

# COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN DOS RÍOS ALTOANDINOS MEDIANTE EL USO DE LOS ÍNDICES BMWP/COL. Y ABI

## Comparison of Water Quality Between Two Andean Rivers by Using the BMWP/COL. and ABI. Indices

Yaneth MENESES-CAMPO<sup>1</sup>, María Isabel CASTRO-REBOLLEDO<sup>2\*</sup>, Angela María JARAMILLO-LONDOÑO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Calle 222 n°. 55-37, Bogotá D.C., Colombia.

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Básicas, Programa de Biología, Universidad de La Salle, Cra. 2 n°. 10-70, Bogotá D.C., Colombia

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Cra. 9 n°. 51-11, Bogotá D.C., Colombia.

\*For correspondence: micastro@unisalle.edu.co

Received: 28<sup>th</sup> February 2018, Returned for revision: 28<sup>th</sup> January 2019, Accepted: 8<sup>th</sup> February 2019.

Associate Editor: Sergi Sabater.

Citation/Citar este artículo como: Meneses-Campo Y, Castro-Rebolledo MI, Jaramillo-Londoño AM. Comparación de la calidad del agua en dos ríos altoandinos mediante el uso de los índices BMWP/COL. y ABI. Acta biol. Colomb. 2019;24(2):299-310. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.70716>

### RESUMEN

Se comparó la calidad ecológica del río Tota durante agosto 2007 y febrero 2008, y el curso alto del río Bogotá entre los meses de octubre 2013 y enero 2014, aplicando los índices BMWP/Col y ABI. Los puntos de muestreo corresponden a la parte alta, media y baja del gradiente longitudinal. En el río Tota se determinaron 27 familias correspondientes a 11 órdenes, donde las más abundantes fueron Baetidae (25,43 %), Leptohiphidae (16,43 %), Naididae (13,76 %), Chironomidae (11,42 %) y Hyalellidae (10,30 %). En el curso alto del río Bogotá se determinaron 32 familias correspondientes a 13 órdenes, y las más abundantes fueron Chironomidae (28,94 %), Leptoceridae (25,20 %), Naididae (18,34 %) y Simuliidae (8,63 %). En el río Tota, El BMWP/Col. presentó una calidad de agua buena, mientras que el ABI presentó una calidad aceptable. Por otra parte, en la parte alta del Río Bogotá, tanto el BMWP/Col. como el ABI presentaron variaciones en la calidad del agua entre aceptable y muy crítica. El ACC para el río Tota mostró correlaciones entre la temperatura y conductividad con las familias Hyalellidae y Leptohiphidae mientras que el caudal se relaciona con Sphaeriidae; mientras que el curso alto del río Bogotá se correlacionó el caudal, la conductividad y la temperatura con la familia Veliidae. A manera de conclusión, los resultados obtenidos denotan que el índice ABI, que es un índice creado para sistemas andinos de montaña, es más sensible a los impactos que el índice BMWP/Col.

**Palabras clave:** Estado ecológico, impacto ambiental, indicadores biológicos, índices bióticos, macroinvertebrados acuáticos.

### ABSTRACT

The ecological quality of the Tota River was evaluated during August 2007 and February 2008 and compared to the upper part from Bogotá River between October 2013 and January 2014, by applying the BMWP/Col and ABI indexes. The sampling points corresponding to the high, medium and low part of the longitudinal gradient. In the Tota River, 27 families were determined corresponding to 11 orders, where the most abundant were Baetidae (25.43 %), Leptohiphidae (16.43 %), Naididae (13.76 %), Chironomidae (11.42 %) and Hyalellidae (10.30 %). In the upper course of Bogotá River, 32 families were determined to conform 13 orders, where the most abundant were Chironomidae (28.94 %), Leptoceridae (25.20 %), Naididae (18.34 %) and Simuliidae (8.63 %). In the river Tota, The BMWP/Col. The index showed a good status, while the ABI index exhibited an acceptable quality. On the other hand, in the upper part of the Bogotá River, both the BMWP/Col. and ABI showed variations in quality between acceptable and very critical. The CCA for the Tota River exhibited correlations between temperature and conductivity with the families Hyalellidae and Leptohiphidae while the stream flow was linked with the family Sphaeriidae. On the other hand, in the upper part of Bogotá River the stream flow, conductivity and temperature were correlated with the occurrence of the family Veliidae. Our results showed that the ABI index is more sensitive to impacts that the BMWP/Col index is showing its ability to evaluate the Andean mountain systems.

**Keywords:** Aquatic macroinvertebrates, biological indicators, environmental impact, biotic indexes, ecological state.

## INTRODUCCIÓN

Los ríos están sometidos a diversas presiones antropogénicas que alteran la calidad de sus aguas originando profundos niveles de contaminación (Sabater *et al.*, 2009; João *et al.*, 2012; Liévano, 2013). Los sistemas hídricos altoandinos albergan gran diversidad de fauna y flora que se ven influenciados por factores altitudinales, geológicos, climáticos y transformaciones fisicoquímicas del agua (Villamarín, 2008). Los análisis de la calidad del agua de estos sistemas deben basarse en herramientas confiables que ayuden a determinar tanto su calidad fisicoquímica como biológica, con miras a la toma de decisiones para la conservación del ecosistema acuático. La elección y uso de estas herramientas requiere de un amplio conocimiento de diversas variables físicas y químicas, así como su interacción con las comunidades biológicas que habitan en este tipo de ecosistemas (Liévano y Ospina, 2007; Roldán y Ramírez, 2008). De las comunidades bióticas de agua dulce, los macroinvertebrados responden espacial y temporalmente a tales interacciones (Wantzen y Rueda-Delgado, 2009), siendo buenos bioindicadores por tener ciclos de vida largos, permitiendo monitorear la calidad del agua dulce; son abundantes y de amplia distribución, fáciles de recolectar e identificar y presentan niveles de tolerancia que los hace vulnerables o resistentes a las diferentes perturbaciones que se produzcan en el sistema (Alba-Tercedor, 1996; Roldán, 1999; Ladreña *et al.*, 2013).

Considerando el análisis de la composición biológica como método de bioindicación y dada las características mencionadas de los macroinvertebrados, se manejan varios índices para la determinación de la calidad del agua. Uno de ellos es *el Biological Monitoring Working Party* (BMWP) implementado en Inglaterra por Hellawell, (1978) y mejorado por Armitage *et al.*, (1983), adaptado en la península Ibérica como BMWP' por Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega, (1988) y denominado después *Iberian Biomonitoring Working Party* (IBMWP) por Alba-Tercedor *et al.*, (2002). Muchos estudios utilizan este índice (Naranjo-López y López-del Castillo, 2013; Cambrat y Barría, 2014; Zeybek *et al.*, 2014) por ser un método sencillo basado en el análisis de la presencia de ciertas familias de macroinvertebrados tolerantes o sensibles a la contaminación, y que genera resultados rápidos y confiables para la evaluación de la calidad del agua (Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega, 1988).

El Índice Biológico Andino (ABI) permite clasificar la calidad ecológica de un sistema, apoyado en el índice original BMWP, y se aplica a ríos altoandinos superiores a los 2000 m.s.n.m. En el ABI se incluye un menor número de familias de macroinvertebrados ya que la altitud restringe la distribución y el nivel de tolerancia al disturbio ambiental difiere de otras regiones del mundo (Acosta *et al.*, 2009; Ríos-Touma *et al.*, 2014). Dada la sencillez y la efectividad en el cálculo de este índice, así como los diversos estudios en países como Perú y Ecuador, lo han convertido en una

herramienta muy utilizada para la evaluación de la calidad de agua (Rosero y Fossatti, 2009; Encalada *et al.*, 2011; Salcedo *et al.*, 2013; Yalta *et al.*, 2013; Gamarra *et al.*, 2014).

En Colombia, Roldán, (2003) adaptó el índice como BMWP/Col. como una aproximación para evaluar los ecosistemas acuáticos por contaminación orgánica que, acompañado de parámetros fisicoquímicos de calidad de agua, se puede determinar con seguridad el estado ecológico de un sistema lótico. Sin embargo, la bioindicación con macroinvertebrados en Colombia se inició con las publicaciones de Roldán *et al.*, (1973), Zamora, (2000) y Zúñiga, (2009); en la Sabana de Bogotá se citan los trabajos de Bohórquez y Acuña, (1984) y Rivera-Usme *et al.*, (2015); en la cuenca alta del río Bogotá los estudios de Muñoz y Ospina, (1999), Riss *et al.*, (2002), Gutiérrez *et al.*, (2004) y Liévano, (2013) y en la parte media del curso del río los estudios de Ramírez *et al.*, (2013) y López y Talero, (2015). En el departamento de Boyacá se encuentran los estudios relacionados con la ecología de estos organismos como los de Medellín *et al.*, (2004), Noriega *et al.*, (2010) y Rocha *et al.*, (2015) y en el río Tota los estudios de Rincón, (2006), Castro y Donato, (2008a) y Castro y Donato, (2015).

Si bien en Colombia los índices biológicos de calidad del agua son cada vez más utilizados, aún es necesario ampliar el conocimiento de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en los ríos altoandinos y determinar aquellos índices que puedan adaptarse con mayor precisión a estos sistemas. Es por esto que para este trabajo se eligieron dos ríos altoandinos con un nivel de intervención antropogénico alto. El primero de ellos es el río Tota, considerado como un corredor ecológico que conecta con otros ecosistemas de la cuenca alta del río Chicamocha (CORPOBOYACÁ, 2015) y suministra agua para uso doméstico y agropecuario. La subcuenca del río Tota está impactada por los monocultivos de cebolla y papa (CORPOBOYACÁ, 2015) y la vegetación nativa ha sido reemplazada por pastos para uso ganadero y por vegetación introducida como el *Eucaliptus globulus* (Castro y Donato, 2008b).

El segundo es el río Bogotá, calificado como un ecosistema importante a nivel histórico y cultural en la sabana de Bogotá (Empresa de Acueducto y Alcantarillado, 2003) que provee agua para diferentes usos, entre ellos, el abastecimiento a la planta de Tibitoc, en el norte de Bogotá (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 2007) y es uno de los sistemas hídricos más alterados del país. También se resalta la importancia ecológica y biológica al ser un corredor natural (Rosselli, 2014) donde convergen múltiples interacciones culturales, sociales y ambientales propios de este ecosistema. Sin embargo, a diferencia del río Tota, el río Bogotá en su recorrido por la Sabana de Bogotá presenta altos niveles de contaminación al recibir los vertimientos de aguas residuales de origen municipal, doméstico, industrial, minero, agrícola y de curtiembres (Alcaldía Mayor de Santa Fé de Bogotá y el Departamento Técnico Administrativo

del Medio Ambiente-DAMA, 1997; CAR y EAAB 2007; Contraloría General de la República, 2013).

Siendo estos dos sistemas andinos impactados de manera desigual por actividades antrópicas en diferentes escalas consideramos importante su comparación. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar los resultados arrojados por dos índices biológicos de calidad, así como su relación con los algunos parámetros fisicoquímicos en dos ríos de alta montaña con distintos niveles de intervención antrópica, como un mecanismo que aporte información para su protección y conservación a través del conocimiento de la calidad fisicoquímica y biológica de sus aguas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Este estudio se realizó en dos sistemas hídricos altoandinos. El río Tota el cual nace en el páramo de las Alfombras en el departamento de Boyacá ( $5^{\circ}35' N$ , y  $73^{\circ}00' W$ ) a una altitud de 2834 m.s.n.m., y de que de acuerdo a la clasificación de Strahler, (1964) este sistema se comporta como un arroyo de tercer orden. Tiene un área de drenaje de 150 km<sup>2</sup> y presenta un régimen de precipitación bimodal (máx. abril-mayo y septiembre-noviembre; mín. diciembre-marzo y julio-agosto). La precipitación promedio es de 730,5 mm anuales y la temperatura promedio está entre los 10,5 y 11,8 °C (Castro, 2012).

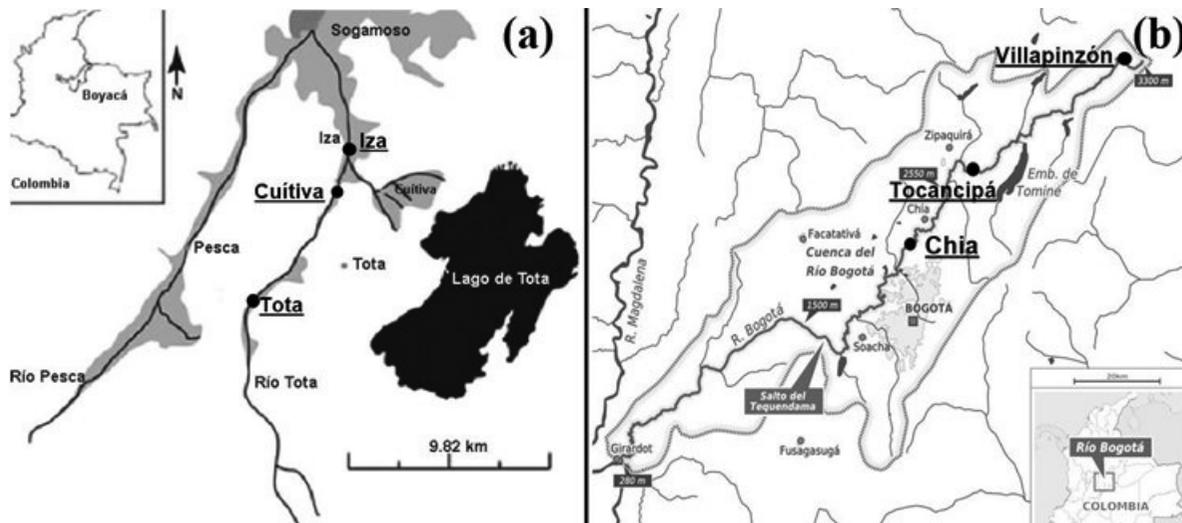
El río Bogotá nace en el Páramo de Guacheneque ( $4^{\circ}17' N$  y  $74^{\circ}47' W$ ) a una altitud de 3300 m.s.n.m. La cuenca del río Bogotá está dividida en: cuenca alta, media y baja (CAR y EAAB, 2007) y presenta un área de drenaje de 5886 km<sup>2</sup>. La cuenca alta se considera un sistema de tercer y cuarto orden de acuerdo a la clasificación de Strahler, (1964), se ve afectada por un núcleo montañoso frío y por los vientos húmedos que llegan de los llanos y la Amazonía; por tal

razón, presenta un régimen de precipitación monomodal (máx. abril y noviembre), mientras que la cuenca baja del río presenta un régimen de precipitación bimodal. La precipitación promedio registrada en la cuenca alta está entre los 800 y 900 mm anuales y la temperatura varía entre los 12 y 15 °C (Soporte POMCA, 2006).

En el río Tota (Fig. 1a) las muestras se colectaron en la parte alta en el municipio de Tota ( $05^{\circ}33' N$  y  $73^{\circ}02' W$ ), en la parte media en el municipio de Cuitiva ( $05^{\circ}58' N$ , y  $72^{\circ}98' W$ ) y en la parte baja en el municipio de Iza ( $05^{\circ}61' N$  y  $72^{\circ}98' W$ ) en épocas de aguas altas (octubre 2007), intermedias (agosto 2007) y bajas (febrero 2008). El curso alto del río Tota se encuentra en buenas condiciones tanto físicas como químicas; sin embargo, el curso medio se ve afectado por vertimientos de actividades agrícolas y la parte baja esta impactada por vertimientos de actividades urbanas (Pedraza y Donato, 2011).

En el curso de alto del río Bogotá (Fig. 1b) las muestras se colectaron en la parte alta antes de la cabecera municipal de Villapinzón ( $5^{\circ}13' N$ , y  $73^{\circ}34' W$ ); en la parte media en el municipio de Tocancipá ( $4^{\circ}58' N$  y  $73^{\circ}54' W$ ) y en la parte baja en el municipio de Chía antes del afluente río Frío ( $4^{\circ}50' N$  y  $74^{\circ} 4' W$ ). Estas muestras se tomaron en épocas de aguas altas (octubre 2013), intermedias (julio 2014) y bajas (enero 2014). El curso alto del río Bogotá, antes de Villapinzón, aparentemente se encuentra en óptimas condiciones; sin embargo, aguas abajo recibe los vertimientos del sector curtiumbres en el municipio de Villapinzón (CONPES, 2004; Corredor, 2006; Ortiz y Carmona, 2015), de la minería y de las aguas negras del municipio de Tocancipá y de las aguas residuales del municipio Chía (Consejo de Estado, 2014).

Las muestras fisicoquímicas y biológicas (macroinvertebrados) en el curso alto del río Bogotá fueron



**Figura 1.** Localización de los puntos de muestreo en el río Tota (a) (Modificado de Pedraza y Donato, 2011) y el curso alto río Bogotá (b) (Modificado de MTS, 2016).

tomadas dentro del proyecto “Transformación Ambiental a lo largo del curso alto del río Bogotá” (Rosselli *et al.*, 2014).

### Parámetros fisicoquímicos e hidrológicos

Para la colecta y análisis de los parámetros fisicoquímicos e hidrológicos *in situ*, se siguieron los protocolos de monitoreo y seguimiento de la calidad de agua señalados por APHA, (2005).

En el río Tota se midió el oxígeno disuelto ( $\text{mg l}^{-1}$ , OD), la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ), la conductividad ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ ) y el pH con una sonda multiparamétrica (YSI modelo 556-10 MPS). Para la estimación del valor del caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) se utilizó un correntómetro digital Global.

En el curso alto del río Bogotá se midió el oxígeno disuelto ( $\text{mg l}^{-1}$ , OD), la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ), la conductividad ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ ) y el pH, usando una sonda multiparamétrica (HACH modelo HQ40D). La velocidad del agua se registró en un molinete (GEOPACK/DEVON EX 203LP) para obtener el valor de caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ).

Las muestras para análisis en el laboratorio se transportaron, conservaron y almacenaron siguiendo los protocolos de APHA, (2005). Una vez en el laboratorio, cada una de las técnicas utilizadas se estandarizó de conformidad con las indicaciones del manual APHA, (2005). Para el análisis químico de amonio ( $\text{NH}_4^+$   $\text{mg l}^{-1}$ ) y fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$   $\text{mg l}^{-1}$ ) se empleó el método espectrofotométrico UV-VIS realizado en un espectrofotómetro UV-VIS (JENWAY modelo 6405).

### Macroinvertebrados

En el río Tota se recolectaron los macroinvertebrados en tramos de 50 m en los sustratos roca, hojarasca, macrófitas y orilla del río con un Surber de  $400 \text{ cm}^2$ . La recolección de macroinvertebrados en el curso alto del río Bogotá se realizó en tramos de 21 m de largo. A lo largo de la orilla se procedió a sacudir la vegetación con una red de patada en contra de la corriente con un esfuerzo de 20 minutos. Para el sustrato sedimento se utilizó una draga Heckman y para el sustrato roca se utilizó un Surber de  $900 \text{ cm}^2$ . Los muestreos se llevaron a cabo siguiendo los protocolos establecidos por Muñoz *et al.*, (2009). La estandarización del esfuerzo entre las diferentes técnicas de muestreo se realizó estableciendo la estabilización de la varianza.

Las muestras se limpiaron y filtraron a través de diferentes tamices ( $500 \mu\text{m}$ ) y se conservaron en alcohol etílico al 70 %. La identificación taxonómica de los individuos se realizó hasta el nivel de familia usando la literatura y claves de McCafferty, (1981), Needham y Needham, (1982), Roldán, (1988), Merritt *et al.*, (2008) y Domínguez y Fernández, (2009).

### Análisis de datos

El comportamiento de las diferentes variables fisicoquímicas: OD ( $\text{mg l}^{-1}$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{NH}_4^+$  ( $\text{mg l}^{-1}$ ),  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\text{mg l}^{-1}$ ), conductividad ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ ), pH, y ambientales: caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) fue descrito con ayuda de la estadística

descriptiva. Fueron evaluados los supuestos de Normalidad (test de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (test de Levene). Se aplicó la transformación logaritmo neperiano en los casos de violación de los supuestos. Se consideraron significativos los valores con una significancia  $p < 0,05$  cuando se cumplieron los supuestos estadísticos y una significancia  $p < 0,01$  en los casos de violación de los mismos. Para comprobar las posibles diferencias en los parámetros medidos como variables dependientes, en función de los puntos de muestreo en cada río y de las épocas climáticas (factores independientes), se realizó un análisis de varianza univariado mediante un diseño de bloques completos al azar (BCA o ANOVA de dos vías). Cuando se detectaron diferencias significativas se empleó el análisis post-hoc de Tukey para comprobar que valores de la variable dependiente diferían unos de otros. En cuanto a las posibles diferencias en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos entre los ríos, éstas se evaluaron por medio de un *t-test* para muestras independientes, en cada una de las épocas del año. Finalmente, para evaluar las diferencias entre puntos de muestreo en cada río se utilizó una prueba ANOVA de un factor. El nivel de significancia empleado en estos análisis fue de  $p < 0,05$ . El paquete estadístico utilizado fue el SPSS 20®.

Para determinar la correlación de las variables fisicoquímicas y ambientales con las diferentes épocas de muestreo, así como la correlación de las diferentes familias con las variables fisicoquímicas y ambientales se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) con el programa CANOCO 4.5 ajustando los valores con Logaritmo; así mismo se corrió una prueba de Montecarlo con 999 permutaciones para determinar la significancia de las variables (Ter Braak y Smilauer, 2002; Lepš y Smilauer, 2003).

Los datos obtenidos de las familias de macroinvertebrados se analizaron aplicando el índice BMWP/Col. adaptado a Colombia por Roldán, (2003) que consiste en la presencia y ausencia de familias de macroinvertebrados. Los puntajes asignados para cada una de las familias van de 1 a 10 de acuerdo con la tolerancia a la contaminación orgánica del sistema hídrico con base en el conocimiento de la distribución y abundancia. La suma de la puntuación de cada familia encontrada en el río suministró el puntaje total BMWP/Col. Para la determinación del índice ABI se tomaron como referencia los valores del BMWP/Col. dada las disimilitudes en el relieve y la ecología de otras latitudes. El significado de calidad del agua y el rango de este índice se muestran en la tabla 2.

## RESULTADOS

### Parámetros fisicoquímicos

Los valores de los fisicoquímicos registrados en el río Tota se muestran en la Tabla 1. El oxígeno disuelto presentó un valor máximo de  $10,59 \text{ mg l}^{-1}$  en Iza con tendencia a

la disminución de 7,08 mg l<sup>-1</sup> en Cútiva. La temperatura máxima se registró en Cútiva con un valor de 15,77 °C en época de poca lluvia (febrero 2008) y una mínima de 11,17 °C en Tota en época intermedia (agosto 2007). Respecto a la conductividad presentó un valor de 147,33 µs cm<sup>-1</sup> en Iza y un valor mínimo de 28,67 µs cm<sup>-1</sup> en Tota donde las perturbaciones ocurridas son menores a las generadas en la zona media y baja del río.

De igual manera, se observa que los parámetros fisicoquímicos registrados en el curso alto del río Bogotá presentaron oscilaciones significativas como en el oxígeno disuelto con un valor máximo de 8,50 mg l<sup>-1</sup> en Villapinzón y una disminución drástica de 0,95 mg l<sup>-1</sup> en Chía, la temperatura con una máxima de 19,80 °C en Chía y la mínima de 10,35 °C en Villapinzón, mientras que la conductividad tuvo un valor máximo de 520,54 µs cm<sup>-1</sup> en Chía y un valor mínimo de 201,95 µs cm<sup>-1</sup> en Villapinzón.

En general, las concentraciones descienden a lo largo del gradiente longitudinal de ambos ríos, siendo este descenso más acusado en el río Bogotá. Para ambos ríos los niveles más bajos de oxígeno disuelto, amonio y fosfatos se presentan en épocas de aguas bajas, mientras que la conductividad y el pH son allí más elevados.

Respecto al análisis de varianza univariado, mediante el diseño de Bloques Completos al Azar, (BCA) en el río Tota

únicamente el amonio mostró diferencias significativas entre los períodos de aguas altas y bajas, con valores mayores en aguas altas (F=58,324; p<0,01). En el río Bogotá se encontraron diferencias significativas en el oxígeno disuelto y en la temperatura entre los tres puntos de muestreo. En el caso del oxígeno las diferencias fueron significativas entre los tres puntos (F=141,499; p<0,01), y en el caso de la temperatura (F=46,485; p<0,05) Villapinzón fue diferente de las otras dos, ya que en esta estación se presentaron las temperaturas más bajas. En cuanto a la conductividad se hallaron diferencias significativas entre estaciones climáticas (F=45,358; p<0,05) y entre la temporada alta e intermedia, con los valores más elevados en época intermedia.

El *t-test* para muestras independientes evidencia que sólo se encontraron diferencias significativas en la conductividad entre los dos ríos en cualquier época del año, mientras que para el pH sólo en épocas de aguas bajas. Los demás parámetros no presentaron diferencias significativas. El análisis de varianza no presentó diferencias significativas para el río Tota entre los tres puntos de muestreo. En el caso del río Bogotá sólo se encontraron diferencias significativas entre los tres puntos de muestreo en las concentraciones de oxígeno disuelto (F=156,549; p<0,05) y la temperatura (F=80,818; p<0,05).

Tabla 1. Valores de los parámetros fisicoquímicos para los puntos de muestreo en las diferentes épocas de lluvia en el periodo de muestreo.

Punto de muestreo	Época de lluvias	Caudal (m s <sup>-1</sup> )	OD (mg l <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg l <sup>-1</sup> )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )	Conductividad (µs cm <sup>-1</sup> )	pH
<b>Tota</b>	Alta	1,87	7,51	13,2	0,21	0,05	28,67	7,5
	Intermedia	1,01	7,6	11,17	0,12	0,04	82,11	7,01
	Baja	0,14	7,54	12,2	0,018	0,053	56,66	8,04
<b>Cútiva</b>	Alta	1,55	7,79	13,07	0,18	0,04	47	7,65
	Intermedia	0,86	9,56	12,47	0,1	0,06	82,11	6,96
	Baja	0,04	7,08	15,77	0,013	0,03	126,67	7,67
<b>Iza</b>	Alta	1,69	7,36	14,28	0,2	0,06	86,33	8,16
	Intermedia	1,94	10,59	12,97	0,11	0,07	82,11	6,91
	Baja	0,14	7,12	14,77	0,07	0,22	147,33	7,87
<b>Villapinzón</b>	Alta	2,08	8,5	11,5	0,06	0,03	201,95	8,17
	Intermedia	3,79	7,79	12	0,17	0,01	430,22	7,36
	Baja	0,99	7,86	10,35	<0,001	<0,001	320,45	7,26
<b>Tocancipá</b>	Alta	9,44	4,9	16,35	0,01	0,02	198,34	8,02
	Intermedia	13,89	4,67	17,25	0,3	0,12	400,93	6,47
	Baja	1,22	6,01	16,3	0,001	0,02	290,86	7,08
<b>Chía</b>	Alta	2,54	1,31	17,8	0,36	0,29	199,64	7,08
	Intermedia	4,06	1,02	18,2	0,35	0,56	520,54	6,88
	Baja	5,47	0,95	19,8	0,3	0,13	380,4	6,98

**Macroinvertebrados**

En el río Tota se determinaron 27 familias correspondientes a 11 órdenes. Las familias más representativas fueron Baetidae (25,43 %) en el punto de Iza y Cúitiva, Leptoxyphidae (16,43 %) en los puntos de Tota y Cúitiva, Naididae (13,76 %) en los puntos de Tota y Cúitiva, Chironomidae (11,42 %) en los puntos Tota, Cúitiva e Iza y Hyalellidae (10,30 %) igualmente en Cúitiva e Iza (Fig. 2a). En el curso alto del río Bogotá se determinaron 32 familias correspondientes a 13 órdenes. Dentro de las familias más representativas se encontraron Chironomidae (28,94 %) en los puntos antes de Villapinzón y Tocancipá, Leptoceridae (25,20 %) en el punto antes de Villapinzón, Naididae (18,34 %) en Chía y Simuliidae (8,63 %) también en Chía (Fig. 2b). Se observó una abundancia considerablemente menor de Hydroptilidae, Baetidae y Ceratopogonidae en el punto antes de Villapinzón.

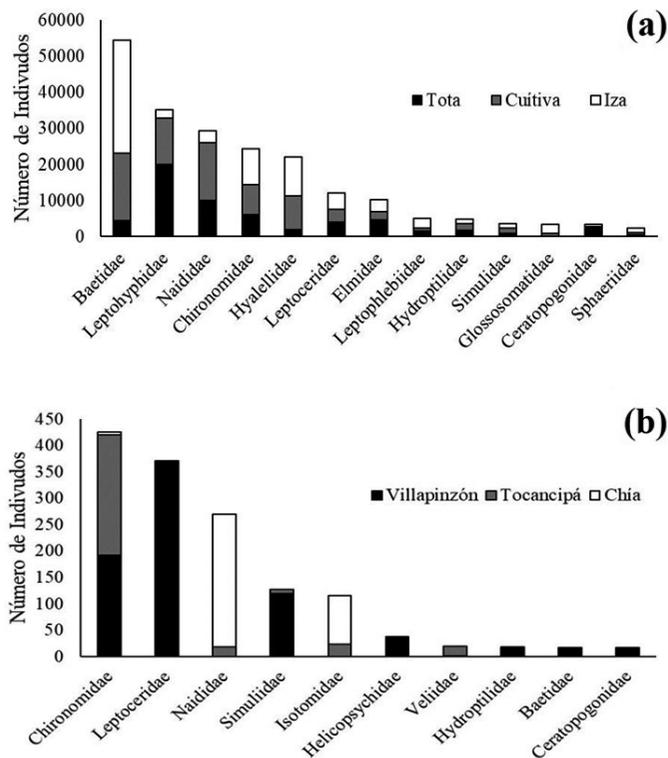
**Índices biológicos de calidad de agua**

Usando los valores obtenidos de las familias de macroinvertebrados encontradas se determinó la calidad del agua de los dos sistemas hídricos mediante la utilización de los índices BMWP/Col y ABI. Las puntuaciones y calidad de agua se ubican en la tabla 2.

Los puntos muestreados en el río Tota en épocas de aguas altas (octubre 2007), intermedias (agosto 2007) y bajas (febrero 2008) se encontraron dentro de un valor de 71 a 113 del índice BMWP/Col., determinando una calidad

de agua buena para Tota y Cúitiva en épocas intermedias y bajas, y en Iza una calidad aceptable en época de aguas baja. Los valores del índice ABI de 73 a 105 presentaron en Cúitiva e Iza una calidad de agua aceptable en todas las épocas de muestreo, estos sectores se ven afectados por los vertimientos de actividades agrícolas y por los vertimientos de actividades urbanas respectivamente. En Tota se presentó una calidad buena en época de aguas bajas (Tabla 2).

En el curso alto del río Bogotá los puntos muestreados en la época de aguas altas (octubre 2013), intermedias (julio 2014) y bajas (enero 2014), con los valores del BMWP/Col. de 3 a 95, manifestaron un notable deterioro en la calidad de agua. En el punto antes de Villapinzón en las épocas altas y bajas dichos valores mostraron una calidad de agua dudosa, cabe anotar que aguas abajo recibe los vertimientos de curtiembres. En Tocancipá se presentó una calidad de agua aceptable en épocas de aguas intermedias y bajas teniendo en cuenta que en este punto hay presencia de minería y vertimiento de aguas negras del municipio de Tocancipá; en Chía se registró una calidad de agua muy crítica en las tres épocas de muestreo. Para el punto antes de Villapinzón, el ABI con valores de 3 a 75 en época de aguas altas y bajas, presentó una calidad de agua dudosa; adicionalmente, en Tocancipá en épocas intermedias y bajas el índice se comportó de la misma manera; mientras que en Chía se registró una calidad de agua muy crítica en las tres épocas estudiadas (Tabla 2), encontrándose en este último punto un evidente alto grado de perturbación debido al vertimiento de las aguas residuales del municipio Chía, reflejado en el detrimento de la calidad del agua, lo que conlleva a recomendar la no utilización de esta aguas para consumo humano, animal y riego de cultivos. Contrario a los datos de calidad de agua obtenidos en el río Tota donde la calidad del agua es apta para consumo humano y animal con un nivel básico de potabilización.



**Figura 2.** Abundancias de individuos por familia, presentes en el río Tota (a) y el curso alto del río Bogotá (b).

**Análisis de Correspondencia Canónica**

De acuerdo con el ACC en el río Tota se explicó una varianza del 60,4 % en el primer eje y del 88,7 % en el segundo eje (Fig. 3a). Según el ACC las variables significativas fueron la temperatura y la conductividad relacionadas con las familias Hyalellidae y Leptoxyphidae en Iza y Cúitiva en la época de febrero. El caudal se relacionó con Sphaeriidae en Iza en los meses de octubre y agosto.

Para el curso alto del río Bogotá, el ACC explicó una varianza del 79,5 % para el primer eje y del 93,9 % para el segundo eje (Fig. 3b). De acuerdo con el análisis se puede deducir que las variables más significativas fueron el caudal, conductividad y temperatura relacionados con la familia Veliidae en Tocancipá durante las épocas de octubre y julio.

**DISCUSIÓN**

Las comunidades de macroinvertebrados varían su composición y estructura debido a agentes contaminantes

Tabla 2. Resultados de los índices BMWP/Col. y ABI en las diferentes épocas y puntos de muestreo. [120-101 buena, 100-60 aceptable, 56-36 dudosa, 35-16 crítica, &lt;15 muy crítica]

Época	BMWP/Col.			ABI		
	Altas	Intermedias	Bajas	Altas	Intermedias	Bajas
<b>Tota</b>	71 Aceptable	107 Buena	113 Buena	73 Aceptable	98 Aceptable	105 Buena
<b>Cuítiva</b>	95 Aceptable	109 Buena	105 Buena	84 Aceptable	91 Aceptable	93 Aceptable
<b>Iza</b>	103 Buena	108 Buena	98 Aceptable	88 Aceptable	92 Aceptable	80 Aceptable
<b>Villapinzón</b>	50 Dudosa	95 Aceptable	44 Dudosa	47 Dudosa	75 Aceptable	45 Dudosa
<b>Tocancipá</b>	23 Crítica	73 Aceptable	71 Aceptable	16 Crítica	51 Dudosa	55 Dudosa
<b>Chía</b>	8 Muy Crítica	3 Muy Crítica	7 Muy Crítica	6 Muy Crítica	3 Muy Crítica	4 Muy Crítica

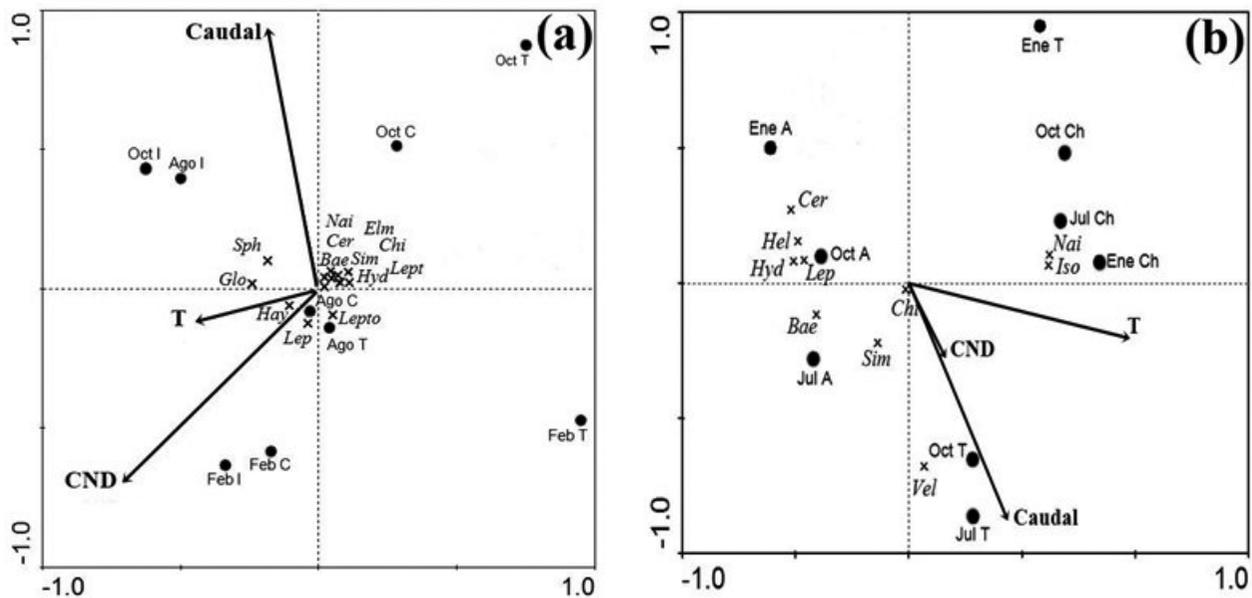


Figura 3. Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) para los puntos del río Tota (a), y los puntos del curso alto del río Bogotá (b).

generados por actividades antrópicas en los sistemas lóticos que a su vez afectan la calidad del agua. El oxígeno disuelto es un parámetro fundamental ya que su concentración determina las especies que, de acuerdo a su tolerancia y rango de adaptación, pueden sobrevivir en un determinado cuerpo de agua (Sierra, 2011). Por consiguiente, una disminución del oxígeno disuelto afecta significativamente la fisiología de los organismos, lo que se refleja en dicha estructura y composición de las comunidades acuáticas; sin embargo, algunas poblaciones son más tolerantes que otras a dicho cambio (Naranjo-López y López-del Castillo, 2013). Esta característica se denota claramente en el río Bogotá, donde en Chía no se superan concentraciones de  $1,3 \text{ mg l}^{-1}$

en ninguna época del año y coincide con la abundancia de organismos de la familia Naididae, los cuales viven en aguas altamente contaminadas y eutrofizadas, y pueden tolerar bajas concentraciones de oxígeno (Roldán, 2003; Liévano y Ospina, 2007). Caso contrario se presentó en Villapinzón donde las concentraciones de oxígeno disuelto son altas ( $8,50 \text{ mg l}^{-1}$ ) favoreciendo la abundancia de las familias como Simuliidae y Leptoceridae (Domínguez y Fernández, 2009) características de aguas limpias (Roldán, 2003). Mateus, (2011) encontró una disminución de oxígeno disuelto aguas abajo relacionada con vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento alguno a lo largo del cauce del río Bogotá. En la mayoría de las

situaciones, el incorporar materia orgánica puede resultar en una pérdida en la saturación del oxígeno disuelto como resultado de los procesos de oxidación que causan la descomposición anaeróbica de cualquier material orgánico presente y facilitan la formación de gases nocivos como el disulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y metano como indicadores de alta contaminación (Orozco *et al.*, 2003; Sierra, 2011).

Tanto en el río Tota como en el río Bogotá los valores de nitrógeno amoniacal y ortofosfatos presentaron valores por encima de los registros normales para ríos y quebradas de alta montaña de la región andina que, según Roldán, (2008), tienen en promedio concentraciones de  $0,001 \text{ mg l}^{-1}$ , y son de origen antrópico producto de la contaminación orgánica proveniente de vertimientos de tipo doméstico, industrial y agrícola (Roldán, 2008). El amonio, al producirse en el primer paso de la mineralización, constituye probablemente el mejor indicador químico indirecto de contaminación fecal en las aguas, en general, la presencia de amoníaco libre o ion amonio se considera como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa (Roldán, 2008; Sierra, 2011). Así mismo, un enriquecimiento de nutrientes en el agua por cultivos agrícolas generalmente se asocia a una disminución de la calidad de agua, lo que a su vez determina la presencia de diversos órdenes de macroinvertebrados (Harding *et al.*, 1999). En este estudio los fosfatos aumentaron en los dos sistemas hídricos a lo largo de su curso, lo que contribuye al incremento en la abundancia de la familia Chironomidae que habita en aguas con un alto contenido de nutrientes (Oscos *et al.*, 2006).

En el curso alto del río Bogotá, la contaminación es predominantemente de tipo orgánico, representada en los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales municipales (PTAR) (el municipio de Villapinzón no cuenta con una PTAR) y de otro tipo de descargas no conectadas a una red de alcantarillado (CAR, 2007). En el río Tota, la familia Baetidae, común en aguas contaminadas (Ríos *et al.*, 2014), fue abundante en Iza, y la familia Naididae en Cúitiva donde existe aporte de nutrientes en el agua debido a actividades domésticas, agrícolas y ganaderas (Castro, 2012). Las concentraciones de amonio en el río Tota ( $0,018$  a  $0,2 \text{ mg l}^{-1}$ ) y en el curso alto del río Bogotá ( $0,065$  a  $0,36 \text{ mg l}^{-1}$ ) fueron bajas; por lo tanto, no representan daño alguno para el sistema ya que, según Ramírez *et al.*, (2013), son perjudiciales para la biota acuática los valores mayores a  $0,5 \text{ mg l}^{-1}$ .

En el curso alto del río Bogotá la familia Chironomidae fue abundante en julio en Tocancipá, mientras que Leptoceridae fue abundante en la misma época en Villapinzón y Naididae fue abundante en Chía en el mes de enero. En el río Tota, Baetidae fue abundante en octubre y agosto en Iza, Leptohyphidae en febrero en Tota y Naididae en octubre en Cúitiva, lo cual difiere de estudios de Jacobsen y Encalada, (1998) y González *et al.*, (2013) quienes consideran que el

número de organismos es más alto en época seca que en la época lluviosa.

La conductividad del río Tota presentó valores inferiores a los presentados en el río Bogotá, siendo estos valores, por el efecto de la disolución, más bajos en épocas de aguas altas. En general, como se puede observar en ambos ríos, la conductividad se eleva de forma progresiva de aguas arriba hacia aguas abajo. Según Rodier, (1998), la relación que existe entre la mineralización y la conductividad es la siguiente:  $< 100 \mu\text{s cm}^{-1}$  se considera mineralización muy débil; entre  $100 \mu\text{s cm}^{-1}$  y  $200 \mu\text{s cm}^{-1}$ , mineralización débil; entre  $200 \mu\text{s cm}^{-1}$  y  $333 \mu\text{s cm}^{-1}$ , mineralización media; entre  $333 \mu\text{s cm}^{-1}$  y  $666 \mu\text{s cm}^{-1}$ , mineralización media acentuada; entre  $666 \mu\text{s cm}^{-1}$  y  $1000 \mu\text{s cm}^{-1}$ , mineralización importante; finalmente una conductividad  $> 1000 \mu\text{s cm}^{-1}$  se considera una mineralización elevada. En el caso del río Tota se puede hablar de una mineralización entre muy débil y débil para cualquier estación en cualquier época del año. En el caso del río Bogotá la mineralización se encuentra entre media y media acentuada.

Esto coincide con lo encontrado en este estudio, donde el ACC prevaleció la importancia de las variables conductividad y temperatura, demostrando así su influencia sobre Hyalellidae y Leptohyphidae en Iza y Cúitiva en la época de febrero, y se asocian a aguas poco contaminadas (Ríos *et al.*, 2014), con un caudal bajo y un aumento de la temperatura Castro, (2012). En Iza, el caudal se relacionó Sphaeriidae en octubre y agosto indicando la presencia de aguas contaminadas (Roldán, 2003).

En Tocancipá, en los meses de octubre y julio, hubo relación entre la familia Veliidae con la conductividad, la temperatura y el caudal. Si bien esta familia es un indicador de aguas de buena calidad, principalmente en la película superficial (Parra-Trujillo *et al.*, 2014), los resultados del índice ABI demostraron que la calidad del agua es aceptable en este sector para esta época; por lo tanto, podemos inferir que la presencia de estos organismos está relacionada más con la presencia de abundante vegetación emergente en las orillas del río (Roldán, 2003) que con la calidad del agua.

En definitiva, el presente trabajo muestra como el ABI da un diagnóstico más preciso de la calidad del agua de los dos sistemas estudiados, quizás porque la sensibilidad del ABI se adecúa a las influencias antrópicas y a la altitud en la cual el índice fue establecido, aspectos que limitan la distribución de las familias de macroinvertebrados en ríos altoandinos (Ríos *et al.*, 2014), y concuerda con los estudios de Rosero y Fossatti, (2009) en ríos del páramo de Papallacta, quienes encontraron que el ABI se acopla a las condiciones que presenta el agua y a la exigencia de los puntajes de las familias representadas en el BMWP/Col. Además, Toledo y Mendoza, (2016) recomiendan la aplicación del índice ABI en áreas de páramo porque incluye todas las familias propias de este hábitat, ya que estudiaron ríos que están por encima de los 2000 m.s.n.m. Sánchez, (2005) aclara

que el índice BMWP/Col se ha diseñado para zonas de baja altitud, basados en resultados de estudios realizados para los departamentos de Antioquia, Valle, Cauca y Tolima, sin presentar resultados relacionados con la zona oriente y la zona andina de Colombia; mientras que estudios de Riss *et al.*, (2002), Zúñiga, (2009), Giraldo *et al.*, (2014) y Murillo-Torrentes *et al.*, (2016) han hecho modificaciones al BMWP/Col., para poderlo aplicar según las condiciones locales. Sin embargo, Montoya *et al.*, (2011) y Roldán, (2016) mencionan que en Colombia las investigaciones realizadas desde hace más de tres décadas han generado una base sólida de información que ha permitido el uso de índices como el BMWP/Col (García *et al.*, 2017).

Cabe resaltar la importancia de la utilización de estos índices como herramienta de diagnóstico de la calidad de agua de un ecosistema lótico determinado. Aunque existen falencias en los índices aplicados, como menciona Álvarez, (2005) al basarse solamente en el nivel taxonómico de familia, en unos pocos casos existen géneros dentro de una misma familia con un valor de indicación diferente, debido a que tienen representantes tanto de aguas limpias como de aguas con algún grado de contaminación. Es importante seguir avanzando en los estudios que implementen índices hasta nivel sistemático de género para así complementar las tablas de puntajes del BMWP/Col y del ABI que evidencien de manera más finita la calidad del agua del sistema analizado.

## CONCLUSIONES

El BMWP/Col. en el río Tota mostró que la calidad del agua en la parte alta, media y baja fue “buena”; sin embargo, el ABI cambió en las tres zonas a una calidad de agua “aceptable”. El BMWP/Col. en el curso alto del río Bogotá, Villapinzón presentó una calidad de agua “dudosa”, Tocancipá una calidad de agua “aceptable” y Chía una calidad de agua “muy crítica”; mientras con el ABI Villapinzón y Tocancipá cambiaron a una calidad de agua “dudosa” y Chía a una calidad de agua “muy crítica”, definiendo así que el ABI es más eficaz para determinar la calidad del agua en ríos altoandinos por encima de los 2000 m.s.n.m.

Aun cuando para ambos sistemas, la parte alta presenta condiciones hidrológicas, fisicoquímicas y biológicas más favorables que la parte baja, es notorio en impacto producido por las perturbaciones humanas lo que favorece la presencia de las familias tolerantes a diferentes tipos de contaminación.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación del proyecto: “Cambios globales en sistemas fluviales: efectos sobre la biodiversidad, la red trófica y el funcionamiento del ecosistema”, a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Ciencias Ambientales

y Aplicadas (U.D.C.A) por la financiación del proyecto “Transformación Ambiental a lo largo del Curso Alto del río Bogotá”, a las docentes Loreta Rosselli Sanmartín y Luz Marina Cabrera por su apoyo incondicional, al Museo La Salle por facilitar el préstamo del laboratorio para la identificación de los individuos, así como a los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia y de la U.D.C.A por facilitar los espacios para limpieza y tratamiento de las muestras, y a José Alejandro Cuellar por su colaboración en el análisis estadístico y revisión del manuscrito.

## CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## REFERENCIAS

- Álvarez-A, L. Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; 2005. p. 263.
- Acosta R, Ríos B, Blanca R, Rieradevall M, Prat N. Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA) y su aplicación a dos cuencas en Ecuador y Perú. *Limnetica*. 2009;28(1):35-64. Doi: <https://doi.org/10.23818/limn.28.04>.
- Alba-Tercedor J, Sánchez-Ortega A. Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hellawell (1978). *Limnética*. 1988;4:51-56.
- Alba-Tercedor J. Macroinvertebrados Acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. En: Instituto Tecnológico Geominero de España, editor. IV Simposio del agua en Andalucía (SIAGA) VII. Madrid: Tiasa Gráfica;1996. p. 203-213.
- Alba-Tercedor J, Jáimez-Cuellar P, Álvarez M, Avilés J, Bonada N, Casas J, et al. Caracterización del estado ecológico de ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP). *Limnética*. 2002;21(3-4):175-185.
- Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá y Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente- DAMA. Atlas ambiental de Santa Fé de Bogotá. Material cartográfico. Bogotá: Consorcio Essere; 1997. p. 11.
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>st</sup> Edition. Washington: American Public Health Association. 2005. p. 1368.
- Armendáriz LC. Temperature effects on individual growth and zooids formation in *Stylaria lacustris* (Linnaeus, 1767) (Oligochaeta, Naididae). *Biota Neotrop*. 2007;7(2):76-81. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-0603200700020008>.
- Armitage P, Moss D, Wright J, Furse M. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Res*. 1983;17(3):333-347. Doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90188-4)

- Bohórquez A, Acuña A. Inventario de las morfofamilias de la clase gasterópoda y el clicelata como bioindicadores limnológicos de la laguna La Herrera. Memorias del XIX Congreso Nacional y III Grancolombiano de Ciencias Biológicas. Universidad de Santander; 1984. p. 32.
- Cambrat RA, Barría L.E. Insectos acuáticos como indicadores de la calidad del agua del río Perresénico, Parque Nacional Darién, República de Panamá. *Scientia*. 2014;24(2):57-70.
- Contraloría general de República. Auditoría especial a la gestión sobre el río Bogotá - Intersectorial y Articulada. Bogotá: Contraloría general de República. 2013. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/OCI/auditoria-especial-a-la-gestion-rio-bogota.pdf>. Citado: 15 Dic 2016.
- Castro MI, Donato JCh. El entorno natural de río Tota. En: Donato J Ch, editor. *Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (Río Tota - Boyacá)*. Bogotá: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia; 2008a. p. 73-79.
- Castro MI, Donato JCh. Patrones de generales de emergencia de macroinvertebrados. En: Donato J Ch, editor. *Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (Río Tota - Boyacá)*. Bogotá: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia; 2008b. p. 181-196.
- Castro MI. Efectos de la fertilización sobre la composición de macroinvertebrados en un arroyo de montaña tropical (tesis doctoral). Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2012. 126 p.
- Castro MI., Donato JCh. Emergence patterns in tropical insects: the role of water discharge frequency in an Andean Stream. *J Limnol*. 2015;51:147-155. Doi: <https://doi.org/10.1051/limn/2015011>
- Consejo de Estado. Sentencia del 28 de marzo de 2014. Sala de lo contencioso administrativo. Sección Primera. Consejero ponente: Doctor Marco Antonio Velilla Moreno. Expediente No. AP- 25000-23-27-000-2001-0479-01. Bogotá: Consejo de Estado; 2014. p.37-45.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). Estrategia para el manejo ambiental del río Bogotá CONPES 3320 de 2004. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social CONPES; 2004. 44 p.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del río Bogotá, Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental. Bogotá: CAR y EAAB; 2007. Volumen I. 162 p.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ). Resolución No. 0 8 6 1 del 25 Mar 2015. Director General: José Ricardo López Dulcey. Tunja, Boyacá. 2015. 4p.
- Corredor J L. El residuo líquido de las curtiembres estudio de caso: cuenca alta del Río Bogotá. *Cienc Ing Neogranadina*. 2006;16(2):14-28.
- Domínguez E, Fernández HR. Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. *Sistemática y biología*. 1 ed. Argentina: Fundación Miguel Lillo; 2009. 656 p.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado. 2003. El agua en la historia de Bogotá. Tomo 1. Bogotá: Villegas Editores; 2003. p.1538-1937.
- Encalada AC, Rieradevall M, Ríos-Touma B, García N, Prat N. Protocolo simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de los ríos andinos (CERA-S). Quito: USFQ, UB, AECID, FONAG; 2011. 83 p.
- Giraldo LP, Chará J, Zúñiga MC, Chará-Serna AM, Pedraza G. Impacto del uso del suelo agropecuario sobre macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la cuenca del río La Vieja (Valle del Cauca, Colombia). *Rev biol trop*. 2014;62(2):203-219.
- Gamarra OA, Yalta JR, Salas R, Alvarado LL, Oliva SM. Evaluación de la calidad ecológica del agua en la microcuenca El Chido e intermicrocuenca Allpachaca - Lindapa, Amazonas, Perú. *Rev INDES*. 2014;2(2):49-59. Doi: <https://doi.org/10.25127/indes.201402.005>
- García J M, Sarmiento LF, Salvador M, Porras LS. Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. *Revisión corta. UGCiencia*. 2017;23:47-62. Doi: <https://doi.org/10.18634/ugcj.23v.0i.659>
- González N, Sánchez S, Mairena A. Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua del trópico húmedo en las microcuencas de los alrededores de Bluefields, RAAS. *Wani*. 2013;68:53-63. Doi: <http://dx.doi.org/10.5377/wani.v68i0.1354>.
- Gutiérrez JD, Riss W, Ospina R. Bioindicación de la calidad del agua con macroinvertebrados acuáticos en la sabana de Bogotá, utilizando redes neuronales artificiales. *Caldasia*. 2004;26(1):15-160.
- Harding JS. Young RG, Hayes KA, Stark JD. Changes in agricultural intensity and river health along a river continuum. *Freshwater Biol*. 1999;42(2):345-357.
- Hellawell JM. *Biological surveillance of rivers*. Stevenage: Water Research Center; 1978. 322 p.
- Jacobsen D, Encalada A. The macroinvertebrate fauna of Ecuadorian highland streams in the wet and dry season. *Arch Hydrobiol*. 1998;142(1):53-70. Doi: <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/142/1998/53>
- João Benetti C, Perez-Bilbao A, Garrido J. Macroinvertebrates as Indicators of Water Quality in Running Waters: 10 Years of Research in Rivers with Different Degrees of Anthropogenic Impacts. En: Dr. Voudouris, editor. *Ecological Water Quality - Water Treatment and Reuse*. InTech; 2012. p. 95-122. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/ecological-water-quality-water-treatment-and-reuse/macroinvertebrates-as-indicators-of-water-quality-in-running-waters-10-years-of-research-in-rivers-w>.

- Ladrera R, Rieradevall M, Prat N. Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: una herramienta didáctica. *Ikastorratza*. e-Revista de Didáctica 11. 2013. Disponible en: [http://www.ehu.es/ikastorratza/11\\_alea/macros.pdf](http://www.ehu.es/ikastorratza/11_alea/macros.pdf). Citado: 9 Sep 2016.
- Lepš J, Šmilauer P. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003. 269 p.
- Liévano A, Ospina R. Guía Ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón. 1 ed. Bogotá: Universidad del Bosque e Instituto Alexander von Humboldt; 2007. 130 p.
- Liévano A. Calidad Biológica de las Aguas Superficiales de la cuenca del río Apulo. *Rev Tecnol*. 2013;12(2):60-71.
- López RH, Talero GM. Densidad larval de chironomidae (Insecta: Diptera) en un meandro del río Bogotá (Cajicá, Colombia) durante la niña 2011. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 2015; 11(1):48-67. Doi: <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.381>.
- Machado T, Roldán G. estudio de las características fisicoquímicas y bioógicas del río Anorí y sus principales afluentes. *Acta Biol*. 1981;10(35):3-19.
- McCafferty WP. *Aquatic Entomology*. Boston: Science Books International, Inc.; 1981. 448 p.
- Mateus SI. Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica de la cuenca alta del río Bogotá (tesis de maestría). Bogotá: Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia; 2011. 201p.
- Medellín F, Ramírez M, Rincón ME. Trichoptera del Santuario de Iguaque (Boyacá, Colombia) y su relación con la calidad del agua. *Rev Colomb de Entomol*. 2004;30(2):197-203.
- Merritt RW, Cummins KW, Berg MB. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. 4 ed. Dubuque: Kendall Hunt /Publishing Company; 2008. 1158 p.
- Montoya Y, Acosta Y, Zuluaga E. 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. *Caldasia*. 2011;33(1):193-210.
- [MTS] Multi Tech Solutions Mapa río Bogotá. 2016. Disponible en: <http://mts-fsc.com/index.php/enlaces/diagnostico-del-rio-bogota/37-mapa-del-rio-bogota>. Citado: 10 Oct 2016.
- Muñoz D, Ospina R. Guía para la identificación genérica de los Ephemeroptera de la Sabana de Bogotá, Colombia. Ninfas y algunos géneros de adultos. *Actual Biol*. 1999;21(70):47-60.
- Muñoz I, Romaní A, Rodrigues A, González J, García E. Relaciones tróficas en el ecosistema fluvial. En: Elosegí A, Sabater S. Editor(s). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA; 2009. p. 344-351.
- Murillo-Torres MP, Caicedo-Quintero O, Hernández-Atilano E, Grajales Vargas H, Mesa JA, Cortés FA, *et al*. Aplicación de tres índices bióticos en el río San Juan, Andes, Colombia. *Mutis*. 2016;6(2):59-73. Doi:<http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1151>
- Naranjo-López JC, López-del Castillo P. Biological monitoring working party, un índice biótico con potencialidades para evaluar la calidad de las aguas en ríos cubanos. *Ciencia en su PC* 2013;(2):15-25.
- Needham JG, Needham PR. *Guía para el estudio de los seres vivos de las aguas dulces*. Barcelona: Reverté S.A.; 1982. 131 p.
- Noriega JA, Castillo D, Vásquez A, Monroy JD. Estudio preliminar del estado de la microcuenca Los Pozos y su posible efecto en un sector de la laguna de Tota, Boyacá-Colombia. *Rev Tecnol*. 2010;9(2):145-164.
- Orozco C, Pérez A, González M, Rodríguez F, Alfayate J. *Contaminación ambiental. Una visión desde la química*. Thompson Ed. Madrid; 2003. 151 p.
- Ortiz NE, Carmona JC. Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. *Rev luna azul*. 2015;40:117-126.
- Oscos J, Campos F, Escala M. C. Variación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en relación con la calidad de las aguas. *Limnética*. 2006;25(3):683-692.
- Parra-Trujillo YT, Padilla-Gil DN, Reinoso G. Diversidad y distribución de Rhagovelia (Hemiptera, Veliidae) del departamento del Tolima. *Rev Asoc Col Cienc (Col)*. 2014;1(26):82-88.
- Pedraza E, Donato JCh. Diversidad y distribución de diatomeas en un arroyo de montaña de los andes colombianos. *Caldasia*. 2011;33(1):177-191.
- Ramírez DF, Talero GM, López RH. Macroinvertebrados bentónicos y calidad del agua en un tramo del río Bogotá, Cajicá-Colombia. *Rev UDCA Act Div Cient*. 2013;16(1):205-214.
- Rincón ME. Análisis de la emergencia de Trichoptera en la zona media del río Tota (Cuitiva-Boyacá). En: Villa F, Rivera C, Reinoso G, Núñez M, editor(s). *Resúmenes del VII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional sobre Ríos y Humedales Neotropicales*. Asociación Colombiana de Limnología. 2006. p. 130.
- Ríos-Touma B, Acosta R, Prat N. The Andean Biotic Index (ABI): revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Rev biol trop*. 2014;62(2):249-273.
- Riss W, Ospina R, Gutiérrez J. D. Establecimiento de valores de bioindicación para los macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia*. 2002;24(1):135-156.
- Rivera-Usme JJ, Pinilla GA, Rangel-Churio JO, Castro MI, Camacho-Pinzón DL. Biomass of macroinvertebrates and physicochemical characteristics of water in an Andean urban wetland of Colombia. *Braz J Biol*. 2015;75(1):180-190. Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.10613>
- Rocha Z, Cuellar L, Vargas J, Díaz X. Bioindicadores de la calidad del agua en áreas con restauración ecológica de la quebrada La Colorada, Villa de Leyva, Boyacá. *Revista I3+*. 2015;2(2):10-27. Doi: <https://doi.org/10.24267/23462329.108>

- Rodier J. *Análisis de las Aguas*. Barcelona: Omega S.A; 1998. 1059 p.
- Roldán GA, Builes J, Trujillo CM, Suárez A. Efectos de la contaminación industrial y doméstica sobre la fauna béntica del río Medellín. *Actual Biol*. 1973;2(5):54-64.
- Roldán GA. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Bogotá: Fondo para la protección del Medio Ambiente “José Celestino Mutis”; 1988. 217 p.
- Roldán GA. Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad de agua. *Rev Acad Colomb Cienc*. 1999;23(88):375-387.
- Roldán GA. Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: Uso del Método BMWP/Col. Colección Ciencia y Tecnología. Antioquia: Universidad de Antioquia; 2003. 170 p.
- Roldán GA, Ramírez J. J. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 2 ed. Colección Ciencia y Tecnología. Antioquia: Universidad de Antioquia; 2008. 324 p.
- Roldán-Pérez G. Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Rev acad colomb cienc exact fis nat* 2016;40(155):254-274. Doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.335>.
- Rosselli L, Jaramillo A, Cabrera LM. Transformación Ambiental del curso alto del río Bogotá. Informe Final de Investigación. Bogotá: Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales; 2014. 120 p.
- Rosselli L. Transformación Ambiental del curso alto del río Bogotá. *Rev Zooc*. 2015;2(Supl.1):12-13.
- Rosero D, Fossati O. Comparación entre dos índices bióticos para conocer la calidad del agua en ríos del páramo de Papallacta. *Índices Bióticos 2009*. AguAndes: GEUA, IRD. 21p. Disponible en: <https://www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/ecuador/papallacta/doc/D14-09%20Indices.pdf>. Citado: 15 Sep 2016.
- Sabater S, Donato J Ch, Giorgi A, Elosegi A. El río como ecosistema. En: Elosegi A, Sabater S, editor(s). *Conceptos y técnicas de ecología fluvial*. País Vasco: Fundación BBVA; 2009. p. 23-37.
- Sánchez H, M J. El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río Pamplonita Norte de Santander. *Bistua*. 2005;3(2):54-67.
- Salcedo S, Artica L, Trama AF. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad de agua en la microcuenca San Alberto, Oxapampa, Perú. *Apunt cienc soc*. 2013;3(2):124-139. Doi: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2013016>
- Sierra CA. *Calidad del Agua. Evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín; 2011, 457 p
- Soporte Plan de Manejo y Ordenamiento de la cuenca POMCA, río Bogotá. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca del río Bogotá. Cundinamarca: Consorcio, Ecoforest SAS y Planeación Ecológica Ltda. 2006. Disponible en: [http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion\\_digital/Estudio\\_Preencion\\_Desastres\\_CAR/Anexo\\_5-Soporte\\_POMCA\\_Rio\\_Bogota.pdf](http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Estudio_Preencion_Desastres_CAR/Anexo_5-Soporte_POMCA_Rio_Bogota.pdf). Citado: 11 Nov 2016.
- Strahler AN. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel network. En V.T. Chow, editor. *Handbook of applied hydrology*. Nueva York: McGraw-Hill; 1964. p. 439-476.
- Ter Braak CJF y Šmilauer P. *CANOCO reference manual and CANOCO DRAW for windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5)*. Ithaca, Nueva York: Microcomputer Power. 2002. p. 500.
- Toledo M y Mendoza B. Estudio de la calidad de agua utilizando bioindicadores, en microcuenca del río Chimborazo (EC). XVII Congreso latinoamericano de hidráulica, Lima - Perú. 2016. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/312192044>
- Villamarín CP. Estructura y composición de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos altoandinos del Ecuador y Perú. Diseño de un sistema de medida de la calidad del agua con índices multimétricos (tesis doctoral). Barcelona: Departamento de Ecología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona; 2008. 204 p. Disponible en: [http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/83923/CPVF\\_TESIS.pdf?sequence=1](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/83923/CPVF_TESIS.pdf?sequence=1). Citado: 8 Mar 2017.
- Wantzen K. M, Rueda-Delgado G. Técnicas de muestreo de macroinvertebrados bentónicos. En: Domínguez E, Fernández HR, editor(s). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: sistemática y biología*. Argentina: Fundación Miguel Lillo; 2009. p. 17-45.
- Yalta JR, Salas R, Alvarado LL. Evaluación de la calidad ecológica del agua en las microcuencas de Chinata y Gocta, cuenca media del río Utcubamba, región Amazonas. *Rev INDES*. 2013;1(1):14-28.
- Zamora H. Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. *Rev Unicauca Ciencia* 2000;4:47-60.
- Zeybek M, Kalyoncu H, Karakaş B, Özgül S. The use of BMWP and ASPT indices for evaluation of water quality according to macroinvertebrates in Değirmendere Stream (Isparta, Turkey). *Turk J Zool*. 2014;38:603-613. Doi: <http://dx.doi.org/10.3906/zoo-1310-9>.
- Zúñiga M C. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. En: Cantera J, Carvajal Y, Castro L, editor(s). *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. 1 ed. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle; 2009. p. 176-200.