

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL Y SU RELACIÓN CON VARIABLES INDICADORAS DE CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO

Juan Fernando Casanova O.¹
Apolinar Figueroa C.²

Recibido el 29 de octubre de 2013, aprobado el 7 de agosto de
2014, actualizado el 1 noviembre de 2014

DOI: 10.17151/luaz.2015.40.2

RESUMEN

El objeto de esta investigación es la determinación del caudal ambiental en la subcuenca del río Las Piedras y su correlación con diferentes variables fisicoquímicas e índices de calidad del agua. Inicialmente se realizó la determinación del caudal ambiental utilizando una aproximación a la metodología para la determinación del caudal ambiental en proyectos licenciados de Colombia, los cuales son aquellos que de acuerdo con la ley y reglamentos puedan producir deterioro grave a los recursos naturales renovables, al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias en el paisaje (MAVDT, 2010). Seguidamente, teniendo el caudal ambiental establecido para cada mes y desglosado por condición hidrológica (Niño, Niña y normal), se procedió a estimar la correlación existente entre estos, medidas *in situ* (pH, conductividad, OD, turbidez, TDS, T y el factor de asimilación de la corriente) con el fin de hacer una estimación de la calidad del agua que se tendría manteniendo los caudales ambientales propuestos, usando para ello el programa estadístico SPSS. Por otro lado se realizó una evaluación de la integridad biótica, para establecer el estado ecológico de la subcuenca con base en la comunidad de macroinvertebrados. Como resultado se determinó el caudal ambiental para cada mes y las tres condiciones hidrológicas, igualmente se pudo observar la relación directa, existente entre el factor de asimilación de la corriente y el caudal, estableciendo de esta forma que el factor de asimilación puede ser una herramienta que permita la determinación de periodos de mayor vulnerabilidad a eventos extremos que pueda presentar la subcuenca. De igual forma, se consiguió realizar una estimación de las variables físicas (conductividad y TDS) con las cuales el caudal presentó correlación significativa, lo que permite tener una relación idónea entre la cantidad y calidad del recurso hídrico. Adicionalmente, se pudo establecer el estado de la calidad del recurso hídrico de la zona estudiada con base en un estudio realizado de la comunidad de macroinvertebrados como bioindicadores.

PALABRAS CLAVE

Subcuenca, fenómenos macroclimáticos, comunidad biótica, recurso hídrico, calidad, vulnerabilidad.

ENVIRONMENTAL FLOW DETERMINATION AND ITS RELATIONSHIP WITH WATER RESOURCES QUALITY INDICATOR VARIABLES

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the environmental flow in the sub-basin of the river "Las Piedras" and its correlation with different physicochemical variables and indexes of water quality. The environmental flow determination using an approximation to the methodology for determining the environmental flow of Colombian licensed projects, which are those that, according to the law and regulations, can lead to severe deterioration to renewable natural resources or introduce significant or noticeable changes in the landscape (MAVDT, 2010) was initially performed. Next, having the environmental flow established for each month and broken down by hydrologic condition (children and Normal) the correlation between these, *in-situ* measurements (pH, conductivity, DO, turbidity, TDS, T, and absorption factor of the stream) was estimated in order to estimate the quality the water would have maintaining the proposed environmental flows, using SPSS for this purpose. In addition, an assessment of biotic integrity, to establish the ecological status of the watershed based on the macro invertebrate community, was carried out. As a result, the environmental flow for each month and for the three weather conditions was determined. Likewise, the direct relationship between the assimilation factor and the current flow could also be observed thus establishing that the factor assimilation can be a tool that allows the determination of periods of increased vulnerability to extreme events that may occur in the sub-basin. Similarly, it was possible to estimate the physical variables (conductivity and TDS) with which the presented significant correlation, which allows having a suitable relationship between the quantity and quality of water resources. Additionally it was possible to establish the state of the quality of water resources in the studied area based on a study carried out dealing with the macro invertebrate community as bioindicators.

KEY WORDS

Sub-basin, macroclimatic phenomena, biotic community, water resources, quality, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Las cantidades de agua que se necesitan para mantener las funciones, usos y beneficios de una cuenca hidrográfica reciben el nombre de caudal ambiental. Las consecuencias de no gestionar el caudal ambiental se van haciendo cada vez más evidentes. Los ecosistemas río abajo y las comunidades que dependen de ellos, están pagando el precio, ya que el acceso al recurso hídrico se vuelve cada vez más limitado (Casanova, 2012).

Colombia es un país en vía de desarrollo, por lo cual es necesario el uso de herramientas de gestión y prevención para garantizar la utilización sostenible de los recursos naturales en el país. El departamento del Cauca, en cuanto a su diversidad biológica y cultural, es un símil de Colombia, pues aquí se encuentran contenidos la mayoría de pisos bioclimáticos y ecosistemas del país, según estudios hechos para la elaboración del documento socioambiental del departamento del Cauca (CRC, 2009), que permite concluir que, sin lugar a dudas muchas áreas del Cauca necesitan un manejo enfocado a garantizar la conservación de la diversidad biológica, la regulación hídrica y en general el mantenimiento y recuperación de la oferta de bienes y servicios, de tal manera que permitan un desarrollo social y económico sin llegar al agotamiento de la base natural.

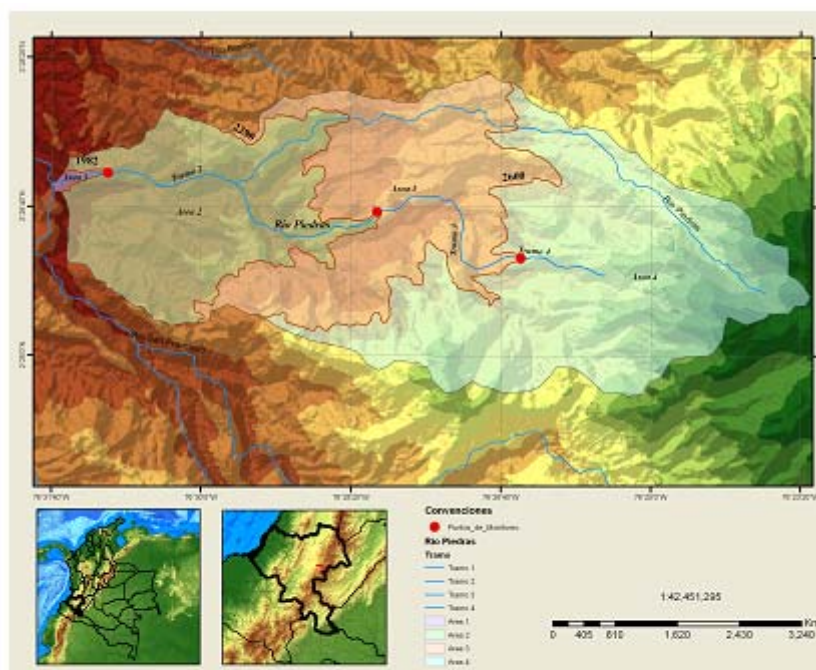
El río Las Piedras es de importancia ya que alrededor de su recurso hídrico se desarrollan diferentes actividades económicas representativas del municipio como la agricultura de subsistencia, la ganadería extensiva, la piscicultura (El Diviso), bocatoma acueductos para el abastecimiento de la ciudad de Popayán (El Tablazo), entre otras. Debido a dicha importancia, se plantea la determinación de un régimen de caudal ambiental, con el fin de poderlo correlacionar con algunas variables fisicoquímicas y de calidad de agua con el objeto de predecir el comportamiento de dichas variables respecto al caudal de la corriente establecido, esto permitiría plantear una herramienta con la cual sea posible garantizar la integridad ambiental de la cuenca hidrográfica en consonancia con la demanda requerida para las diferentes actividades de desarrollo económico.

METODOLOGÍA

Ubicación

La subcuenca del río Las Piedras está ubicada en los municipios de Popayán y Totoró, al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central.

Limita al norte con la divisoria de aguas de la cuenca del río Palacé, al sur con la divisoria de aguas del río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el departamento del Cauca. Su extensión es de 6.626 hectáreas (CRC, 2006).



Fuente: Grupo de Estudios Ambientales –GEA–.

Figura 1. Subcuenca río Las Piedras.

Diseño metodológico

Inicialmente se aplica una aproximación a la metodología para la determinación del caudal ambiental en proyectos licenciados de Colombia (MAVDT, 2008), contando con la información hidrométrica disponible de la estación Puente Carretera ubicada en la zona baja de la subcuenca, esta información corresponde a los caudales medios diarios registrados durante 15 años (1997 a 2011). Consecutivamente, se procedió a realizar un análisis comparativo entre el caudal ambiental determinado para cada mes y las variables fisicoquímicas medidas *in situ* y en el laboratorio del Grupo de Estudios Ambientales –GEA–. Así mismo, se realizó el análisis comparativo con el factor de asimilación de la corriente, determinado, haciendo uso de ecuaciones empíricas propuestas por diferentes autores, como la ecuación de transporte de solutos de ADZ-Quasar (Beer & Young, 1983), tasa de remoción de DBO identificada mediante estudios realizados por Thomas (1948 citado por Chapra, 1997), método de Hydrosience propuesto por la firma del mismo nombre en 1971 (Chapra, 1997) utilizado para el cálculo de la tasa de remoción de la DBO, método de Courchain para la estimación de la tasa de nitrificación (Robles & Camacho, 2005) y para el cálculo de la tasa de reaireación se utilizaron las ecuaciones propuestas por Covar (1976) y Zison et al. (1978) (citados por Chapra, 1997) (Rojas, 2011). Lo anterior con el fin de poder hacer una estimación del comportamiento de las variables mencionadas, con respecto a los cambios propuestos de caudal. Finalizando se hizo la determinación del Índice de Integridad Biótica para la comunidad de macroinvertebrados con el fin de determinar el estado ecológico de la corriente con base en esta comunidad.

Análisis estadístico. Se planteó la realización de análisis estadísticos (pruebas paramétricas y no paramétricas, análisis descriptivos, correlaciones) utilizando el programa IBM SPSS versión 19 (IBM SPSS Statistics, 2010), hechos para la identificación del tipo de distribución de datos hidrométricos, determinación de puntos anómalos en las series de datos, correlación entre los caudales medios mensuales y los índices de fenómenos macroclimáticos, correlación entre los caudales ambientales propuestos, las variables fisicoquímicas y el factor de asimilación de la corriente, homogeneidad de la información hidrológica y los respectivos análisis descriptivos.

Clasificación de registros hidrológicos. Posterior a la determinación del grado de correlación mencionada anteriormente, prosigue la clasificación del registro de acuerdo a la condición hidrológica, con base en el hallazgo o no de correlación alguna entre las variables, esta clasificación es realizada de acuerdo al consenso entre dos grupos de investigación, el Climate Prediction Center (National Weather Service, 2012) y el Multivariate ENSO Index (Earth System Research Laboratory, 2012), que realizan el reporte mensual de dichos índices.

Determinación de índices hidrológicos. Consecutivamente se realiza la determinación del caudal ambiental para cada mes y las tres condiciones hidrológicas (en caso de haber encontrado correlación) usando para ello los índices 7Q10 y Q95%. Para la determinación del índice 7Q10 se realiza un promedio móvil de ventana de 7 días, se agrupan los caudales mínimos semanales por cada año y se aplica la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los datos para la determinación del caudal con un periodo de retorno de 10 años, correspondiente al 7Q10. Seguidamente se realizó la determinación del índice Q95%, este se hace utilizando curvas de duración de caudales construidas para cada mes y las tres condiciones hidrológicas, este índice corresponde al caudal excedido el 95% del tiempo según la curva construida. El caudal ambiental correspondiente para cada mes y periodo hidrológico es el menor entre los dos índices determinados. El resultado obtenido en este punto es el correspondiente a la primera propuesta de caudales ambientales.

Evaluación iterativa de la propuesta de caudales ambientales. Consecutivamente a la determinación de la primera propuesta de caudales ambientales, se le realizó una evaluación iterativa, utilizando para ello dos criterios establecidos en la guía metodológica. El primer criterio corresponde a la alteración máxima de la curva de duración de caudales CDC medios diarios para las condiciones sin y con proyecto. El segundo criterio corresponde a la alteración máxima de las frecuencias de valores mínimos de caudal, para la evaluación de este criterio es necesaria la determinación de caudales mínimos para determinados periodos de retorno, por lo tanto es necesario realizar una prueba de bondad de ajuste de probabilidad para la escogencia del método de probabilidad que se ajuste a los datos.

Determinación del factor de asimilación de la corriente. El factor de asimilación de la corriente se determina con el fin de hacer una

evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del río Las Piedras y realizar una comparación de este resultado con los valores de caudal ambiental determinados. El factor de asimilación fue determinado para tres determinantes de calidad de agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Oxígeno Disuelto (OD), partiendo de ecuaciones empíricas deducidas a partir del modelo sencillo de calidad de agua y transporte de solutos de ADZ-Quasar (ANLA, 2013).

Las ecuaciones usadas para la determinación del factor de asimilación son las siguientes:

Para DBO:

$$aL = \frac{Q*(1+K_r*(\bar{t}-\tau))}{e^{(-K_r*\tau)}} \text{ Ec.1}$$

Para NTK:

$$aNTK = \frac{Q*(1+K_{na}*(\bar{t}-\tau))}{e^{(-K_{na}*\tau)}} \text{ Ec.2}$$

Para OD:

$$aOD = \frac{Q*(1+K_a*(\bar{t}-\tau))}{e^{(K_a-K_d-4,57K_{na})*\tau}} \text{ Ec.3}$$

De acuerdo a las ecuaciones anteriores se necesitan ciertas variables que serán determinadas por medio de las siguientes expresiones:

$$\tau = (1 - DF) * \bar{t} \text{ Ec.4}$$

Donde:

τ = Tiempo de arribo.

DF = Fracción dispersiva.

\bar{t} = Tiempo medio de viaje.

La fracción dispersiva generalmente es obtenida por medio de experimentos con trazadores sobre la corriente estudiada, en este caso no se realizaron experimentos con trazadores sobre la subcuenca del río Las Piedras, en su lugar, se utilizó un estudio realizado sobre el comportamiento de la fracción dispersiva en ríos característicos de montaña presentado en el XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología (González et al., 2008). En el cual se realizó la investigación de la fracción dispersiva en ríos característicos de montaña, utilizando una base de datos de 58 experimentos con trazadores y caracterizaciones hidráulicas realizados bajo diferentes caudales. Los resultados encontrados en dicho estudio permitieron estimar una fracción dispersiva global igual a $DF = 0,27 \pm 0,015$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,98$.

El tiempo medio de viaje será hallado con la siguiente ecuación:

$$\bar{t} = L/V \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

L = Longitud media.

V = Velocidad media.

Por otro lado es necesaria la identificación de las tasas de reacción para cada determinante, para ello se hizo uso de las siguientes ecuaciones empíricas:

Tasa de remoción DBO:

$$K_r = K_d + K_s \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

K_r = Tasa de descomposición total de DBO en la corriente.

K_d = Coeficiente de desoxigenación de la DBO.

K_s = Tasa por sedimentación.

La estimación del coeficiente de desoxigenación de la DBO, se realizó por medio del método de Hydrosience, el método fue propuesto por la firma Hydrosience (1971) con el fin de predecir el valor de K_d en corrientes, en función de la profundidad y el grado de tratamiento de aguas residuales. La relación hallada por

Hydroscience se ha plasmado a través de la siguiente ecuación, acorde a las condiciones del área de estudio en la subcuenca del río Las Piedras:

$$K_d = 0,3 * \left(\frac{H}{8}\right)^{-0,434} \quad 0 \leq H \leq 8ft \text{ Ec.7}$$

Por otra parte, la tasa de sedimentación está dada por:

$$K_s = \frac{V_s}{H} \text{ Ec.8}$$

Donde:

H = Profundidad.

V_s = Velocidad de sedimentación de la DBO.

La velocidad de sedimentación de SST y la materia orgánica particulada (MOP) se pudieron estimar preliminarmente conociendo su composición a partir de valores reportados en la literatura (Camacho et al., 2007).

Como la velocidad de sedimentación o caída de las partículas tiene en cuenta el peso, la forma, el tamaño de la partícula, la temperatura, la densidad del agua y teniendo en cuenta que se trata de la tasa de remoción de la DBO y no se tienen estudios previos sobre la clasificación de los sedimentos de la zona de estudio, se optó por tomar la velocidad de sedimentación para partículas de materia orgánica con diámetros > 64 μm, para garantizar una velocidad que abarque todos los diámetros de las partículas de materia orgánica, esta velocidad corresponde a:

$$V_s = 2,3 \text{ m/d}$$

Consecutivamente se realizó el cálculo de la tasa de nitrificación (Kn), esta tasa al igual que la tasa de remoción de la DBO, difiere significativamente de la estimada en los laboratorios. Entre las causas de estas divergencias se encuentran los efectos del lecho, como las películas biológicas adheridas a las rocas, por lo tanto el valor debe ser aumentado para incluir todos los efectos que ocurren en la corriente (Rojas, 2011)

Para el cálculo de la tasa de nitrificación se hizo uso del método de Courchaine (Medina et al., 2008), mediante el cual se encontró una relación entre Kn y la relación velocidad/profundidad (V/H), con ajuste de R² = 0,944 para diversos ríos de montaña:

$$K_n = 0,4381 * \left(\frac{V}{H}\right) + 0,5394 \text{ Ec.9}$$

Posteriormente se realizó la estimación de la tasa de reaeración (OD), esta tasa es afectada por ciertos factores que perturban la capa superficial de turbulencia (Kilpatrick et al., 1989), entre estos factores se pueden citar: la temperatura, las caídas de agua, las estructuras hidráulicas, los rápidos y las películas superficiales. De acuerdo a las características de la corriente estudiada han sido citadas diferentes ecuaciones, de las cuales se ha tomado la más acorde a las características hidráulicas de la zona de estudio en la subcuenca del río Las Piedras (Rojas, 2011).

$$K_a = a * \left(\frac{V^b}{H^c}\right) \text{ Ec.10}$$

Donde:

$$a = 5,320 \quad b = 0,670 \quad c = 1,85$$

$$\text{si } 0,12m \leq H \leq 0,71m \quad 0,03m/s \leq V \leq 0,57m/s$$

Determinación de variables fisicoquímicas. Las variables fisicoquímicas utilizadas en el presente estudio corresponden a: sólidos disueltos totales (TDS), conductividad, pH, oxígeno disuelto (OD), temperatura y turbidez. Las anteriores variables fueron medidas *in situ* y en el laboratorio durante 4 años consecutivos (2009 a 2012) por el GEA. A continuación se muestran los equipos usados para dichas mediciones:

Tabla 1. Métodos de medición de variables físicas

| Parámetro | Frecuencia | Método |
|---------------|------------|------------------------|
| pH | 1 mensual | pH metro MA 235 |
| Conductividad | 1 mensual | Sonda HACH HQ30d/HQ40d |
| OD | 1 mensual | Sonda HACH HQ30d/HQ40d |
| TDS | 1 mensual | Sonda HACH HQ30d/HQ40d |
| Turbidez | 1 mensual | Sonda YSI 6920 |
| Temperatura | 1 mensual | Sonda HACH HQ30d/HQ40d |

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se observó que, de la serie histórica de caudales medios diarios, obtenidos de la estación Puente Carretera, los años 2008 y 2010 poseían un faltante de datos mayor a 3 meses, por lo tanto esos dos años fueron sacados de los análisis posteriores, no se encontró problema al realizar esto ya que se continuó manteniendo el requerimiento exigido por la guía metodológica, el cual corresponde a la utilización de una serie mínima de 10 años. Seguidamente se realizaron los respectivos análisis estadísticos descriptivos a la serie histórica de caudales encontrándose los siguientes resultados:

Tabla 2. Análisis estadísticos descriptivos

| Descriptivos | | | Estadístico | Error típ. |
|--------------------------------------|---|-----------------|-------------|------------|
| Caudales diarios (m ³ /s) | Media | | 2,75181 | ,039994 |
| | Intervalo de confianza para la media al 95% | Límite inferior | 2,67341 | |
| | | Límite superior | 2,83022 | |
| | Media recortada al 5% | | 2,34076 | |
| | Mediana | | 1,63000 | |
| | Varianza | | 7,593 | |
| | Desv. típ. | | 2,755518 | |
| | Mínimo | | ,804 | |
| | Máximo | | 32,100 | |
| | Rango | | 31,296 | |
| | Amplitud intercuartil | | 1,980 | |
| | Asimetría | | 3,759 | ,036 |
| | Curtois | | 21,079 | ,071 |

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó el análisis de correlación usando la prueba de Spearman (Obregón, s.f.) entre la serie histórica de caudales y los índices de los fenómenos macroclimáticos de El Niño y La Niña (ENSO), con la cual se observó que tres años de la serie hidrológica (1997, 2009 y 2011) presentaron una correlación significativa al grado de 0,05 y dos años (2000 y 2001) presentaron una correlación significativa al grado de 0,01. Debido a que un 38,5% de la serie hidrológica presentó una correlación significativa con los índices de fenómenos macroclimáticos, se procedió a realizar la clasificación de la serie por condición hidrológica, ya que esto permite la determinación de un caudal ambiental adaptativo en términos de condiciones climáticas e hidrológicas.

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta la información de los dos grupos de investigación estadounidenses mencionados en la

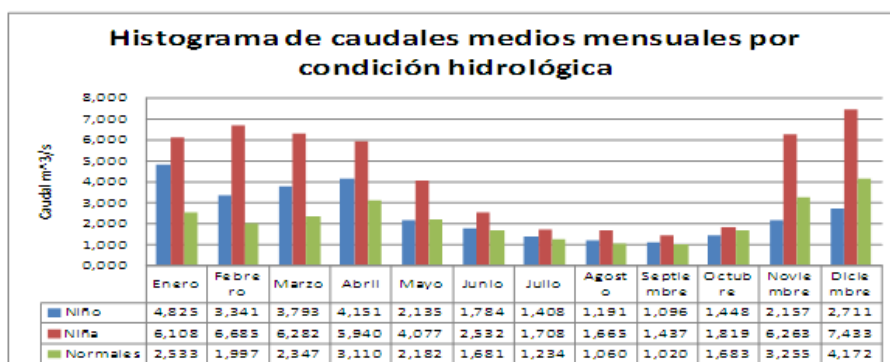
metodología, se realizó la clasificación de la serie por condición hidrológica como se muestra a continuación:

Tabla 3. Clasificación de registro por condición hidrológica

| Año | Comparación | | Consenso |
|------|-------------|------|----------|
| | CPC | MIE | |
| 1997 | Niño | Niño | Niño |
| 1998 | Niña | Niño | Niña |
| 1999 | Niña | Niña | Niña |
| 2000 | Niña | Niña | Niña |
| 2001 | | | |
| 2002 | Niño | Niño | Niño |
| 2003 | | | |
| 2004 | Niño | | |
| 2005 | | | |
| 2006 | | Niño | |
| 2007 | | | |
| 2009 | Niño | Niño | Niño |
| 2011 | Niña | Niña | Niña |

Fuente: Elaboración propia.

En la clasificación realizada se encontró inconsistencia para las condiciones Niño y normal, observándose que para 8 meses del año (enero, febrero, marzo, abril, junio, julio, agosto y septiembre) resultó ser mayor el valor de caudal estimado para las condiciones de años Niño que para las condiciones de año normal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Clasificación hidrológica por años.

Esta inconsistencia puede ser debida a las fluctuaciones extremas de caudales diarios, es decir, presentación de caudales mínimos en relación a la serie histórica analizada, encontrados durante los años catalogados como normales. Por otro lado, los fenómenos macroclimáticos no se presentan durante todos los meses del año y tampoco tienen la misma intensidad, además de que un mismo año puede presentar los dos fenómenos, pero es clasificado de acuerdo al fenómeno que se presente durante un mayor número de meses (Casanova, 2012).

Seguidamente se hizo la estimación de los índices 7Q10 y Q95%. El índice 7Q10 obtenido para la serie de datos analizada correspondió a 0,806 m³/s único para todos los meses y las tres condiciones hidrológicas y el índice Q95% determinado para cada mes y las tres condiciones hidrológicas se muestran en la **Tabla 1**.

Comparando los dos índices se observó que el Q95% fue mayor en todos los meses que el índice 7Q10, lo cual evidenció, como se menciona en la metodología, que este índice subestima los caudales ambientales (MAVDT, 2008).

Por lo tanto, es posible predecir que la utilización del índice 7Q10 como criterio en la determinación de caudales ambientales resulta innecesaria en lo referente al desarrollo de la metodología para proyectos licenciados de Colombia.

Tabla 4. Propuesta inicial de caudales ambientales por mes y condición hidrológica

| Mes | M á x (7 Q 1 0 , Q 9 5 %) en m ^ 3 | | |
|------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| | A ñ o s N i ñ o | A ñ o s N o r m a l e s | A ñ o s N i ñ a |
| Enero | 1,738 | 1,122 | 2,529 |
| Febrero | 1,456 | 1,189 | 2,764 |
| Marzo | 1,414 | 1,114 | 3,391 |
| Abril | 2,023 | 1,262 | 3,375 |
| Mayo | 1,593 | 1,340 | 1,522 |
| Junio | 1,351 | 1,210 | 1,385 |
| Julio | 1,125 | 1,031 | 1,396 |
| Agosto | 1,040 | 0,835 | 1,129 |
| Septiembre | 0,891 | 0,835 | 1,013 |
| Octubre | 0,830 | 0,903 | 1,129 |
| Noviembre | 1,164 | 1,240 | 1,853 |
| Diciembre | 1,234 | 1,923 | 1,801 |

Fuente: Elaboración propia.

Estimación iterativa de la propuesta inicial de caudales ambientales

Posteriormente a la presentación de la primera propuesta de caudales ambientales, la metodología propone una serie de criterios con los cuales se realiza una estimación iterativa de la propuesta, evaluando la funcionalidad de su aplicación, por lo tanto se realizó la aplicación del primer criterio el cual evalúa la alteración máxima de la curva de duración de caudales CDC medios diarios, para las condiciones con y sin proyecto.

Para el análisis de cumplimiento del criterio antes mencionado, es necesario realizar la construcción de la curva de duración de caudales para la serie post-intervención, para lo cual la metodología propone la siguiente ecuación:

$$Q_{diario_post_{i,j}} = \min(Q_{amb_{i,j}}, Q_{diario_{pre}}) \text{ Ec.11}$$

Continuamente a la construcción de la CDC post-intervención se aplicó el criterio que indica que la fracción Q_{post}/Q_{pre} debe ser $\geq 0,50$, el cual se cumplió para los percentiles $> 70\%$, es decir, para los caudales más bajos o condiciones críticas y no se cumplió para los percentiles $\leq 30\%$, como se muestra en la **Tabla 5**, lo cual confirma que la propuesta de estimación de los caudales post-intervención penaliza los valores altos de caudal en la corriente pues para los casos en los que el caudal diario sea mucho mayor que el correspondiente caudal ambiental mensual, la fórmula indicaría que la corriente después de la intervención llevaría solo el caudal ambiental mensual propuesto, y no valores mayores de caudal como realmente ocurre en la práctica.

Tabla 5. Evaluación del primer criterio

| Percentiles % | Caudales en m ³ /s | | Fracción Q_{post}/Q_{pre} | Cumple criterio $fracción > 0,50$ |
|---------------|-------------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------------------|
| | Pre | Post | | |
| 10 | 5.380 | 1.928 | 0.36 | (NO) |
| 20 | 3.730 | 1.596 | 0.43 | (NO) |
| 30 | 2.793 | 1.390 | 0.50 | (NO) |
| 40 | 2.130 | 1.283 | 0.60 | (SI) |
| 50 | 1.630 | 1.214 | 0.74 | (SI) |
| 60 | 1.482 | 1.136 | 0.77 | (SI) |
| 70 | 1.335 | 1.116 | 0.84 | SI |
| 80 | 1.199 | 1.035 | 0.86 | SI |
| 90 | 1.111 | 0.839 | 0.76 | SI |
| 92 | 1.054 | 0.848 | 0.80 | SI |
| 95 | 0.984 | 0.860 | 0.87 | SI |
| 98 | 0.900 | 0.831 | 0.92 | SI |
| 99 | 0.881 | 0.833 | 0.95 | SI |
| 99.5 | 0.847 | 0.834 | 0.99 | SI |

Fuente: Elaboración propia.

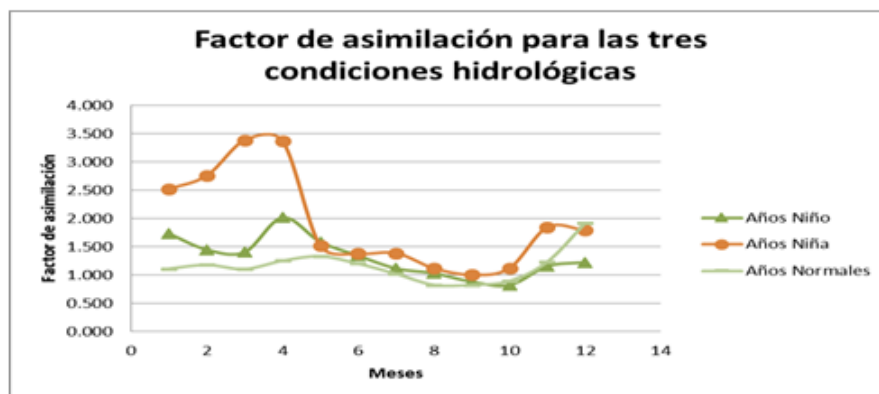
Seguidamente se realizó la aplicación del segundo criterio, el cual corresponde a la alteración máxima de las frecuencias de valores mínimos de caudal, para ello se realizó una prueba de bondad de ajuste con la cual se determinó que el mejor método de probabilidad que se ajustaba a la serie de datos es el correspondiente a método para valores extremos de Pearson Tipo III, con lo cual se pudo determinar los tiempos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años. Aplicando dicha evaluación, se obtuvo el resultado mostrado en la **Tabla 6**, donde se evidencia el cumplimiento del criterio ya que la fracción Q_{post}/Q_{pre} establecida da por encima del umbral límite propuesto el cual corresponde a 0,60.

Tabla 6. Evaluación del segundo criterio

| Tr(años) | Qpre(m ³ /s) | Qpost(m ³ /s) | Fracción Qpost/Qpre | Cumple |
|----------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 2 | 1.067 | 0.965 | 0.90 | SI |
| 5 | 0.95 | 0.881 | 0.93 | SI |
| 10 | 0.897 | 0.84 | 0.94 | SI |
| 25 | 0.845 | 0.801 | 0.95 | SI |

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la determinación del caudal ambiental y cumplimiento de los criterios mencionados para su respectiva evaluación iterativa, se realizó la determinación del factor de asimilación de la corriente, haciendo uso de las ecuaciones mencionadas en la metodología. En los resultados obtenidos se pudo observar que la relación es directamente proporcional entre el factor de asimilación y el caudal ambiental establecido, esta determinación se realizó para las tres condiciones hidrológicas (Niño, Niña y normal). Así mismo, se observa que para los meses de agosto, septiembre y octubre se presentaron los valores más bajos del factor de asimilación para las tres condiciones hidrológicas, definiendo este periodo como aquel en el cual el río presenta mayor vulnerabilidad a los eventos externos de contaminación. De acuerdo a lo anterior es importante para los organismos tomadores de decisión en torno al recurso hídrico, tener en cuenta este periodo de vulnerabilidad y poder disponer de alternativas viables (derivar la utilización del recurso hídrico a otra fuente con mayor capacidad de asimilación, prohibir vertimiento de todo tipo de contaminantes que puedan afectar el recurso durante el periodo propuesto, entre otras) en los casos en que los eventos de contaminación superen en gran medida la capacidad natural del río para su mitigación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Factor de asimilación de la corriente.

Adicionalmente se realizó la determinación del Índice de Integridad Biótica para la comunidad de macroinvertebrados con el fin de identificar el estado de la calidad del río para esta comunidad y posteriormente, de acuerdo a los cambios presentados en el caudal, establecer los requisitos mínimos que tiene la comunidad para su desarrollo, lo cual permitiría implantar una relación más idónea entre la calidad y cantidad del recurso hídrico. El Índice de Integridad Biótica fue calculado como se muestra a continuación:

$$IIB_{macroin} = \text{Puntajes}[TT + T + D + E + EPT + O + I + TOL + R + F + IH]/11$$

Ec.13

Donde:

TT = Número Total de Taxones.

T = Número de Taxones de Trichóptera.

D = Número de Taxones de Diptera.

E = % de Taxones de Ephemeroptera.

EPT = % de Taxones de Ephemeroptera, Plecóptera y Trichóptera.

O = % de Abundancia de Oligoquetos.

I = Número de Taxones Intolerantes.

TOL = % de Taxones Tolerantes.

R = % de Taxones de Recolectores.

F = Número de Taxones Filtradores.

IH = Índice de Hilsenhoff.

Las variables mencionadas anteriormente fue posible obtenerlas por medio de muestreos mensuales realizados durante 8 meses consecutivos y su posterior identificación (MADR, 2012).

De acuerdo a la ecuación 13 el resultado obtenido fue el siguiente:

$$IIB_{macroin} = 0,782$$

El anterior resultado se encuentra en el rango de 0,6-1,0 propuesto por la guía para la interpretación del Índice de Integridad Biótica de macroinvertebrados, lo cual justifica que en la zona de estudio de la subcuenca hay una alta integridad biótica de macroinvertebrados lo que representa un estado ecológico bueno o excelente para esta comunidad y por ende una buena calidad del afluente hídrico.

Adicionalmente, teniendo en cuenta estudios realizados sobre los macroinvertebrados como bioindicadores, se tiene que en aguas limpias es común encontrar poblaciones dominantes de Ephemeropteros, Plecópteros y Tricópteros, a diferencia de aguas contaminadas donde prevalecen poblaciones de Quironómidos y Anélidos.

Así mismo cuando se presenta una perturbación moderada, comienzan a aparecer especies tolerantes y a disminuir las intolerantes y con perturbaciones altas, desaparecen las especies intolerantes (Bolaño et al., 2003). Información que concuerda con los porcentajes de especies obtenidas para el presente estudio.

Para finalizar se aplicó el método de Spearman para determinar el grado de correlación existente entre variables físicas, químicas y el caudal, a continuación se muestran los valores promedio utilizados:

Tabla 7. Variables físicas y químicas

| | T (°C) | Cond (µs/cm) | TDS (mg/L) | OD (mg/L) | pH | Turbidez | Q (m3/s) |
|-------------------|--------|--------------|------------|-----------|------|----------|----------|
| Enero | 16,7 | 55,3 | 26,01 | 7,69 | 5,67 | 2,9 | 3,89 |
| Febrero | 17,1 | 54,6 | 25,66 | 7,78 | 7,09 | 2,1 | 3,39 |
| Marzo | 16,8 | 56,2 | 26,77 | 7,71 | 6,99 | 2,5 | 3,64 |
| Abril | 16,6 | 51,3 | 24,05 | 7,71 | 7,18 | 3,0 | 4 |
| Mayo | 16,4 | 60,8 | 29,93 | 7,81 | 7,10 | 2,3 | 2,61 |
| Junio | 17,1 | 70,1 | 33,48 | 7,50 | 7,20 | 2,5 | 1,9 |
| Julio | 17,2 | 71,7 | 34,04 | 7,67 | 7,31 | 1,6 | 1,38 |
| Agosto | 16,8 | 73,0 | 35,80 | 7,67 | 7,26 | 1,2 | 1,23 |
| Septiembre | 17,2 | 75,6 | 37,28 | 7,74 | 7,24 | 1,5 | 1,13 |
| Octubre | 16,1 | 61,2 | 28,68 | 7,82 | 7,20 | 4,2 | 1,66 |
| Noviembre | 16,5 | 49,5 | 23,21 | 7,86 | 7,16 | 2,2 | 3,7 |
| Diciembre | 16,5 | 47,5 | 22,58 | 7,67 | 7,13 | 2,2 | 4,59 |

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que existe una correlación inversamente proporcional entre el caudal, la conductividad y TDS con una significancia de 0,01, para las demás variables no se encontró correlación significativa. Debido a la correlación existente fue posible plantear una estimación del cambio de estas dos variables físicas de acuerdo

al establecimiento del caudal ambiental propuesto, obteniéndose el siguiente resultado:

Tabla 8. Estimación variables físicas

| | Caudal Ambiental | Conductividad $\mu\text{s}/\text{cm}$ | TDS mg/L |
|------------|------------------|---------------------------------------|----------|
| Enero | 1,122 | 74,18 | 36,16 |
| Febrero | 1,189 | 73,63 | 35,87 |
| Marzo | 1,114 | 74,25 | 36,20 |
| Abril | 1,262 | 73,02 | 35,55 |
| Mayo | 1,34 | 72,37 | 35,21 |
| Junio | 1,21 | 73,45 | 35,78 |
| Julio | 1,031 | 74,94 | 36,56 |
| Agosto | 0,835 | 76,57 | 37,42 |
| Septiembre | 0,835 | 76,57 | 37,42 |
| Octubre | 0,903 | 76,01 | 37,12 |
| Noviembre | 1,24 | 73,20 | 35,65 |
| Diciembre | 1,923 | 67,52 | 32,66 |

Fuente: Elaboración propia.

La estimación fue realizada para el caudal ambiental propuesto en la condición más crítica, que para este caso corresponde al caudal ambiental de los años Normales. Se pudo observar que las variables físicas de conductividad y turbidez se mantienen dentro de valores normales para los usos del agua en la subcuenca los cuales corresponden a consumo humano y actividades agropecuarias. En otro sentido, cabe destacar la importancia de identificar la composición de las diferentes comunidades bióticas de la subcuenca con el fin de determinar si las condiciones de calidad favorecen su desarrollo.

CONCLUSIONES

En relación al componente hidrológico, se observó que es posible realizar la determinación de la primera propuesta de caudales ambientales utilizando únicamente el índice Q95%, ya que se encontró que este resultó ser mayor para todos los meses y condición hidrológica que el índice 7Q10, lo cual comprueba lo mencionado en la bibliografía, en la cual se refiere que el índice 7Q10 subestima los caudales ambientales.

La correlación realizada entre los índices de fenómenos macroclimáticos (fenómeno de El Niño y La Niña) y los caudales medios diarios, para clasificar los registros hidrológicos, resultó ser más consistente hacerla de acuerdo a los meses durante los cuales se presente determinado fenómeno y no por años como se plantea en la metodología.

Se observó que la serie hipotética de caudales post-intervención es posible realizarla, determinando para cada día el caudal medio

diario post-intervención igual al 50% del caudal medio diario del registro histórico estudiado. Esta relación permitiría dar antemano, dar cumplimiento a los criterios establecidos para la estimación iterativa de la primera propuesta de caudales ambientales presentada.

Teniendo en cuenta el concepto de caudal ambiental, es necesario plantear una relación idónea entre la cantidad y calidad del recurso hídrico, para ello resulta indispensable que se realice un estudio adecuado de especificidad de las comunidades bióticas analizadas, con el fin de asignar valores de caudal ambiental que puedan asegurar la preservación de las especies propias del ecosistema de cada subcuenca o cuenca estudiada.

Es importante destacar que la metodología para proyectos licenciados de Colombia se encuentra en estudio de aprobación, por lo tanto este estudio fue muy importante ya que permitió identificar posibles criterios que pueden ser perfeccionados con el fin de poder lograr el desarrollo de una metodología que abarque, en su gran mayoría, las características propias pertenecientes al contexto colombiano.

La determinación del Índice de Integridad Biótica para la comunidad de macroinvertebrados permitió identificar que la zona de estudio posee una buena o excelente calidad del recurso hídrico, esta justificación es necesaria reforzarla con la identificación del Índice de Integridad Biótica para una gran variedad de comunidades que sean específicas de cada cauce estudiado, con el fin de poder identificar los cambios generados en cada comunidad debidos a la alteración del caudal, de tal forma que se pueda establecer una diferencia más acorde entre el término de caudal ambiental y caudal ecológico al cual se refiere mucha literatura.

Es necesario tener en cuenta para posteriores estudios, el término de factor de asimilación de la corriente, ya que, debido a su relación directa con el caudal, es posible que se pueda convertir en una herramienta de gran ayuda para la implantación de estrategias por parte de los entes encargados del manejo y control del recurso hídrico, permitiendo la identificación de los periodos que pueden presentar mayor vulnerabilidad a la contaminación externa en todas las fuentes hídricas.

Se determinó la correlación existente entre dos variables físicas (conductividad, TDS) y el caudal ambiental establecido, permitiendo identificar que cumple con los requerimientos necesarios para las condiciones de uso que se le da al recurso hídrico. Adicionalmente, se recomienda el estudio de la composición biótica de las subcuencas donde se determine el caudal ambiental, con el fin de poder identificar las condiciones fisicoquímicas que requieren las comunidades específicas y poder estimar si los caudales ambientales propuestos logran mantener la calidad necesaria para el desarrollo de dichas comunidades.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Se agradece al Grupo de Estudios Ambientales –GEA– de la Universidad del Cauca ya que por medio de los diferentes proyectos de investigación desarrollados, se pudo realizar el desplazamiento para la toma de muestras *in situ* como también los respectivos análisis de laboratorio.

POTENCIAL CONFLICTO DE INTERESES

No hay ningún tipo de conflicto de intereses respecto a la publicación de este artículo, el cual es elaborado a partir de la tesis de pregrado del autor Juan Fernando Casanova Olaya con el asesoramiento como director del autor Apolinar Figueroa Casas.

REFERENCIAS

- ANLA –Autoridad Nacional de Licencias–. (2013). *Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial*. Bogotá: MinAmbiente.
- Beer, T. & Young, P. (1983). Longitudinal dispersion in natural streams. *Journal of Environmental Engineering*, 109(5), 1049-1067.
- Bolaño Guerrero, F., Manjarrés-Hernández, A. & Núñez-Padilla, N. (2003). Los macroinvertebrados béntonicos de Pozo Azul (cuenca del río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua. *Acta Biológica Colombiana*, 8, 43-55.
- Camacho, L. A., Rodríguez, E. A., González, R., Torres, J., Gelvez, R. & Medina, M. (2007). Metodología para la caracterización de la capacidad de autopurificación de ríos de montaña. I Congreso Internacional del Agua y el Ambiente.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modelling*. EE UU: McGraw-Hill.
- CRC. (2006). *Plan de ordenamiento y manejo de la subcuenca hidrográfica del río las Piedras*.
- _____. (2009). *Documento de análisis socioambiental del departamento del Cauca: como elemento para identificación de lineamientos para ajuste de instrumentos de planificación de la CRC*.
- Casanova Olaya, J. F. (2012). *Determinación de un régimen de caudal ambiental utilizando una aproximación a la metodología para proyectos licenciados de Colombia en la subcuenca del río las Piedras en el departamento del Cauca*. Pregrado, Universidad del Cauca.
- Earth System Research Laboratory. Physical Sciences Division. (2012). Multivariate ENSO Index (MEI). Recuperado de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
- González Pinzón, R. A., Camacho Botero, L. A. & Rodríguez Sandoval, E. A. (2008). Determinación del Comportamiento de la Fracción Dispersiva en Ríos de Montaña. *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, mayo 22-24, Bogotá.
- IBM SPSS Statistics. Versión 19. (2010).

- Kilpatrick, F. A., Rathbun, R. E., Yotsukura, N., Parker, G. W. & DeLong, L. L. (1989). *Determination of stream reaeration coefficients by use of tracers*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Book 3. Chapter A18.
- MADR –Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural–. (2012). *Modelamiento climático, patrones de cambio y sus efectos en ecosistemas agrícolas altoandinos, identificando medidas de adaptación y mitigación para la planificación: MACACEA*.
- MAVDT –Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial–. (2008). *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados de Colombia*. Bogotá: MAVDT.
- _____. (2010). Decreto 2820. "Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales".
- Medina Nieto, M. P., Camacho Botero, L. A. & Rodríguez Sandoval, E. A. (2008). Métodos para estimar la tasa de nitrificación en ríos de montaña. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros, mayo 22-24, Bogotá.
- National Weather Service. (2012). Climate Prediction Center. Recuperado de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>
- Obregón, J. R. (s.f.). Prueba de asociación de dos variables cuantitativas discretas (o dos continuas sin distribución normal). Prueba de Spearman. pp. 28-37.
- Robles, E. & Camacho, L. (2005). *Estimación experimental de tasas de nitrificación en ríos de montaña*. Universidad de los Andes.
- Rojas Aguirre, A. F. (2011). *Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia*. Maestría, Universidad Nacional de Colombia.

1. Ingeniero Ambiental. Joven Investigador CIAgua-Universidad del Cauca. jfcasanova845@gmail.com

2. Ph.D. en Ciencias biológicas. Director Grupo de Estudios Ambientales, Universidad del Cauca. apolinarfigueroa@gmail.com

Para citar este artículo: Casanova, J.F. & Figueroa, A. (2015). Determinación del caudal ambiental y su relación con variables indicadoras de calidad del recurso hídrico. *Revista Luna Azul*, 40, 05-24. Recuperado de <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=996>