

**CAUDAL ECOLÓGICO COMO INSTRUMENTO PARA EL ORDENAMIENTO Y
GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO**

MAURA ALEJANDRA VARELA MÁRQUEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2020**

**CAUDAL ECOLÓGICO COMO INSTRUMENTO PARA EL ORDENAMIENTO Y
GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO**

MAURA ALEJANDRA VARELA MÁRQUEZ

Estado del arte

**DIRIGIDO POR
Ing. Dayam Calderon Rivera**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2020**

CAUDAL ECOLÓGICO COMO INSTRUMENTO PARA EL ORDENAMIENTO Y GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

El agua es uno de los recursos con mayor contribución al desarrollo de la sociedad, su uso apoya la economía global basada en actividades agropecuarias, sector energético, saneamiento básico, entre otros. Sumado a esto el aumento en la población a nivel mundial, el cambio climático y consumismo global se han convertido en una gran presión para el recurso hídrico, desembocando en un aumento de vulnerabilidad y afectaciones a los ecosistemas que se abastecen de él. Esta problemática se ha convertido en una crisis mundial, donde la escasez del agua, la baja calidad del recurso y el desabastecimiento son escenarios cada vez más comunes y alarmantes, en donde más de 2000 millones de personas alrededor del mundo sufren por el estrés hídrico y se estima que por lo menos 4000 millones experimentan escasez hídrica por lo menos un mes al año, si este contexto continua, es probable que para el año 2050 *“el 45% del producto interior bruto (PIB) mundial, el 52% de la población mundial y el 40% de la producción mundial de cereales estarán en riesgo”* [1]; de manera tal, que los gobiernos se han visto obligados en la reorientación del manejo del recurso, fijando su interés por la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) como una medida que soporta la seguridad hídrica y disminuye la degradación ambiental dentro de los territorios [2], [3].

A causa de esto, la regulación en el uso y calidad del recurso hídrico se empezó a concebir como una necesidad dentro del desarrollo de las naciones. Enfocando los esfuerzos en la formulación de políticas y planes que delimiten del uso del agua, controlen los parámetros de calidad y sean la base de herramientas de gestión del recurso como componentes claves para el mantenimiento de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades. Como aspecto fundamental para la formulación de medidas para la GIRH, se deben evaluar las diferentes demandas de uso del recurso en los territorios, priorizando el uso de agua por parte del ecosistema, donde se permitan las condiciones mínimas necesarias para la subsistencia del mismo.

En este contexto, para finales de 1940, EEUU inicia la evaluación de flujo con el objetivo de proteger la actividad pesquera, planteando las primeras recomendaciones de caudal mínimo como herramienta de gestión. Para 1970, se evidenció un rápido progreso en la nueva legislación de evaluación de flujos ambientales enmarcado en el efecto de las presas sobre los ecosistemas acuáticos, hasta 1972, donde la formulación de la ley *“The US Clean Water Act”*, se dan las primeras bases para la formulación de metodologías de estimación de caudales ecológicos. Ya en 1980 países como Inglaterra, Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda comenzaron a involucrarse en el tema, seguido de Brasil, Japón y países de Europa continental, aportando nuevas perspectivas sobre los retos en materia de gestión de flujos ambientales como la base para el cuidado del recurso hídrico [4]. Todo esto ha impulsado la búsqueda de regímenes de caudales ambientales (RAC)

o caudal ecológico, como una medida que asegurara estas particularidades en cada unidad hidrográfica de estudio y posibilitan el aprovechamiento del recurso [5].

La dinámica de caudales (tanto temporal como espacial) es un determinante dentro del comportamiento ecológico del ecosistema, muchos de los componentes que caracterizan los caudales, como magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y la tasa de variación, regulan varios procesos de los ecosistemas (transporte de nutrientes, arrastre de sedimentos, la supervivencia de especies, entre otros.), convirtiéndolo en una de las variables imperativas para la gestión del recurso hídrico [3], [6]. El aumento o disminución de caudal permiten la productividad y diversidad del ecosistema, lo que direcciona los esfuerzos en la formulación de metodologías para la determinación de caudales ecológicos, que respondan a las particularidades ambientales y socioeconómicas dentro de la gestión del recurso en los territorios.

CONTEXTO NACIONAL

En Colombia, los conflictos por uso del agua, la variabilidad climática con el (fenómeno ENSO), la ubicación del país en la Zona de Convergencia Intertropical sumado a las actividades antropogénicas. Han aumentado las presiones sobre el recurso, por esta razón la búsqueda de regulación del agua se ha convertido en uno de los objetivos de desarrollo sostenible, con el propósito de responder a los desafíos ambientales, políticos y económicos a nivel mundial encaminado en el desarrollo sostenible, donde el compromiso con el recurso hídrico se resume en el objetivo 6 que garantiza el acceso al agua potable (los 17 objetivos están interrelacionados y la efectividad de uno aporta a los demás) [7]. La gobernanza del agua se ha trabajado en los últimos años como un proceso que culminará en la gestión integral del mismo, priorizando los esfuerzos por coordinar y regular las complejas relaciones entre los diferentes aspectos que constituyen el régimen hídrico (aspectos hidrológicos, ecológicos, hidráulicos, participación comunitaria, territorio, entre otros.), con *“el fin de evitar que el agua y sus dinámicas se conviertan en amenazas para las comunidades, y de garantizar la integridad y diversidad de los ecosistemas, para asegurar la oferta hídrica y los servicios ambientales”* [8].

En cuanto al manejo hídrico, más específicamente del caudal ecológico, se trabajan por primera vez dentro de la legislación colombiana, en el proyecto de Ley 365 de 2005 (sin aprobar) en su artículo 21 definiendo el caudal ecológico como:

“los caudales mínimos que deberán mantener las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas asociados” [9].

Luego en el periodo 2006-2010 se establece un capítulo dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) sobre la gestión ambiental y de riesgos, estructurado en torno a la GIRH como un elemento importante para los ecosistemas, siendo un determinante para la ordenación del territorio y un insumo dentro de las actividades

productivas del país. A partir de esto se crean entidades como el Grupo de Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial) enfocadas a la formulación de herramientas para la gestión, como el registro de usuarios del recurso hídrico, el ordenamiento de cuencas y el sistema de información del recurso hídrico [10].

En el periodo 2010-2014 se trabajan los lineamientos y acciones para la GIRH apropiándose de elementos como el ordenamiento ambiental del territorio, el mejoramiento de la calidad del agua, el uso eficiente del recurso y el ahorro del agua; como resultado en el año 2010 se expide la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y en 2014 se asume el Plan de Ordenamiento y Gestión de Cuencas Hidrográficas (POMCA) como un instrumento de planificación, con el cual a partir de la guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas pretende mejorar la disponibilidad y calidad del recurso a partir de una propuesta con un horizonte mínimo de 10 años con su respectivo plan de seguimiento y monitoreo [10], [11].

Este proceso de planificación hídrica demanda requiere un manejo más complejo enfocado a una visión ecosistémica más desarrollada, que permita el aprovechamiento del recurso de forma compatible con el sostenimiento de las características ecológicas del mismo y que incorpore un caudal ecológico que responda a estas necesidades del ambiente, logrando un equilibrio para cada aspecto de estudio [5], [6]. Los caudales ecológicos se han ido incorporando dentro de los planes de gestión, especialmente en los POMCA, proyectos que requieran captación de agua, trasvases de cuencas, generación de energía, y además de construcción de embalses, como base para la delimitación de las características de intervención sobre la corriente.

Actualmente existe variedad de metodologías para la determinación de caudales, las cuales se clasifican en cuatro grandes ramas según las características de los datos de entrada definidos en los estudios, como lo son: métodos hidrológicos (se basa en el estudio de regímenes de flujo históricos), métodos hidráulicos (se basa en el estudio de las dimensiones de los canales de corriente), métodos de simulación de hábitat (se basa en el análisis de las particularidades del hábitat a través de su simulación) y métodos holísticos (se basa en el análisis global del ecosistema, abordando la mayor cantidad de componentes posibles) [12]; a continuación se mencionaran algunas de estas metodologías en donde se le dará gran importancia en aquellas usadas en Colombia.

MÉTODOS HIDROLÓGICOS:

Los métodos hidrológicos asumen que el régimen de caudales de un sector específico es condicionante para la subsistencia de las especies, incidiendo directa o indirectamente en su dinámica poblacional (alimentación, reproducción, conducta, etc.), por lo cual el estudio de series de tiempo y variabilidad hídrica es la base de

análisis para la obtención de caudales ecológicos [13]. Estos métodos son bastante usados por su aplicación simple, que se basa en el análisis estadístico, como el método de percentil de la curva de duración de caudales o también por medio del uso de periodos de retorno. Entre las más usadas en Colombia se encuentran:

El método de Mínimos históricos, que se aplica a partir del caudal medio diario de mínimo cinco años y máximo diez años, con los cuales se construye la curva de duración de caudales, donde el caudal ambiental para cuencas con un índice de regulación hídrica (IRH) de baja a moderada es del 75% del tiempo y para cuencas con un IRH de moderada a alta es del 85% del tiempo para un periodo de retorno de 2.33 años [14].

Los otros son el método de Porcentaje de Descuento, que corresponde al valor del 25% del caudal medio mensual multianual que es el más bajo de la corriente de estudio [15] y el método de Northern Great Plains Resource Program que consta del cálculo del percentil 90 basado en la curva de caudales medios diarios (no integra valores extremos de inundación o sequías). Este método se asemeja mucho a las especificaciones del cálculo de caudales ambientales dado por la normativa colombiana [16].

Por otro lado, podemos encontrar el método de curva de duración de flujo (FDC) que muestra el comportamiento del flujo en una sección del cuerpo hídrico a partir de valores de mínimo y máximo, esta metodología es una de las más usadas alrededor del mundo por su fácil construcción [17]; esta curva se construye con los datos de flujo diario de mínimo 20 años y muestra *“el porcentaje de tiempo durante el cual cualquier descarga seleccionada puede igualarse o superarse”* [18], de los cuales los percentiles de excedencia Q95 y Q90 se consideran de bajo flujo. Este método ha sido implementado en diversidad de ríos alrededor del mundo, como el Krishna en India o el Limpopo en Sudáfrica [18].

En 1976, el método de Tennant al estudiar 11 ríos distintos del continente americano, en los cuales observó que el porcentaje de flujo mínimo necesario para el sostenimiento de ecosistemas es similar en todos ellos, en él se determinan los flujos promedios a partir de tasas y las particularidades biológicas de los cuerpos hídricos, con los cuales se obtienen los porcentajes de flujo a partir de datos mensuales, donde el 10% del flujo promedio anual es el flujo momentáneo más corto que puede mantener la vida en el agua a un plazo de tiempo determinado y el 30% o más es el flujo necesario para el mantenimiento del ecosistema. Este método se trabaja sobre dos periodos al año (seco y húmedo), sin embargo, al momento de estudiar el método se tuvo que adaptar estos periodos de tal forma que se consideren los cambios estacionales [17], [18], [19].

Para 1980, se creó el método de Tessman, que es una versión modificada del método de Tennant, en él se determinan los datos de flujo mínimo de la misma manera que el método de Tennant, pero los datos de flujo promedio mensual se

usan en los cálculos de manera distinta en relación con el flujo promedio anual, obteniendo una mejor precisión en el caudal ecológico para diferentes escenarios. En este método, si el flujo promedio mensual es menor al 40% del flujo promedio anual se toma como caudal ecológico la cantidad de flujo promedio mensual, en cambio si el valor está entre el 40 y el 100% del flujo promedio anual, se toma como caudal ecológico el 40 % del flujo promedio anual, pero si el valor del flujo promedio mensual es mayor al flujo promedio anual se toma como caudal ecológico el 40% del flujo promedio mensual [17,18].

Estos tres métodos se implementaron en el río Göksu en Turquía, para determinar el caudal ecológico óptimo, teniendo en cuenta la presencia de la central hidroeléctrica de Anatolia; en este estudio se realizó una comparación de los resultados obtenidos y así determinar el caudal adecuado dentro del proyecto. Como resultado se encuentra que el método con el resultado más alto es el de Tessman, ya que al considerar la dinámica a nivel mensual se toma como un mejor método dentro del estudio, además con ayuda del método FDC se puede observar mejor el comportamiento de los caudales antes y después del proyecto (datos de más de 30 años o datos antes de la implementación del proyecto), para tener una mejor estimación [17].

Faschevsky en 1989 describe el método para aumentar la probabilidad de excedencia, el cual determina los límites del cambio de flujo, en donde se debe establecer un límite inferior de flujo sostenible del nivel de descarga mensual de un año donde la probabilidad de excedencia sea del 99% (se considera el óptimo para el sostenimiento ecológico) y un límite superior del 50% de probabilidad de excedencia, estos límites permiten un régimen fluvial tal que las dinámicas ecológicas sean posibles y óptimas para zonas como las llanuras aluviales [20]. Este método se usó en el Río Yaselda, el cual es uno de los mayores tributarios del río Pripyat en Ucrania, en una comparación de métodos que lograran dar luz del mejor caudal ecológico de la unidad hidrográfica, como resultado se encuentra que el método para aumentar la probabilidad de excedencia es un buen estimador, aun se deben ajustar algunas subjetividades, pero su consideración sobre los eventos de sequía e inundaciones mejoran sus datos de caudal ecológico. [20].

Para V. Smakhtin, C. Revenga y P. Döll [21], el método de descargas proporcionales se basa en la separación del flujo ambiental (Q_i -eco) como parte del flujo de un cuerpo hídrico en un momento presente (Q_i). Para ello se usa un coeficiente de proporcionalidad K_i que responde a las características de una zona en particular. Este método está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_i^{eco} = Q_i \times K_i \quad (1)$$

Comúnmente es usado en Europa occidental y no se considera un método que esté bien fundamentado, gracias a que la determinación del coeficiente de

proporcionalidad es bastante compleja, por lo cual no se presenta en otros lugares de estudio [21].

Ya en el río rojo de EEUU, H. Zamani, S. Rezapour, R. Fovargue y H. Moreno [22] desarrollaron un modelo de tres etapas conocido como red de depósitos, en el cual, cada depósito proporciona un suministro de agua para las demandas en periodos de baja afluencia, primero se considera un depósito base de horizonte temporal anual, que representa la dinámica en los embalses teniendo en cuenta sus entradas y salidas, las consideraciones sociales y los requisitos mínimos del ecosistema, luego se amplía el método a una red de depósitos, en esta etapa se incluyen los incentivos como una herramienta de conservación del recurso. Este método está dado por la siguiente ecuación:

$$S_{t-1} + I_t + Pr_t - E_t - P_t - A_t - F_t = S_t \quad (2)$$

La liberación de agua está condicionada por el almacenamiento dentro del depósito (S_t) y el nivel de flujo disponible aguas abajo en un tiempo determinado (t), del cual cada cierto momento se tendrán entradas al depósito por agua superficial y subterránea (I_t), estos datos se obtienen por datos históricos de afluencia en el cuerpo hídrico, a los cuales se agregan estimaciones de entrada (S_{t-1}) para un mejor resultado. Además, se tiene en cuenta la precipitación en el cuerpo hídrico (P_t), la pérdida por evapotranspiración (E_t), por infiltración (P_t), extracción para usos sociales (A_t) y uso de agua para el ecosistema (F_t); este método se aplicó en 38 reservorios del río rojo para mejorar el manejo del recurso hídrico [22].

Para J. Alcázar y A. Palau [22], se implementó el método Environmental Water Requirements (EWR) para estudios de cuerpos hídricos en el Mediterráneo, basado en los flujos base y los flujos rápidos, a partir del régimen de caudales diarios se determinan los límites del flujo (superior e inferior) como condicionantes para el requerimiento mínimo de agua de los peces, junto con los niveles máximos que determinan las inundaciones en humedales y vegetación ribereña. Todo enfocado en objetivos hidrológicos y de gestión ambiental establecidos por los expertos para el cuerpo hídrico de estudio. El método EWR total se obtiene de la suma de los límites superior e inferior, donde el límite inferior varía entre diferentes estados de conservación (bueno, regular, malo) y ambos límites varían según el área de estudio, este método se adapta bastante bien a diferentes condiciones y permite dar un mejor análisis de variación de caudales.

En I. Alomía y P. Carrera [23], se implementó el método de flujo básico para los ríos Andinos del Ecuador, que proporciona un régimen de flujo ambiental acorde a la variabilidad espacial y temporal que se asemeja al flujo natural de la zona de estudio, siendo este factor es importante para establecer medidas de gestión, además, es un método que ha ganado reconocimiento en España y es aplicado en numerosos tramos de los ríos españoles. Para su cálculo se hace uso de los flujos medios diarios, de los cuales se realiza un pronóstico a partir del cálculo de

promedios móviles que aumenta los intervalos de datos consecutivos (identifica el valor mínimo de cada intervalo), su incremento más alto entre intervalos de flujos promedios mínimos “*determina el final del período de flujo bajo más largo y define el valor Q_b para cada año*” [23].

En 2003, Hughes y Hannart desarrollan un método hidrológico de escritorio aplicado en los ríos sudafricanos, el cual define 4 tipos de ríos, que son: A con hábitats no modificados, B con pocas modificaciones, C con modificaciones moderadas y D con modificaciones que han causado pérdidas sustanciales. Este método supone que el caudal ecológico disminuye cuando la variabilidad de flujo asciende y aumenta cuando la contribución de flujo base también lo hace. Con lo anterior, el promedio del coeficiente de variación de flujos mensuales (VF) para el periodo húmedo y el periodo seco (medida de variedad de flujo), se divide por el índice de flujo base (BFI) para obtener el índice CVB, el cual sirve para la predicción del caudal ecológico [24]:

$$CVB = \frac{VF}{BFI} \quad (3)$$

$$BFI = \frac{VBF}{WAR} \quad (4)$$

Donde, VBF es el volumen de flujo base y WAR es el volumen de escorrentía total para un año [24].

Para M. Reza, S. Zolfaghari, C. Gelss y Z. Darvari [20], se implementa la metodología SB3 para la cuenca del río Tajan en Irán, que define las necesidades de flujo en valores máximos y mínimos mensuales para considerar las condiciones de mantenimiento y sequía. Al inicio se realiza la simulación de datos en el modelo WRAP que parte de los flujos de corriente naturalizados (en ausencia de actividades de gestión), luego el modelo calcula los flujos regulados y no apropiados que reflejan el escenario del desarrollo y uso del recurso para el sitio de estudio.

Más tarde, en el año 2006 Smakhtin y Anputhas desarrollaron el Global Environmental Flow Calculator (GEFC), una calculadora que permite el cálculo de los requisitos de flujo ambiental a partir de FDC con 17 percentiles de estudio que dan una mejor visión de la dinámica de flujo a lo largo del tramo, además, logra abarcar 7 tipos de escenarios de estudio que van desde el estado natural de un cauce, hasta cauces alterados ecológicamente [25].

El método IHA se usó en el año 2015 para la cuenca transfronteriza (EEUU y México) Río Grande/Bravo como un esfuerzo para una gestión integral del recurso [26], este método está basado en análisis probabilísticos de datos de flujo históricos, en este se tiene en cuenta los periodos donde el régimen hidrológico no tiene afectaciones por actividades antropogénicas, proporcionando las condiciones óptimas del cuerpo hídrico; con base a lo anterior (condiciones previas y posteriores a la intervención), se construye un hidrograma que permite un mejor análisis de

ambos periodos de estudio y se incorporan dos inundaciones de flujo máximo ubicados en los periodo representativos de flujo máximo, partiendo del análisis del hidrograma se obtienen los valores de caudal ecológico del área.

En los últimos años, en la dificultad de obtener series de tiempo largas (más de 10 años), es decir, que sean representativos dentro del análisis, los esfuerzos se concentraron en la búsqueda de modelos de aprendizaje que ayudaran en la simulación del comportamiento de la dinámica hídrica, teniendo como base los datos disponibles como una alternativa para lograr la aplicación de las metodologías de manera efectiva. Dentro de estos encontramos modelos como la transformación de wavelet de Morlet, el modelo de redes neuronales artificiales (ANN), el modelo WAVELET híbrido (W-ANN) y el modelo Random Forest, que logran describir mejor el comportamiento de caudales históricos, comparados con métodos convencionales [25]. Al completar las series de tiempo del período de análisis, la implementación de las metodologías ya es posible.

En Colombia, estos métodos se usan frecuentemente, especialmente el método de FDC, debido a sus bajos costos, además de que su escala de uso puede ampliar el rango de implementación, por ejemplo, en la Cuenca del Río Quindío, que trabajo el caudal ecológico, en base a la comparación de metodologías hidrológicas como una estrategia para obtener mejores resultados que concordaran con las dinámicas hídricas del área [27].

Estos métodos se han ido modificando y complementando con diferentes herramientas de gestión, que permitan la adaptación e implementación a los diferentes escenarios de estudio, aun así, se presentan dificultades para el buen pronóstico del régimen fluvial, su variabilidad y condiciones particulares, que han hecho de esto una tarea ardua y que obliga a la formulación de modelos más robustos que impliquen cada vez más variables de estudio. Los métodos como el FDC, el método de Tennant y el método de Tessmann, son los más usados por su fácil implementación y bajo costo, sin embargo, estos métodos no hacen consideración de la variabilidad de flujo a lo largo del tiempo y sólo formulan un valor de caudal ecológico para el área de estudio (no se tiene un análisis espacial ni temporal), a diferencia de los demás métodos, que a pesar de que aún les falta considerar ciertas variables, tiene un mejor análisis de dinámica fluvial en el tiempo.

MÉTODOS HIDRÁULICOS:

Estos métodos asumen que los parámetros hidráulicos de un cauce, como lámina de agua, profundidad y radio hidráulico, limitan y condicionan la biota acuática en cuanto a su conducta, reproducción, alimentación, entre otros; la evaluación por este método se realiza por secciones transversales a lo largo del tramo del cauce, donde se relacionan las variables hidráulicas con la magnitud de descarga (variables importantes para la subsistencia de las especies) [28].

Uno de ellos es el Análisis Del Hábitat y Análisis Por Transectos, que evalúa los parámetros básicos de hábitat fluvial (velocidad, profundidad, granulometría del sustrato, etc.), cada dato se sistematiza junto con parámetros hidrológicos y bióticos de las secciones transversales, que ayudaran a la caracterización y evaluación de habitabilidad de las secciones estudiadas, todo en función al caudal que debe circular en ellas; estos estudios se deben hacer en diferentes secciones transversales del a lo largo del cauce y en diferentes épocas del año para mayor representatividad [24].

Otro método es el de Perímetro mojado, que se basa en la relación entre la parte mojada de la sección del cauce y el hábitat piscícola, así el caudal se limita por el lecho, la lámina de agua y los bancos laterales; la relación entre el caudal y el perímetro mojado es directamente proporcional, a mayor caudal se tiene un mayor perímetro, y con ello un espacio de hábitat mayor para los peces. Además, tiene presente variables de velocidad, profundidad y sustrato en cada sección a lo largo del tramo de estudio, que ayuda en la caracterización del caudal, mostrando los lugares con mayor sensibilidad frente a variaciones; los datos de perímetro mojado y velocidad se representan gráficamente, donde se identifica el punto de inflexión (el crecimiento se detiene) que determina el caudal mínimo o caudal ecológico [13], [24]. Entre los métodos hidráulicos es uno de los más usados, especialmente en EEUU, para los cuerpos hídricos intervenidos, que poseen una geomorfología que permite un cálculo de dimensiones más efectiva [24].

Para 1967, se desarrolló el método de la región 4 U.S.F.W.S por Herrington y Dunham, para la especie salmónidos en cuerpos de agua de montaña en Utah, Idaho y Wyoming en Estados Unidos y fue modificado en 1975 por Dunham y Collotzi para un mejor análisis. En este método se realiza la caracterización hidráulica de un cuerpo hídrico (profundidad, velocidad y perímetro mojado), previamente estudiado a través de fotografías aéreas y mapas topográficos, en relación de las condiciones habitabilidad de las especies, con estos resultados se construye la curva de hábitat en función del caudal (flujos mínimos), del cual se considera un porcentaje de hábitat óptimo, como el 100% del caudal de estiaje [29]

Cochner y White desarrollaron en 1975 el método de Idaho para las cuencas del estado de Idaho en E.E.U.U. En este se evalúa la pérdida de hábitat por la disminución de caudal, teniendo en cuenta las condiciones necesarias por las especies indicadoras, a partir de áreas críticas que se definen para condiciones de circulación, crecimiento y reproducción de la especie. Además, se hacen mediciones de profundidad, velocidad y tipo de sustrato de las áreas por secciones transversales. Los requerimientos de caudal ecológico se determinan al comparar los datos obtenidos de caudal, geometría del cauce y condiciones de hábitat de las especies evaluadas [29].

En 1995, se desarrolla el método vasco para los ríos del País Vasco por Decampo & García de Bikuña, este método se basa en el mantenimiento de la diversidad

ecológica, medidas por el número de taxones de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos. Aquí se establecen las relaciones entre la superficie del cauce, caudal, profundidad, velocidad, entre otros, y el número de taxones presentes en la sección. El caudal ecológico está determinado por el orden fluvial del cauce y de la media geométrica de los caudales registrados en las estaciones de aforos durante el periodo de estudio (mínimo tres años); *“el valor más bajo que puede alcanzar el caudal aconsejable, se denomina caudal ecológico mínimo; oscila entre un 46% para los cauces de orden 1 y un 30% en los cauces de orden 5 a 6. Los caudales se calculan para cada mes”* [30].

Estas metodologías presentan bastantes dificultades en la obtención de las variables hidráulicas, especialmente en cauces de gran magnitud, por lo cual sus estimaciones se vuelven complejas. Además, algunos de ellos se construyen a partir de estimaciones simples que no permiten identificar el caudal adecuado a las necesidades de las especies y tampoco hacen consideración de las modificaciones futuras en la geomorfología del lecho (se considera estable y uniforme en el tiempo). En Colombia, estas metodologías se implementan muy poco, gracias a las características topográficas de la mayoría de cuencas dentro del territorio, que no permiten establecer dimensiones hidráulicas correctas para el estudio [13].

MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE HÁBITAT:

Las metodologías de simulación de hábitat se basan en la relación entre la biota sus condiciones hidráulicas, climáticas, hidrológicas, estructurales y geomorfológicas, estos parámetros posibilitan la construcción de escenarios para establecer el caudal óptimo que mantenga las poblaciones, como un índice representativo de su interacción con sus condiciones mínimas [31].

En 1973, Wesche desarrolló el método WRRI Cover para la trucha de ríos de montaña en EEUU, este método se basa en coberturas y su relación con las características particulares cada una de ellas en las secciones transversales del cauce; en cada sección se mide el sustrato, la longitud y amplitud de la cobertura y las características hidráulicas de profundidad y ancho del curso de agua. El caudal se establece entre el 10 y el 100% del caudal medio, considerando un mínimo de cuatro velocidades de flujo [24]. Para el cálculo de la cobertura para cada flujo se hace uso de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Lm}{T} (FP_m) + \frac{Acb}{A} (FP_{cb}) \quad (5)$$

Donde, Lm (m) es la ampliación de la cobertura de los bancos en la sección, T (m) es la longitud del tramo, FPm (m) es el factor de preferencia para cubrir las márgenes, específicas para cada fase del ciclo de vida de la trucha, Acb (m²) es el

área de la sección donde la profundidad del flujo es mayor, A (m²) es el área total del tramo objeto de estudio teniendo en cuenta el flujo promedio anual o flujo de mediados y finales de verano, FP_{cb} es un factor de preferencia para las áreas de los bloques de grava y para cada fase específica del ciclo de vida de la trucha y C es la cantidad de cobertura de la sección en estudio. Para la determinación del caudal ecológico se construye la curva de cobertura en función del caudal, mostrando la sensibilidad ecológica entre la cobertura y la biomasa de peces, se recomienda escoger el caudal que permite una menor pérdida de cobertura en el ecosistema. Este método es usado en ecosistemas bastante específicos, en estudios amplios resulta bastante costoso y se necesita de bastantes adaptaciones para la especie de estudio, por lo cual solo se ha implementado en ecosistemas de EEUU como en el río colorado para la trucha asesina o “cutthroat” [24].

En 1996, se desarrolla el método IFIM-PHABSIM por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre, basado en estudios que se llevaron a cabo por 10 años en 11 ríos en Montana, Nebraska y Wyoming (E.E.U.U) para las especies de salmónidos (especie de importancia en el país), que dieron luz de la relación entre los parámetros físicos del cauce y la disponibilidad de hábitat para una especie [24]. Este método establece los caudales ambientales como los que aseguran el estado ecológico óptimo determinado por las aguas superficiales (IFIM), evaluando el efecto de la variabilidad de caudales sobre el hábitat acuático; para este método se usa el modelo PHABSIM ("Physical Habitat Simulation System"), que se compone de varios modelos para simular las condiciones hidráulicas, la simulación de hábitat y mostrar la relación de hábitat total y el caudal a través de curvas de preferencia de hábitat, que expresara el caudal necesario para mantener la vida acuática [24], [32]. Este método es uno de los más usados alrededor del mundo, por su flexibilidad y adaptación a diferentes escenarios de estudio y da una mirada más específica de las necesidades de los cauces a partir de especies indicadoras de hábitat [17], [30].

W. Chen y J. Olden [33], se implementaron el método de densidad de especie, donde estima el caudal ecológico a partir del análisis de las regresiones de la estimación de densidad anual de las especies y las series de tiempo de flujo diario del año anterior (covariable para la regresión), donde se observe la relación entre los caudales y la presencia de biota en la cuenca; para su cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$Densidad_1 = \beta_0 + \sum_{t=1}^{365} \beta_1(t) \times Flujo_i(t) + \varepsilon_i \quad (6)$$

Donde, “Densidad i” es la densidad de la especie muestreada en el año i, “Flujo i (t)” es la descarga diaria medida en un tiempo t (que va del día 1 al 365) en el año i, “Bo” es la densidad promedio estimada para la especie, “b1 (t)” es el aumento unitario estimado en la densidad de especies por aumento unitario en la descarga en el día calendario t, y “Ei” es el modelo residual asociado con el año i. Con ello se analizan las distancias entre las relaciones de flujo y ecología (gráfica de densidad versus caudal), cuantificando su similitud y su capacidad de transferibilidad

potencial presente en la relación entre el contexto ambiental (flujo) y las especies dentro de él, el caudal ecológico se determina como el flujo que mantiene una mejor densidad de especies [33]. La implementación de este método es bastante compleja, es necesario el monitoreo del flujo y de las series temporales de especies de varias décadas, dentro del estudio se hizo en las cuencas del suroeste de EEUU (Río Virgin, Río San Juan, Río Pecos, y el Río San Pedro) [33].

En 2014, se implementó el método de relación flujo-ecología en la cuenca del río Tennessee, donde examinaron la relación entre el flujo y las métricas de peces para la cuenca de estudio. Este método se ha utilizado diferentes modelos para el flujo de cuenca y el área de hábitat óptima para las especies acuáticas, y con los datos obtenidos se hace un análisis de presión respuesta entre la variabilidad hidrológica y el grado de habitabilidad de la especie a estudiar [34]. En Colombia, este método se utiliza como parte de metodologías combinadas propuestas (MAVDT, Universidad Nacional de Colombia, IDEAM, entre otros.), un ejemplo, está en la cuenca del río Chinchiná que compara algunas metodologías propuestas en Colombia, donde se usa la curva de relación flujo-ecología como base para la determinación de caudal ecológico en el año 2005 para especies de peces, vegetación riparia, perifiton y macroinvertebrados [35], [36].

Estas metodologías son más flexibles frente a las condiciones de estudio y su capacidad de adaptación es bastante; sin embargo, son metodologías bastante criticadas por su baja validación y su planteamiento, ya que varias de estas estiman los caudales con métodos simples que se comparan con el comportamiento ecológico, subestimando los caudales ecológicos. Por otro lado, a pesar de su flexibilidad, aún no se logra aplicar en cursos de agua para zonas semiáridas y ríos estacionarios, por sus bajos caudales y alta morfología, dificultando la caracterización [31]. En Colombia, la metodología IFIM-PHABSIM es una de las más usadas, por ejemplo, para el río Magdalena a la altura del canal del Dique, donde se realizó la optimización y modelación de datos hidráulicos que se implementarían para la metodología y en el río Palacé del departamento del Cauca [36].

MÉTODOS HOLÍSTICOS:

Estas metodologías identifican características importantes dentro de los flujos hídricos que puedan alterar o modificar su régimen, teniendo esto en cuenta se pueden generar medidas de gestión que mantengan la integralidad del ecosistema, trabajando más aspectos y variables de estudio en su desarrollo [27].

Uno de estos métodos se trabajó en México a partir del planteamiento de objetivos ambientales de las unidades de estudio, con los cuales se trabajará la gestión de la misma. Para su evaluación se estiman la escorrentía media anual (MAR), el volumen ordinario total (TOV) y el volumen total del régimen de inundación (TVFR) a escala anual a partir de los flujos estacionales (descarga promedio) y los atributos del régimen hidrológico para los dos últimos respectivamente; con estos datos se

determina el volumen de reserva final (FRV) a partir de las estimaciones y se calcula el balance hídrico anual de la cuenca para observar la disponibilidad hídrica que tiene. Para el cálculo del TOV se tiene en cuenta la variabilidad del registro histórico, multiplicando el flujo (OVR) por cada periodo húmedo (W), normal (N), seco (D) y muy seco VD) y por su frecuencia de ocurrencia de caudal (f), a partir de la siguiente ecuación [37]:

$$TOV = (OVR_w \times f_w) + (OVR_N \times f_N) + (OVR_D \times f_D) + (OVR_{VD} \times f_{VD}) \quad (7)$$

Para el TVFR se obtiene con la suma de cada magnitud de inundación (V) para cada categoría (I, II y III), por su respectiva duración (d) y frecuencia de ocurrencia (f), según la ecuación. (7) [37]:

$$TVRF = (V_{al} \times d_{al} \times f_{al}) + (V_{all} \times d_{all} \times f_{all}) + (V_{alll} \times d_{alll} \times f_{alll}) \quad (8)$$

Por último, se hacen comparaciones con las condiciones de habitabilidad del área (objetivos ambientales) y los resultados obtenidos de FVR. Este estudio se implementó en el norte de México en los Marismas Nacionales, donde los objetivos ambientales ayudaron a una mejor delimitación de usos para la determinación del caudal ambiental, haciendo uso de datos de mínimo 20 años [37].

Otra de los métodos es la respuesta aguas abajo a la transformación de flujo impuesta (DRIFT), basada en la discusión de escenarios. Este método se compone de cuatro estudios, que son: un estudio biofísico (datos recopilados del ecosistema), un estudio sociológico (efectos de la sociedad), un desarrollo de escenarios (discusión sobre los escenarios planteados) y un estudio económico (se evalúan los gastos de las operaciones que modifican en cauce); con todas estas consideraciones, se conforma una mesa de expertos que discuta y considere cada uno de los estudios planteados y formulen las necesidades específicas que determinarán el caudal ecológico [17].

En el Río Amarillo en China [38], se planteó un método que permitiera establecer caudales ambientales para los estuarios costeros, denominado X2, en este método se relaciona el flujo de entrada y los rangos de salinidad necesarios para el ecosistema. Para ello, se eligen tres tipos de pastos marinos sensibles a cambios de salinidad como un bioindicador del ecosistema que ayudan a determinar la entrada de agua dulce al estuario, también se usa la captura de peces como punto de referencia (relación cosecha y flujo de entrada) y objetivos ambientales planteados para el ecosistema. Los caudales ecológicos se dividen en consuntivos y no consuntivos, que se asignan a partir de los objetivos ambientales propuestos, de estos para establecer el equilibrio entre la salinidad y el transporte de sedimento y nutrientes se usan los caudales no consuntivos. Estos parámetros se trabajan en la siguiente ecuación:

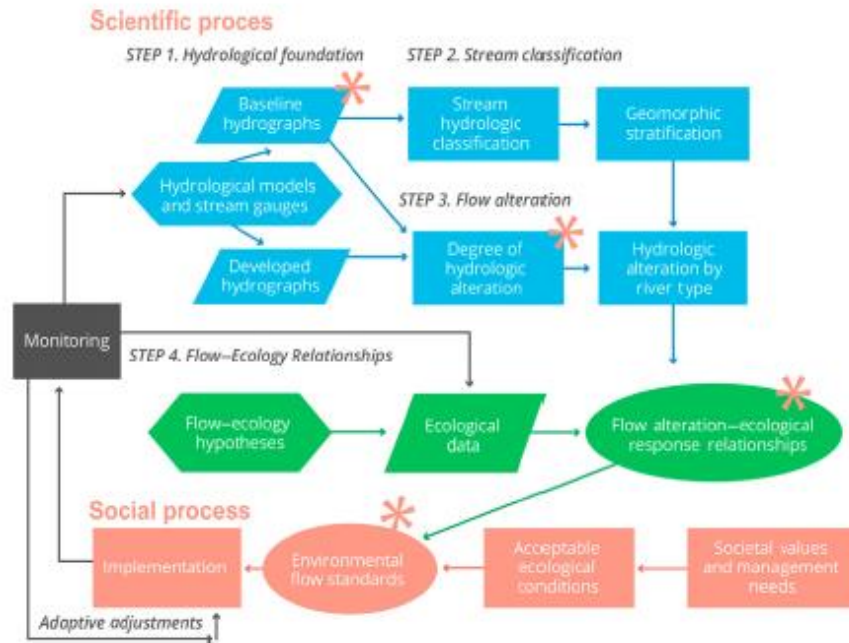
$$W_a = \sum_{i=1}^n W_i + \text{MAX}(W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jm}) \quad (9)$$

Donde, W_a son flujos ambientales en el estuario (m³), $\text{MAX}(a, b)$ denota el máximo de variables a, b , W_i son los volúmenes de agua de consumo (m³), W_j son los volúmenes de agua no de consumo (m³), n y m indican el número de objetivos de los volúmenes de agua consuntivos y no consuntivos, respectivamente.

En 2010, se formaliza el marco ELOHA que comprende diferentes métodos y enfoques para la evaluación ambiental del agua, el cual consiste en un proceso de pasos que ayudan a la construcción hidrológica, clasificación de corrientes, consideraciones geomórficas, asignación de corrientes alteradas que impactan flujos de referencia (escenarios), ecología de flujo y alteración de flujo, relaciones de respuesta ecológica y consideraciones sociales que impliquen los objetivos ambientales establecidos [36],[39].

ELOHA trata de relacionar cada uno de estos factores que ayudaran a establecer los efectos de la regulación hídrica sobre la biota, para lo cual determinan límites de aprovechamiento (caudal ecológico). En Colombia se ha implementado por la Organización no gubernamental The Natura Conservancy (TNC) para cuencas como el río Nare en Antioquia. Este método tiene tres procesos por los cuales se implementa, un primer proceso científico, donde se recopila y analiza la información requerida (hidrología, ecología), un segundo proceso social, donde se identifican las especies de flora y fauna que generan la economía para las comunidades y se establecen los posibles límites de alteración para que adicionalmente se dé el proceso de monitoreo y evaluación para el ajuste y cambios en los procesos anteriores [4], [36].

Figura 1: Proceso científico, método ELOHA.



Fuente: [4]

Otro de los métodos holísticos es el método propuesto por el IDEAM en la guía metodológica para la estimación de caudal ecológico, el cual debe usarse para la implementación de proyectos dentro del territorio. Para su implementación se debe estimar el régimen hidrológico natural de la cuenca, luego calcular las métricas de interés ecológico como el caudal de conectividad longitudinal que permite identificar las barreras hidráulicas condicionante para la biota y el caudal de conectividad lateral que se asocia al transporte de sedimentos a lo largo de la corriente; después se hacen las respectivas estimaciones morfométricas de interés ecológico (tiempo-caudal, caudal de banca llena que permite parametrizar la propiedades geométricas de la cuenca), luego se identifican y caracterizan los eventos de interés ecológico del régimen natural, para finalmente generar la propuesta de aprovechamiento de caudales, donde se establece el caudal ecológico [40].

En el año 2017 [41], se implementa el método PVA para los ríos de la cuenca del amazonas en Brasil con objetivo de reservorio para el proyecto de generación energética (río Tocantins, río Araguari y el río Amapá que corresponden al área de influencia del proyecto), que integra los procesos hidrológicos con un enfoque participativo (taller especializado) que permitirá adaptar la metodología al área de estudio, teniendo en cuenta los actores sociales que intervienen en él. El PVA trabaja tres indicadores, que son: el estrés hidrológico (E_h), el valor ecológico y cultural (Vec) y la dependencia económica De , que se ven representados en la siguiente ecuación:

$$PVA = E_h \times Vec \times De \quad (10)$$

A cada una de las variables se le asigna un valor a partir de la evaluación cualitativa en tres niveles (bajo / medio / alto) y se les atribuye valores de 1, 2 o 3, respectivamente. Los talleres de participación se llevaron a cabo, con el fin de evaluar la concepción que tienen los actores sociales sobre la unidad Hidrográfica y así se permitiera considerar ciertas características para la determinación del caudal ecológico. Luego una mesa de especialistas debe analizar las variables de estudio y los resultados del taller de participación para determinar el caudal ecológico, logrando resultados positivos al tener en cuenta la concepción que tienen las comunidades sobre la cuenca. Una de sus ventajas es la incorporación de variables cualitativas a bases cuantitativas, permitiendo mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes cuencas hidrográficas, especialmente la cuenca del amazonas que abastece variedad de comunidades en Brasil, donde esta herramienta participativa posibilitó una visión más amplia de los usos dentro de la cuenca [41].

En 2019, [42] plantea un método basado en Aprendizaje de Máquina o Machine Learning que trabaja con tres modelos de los cuales se obtendrán los datos de estudio y seis escenarios probables (condición existente, futuro sin proyecto, conservación de la biodiversidad, aumento de la agricultura, mejora de la calidad del agua y Condiciones previas al asentamiento) en los cuales se evaluaron los tres modelos. El primer modelo se encarga del tratamiento hidrológico, que sirve de indicador de respuesta ecológica, además, trabaja sobre siete estadísticas de flujo diario en un año que son “la media, el coeficiente de variación, la asimetría, la curtosis, el coeficiente de correlación de retardo automático autorregresivo, la amplitud de la señal estacional y el cambio de fase de la estación señal”, las cuales se trabaja en el periodo de toma de muestras de peces que evalúan los cambios relativos como medidas de impacto ambiental. Para una mejor representatividad, las siete estadísticas se normalizaron para escenario propuesto (uso de la tierra), lo que mejora las comparaciones a escalas y dimensiones diferentes.

En el segundo modelo es de carácter deductivo tradicional y trabaja relaciones flujo-ecología, donde realiza análisis dimensionales y regresiones lineales. Para el análisis dimensional, se trabajan problemas con variables adimensionales que muestren los procesos tanto físicos como ecológicos en el tiempo y el espacio, variables que irán descartando hasta obtener parámetros adimensionales; cada parámetro seleccionado debe describir de manera eficaz la riqueza de las comunidades (R) en la cuenca y se deben elegir a partir de “las relaciones ecológicas hipotéticas” de la cuenca y una “función de escala general” representada por la siguiente ecuación [42]:

$$R = f(A, W, D, Q_m, g) \quad (11)$$

Donde, A es el área de drenaje, W es el ancho del canal, D la profundidad del canal, Q_m el caudal de descarga y g la constante de gravedad, parámetros que

representan “las relaciones ecológicas hipotéticas” planteadas para el estudio. Para la reducción de variables se propone el uso del teorema π de Buckingham, donde se reducen seis variables (dos dimensiones) a solo cuatro de carácter adimensional. para el estudio se usaron como longitud el área de drenaje (A) y como tiempo la aceleración derivada de la gravedad (g) [42].

$$\pi_1 = A^a g^b R^c \quad \pi_2 = A^a g^b Q_m^c \quad \pi_3 = A^a g^b W^c \quad \pi_4 = A^a g^b D^c \quad (12)$$

Cada parámetro se combinó y reordeno para obtener la siguiente ecuación:

$$\pi_1 = R \quad \pi_2 = \frac{Q_m^2}{gA^{2.5}} \quad \pi_3 = \frac{W}{A^{0.5}} \quad \pi_4 = \frac{D}{A^{0.5}} \quad (13)$$

$$\ln R = \beta_1 + \beta_2 \ln \left(\frac{Q_m^2}{gA^{2.5}} \right) + \beta_3 \ln \left(\frac{W}{D} \right) + \beta_4 \ln \left(\frac{Q_m^2}{gW^2D^3} \right) \quad (14)$$

Donde, β_1 - β_4 son constantes que se ajustaron empíricamente con los datos observados, el primer término representa la descarga del río determinada por el área de drenaje, el segundo término corresponde a la relación entre el ancho y la profundidad del cauce y el último representa la riqueza de peces de la comunidad de peces (base del análisis) [42].

El modelo tres es de carácter inductivo de Machine Learning (random forest), que ayudará en el desarrollo de las relaciones flujo-ecología, donde se predice la relación con los resultados de los dos modelos anteriores (caracterización hidrológica y la riqueza de las comunidades de peces) a partir de árboles de regresión potenciados [42].

Las metodologías holísticas a pesar de su carácter integral, aún no se obtiene un método que comprenda todos los aspectos que componen una unidad hidrográfica. Un aspecto a resaltar es la integración del aspecto social y económico en algunas de estas metodologías y da muestra de la interacción de las poblaciones con el recurso; además, la mayoría de ellas trabaja el análisis a través de una mesa de expertos tomadores de decisiones que permite una mejor visión del área de estudio.

DISCUSIÓN

En este sentido, la aplicación de metodologías para la estimación de caudales ecológicos ha sido un reto alrededor del mundo, especialmente en Colombia que posee complejos sistemas hídricos y particulares ecosistemas dentro del territorio, obligando a una reformulación y/o combinación de métodos que posibilite un mejor resultado. En las unidades hidrográficas colombianas la implementación de estos métodos se centran generalmente en el análisis de régimen hidrológico, condiciones hidráulica y condiciones mínimas de hábitat, como un ejemplo, tenemos la estimación de caudal ecológico para la cuenca del Río Quindío, con un periodo de

estudio de 10 años (1995-2004), a partir de la comparación de los métodos de FDC, Q95 y NGPRP [27], también tenemos la aplicación del método de Tennant para el río Tuluá realizando una simulación de caudales en el software HEC RAS y completar la serie de tiempo de 1975-1995 [43], o el uso del método IFIM-PHABSIM que se usó en el estudio para la determinación de caudal ecológico para el río Sisga a partir del macroinvertebrado Chironomidae, alimento base de la especie *Eremophilus Mutisii* [44].

A pesar de los esfuerzos por la selección de un método que representara la dinámica hídrica del cauce, el caudal establecido aún es muy débil, su estimación no correlaciona la hidrología con las variables bióticas, hidráulicas y mucho menos socioeconómicas, las metodologías seleccionadas únicamente tienen en cuenta caudales mínimos como limitante de las condiciones bióticas, sin conocer verdaderamente los requerimientos de la cuenca (vegetación riparia ribereña, la zona hipúrica del vaso y los pulsos de inundación) [45], [46].

Para Colombia la determinación de caudales ecológicos es bastante complejo, aún con la diversidad de metodologías propuestas, la incertidumbre científica persiste, los patrones naturales de variación temporal de los flujos, la poca disponibilidad de datos y las particularidades de los ecosistemas impide establecer un método que se adapte completamente a estas características. Así, los expertos tienen el reto de definir, ajustar y agregar las condiciones necesarias que posibilite la aplicabilidad a nuestras condiciones. Para ello se debe tener en cuenta escalas espaciales y temporales correspondientes a las unidades de estudio, facilitando la identificación de unidades de gestión prácticas.

Esta clasificación puede establecerse a nivel de subzonas hidrográficas y en los niveles I y II de unidades hidrográficas según la clasificación del IDEAM, estas escalas se proponen por su facilidad de estudio, su tamaño facilita la obtención de información para la aplicación de métodos y el análisis de ecosistemas, ya que a una mayor escala es bastante complejo la determinación de variables de estudio y la sistematización de información, así como la toma de muestras. Es necesario integrar diferentes tipos de métodos que permita obtener una visión más completa del estado de la cuenca y sus necesidades para el medio biótico, y establecer objetivos ambientales que delimiten el análisis y las necesidades de las corrientes, donde se considere las condiciones mínimas de habitabilidad y las diferentes demandas de uso.

De esa manera, se proponen los métodos hidrológicos para el estudio a escala de subzonas hidrográficas, por su facilidad de implementación y bajos costos, estas metodologías tienen un enfoque simple de tratamiento de datos de serie de caudales con los cuales se deducirá el caudal ecológico, en esta escala de estudio es bastante pertinente su implementación; sin embargo, la poca disponibilidad de datos históricos dificulta la estimación, por lo cual se debe recurrir a modelos de

simulación que ayuden a completar las series temporales para así obtener resultados eficaces y rápidos [31].

Para el caso de los niveles II y III de unidades hidrográficas según la clasificación del IDEAM se proponen los métodos de simulación de hábitat, siendo el más aconsejable IFIM-PHABSIM al trabajar a partir de un marco conceptual y analítico completo con enfoques ecohidráulicos y eco hidrológicos, que permiten cuantificar la cantidad y calidad de hábitat acuático que usan la especie bioindicador establecida bajo múltiples escenarios estructurales o de regímenes hidrológicos, para tener un mejor análisis de la respuesta ecológica frente a las alteraciones (implementación de proyectos) [31], [47]. Este método es sumamente flexible y adaptable a cualquier río, sin embargo, son más costosos y dispendiosos a la hora de su implementación por lo cual la escala del área de estudio es menor, posibilitando la obtención de datos fácilmente, además, al ser enfocado para proyectos de implementación, los costos serían asumidos por las empresas dueñas de la actividad productiva [31]. Es importante enfatizar en los estudios de relación ecológica dentro de los proyectos productivos, que permitan prevenir y/o mitigar futuros impactos, como muestra de su importancia encontramos el proyecto de producción energética Hidroituango, donde su mala gestión del recurso provocó aguas arriba el aumento de la zona inundable (aumento del riesgo en la zona) y aguas abajo la disminución de especies por bajo caudal [48]. Cabe la pena aclarar que actualmente se trabaja para que esta metodología sea más accesible con la construcción de curvas de idoneidad de hábitat de organismo propios de los ríos colombianos.

Por otro lado, en esta misma categoría se propone la utilización de métodos holísticos como herramienta para la gestión del recurso hídrico y ordenamiento del territorio como en la formulación de POMCAS, siendo el más aconsejable el método basado en machine learning y el método propuesto por el IDEAM en la guía metodológica de estimación de Caudales ecológicos, estos métodos consideran condiciones hidrológicas, hidráulicas y ecológicas para la determinación del caudal, asimismo, presenta predicciones más completas obteniendo estimaciones de caudal mejores, también se debe implementar con un enfoque participativo, donde integre lo actores sociales que puedan dar una mejor visión del área de estudio y brinde herramientas de gestión que puedan dar respuesta a los escenarios particulares que se presenten, es necesario implementar una mesa de especialistas tomadores de decisiones que analicen el caudal ecológico obtenido por el método y las condiciones sociales resultantes de las actividades participativas que permitan un mejor ajuste del caudal (este apartado social puede trabajarse desde la participación comunitaria anexa al POMCA o la herramienta de ordenamiento) [31].

En resumen, la Gestión Integral del Recurso Hídrico es un proceso complejo, que ha ido evolucionando en Colombia y reforzado a través del tiempo, la gobernanza del agua ha ido en aumento y los esfuerzos por su ordenamiento se está evidenciando cada vez más; sin embargo, la falta inversión en estudios y obtención

de datos es bastante baja, haciendo más difícil la determinación de condiciones de conservación, especialmente en materia de caudales ambientales, es necesario un fortalecimiento institucional que apoye la implementación de más y mejores estudios ambientales en el país. Por otro lado, se debe reforzar y avanzar hacia un marco normativo sólido en materia de gestión ambiental, que provea más herramientas y técnicas para determinar condiciones óptimas para el recurso, y permita unas bases sólidas para la gobernanza del agua, además, de integrar actores sociales, estamentos técnicos y científicos (Universidad, empresas y corporaciones) que aporten en la elaboración de planes estratégicos de conservación.

REFERENCIAS

- [1] ONU-Agua, “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019”, UNESCO, 2019
- [2] Y. Martínez y V. Villalejo, “Caudal ambiental: herramienta ecohidrológica en la gestión de los recursos hídricos”, *Ingeniería hidráulica y ambiental*, vol. XLI, pp. 56-70, 2020.
- [3] J. Diez, “Evaluación de requerimientos ecológicos para el diseño de regímenes ambientales de caudales fluviales”, *Revista de ingeniería*, vol. 28, pp. 15-23, 2008.
- [4] N. Poff, R. Tharme y A. Arthington, *Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies*, Water for the environment, 2017.
- [5] Y. Carvajal, “Dimensiones para usar metodologías en la estimación de caudales ambientales en Colombia”, *Respuestas*, vol. 2, pp. 34-46, 2010.
- [6] J. Diez y L. Burbano, “Tecnología ecológica para la planificación de cuencas hidrográficas: regímenes caudales ambientales”, *Facultad de ciencias agropecuarias*, Vol. 5, pp. 20-31, 2007.
- [7] ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Gobernanza del agua. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/gobernanza-del-agua>
- [9] Proyecto de Ley 365 de 2005, 16 de junio, por la cual se establecen medidas para orientar la planificación y administración del recurso hídrico en el territorio nacional.

[10] IDEAM. Administración del recurso hídrico en Colombia. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/instrumentos-de-planificacion-y-administracion-del-recurso-hidrico>

[11] Minambiente, “Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas”, Guía Técnica, Bogotá D.C., 2014.

[12] J. Alcázar y A. Palau, “Establishing environmental flow regimes in a Mediterranean watershed based on a regional classification”, *Journal of Hydrology*, Vol. 388, pp. 41-51, 2010.

[13] D.J Mesa, “Algunos atributos de los factores a favor y en contra en las técnicas y métodos utilizados para la estimación de caudales ambientales en Colombia”, *Umbral científico*, vol. 15, pp. 81-93, 2009.

[14] IDEAM, “Estudio Nacional del Agua 2018”, IDEAM, 2019.

[15] *Resolución 865 de 2004*, 22 de julio, Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

[16] J. Hernández, “Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas”, *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 7(2), pp.11–18, 2005.

[17] Y. Karakoyun, A. Dönmez y Z. Yumurta, “Comparison of environmental flow assessment methods with a case study on a runoff river–type hydropower plant using hydrological methods”, *Environ Monit Assess*, Vol. 190, 2018.

[18] Y. Karakoyun, A. Dönmez y Z. Yumurta, “Environmental flow assessment for energy generation sustainability employing different hydraulic evaluation methods: C, ambas j hydropower plant case study in Turkey”, *Environ Monit Assess*, Vol. 18, pp. 583-591, 2016.

[19] M. Reza, S. Zolfaghari, C. Gelss y Z. Darvari, “Investigation of river flow alterations using environmental flow assessment and hydrologic indices: Tajan River Watershed, Iran”, *River Basin Management*, Vol. 11, pp. 311-321, 2013.

[20] A. Volchek, I. Kirvel y N. Sheshko, “Environmental flow assessment for the Yaselda River in its Selets reservoir section”, *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 19, pp. 109-118, 2019.

[21] V. Smakhtin, C. Revenga y P. Doll, “A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity”, *International Water Resources Association*, Vol. 29, pp. 307-317, 2004.

- [22] H. Zamani, S. Rezapour, R. Fovargue y H. Moreno, "Strategic allocation of water conservation incentives to balance environmental flows and societal outcomes", *Ecological Engineering*, Vol. 127, pp. 160-169, 2019.
- [23] I. Alomía y P. Carrera, "Environmental flow assessment in Andean rivers of Ecuador, case study: Chanlud and El Labrado dams in the Machangara River", *Ecology & Hydrobiology*, Vol. 17, pp. 103-112, 2017.
- [24] S. Moscoso, "Modelamiento de caudal ecológico con el método IFIM - PHABSIM para el río salcca", tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2012.
- [25] S. Pal y S. Talukdar, "Modelling seasonal flow regime and environmental flow in Punarbhaba river of India and Bangladesh", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 252, 2020.
- [26] E. Porse, S. Sandoval-Solis y B. Lane, "Integrating Environmental Flows into Multi-Objective Reservoir Management for a Transboundary, Water-Scarce River Basin: Rio Grande/Bravo", *Water Resour Manage*, Vol. 29, pp. 2471-2484, 2015.
- [27] G. Lozano, E. Monsalve et. al., "Estimación de Caudales Ecológicos mediante Métodos Hidrológicos e Hidráulicos para la Cuenca del Río Quindío Usando WEAP como Herramienta de Apoyo", *INGE CUC*, Vol. 11, pp. 34-48, 2015.
- [28] Aguilera, Gastón, y M. Pouilly, "Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina". *Acta Zoológica Lilloana*, pp. 15-30, 2012.
- [29] Duabily, Y. Agualimpia, y C. Castro, "Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos". *Tecnogestión*, Vol. 3, 2006.
- [30] M. Mayo, "Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos adaptación del método IFIM - PHABSIM y aplicación a los ríos españoles", tesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, España, 2000.
- [31] J. Hernández. "Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográfica". *Ingeniería y Competitividad*, Vol. 7(2), pp.11-18, 2005.
- [32] D. Gómez y E. Mosquera, "Análisis de sensibilidad paramétrica para la determinación del régimen de caudales ecológicos mediante el software PHABSIM", tesis, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, 2010.
- [33] W. Chen y J. Olden, "Evaluating transferability of flow-ecology relationships across space, time and taxonomy", *Fresh Water Biology*, Vol. 1, pp. 1-14, 2017.

- [34] S. Praskievicz y C. Luo, "Assessment of flow–ecology relationships for environmental flow standards: a synthesis focused on the southeast USA", *Hydrological Sciences Journal*, pp. 1-12, 2020.
- [35] J. Velez et.al., "Comparative analysis of environmental flows and ecological flows in the Chinchina river basin, Colombia", 2015.
- [36] J. Barrera, "Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para la cuenca del río Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología ELOHA", Tesis, Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [37] R. Hernández, A. Ruiz y A. Cervantes, "Environmental flow assessment for rivers feeding a coastal wetland complex in the Pacific coast of northwest Mexico", *Water and Environment Journal*, Vol. 1, pp. 1-11, 2018.
- [38] T. Sun, F. Yang y B. Cui, "Critical Environmental Flows to Support Integrated Ecological Objectives for the Yellow River Estuary, China", *Water Resour Manage*, Vol. 22, pp. 973-989, 2008.
- [39] O. Belmar y J. Velasco, "Hydrological Classification of Natural Flow Regimes to Support Environmental Flow Assessments in Intensively Regulated Mediterranean Rivers, Segura River Basin (Spain)", *Environmental Management*, Vol. 47, pp. 992-1004, 2011.
- [40] IDEAM, "Guía metodológica para la estimación del caudal ambiental", IDEAM, Bogotá D.C., Consulta pública, 2017.
- [41] P. Campos, J. Santos y A. Cavalcanti, "Potencial de vazão ambiental: método participativo para estimar vazão ambiental em rios na Amazônia", *Eng Sanit Ambiente*, Vol. 23, pp. 137-150, 2018.
- [42] S. Mckay, C. Theiling y M. Dougherty, "Comparing outcomes from competing models assessing environmental flows in the Minnesota River Basin", *Ecological Engineering: X*, Vol. 4, 2019.
- [43] Y. Carvajal, "Evaluación de los métodos hidrológicos para la determinación de caudales ambientales en el río Tuluá, Colombia", tesis, Universidad del Valle, Colombia, 2016.
- [44] A. Preciado, "Uso de las curvas de preferencia del macroinvertebrado Chironomidae, alimento base de la especie *Eremophilus Mutisii*, con el fin de evaluar la aplicabilidad de la metodología IFIM en el cálculo de los caudales ambientales para el río Sisga en el departamento de Cundinamarca", tesis, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2017.

[45] M. Roa y S. Brown, "Assessing equity and sustainability of water allocation in Colombia", *The international journal of Justice and Sustainability*, 2015.

[46] L. Rasche, U. Schneider y M. Bolivar, "Benefits of Coordinated Water Resource System Planning in the Cauca-Magdalena River Basin", *Water Economics and Policy*, Vol. 3, pp. 1-27, 2017.

[47] G. Aguilera y M. Pouilly, "Caudal ecológico: definiciones, metodologías, aplicación en la zona Andina", *Acta Zoológica Lilloana*, Vol. 56, pp. 15-30, 2012.

[48] R. Sepúlveda, "El BID investigará Hidroituango por crisis que generó", *El portafolio*, 12, Nov, 2019.