

ENFOQUES TEÓRICOS PARA DEFINIR EL CAUDAL AMBIENTAL*

*Lina M. Castro Heredia***

*Yesid Carvajal Escobar****

*Elkin A. Monsalve Durango*****

Resumen: el desarrollo económico de las naciones ha evolucionado paralelamente con el uso centrado en el consumo de los recursos hídricos. Esto ha ocasionado una fuerte presión sobre los mismos alterando el régimen natural de los ríos, los ecosistemas fluviales y limitando los bienes y servicios provistos por los ecosistemas. La creciente preocupación acerca de los severos daños causados a los ecosistemas de agua dulce, ha llevado al desarrollo de metodologías que permiten determinar la cantidad de agua (régimen de caudal ambiental o ecológico) que debe permanecer en un río para no afectar los servicios ecológicos o ambientales que presta. Este trabajo presenta una revisión de las metodologías más usadas para determinar el caudal ambiental (CA) y el régimen de caudal ambiental (RCA) a partir de diferentes enfoques, ya sea hidrológicos, hidráulicos, de simulación de hábitat u holísticos. Estos enfoques involucran desde procedimientos simplemente hidrológicos hasta el uso de complejas herramientas computacionales, vinculando información hidrológica, biológica, hidráulica, geomorfológica, además de componentes sociales y económicos; con el fin de obtener un régimen de caudal ambiental a partir de una visión holística e integral. Se hace una breve explicación de

* Fecha de recepción: 12 de mayo de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 7 de julio de 2006.

** Ingeniera Civil, Universidad del Cauca. Correo electrónico: linacahe@yahoo.com

*** Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc. en Suelos y Aguas, Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Hidrología General y Aplicada, CEDEX España. Diplomado en Estudios Avanzados en Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Ph.D. en Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. Correo electrónico: yecarvaj@univalle.edu.co

**** Ingeniero Civil, Universidad del Quindío. Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Quindío. Correo electrónico: elkinmonsalve@uniquindio.edu.co

cada uno de los métodos, sus características más relevantes y al final se dan unas conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: recursos hídricos, caudal ambiental, régimen de caudal ambiental.

Abstract: the economic development of the nations has evolved around the use of water resources. This situation has caused alterations in the natural course of rivers and changes in the fluvial ecosystems as a result of the huge pressure put on them. Another consequence is the serious limitations in the capacity of the ecosystems to provide goods. The growing awareness about the damages causes to the freshwater systems has led to the development of the methodologies for determining the water level that should remain in the river for keeping the harmony of the environment. The aim of this paper is to review the methodologies that are frequently more used for measuring the environmental flow and the environmental flow regime. The methodologies are revised from different perspectives: hydrological, hydraulic, hydraulic of habitat simulation or holistic. Within every presented perspective, the former approaches involve from simply hydrological procedures to complex technological tools, with hydrological, hydraulic and biological information, and also takes into account the economic and social components. The purpose is to obtain a regime flow with a holistic and integral vision. A brief explanation of each one of the methods and its more outstanding characteristics are made and some conclusions and recommendations are given.

Key words: water resources, environmental flow, environmental flow regime.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de las naciones ha evolucionado paralelamente con el incremento en el uso de los recursos hídricos. Esto ha ocasionado una fuerte presión sobre los mismos alterando el régimen natural de los ríos, los ecosistemas fluviales y limitando los bienes y servicios provistos por los ecosistemas de agua dulce. Es así como en muchos países del mundo se ha comenzado a abordar el tema del aprovechamiento de los recursos hídricos de una manera más integral, lo que significa realizar estudios interdisciplinarios en la cuenca hidrográfica con el fin de garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y de los bienes que ellos proveen; cada vez se evidencia más la necesidad de proteger los ecosistemas acuáticos, para tener medios de sustentación y servicios para la población [Dyson *et al.*, 2003]. El régimen de caudal ambiental forma parte de una óptica ecosistémica en la gestión integrada de los recursos hídricos, que incluye un amplio conjunto de medidas para garantizar un río saludable, entre las cuales se incluyen la protección de suelos, la prevención de la contaminación, el control en el aprovechamiento y la protección y restauración de hábitats, entre otras.

Varios encuentros internacionales (Cumbre de la Tierra en 1992, Segundo Foro mundial del Agua en el 2000, Segunda Cumbre de la Tierra en el 2002, Tercer Foro Mundial del Agua en el 2003) han destacado la necesidad de asegurar la integridad de los ecosistemas a través de un manejo integral del agua para bien de las generaciones futuras. En la conferencia de desarrollo sostenible de Johannesburgo en el año 2002, se enfatizó la necesidad de “mejorar la eficiencia en el uso del recurso agua y promover su asignación dando prioridad a la satisfacción de necesidades básicas humanas, pero equilibrando los requisitos para conservar y restaurar los ecosistemas y sus funciones (en particular los ambientes frágiles), con la cantidad de agua necesaria para los seres humanos, para la agricultura y la industria, además de salvaguardar la calidad del agua para beber” [Homa *et al.*, 2005].

En Colombia la normatividad no es clara al respecto; incluso en el Proyecto de Ley 365 de 2005 que establece medidas para orientar la planificación y administración integral del recurso hídrico en el territorio nacional, se incluye el denominado caudal ecológico y establece que las autoridades ambientales deben fijar dicho caudal con base en estudios técnicos. Sin embargo, mientras no se disponga de éstos para el río o tramo del mismo, se considera como caudal ecológico el que permanece en la fuente el 90% del año, valor que no garantiza ni la vida acuática, ni la sostenibilidad del ecosistema, ni los servicios ambientales que presta. En el Estudio Nacional del Agua (2000) realizado por el IDEAM se plantea como caudal ecológico el caudal mínimo estimado a partir de la curva de duración de caudales medios diarios. Se considera entonces que el caudal que permanece en la corriente durante el 75% del tiempo representa el mínimo que podría fluir por el cauce una vez se realicen las captaciones, criterio también aconsejado para realizar el cálculo de índices de escasez para aguas superficiales (Resolución 865 de 2004). El cálculo del régimen de caudal ambiental sigue siendo flexible, dejando al libre albedrío la decisión de realizar un estudio técnico y bien fundamentado del tema, o si se hace y éste afecta la viabilidad del proyecto, se condiciona el estudio a la conveniencia de intereses particulares. La falta de reglamentación y conocimiento en este sentido ha dejado en libertad al diseñador o extractor de conservar en el río solo el 10% del caudal medio anual y, en algunos casos, del mínimo anual, criterio que no tiene fundamento teórico ni técnico y es más bien una copia de reglamentaciones extranjeras.

En respuesta a las nuevas políticas que están siendo desarrolladas en el mundo para asegurar prácticas sostenibles y responsables, se están aplicando técnicas de estimación del régimen de caudal ambiental para ayudar a reducir los impactos. Es así como en muchas partes del mundo se trabaja constantemente en establecer o tener una mayor proximidad sobre cuáles son los caudales que deben permanecer en un río después de un aprovechamiento, definiéndolo bajo varios parámetros y manejando diferentes componentes como la hidráulica, la hidrología, la ecología, etc.

Las metodologías, métodos o procedimientos desarrollados mundialmente, permiten tener un acercamiento a la realidad y aportar al desarrollo y conocimiento del comportamiento de los ríos y ecosistemas fluviales locales, lo que es factible lograr si se conocen plenamente los elementos conceptuales y teóricos que rigen los caudales ecológicos o más bien llamados ambientales. Dada la urgente necesidad que existe en el país de conocer y aplicar criterios científicos adecuados para determinar el régimen de caudal ambiental, se planteó el proyecto de investigación denominado “Metodología para la determinación del régimen de caudal ambiental en el río Tuluá – subcuenca del río Cauca”, como estudio piloto en el Valle del Cauca, pero extrapolable a otras regiones del país. El componente inicial del proyecto consiste en una revisión del estado del arte en la materia y cuyo resultado es mostrado en el presente artículo. Allí se muestran las diferentes metodologías con sus definiciones y métodos, y al final se dan unas conclusiones y recomendaciones acerca de las mismas.

2. CONCEPTO Y METODOLOGÍAS

El caudal ambiental se define como aquel que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural (que cobija una riqueza de flora y fauna) y funciones ambientales tales como purificación de aguas, amortiguación de extremos hidrológicos, recreación, pesca, entre otros [Davis y Hirji, 1999], [García de Jalón y Gonzáles del Tánago, s.f], [Verweij, s.f.], [Aguirre y Vicuña, s.f.].

En los últimos años se viene reconociendo que respetar el valor de los ecosistemas implica dejar suficiente agua en las corrientes hídricas y que la extracción necesaria para satisfacer las necesidades humanas básicas debe estar condicionada por la disponibilidad de la fuente. Los ríos no son sólo conductos de los cuales se extrae lo que se necesita y se desecha lo que no. Son más que eso, pues brindan servicios imprescindibles para el ser humano y los ecosistemas asociados. El inconveniente radica en establecer cuál es el caudal necesario en determinado cuerpo de agua para conservar las actividades propias de los ecosistemas y para que el hombre pueda beneficiarse del agua, sin afectar los ecosistemas acuáticos y procesos propios del río.

Desde 1970, principalmente en Estados Unidos, Europa, Sudáfrica y Australia, ha habido una evolución en las metodologías para valorar los requerimientos de caudal ambiental de los ecosistemas fluviales. Históricamente y aún en la actualidad, el enfoque dado para valorar el caudal ambiental ha sido el de mantener la pesca en agua dulce debido a su importancia para la economía de algunas regiones. En Norteamérica se desarrollaron metodologías donde se encontraban los caudales necesarios para el mantenimiento, el desove y la cría de especies objeto (especialmente el salmón). La suposición inherente en las primeras metodologías desarrolladas era que el caudal que

mantiene la población, hábitat y actividades del pez objeto, mantendría todo el ecosistema fluvial. Sin embargo, el campo se ha expandido e incluye la valoración de otras necesidades de la biodiversidad biótica, aspectos de la estructura del ecosistema, tales como la forma del canal, la vegetación riparia, los humedales y las llanuras aluviales [Tharme, 1996], [King *et al.*, 1999], [Davis y Hirji, 1999].

Es así como las metodologías pueden variar desde enfoques de escritorio basados en la información existente, a aquellas que incluyen una recopilación de información intensa y sofisticada con el uso de software especializado. La mayoría de los enfoques se pueden usar tanto en ríos regulados como en aquellos no regulados, aunque algunas metodologías han sido desarrolladas especialmente para el caso de la restauración de ríos (obviamente regulados).

Tharme [1996] diferencia entre métodos y metodologías para valorar los requerimientos de caudal ambiental y dice que los métodos son técnicas usadas para medir, describir o predecir las variables químicas o biológicas de la corriente, mientras las metodologías son la recopilación de muchos métodos que presentan similitud en cuanto a su aplicación. Hay cuatro grupos de metodologías básicas ampliamente reconocidas: metodología hidrológica, metodología de valoración hidráulica, metodología de simulación de hábitat y la metodología holística [King *et al.*, 1999], cada una de las cuales se presentará a continuación.

2.1. METODOLOGÍA HIDROLÓGICA

Se trata de una metodología basada en registros históricos de caudal (mensuales o diarios) a partir de los cuales se obtiene un caudal mínimo. Esta metodología se fundamenta en la relación estricta que existe entre el régimen hidrológico y el ecosistema existente, puesto que las especies dentro del río se han adaptado y acostumbrado a las variaciones de caudal. Dentro de las principales características de los métodos hidrológicos se encuentran su fácil aplicación, el requerimiento de pocos datos, y que son económicos, rápidos y poco dispendiosos de aplicar. Su desventaja consiste en que no tienen en cuenta aspectos biológicos y geomorfológicos del cauce, y en que establecen en algunos casos un caudal invariable en el tiempo, lo cual no refleja las necesidades de todos los interesados [Palau y Alcazar, 1996], [Davis y Hirji, 1999], [Bernardo y Alves, 2000], [Díez, 2000], [Dyson *et al.*, 2003]. Algunos métodos propios de esta metodología son:

- Porcentaje fijo del caudal medio interanual: como su nombre lo indica, el caudal ambiental obtenido a partir de este método representa sólo un porcentaje del caudal medio interanual y es constante a lo largo del año, por lo cual convendría llamarlo caudal mínimo en lugar de caudal ambiental. Dentro de este método se incluyen algunas reglamentaciones tales como la Ley Francesa de Aguas que establece como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual calculado para un período mínimo de cinco años [Díez, 2000]; y el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Uni-

dos que sugiere como caudal ambiental el caudal medio del mes más crítico para el metabolismo de los organismos acuáticos, con frecuencia el caudal del mes de agosto [Kulik, 1990]. En España, la Dirección General de Obras Hidráulicas fijó como caudal mínimo permanente el 10% del caudal medio interanual, criterio similar al adoptado en Colombia en el Proyecto de Ley 365 de 2005 conocida como Ley de Aguas. Estos métodos son simples aproximaciones que han sido muy usadas mundialmente por la facilidad en la aplicación, pero que no representan una solución científico-técnica ni mucho menos consensuada entre los múltiples actores de una cuenca hidrográfica y sólo pretenden ser una respuesta apresurada para satisfacer las insaciables necesidades humanas.

- Método de Tennant [1976]: conocido también como Método de Montana, es uno de los más usados mundialmente [Orth y Maughan, 1981], [Wesche y Rechar, 1980], [Pyrce, 2004], [Ministerio del Medio Ambiente – España, 2003] y se ha utilizado básicamente en corrientes que no tienen estructuras de regulación como represas, diques u otras modificaciones en el cauce [Arthington y Zalucki, 1998]. Tennant [1976] desarrolló este método basado en diez años de observaciones y mediciones de carácter fundamentalmente biológico para una especie en particular (la trucha) en once ríos de Montana (Wyoming y Nebraska en los Estados Unidos), encontrando relaciones entre los parámetros físicos del cauce (ancho, profundidad y velocidad del cauce) y la disponibilidad del hábitat para una especie en particular. El método divide el año en dos períodos, en cada uno de los cuales se recomiendan unos porcentajes del caudal medio interanual para lograr una calidad de hábitat fluvial determinada. De esta forma se reconoce que existe una relación entre los niveles de caudal y las características del hábitat existente; además, se establece que asignar un valor único de caudal puede eliminar todo rastro existente de variabilidad temporal (Tabla 1) [Tharme, 1996], [King *et al.*, 1999], [Palau, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998].

Tabla 1. Variación temporal en porcentaje del caudal medio anual definido para mantener diferentes niveles de calidad del hábitat

Categoría del caudal	Recomendación del régimen de caudal base	
	octubre a marzo	abril a septiembre
Abundante	200	200
Rango óptimo	60 - 100	60 - 100
Excepcional	40	60
Excelente	30	50
Bueno	20	40
Degradación	10	30
Pobre o mínimo	10	10
Degradación severa	<10	<10

Fuente: [Tennant, 1976].

Su aplicación no debe ser exactamente la propuesta por el método pues, en el caso de Colombia, los ríos no presentan un carácter estacionario sino un carácter bimodal, lo que hace que haya cuatro periodos en el año. Además, las especies dominantes en cada río tendrán condiciones de habitabilidad diferentes a las adoptadas en el Método de Tennant.

- Método de Hoppe: fue uno de los primeros métodos en desarrollarse y en el que se reconoce la relación entre los percentiles de la curva de duración caudales y las condiciones favorables para la biota. Este método usa valores de porcentaje de excedencia de la curva de duración de caudales para definir unos caudales mínimos asociados a diferentes estadios de crecimiento [Diez, 2000]. Para llevarlo a cabo se calculan los siguientes percentiles: Q_{17} para avenidas y recomendado para limpiar el sustrato; Q_{40} para mantener las condiciones de hábitat convenientes para el desove; y Q_{80} para mantener condiciones de alimento y abrigo, además de un mínimo de hábitat disponible para las truchas [Gordon *et al.*, 1992], [EFM, 2003]. Esta es una aproximación un poco más biológica, pero que representa solamente las condiciones favorables para los ríos y especies donde fue desarrollada, lo que implica que su aplicación en otras corrientes puede resultar errónea si no se consideran adaptaciones propias del río en estudio.
- Método del Caudal Medio Base (*Average Base Flow Method* - ABF): fue desarrollado en Nueva Inglaterra por el servicio de pesca y vida salvaje de Estados Unidos. Es uno de los métodos más usados en los proyectos hidroeléctricos de este país [USFWS, 1980] y en él se propone el caudal mínimo de verano (media de los caudales medios multianuales de agosto) como el caudal ambiental, ya que representa la condición natural más severa que la comunidad de especies del cauce podría experimentar. Para corrientes sin registros, el caudal medio de agosto se estima en $0.5 \text{ pie}^3/\text{s}$ milla² de área drenante (cfsm). Cuando son necesarios caudales altos en otras épocas del año para desove, migración y otras necesidades biológicas, se recomiendan: para otoño 1.0 cfsm, para invierno y primavera 4.0 cfsm [EFM, 2003]. Es un método de fácil aplicación, pero que podría acarrear graves alteraciones en el ecosistema fluvial, pues si bien es cierto que las comunidades acuáticas resisten épocas críticas de estiaje, no lo hacen por largos periodos de tiempo; las especies están adaptadas a las fluctuaciones anuales con caudales medios, de crecida, mínimos, avenidas, etc., luego sería un error imponer un caudal mínimo constante a lo largo del año y menos uno que representa la condición más crítica para los organismos acuáticos.
- Método del Rango de Variabilidad (*Range Variability Approach* - RVA): desarrollado en respuesta al creciente interés de usar la variabilidad natural para recomendar caudales ambientales y no insistir con el uso de un caudal mínimo a lo largo de todo el año que asegure la salud de las especies y el mantenimiento del ecosistema fluvial. En este método se reconoce que la variación hidrológica juega un papel importante en la estructura de la diversidad biótica, ade-

más de controlar las condiciones de hábitat dentro del canal, llanuras de inundación, humedales, etc. El principal objetivo de este método consiste en definir políticas de gestión a partir de 32 indicadores relacionados con la corriente, llamados Indicadores de Alteración Hidrológica (*Indicators of Hydrologic Alteration – IHA*). Los IHA identifican las componentes del régimen natural de caudales en magnitud, frecuencia, periodicidad y duración [Richter *et al.*, 1997], y con ellos se hacen recomendaciones del rango en el cual pueden variar sin perjudicar al ecosistema fluvial. Ha sido un enfoque usado mundialmente para evaluar el grado de alteración por la construcción de obras hidráulicas [Schoeller y Sánchez, 2005], [Gergel *et al.*, 2002], [Beauchamp y Stromberg, 2001], [Finch, 1998], como herramienta para la restauración de hábitats [Armstrong *et al.*, 2003], [BRPP, 2003], [Galat y Lipkin, 2000], y para investigaciones de tipo hidrológico en ríos y lagos [Benjamin y Van Kira, 1999], [Dangelmaier, 2004], [Eisele *et al.*, 2003], [Galat *et al.*, 1999].

2.2. METODOLOGÍA DE VALORACIÓN HIDRÁULICA

Esta metodología usa relaciones entre el caudal del río y alguna característica del cauce (velocidad, profundidad, perímetro mojado, entre otros). Es una mejora de la metodología hidrológica, que involucra medidas específicas del cauce afectadas directamente por la variación de caudal y que constituyen un factor limitante para las especies piscícolas u otras especies. Sin embargo, estos métodos continúan basándose más en las características físicas que en las necesidades de la biota. Se aplica generalmente en secciones transversales donde el mantenimiento del caudal es crítico o donde el hábitat hidráulico es limitante para la vida acuática (usualmente rápidos). Dentro de esta metodología se encuentran:

- Método del Perímetro Mojado: es un método usado como índice de disponibilidad de alimento para los peces, asumiendo que al maximizar el perímetro mojado habrá más alimento y hábitat aprovechable para la comunidad acuática. Requiere para su aplicación de la ubicación de un único transecto a lo largo del río que represente el sitio más sensible a los cambios de caudal. Para determinar el caudal ambiental se hace uso de la relación directamente proporcional entre el perímetro mojado y el caudal: a medida que aumenta este último se incrementa el otro desde un nivel base de caudal, hasta alcanzar un punto de inflexión, después del cual, el incremento del perímetro mojado crece muy lentamente hasta llegar a banca llena. Este punto de inflexión se toma como el de caudal óptimo o ambiental [Reiser *et al.*, 1989], [Tharme, 1996], [King *et al.*, 1999], [Palau, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998]. Es un método de fácil aplicación, pero que no considera las condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas, ni tampoco la variación de caudal en el tiempo, elementos fundamentales cuando se determina un caudal ambiental.
- Método de Múltiples Transectos (*Multiple Transect Methods*): en este método se corrige el problema de usar un solo transecto para defi-

nir los caudales ambientales en el río, pues utiliza más de uno para su aplicación. Requiere de mediciones en campo de velocidad, nivel, sustrato y cobertura a diferentes caudales y en diferentes secciones transversales, con el fin de determinar por medio de simulación hidráulica el cambio de estas variables hidráulicas (habitabilidad) con cambios en el caudal [Arthington y Zalucki, 1998]. Se considera un método conservativo, que frecuentemente estima caudales altos [Richardson, 1986], [Swales *et al.*, 1994], pero es uno de los primeros enfoques donde se tiene en cuenta la variabilidad de caudales y el consecuente cambio de variables hidráulicas de importancia ecológica.

2.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Es una metodología de escritorio y de campo que se fundamenta en la relación entre el caudal y la hidráulica, pero que ofrece un análisis más detallado de la cantidad y conveniencia del hábitat físico disponible para una biota objeto y para diferentes regímenes de flujo, además de vincular información hidrológica, hidráulica y biológica. La información requerida en esta metodología es moderadamente alta e incluye series históricas de caudal, variables hidráulicas de múltiples secciones transversales e información de disponibilidad de hábitat de varias especies de la biota acuática; también requiere de un alto grado de experiencia en biología, hidráulica e hidrología, entre otros. Dentro de este tipo de metodología se encuentra:

- Metodología Incremental para la Asignación de Caudales (*Instream Flow Incremental Methodology – IFIM*): fue desarrollada en el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos [Bovee y Milhous, 1978]. Es una metodología usada para evaluar los efectos de cambio del caudal en la estructura del canal, calidad del agua, temperatura y disponibilidad de microhábitat para algunas especies acuáticas. El desarrollo de esta metodología considera la integración de técnicas que involucran aspectos tan diversos como la ingeniería hidráulica y ambiental, la biología acuática, la ecología, las ciencias sociales y la química, entre otras [Espinoza *et al.*, s.f.], razón por la cual es tan completa y usada mundialmente para evaluar la cantidad de agua que debe permanecer en la fuente hídrica después de un aprovechamiento hidráulico. El IFIM está basado en las relaciones cuantitativas (obtenidas por simulación) entre los caudales que circulan y los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el hábitat biológico. Para modelar el rango de caudales y la disponibilidad de hábitat asociada a estos, se usa el programa PHABSIM (*Physical Habitat Simulation Model*), modelo computacional que calcula cuál será la profundidad de agua, velocidad y características del cauce que cambiarán si se modifica el caudal. PHABSIM fue diseñado para ser aplicado en el hábitat de peces específicamente, y requiere de información extensa y un considerable conocimiento en varias áreas para ser aplicado [Tharme, 1996], [King *et al.*, 1999], [Palau, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998], [Davis y Hirji, 1999]. Es un enfoque ampliamente usado en Estados

Unidos [Gallagher, 1999], [Korman *et al.*, 1994], [Susquehanna River Basin Comisión, 1998], en España [Martín y Díez, 1999], [Schoeller y Sánchez, 2005], [Olmeda y Díez, s.f.] y en algunos países latinoamericanos [Espinoza *et al.*, s.f.]. En Colombia, Campo y Ruiz [2001] realizaron la primera aplicación de la metodología en el río Palacé en el departamento del Cauca, con el fin de determinar el régimen de caudal ambiental que debía permanecer en el mismo después de la construcción del acueducto para la ciudad de Popayán.

2.4. METODOLOGÍA HOLÍSTICA

Las metodologías holísticas han sido desarrolladas y muy utilizadas en países como Sudáfrica y Australia [King y Louw, 1998], [Hughes y Hannart, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998], [Arthington, Conrick y Bycroft, 1992], fundamentalmente porque en estos países existe una alta variabilidad en el régimen de caudales y se han construido grandes represas que han transformado las características hidrológicas de las cuencas. Es un enfoque que requiere información extensa y de muy alta calidad, registros históricos de caudales, variables hidráulicas y modelos que relacionen el caudal con los requerimientos de todos o algunos componentes del ecosistema y de la biota acuática, además de información económica y social. Es un enfoque nuevo y, por lo tanto, tomará tiempo para determinar su efectividad. La metodología más usada en este enfoque es la de los bloques de construcción (*Building Block Methodology – BBM*), desarrollada en Sudáfrica por King *et al.* [2000] bajo la premisa básica de que las especies fluviales dependen de elementos básicos del régimen de caudal, incluyendo caudales mínimos e inundaciones, para conservar la dinámica de sedimentos y la estructura geomorfológica del río. La BBM está dirigida a un amplio rango de componentes del ecosistema tales como calidad estética, dependencia social del río, beneficios económicos, áreas de interés científico, protección de características a nivel cultural, recreación, etc. La BBM gira en torno a un grupo de expertos en hidrología, hidrogeología y geomorfología, así como de científicos en química, biología, entomología acuática, botánica y biología acuática, además de componentes sociales y económicos afectados directamente por el uso del recurso hídrico. En el proceso, los expertos siguen una serie de pasos, donde se evalúan los datos disponibles, se utilizan resultados de modelos y se aplica la experiencia profesional combinada para llegar a un consenso en cuanto a los bloques de construcción del régimen de caudal ambiental [Dyson *et al.*, 2003], [Brizga *et al.*, 2002], [Arthington *et al.*, 1992], [Tharme, 1996], [King *et al.*, 1999], [Palau, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998], [Davis y Hirji, 1999]. Es una metodología muy completa pues evalúa aspectos hidrológicos, ambientales, sociales y económicos antes de definir un régimen de caudal ambiental, es decir, es una metodología basada en la participación de varios sectores y, por ende, con mayor probabilidad de sostenibilidad a lo largo del tiempo.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las acciones humanas sobre las cuencas hidrográficas y las fuentes hídricas condicionan los procesos naturales en los ríos afectando el régimen de caudal de la corriente, la calidad del agua y los ecosistemas. Se requiere un modelo alternativo de gestión del recurso hídrico, donde se considere la importancia social, ambiental, cultural y económica que representan los ecosistemas de agua dulce y, por lo tanto, la importancia de su conservación.
- Las metodologías descritas en este documento han surgido en países donde sus ríos y ecosistemas presentan características muy particulares. Esta consideración debe ser tenida en cuenta a la hora de implementar estas metodologías en Colombia, ya que estas deben contar con una evaluación previa que permita su aplicación y adaptación al contexto nacional.
- El Método de Tennant presenta algunas desventajas considerables: es aplicable únicamente a ríos de montaña sin intervención humana, lo que puede conducir a resultados erróneos si se aplica a otro tipo de río (por ejemplo, ríos meándricos); depende principalmente de la información hidrológica suministrada; y asigna un caudal para dos posibles estaciones (invierno y verano) y una especie en particular (salmón). Es necesario que para su aplicación se realice una adaptación adecuada al contexto regional, donde se evalúen las condiciones de hábitat de las especies dominantes en el río y las condiciones hidrológicas propias de la corriente.
- El método del rango de variabilidad incorpora un concepto que ha sido demostrado teóricamente y empíricamente: el régimen de caudal ambiental debe estar caracterizado por una variación natural para mantener la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos. Es un enfoque que pone en tela de juicio las aproximaciones simplistas y demuestra que las variaciones hidrológicas inter e intra anual tienen implicaciones ecológicas relevantes y que deben ser consideradas dentro de una política de gestión del recurso hídrico. Es una de las mejores metodologías hidrológicas y de gran utilidad cuando se diseña o evalúa el funcionamiento de embalses.
- En el método del perímetro mojado hay suposiciones importantes: primero, asume que un solo transepto es adecuado para describir los cambios que ocurrirán a lo largo del río a causa de un cambio en el caudal; segundo, la ubicación del transepto más sensible a los cambios de caudal siempre coincide con la zona donde se forman los rápidos, lo que quiere decir que el estudio se enfoca a ese tipo de hábitat, asumiendo que éste es suficiente para cumplir con todos los requerimientos de hábitat que demandan las especies acuáticas; tercero, supone que el perímetro es un sustituto de muchos otros factores o procesos que determinan la integridad ecológica y la salud acuática de toda la corriente. Más conveniente sería entonces usar el método de los múltiples transeptos si se trata de evaluar la variación de las condiciones hidráulicas debidas a cambios en el caudal.

- La metodología IFIM como los métodos holísticos requieren gran cantidad de información (registros completos de información hidrológica, hidráulica, calidad fisicoquímica, calidad microbiológica, biótica, social y económica), tiempo y recursos económicos, que las convierten en alternativas viables, en proyectos de gran envergadura o en proyectos donde hay voluntad de trabajo.
- Es importante que la definición del régimen de caudal ambiental se encuentre enmarcado dentro de un conjunto de prácticas de gestión en la cuenca relacionadas con el uso del suelo, los derechos de agua, control de la contaminación y control de las actividades humanas. Limitarse a establecer un caudal ambiental en un río en grave proceso de degradación puede resultar inútil o incluso perjudicial.
- Otro aspecto importante a tener en cuenta es no confundir el término de caudal ambiental con el volumen necesario para diluir carga contaminante y mejorar su calidad. Un río contaminado requerirá de acciones pertinentes para mejorar la calidad del agua antes de comenzar a aplicar este tipo de metodologías.
- La definición del régimen de caudal ambiental es algo relativamente nuevo en el entorno colombiano y son pocos los estudios o investigaciones para determinar los caudales que deben permanecer en una determinada corriente hídrica después de un aprovechamiento. Por lo tanto, es necesario empezar a desarrollar trabajos que permitan aplicar, construir y estructurar conocimiento sobre el régimen de caudales ambientales enmarcados en el contexto nacional. Dichas metodologías servirán de base a las autoridades ambientales en la toma de decisiones para conceder asignaciones, cobro de tasa por uso del agua, licencia de construcción de obras hidráulicas, etc.
- No es necesario seguir al pie de la letra cada una de las metodologías planteadas; es más acertado definir las propias conceptualizadas sobre la región y el río objeto de estudio, donde se valore la variación hidrológica en magnitud, duración y frecuencia, los rangos en los que se puede permitir esa variación, se evalúen las condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas representativas, la calidad de agua y los usos potenciales con los caudales propuestos, entre otras variables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias y a la Universidad del Valle por la financiación del proyecto denominado “Metodología para la determinación del régimen de caudal ambiental en el río Tuluá – subcuenca del río Cauca”, en la modalidad de Jóvenes Investigadores e Innovadores 2005. El presente artículo se desprende del proyecto anteriormente mencionado con el propósito de divulgar los enfoques teóricos para definir el caudal ambiental.

REFERENCIAS

- Aguirre, A., Vicuña, B. *Conceptos básicos para la aplicación del caudal ecológico en los ríos ibéricos*. s.f.
- Arthington, A.H., *et al.* Development of a Holistic Approach for Assessing Environmental Flow Requirements of Riverine Ecosystems. En: Pigram JJ, Hooper BP (eds). *Proceedings of an international Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment*. The Centre for Water Policy Research, University of New England. Armidale, Australia, 1992.
- Arthington, A.H., Conrick, D.L., Bycroft, B.M. *Environmental Study: Barker-Barambah Creek*. Volume 2. Scientific Report: Water Quality, Ecology and Water Allocation Strategy. 457 pp. Report for the Water Resources Commission, Queensland Department of Primary Industries. Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University, Brisbane, 1992.
- Arthington, A.H., Zalucki, J.M. *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods*. LWRDC Occasional Paper 27. 1998.
- Armstrong, D.S., Parker, G.W. *Assessment of Habitat and Streamflow Requirements for Habitat Protection, Usquepaug-Queen River, Rhode Island, 1999-2000*. Open-File Report 02-438. 2003.
- Bernardo, J., Alves, M. *Contribuição para uma Metodologia de Determinação do Caudal Ecológico em cursos de Água Temporários*. 5º Congresso da Água. Lisboa, Portugal. 25 a 29 de Setembro, 2000.
- Beauchamp, V., Stromberg J.C. *Assessment of Hydrologic Alteration of the Lower Verde River and Possible Ecological Consequences*. Poster. Fifteenth Meeting of the Arizona Riparian Council. 2001.
- Benjamin, L., Van Kira, R.W. Assessing Instream Flows and Reservoir Operations on an Eastern Idaho River. En: *Journal of the American Water Resources Association* 35, 1999, 898-909.
- Bove K. D., Milhous, R. T. *Hydraulic Simulation in Instream Flow Studies: Theory and Techniques*. Instream Flow Information Paper No. 5. US Fish & Wildlife Service, FWS/OBS, 78-33, 1978.
- BRPR - Big Rock Power Partners. *California Trout First Stage Consultation Study Recommendations and Comments for the Big Rock Power Partners*. FERC Project No. 12113, 2003.
- Brizga S.O., *et al.* Benchmarking, a "Top-Down" Methodology for Assessing Environmental Flows in Australian Rivers. En: *Environmental Flows in River Systems. An International Working Conference on Assessment and Implementation, incorporating the 4th International Ecohydraulics Symposium*. Conference Proceedings. Cape Town, March 2002.

- Campo, Y., Ruiz, D. *Determinación del régimen de caudales ecológicos en el río Palacé (Cauca)*. Tesis de Pregrado en Biología. Popayán: Universidad del Cauca, 2001.
- Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam. *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá, 2000.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Ambiente. *Proyecto de Ley 365 de 2005*.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Ambiente. *Resolución 865 de 2004*.
- Colombia. Presidencia de la República. *Decreto Ley 2811 de 1974. Código de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente*.
- Davis, R., Hirji, R. Environmental Flows: Concepts and Methods. *Water Resources and Environment Technical Note C. 1*. The World Bank, Series Editors, 1999.
- Dangelmaier, G. *Importance of natural Flow Variability for Atlantic Salmon in the regulated River Surna, Mid-Norway: An Application of the IHA-Methodology and an Analysis of Habitat Time Series*. Diploma thesis at the University of Stuttgart, Dept. of Wasserbau/SINTEF Energy Research, 2004.
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, J. *Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales*. Tr. José María Blanch. San José: UICN-ORMA. XI, 2003.
- Diez, J.M. *Metodologías para la estimación de caudales ecológicos*. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, 2000.
- Eisele, M., Steinbrich, A., Leibundgut, C. *Assessment of Impacts on Stream Flow Magnitude and Variability based on the Natural Flow Paradigm*. Institute of Hydrology, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, 2003.
- Environmental Flow Methodologies – EFM. Disponible en: <http://www.lk.iwmi.org/ehdb/EFM/efm.asp>. Fecha de consulta: mayo de 2005.
- Espinoza C., Vargas, X., Pardo, M. *Metodología incremental para la asignación de caudales mínimos aconsejables*. IFIM. VI Jornadas del CONAPHI-CHILE. (s.f.).
- Finch, B. *Upstream Dams Disrupt the Delta's Flow of Life*. Mobile, 1998.
- Galat, D., Lipkin, R. *Characterizing the Natural Flow Regime of the Missouri River Using Historical Variability in Hydrology*. Final Report to Missouri Dept. of Conservation, 1999.
- Galat, D.L., Lipkin, R. Restoring Ecological Integrity of Great Rivers: historical Hydrographs Aid in Defining Reference Conditions for the Missouri River. En: *Hydrobiologia*. 442/423, 2000, 29-48.
- Gallagher, S.P. *Use of Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling to evaluate Channel Rehabilitation in the Trinity River, California*.

- U.S.: Fish and Wildlife Service, Arcata Fish and Wildlife Office, Arcata, CA. 1999.
- García de Jalón, D., González del Tánago, M. *El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles*. Madrid: Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, s.f.
- Gergel, S.E., *et al.* Landscape Indicators of Human Impacts to Riverine Systems. En: *Aquatic Sciences*, 64, 2002, 118-128.
- Gordon, N., Mac Mahon, XX, Finlayson, XX. *Stream Hydrology. An Introduction for Ecologist*. Chichester: John Wiley and Sons, 1992.
- Global Water Partnership GWP. *Agua para el siglo XXI: de la visión a la acción – América del Sur, Estocolmo, Suecia y Buenos Aires, Argentina*. 2004.
- Homa, E., *et al.* An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow Needs. En: *Proceedings of the EWRI 2005 World Water and Environmental Resources Congress*, Alaska: ASCE, Anchorage, 2005.
- Hughes, D.A., Hannart, P. A Desktop Model used to provide an initial Estimate of the Ecological Instream Flow Requirements of Rivers in South Africa. En: *Journal of Hydrology* 270, 2003, 167-181.
- España. Ministerio del Medio Ambiente. *Caudales mínimos en el Bajo Ebro. Plan Hidrológico Nacional. Confederación Hidrográfica del Ebro*. Disponible en: <http://www.oph.chebro.es>. Fecha de consulta: febrero de 2006.
- King, J.M., Louw, D. Instream Flow Assessments for Regulated Rivers in South Africa using the Building Block Methodology. En: *Aquatic Ecosystem Health and Restoration*, 1998.
- King, J., Tharme, R., Brown, C. Definition and Implementation of Instream Flows Southern Waters, University of Cape Town, South Africa. *Prepared for Thematic Review II.1: Dams, ecosystem functions and environmental restoration*. Disponible en: <http://www.dams.org/>. Fecha de consulta: mayo de 2005.
- King, J.M., Tharme, R.E., de Villiers, M.S. (eds.). *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology. Water Research Commission Report TT 131/00*, Pretoria, South Africa, 2000.
- Korman, J., Perrin, C.J., Lekstrum, T. *A Guide for the Selection of Standard Methods for Quantifying Sportfish Habitat Capability and Suitability in Streams and Lakes of British Columbia*. Report prepared by Limnotek Research and Development Inc. Vancouver, B.C. for B.C. Environment, Fisheries Branch, Research and Development Section. Vancouver: B.C., 1994.
- Kulik, B.H. A Method to Refine the New England Aquatic Base Flow Policy. En: *Rivers*, 1, 1990, 8-22.

- Martín, J., Díez, J. *Determinación del régimen de caudales ecológicos en el río Carrión (Palencia) aguas abajo del embalse de Compuerto, empleando la metodología IFIM*. II Congreso de Ingeniería del Paisaje. España, 1999.
- Olmeda, S., Díez, J. *Pautas para el establecimiento de un régimen de caudales ambientales en el río Mandeo (La Coruña)*. Grupo de Hidráulica e Hidrología. ETS. Ingenierías Agrarias. Madrid: Universidad de Valladolid, s.f.
- Orth, D. J., Maughan, E. Evaluation of the Montana Method for Recommending Instream Flows in Oklahoma Streams. En: *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, 61, 1981, 62-66.
- Palau, A. *Régimen ambiental de caudales: estado del arte*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- Palau, A., Alcázar, J. The Basic Flow: An Alternative Approach to calculate Minimum environmental Instream Flows. En: *Proceedings of Second International Symposium on Habitat Hydraulics*. Québec:1996, 547-558.
- Pyrce, R. *Hydrological Low Flow Indices and their Uses*. Watershed Science Centre. Trent University. Ontario, Canada. Disponible en: <http://www.trentu.ca/wsc>. Fecha de consulta: marzo de 2006.
- Reiser, D.W., Wesche, T.A., Estes, C. Status of Instream Flow Legislation and Practice in North America. En: *Fisheries*, 14, 1989, 22-29.
- Richardson, B.A. Evaluation of In-Stream Flow Methodologies for Freshwater Fish in New South Wales. En: Campbell, I.C. (ed.). *Stream Protection, the Management of Rivers for Instream Uses*. Victoria: Water Studies Centre, Chisholm Institute of Technology, 1986. p. 143-167.
- Richter, B., Baumgartner, J., Braun, D. How much Water does a River need? En: *Freshwater Biology*, 37, 1997, 231-249.
- Schoeller, S., Sánchez, M. *Determining Instream Flow, Analysis of Methods and their Application to the River Ebro in Spain*. Tesis en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- Swales, S., Bishop, K.A., Harris, J.H. Assessment of Environmental Flows for native Fish in the Murray-Darling Basin. A Comparison of Methods. En: *Environmental Flows Seminar Proceedings*, 1994, 184-191.
- Susquehanna River Basin Commission. *Instream Flow Studies Pennsylvania And Maryland*. Prepared in cooperation with the Pennsylvania Department of Environmental Protection under Contract ME94002. 1998.
- Tennant, D. Instream Flow Regimes for Fish, Wildlife, Recreation and related Environmental Resources. En: *Fisheries*, 1, 1976, 6-10.

- Tharme, R. *Review of International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers*. Water Law Review Final Report for Policy Development for the Department of Water Affairs and Forestry. Pretoria, 1996.
- USFWS. *Habitat Evaluation Procedures*. Division Ecological Services. USFWS-EMS 102. Washington. D.C., 1980.
- Verweij, M. *A propósito del caudal ecológico*. Disponible en: http://www.aguabolivia.org/exportacionAguas/Caudal_Eco.htm. Fecha de consulta: abril de 2005.
- Wesche, T. A., Rechar, P. A. *A Summary of Instream Flow Methods for Fisheries and Related Research Needs*. Water Resources Research Institute, University of Wyoming, Eisenhower Consortium Bull. 9, Laramie, Wyoming, 1980.
- . *Johannesburg Programme of Action. Un documento preparado para la Cumbre sobre el Desarrollo Sostenible*. Johannesburgo, 2002.