



Latin American Journal of Aquatic  
Research

E-ISSN: 0718-560X

lajar@pucv.cl

Pontificia Universidad Católica de  
Valparaíso  
Chile

Meza-Rodríguez, Demetrio; Martínez-Rivera, Luis Manuel; Mercado-Silva, Norman;  
García de Jalón-Lastra, Diego; González del Tánago-Del Río, Marta; Marchamalo-  
Sacristán, Miguel; De la Mora-Orozco, Celia  
Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de  
México  
Latin American Journal of Aquatic Research, vol. 45, núm. 5, noviembre, 2017, pp. 1017-  
1030  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Valparaíso, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=175053482017>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

**Research Article**

## **Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México**

**Demetrio Meza-Rodríguez<sup>1</sup>, Luis Manuel Martínez-Rivera<sup>1</sup>, Norman Mercado-Silva<sup>2</sup>  
Diego García de Jalón-Lastra<sup>3</sup>, Marta González del Tánago-Del Río<sup>3</sup>  
Miguel Marchamalo-Sacristán<sup>4</sup> & Celia De la Mora-Orozco<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad de Guadalajara  
Autlán de Navarro, Jalisco, México

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos Cuernavaca, Morelos, México

<sup>3</sup>Escuela de Ingenieros Forestales y del Medio Natural, Laboratorio de Hidrobiología  
Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

<sup>4</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Laboratorio de Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

<sup>5</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Tepatlán de Morelos, Jalisco, México

Corresponding author: Luis Martínez (lmartinez@cucsur.udg.mx)

**RESUMEN.** En los últimos 100 años los ríos han experimentado grandes modificaciones. En México se han tomado medidas para resarcir los daños causados a través de la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico. La cuenca del Río Ayuquila-Armería, uno de los más importantes ríos del occidente de México, ha sufrido en los últimos años el desecamiento a su salida al mar, lo que ha representado un obstáculo para las especies migratorias. El objetivo de este estudio es la propuesta de caudal ecológico de distribución mensual, utilizando los métodos hidrológicos, combinados con la utilización del método de hidrobiológico, definidos en la norma mexicana. Como resultado de los métodos hidrológicos suma un volumen total de  $1.088 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ , el método hidrobiológico estima un caudal mínimo ecológico de  $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , indicando que en niveles de gasto por debajo de este caudal las “especie objetivo” no podrían sobrevivir debido al descenso del hábitat potencial útil. El resultado final es un régimen mensual de caudales, para la época de estiaje (noviembre-mayo) con un 7% de reserva de agua, y para los meses más secos de marzo a mayo con 2%, con caudales de  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en marzo,  $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para abril y  $4.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en mayo, asegurando la protección de la fauna acuática, en lluvias de junio a octubre con una reserva de agua de 41%, alcanzando su caudal más elevado en septiembre con  $105.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  mejorando la dinámica hidrológica y geomorfológica del río.

**Palabra clave:** método hidrológico, método hidrobiológico, caudal mínimo ecológico, especie objetivo.

## **Proposal of ecological flow at Ayuquila-Armeria River watershed in western Mexico**

**ABSTRACT.** Rivers have experienced great changes in the last 100 years. In Mexico, measures have been taken to compensate for the damages caused, through the Mexican Standard NMX-AA-159-SCFI-2012, which establishes the procedure for determining the ecological flow. The watershed of the Ayuquila-Armeria River, one of the most important rivers in western Mexico, has suffered in recent years drying out, towards the sea, which has been an obstacle for migratory species. The objective of our study is the proposal of ecological flow of monthly distribution, using the hydrological methods, combined with the use of the hydrobiological method, defined in the Mexican standard. As a result of hydrological methods totaling  $1.088 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ , the hydrobiological method estimates an ecological minimum flow of  $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , indicating that in spending levels below this flow the “target species” would not survive if flows fall below these levels due to significant decreases in their Weighted Usable Area (WUA). The final result is a monthly flow regime; during the dry season

(November-May) it maintains a 7% water reserve, and for the driest months from March to May, 2%, with flow rates of  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in March,  $4.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  for April and  $4.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in May, the protection of aquatic fauna was ensured, in rainfall from June to October it has a water reserve of 41%, reaching its highest flow in September with  $105.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  improving the hydrological and geomorphological dynamics of the river.

**Keyword:** hydrologic method, hydrobiological method, minimum ecological flow, target species.

## INTRODUCCIÓN

Los daños causados a los ríos son cada vez más evidentes a nivel local y global (Revenga *et al.*, 1998); en los últimos 100 años los ríos han experimentado grandes modificaciones, la construcción de presas de almacenamiento de agua para el uso industrial, doméstico, agrícola y la generación de energía, han modificado las condiciones de calidad de agua y la estructura de los cauces (Baxter, 1977). Como consecuencia de estas alteraciones las comunidades biológicas asociadas a los ríos han sufrido intensas modificaciones (Arthington *et al.*, 1992), por lo que ha aumentado la necesidad de conocer su estado de conservación o degradación, para adoptar mecanismos de manejo adecuados (Richter *et al.*, 1996). En la actualidad existen esfuerzos importantes a nivel internacional por realizar investigaciones enfocadas a la conservación de los ecosistemas fluviales. Estos esfuerzos se avocan a mantener regímenes de caudales que eviten daños al funcionamiento natural de los ecosistemas lóticos (García-Rodríguez *et al.*, 2009). El régimen de caudales de un río se refiere a las variaciones espaciales y temporales de caudal que un río presenta como respuesta al clima, a las condiciones geológicas, geomorfológicas y al uso del agua a lo largo del curso fluvial (Resh *et al.*, 1988).

El régimen de caudal natural representa el caudal que escurre en un río en términos de cantidad, tiempo y variabilidad en condiciones naturales, sin estructuras hidráulicas que cambien el patrón hidrológico (Poff *et al.*, 1997). El régimen de caudal alterado representa un caudal totalmente dependiente del almacenamiento y del uso antropogénico del agua, que altera el caudal hidrológico natural del río (Arthington & Pusey, 2003). Dentro del concepto de régimen de caudal alterado, se incluye el régimen de caudal ecológico, que es la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada en un río (DOF, 2012).

Existen diferentes métodos para el cálculo del régimen de caudal ecológico (Tharme, 2003): los métodos hidrológicos se basan en el análisis de series históricas de aforos (Cavendish & Duncan, 1986); los métodos hidráulicos se basan en el entendimiento de la morfología del cauce (Tharme, 2003); los métodos hidrobiológicos permiten realizar simulaciones de hábitat bajo diferentes condiciones de caudal y utilizan

una especie objetivo (Armour & Taylor, 1991) y finalmente, los métodos holísticos analizan la integración del conjunto de procesos biológicos, físicos y químicos en un sistema fluvial a través de su organización estructural, funcional y de distribución (Poff *et al.*, 1997; Arthington *et al.*, 2003; Tharme, 2003).

Diversas naciones utilizan diferentes métodos para establecer caudales ecológicos. En Latinoamérica, Chile utiliza el 10% del caudal medio anual como un estimador del caudal ecológico; en Brasil, se utilizan primordialmente los métodos de tipo hidrológico simple como son el  $7Q_{10}$  y el método de curvas de permanencia (Tharme, 2003). Sin embargo, estos métodos resultan en caudales sumamente bajos y no toman en cuenta criterios ecológicos.

En México se han desarrollado diferentes técnicas para la implementación de caudales ecológicos. En la década de los 90's la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), inició una serie de actividades relacionadas con los caudales para uso ambiental o uso para conservación ecológica, apoyadas fundamentalmente en la aplicación del método de Tennant (1976). En el 2004, la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P (FGRA) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF-México), establecieron alianza con el objetivo de desarrollar nuevos modelos de manejo del agua en el país (González *et al.*, 2009). En el 2010 se logró identificar 189 cuencas prioritarias con baja demanda de uso del agua para la generación de reservas potenciales de agua (RPA) y con base en estas experiencias, y la colaboración de numerosas otras organizaciones en 2012 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que estableció el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (DOF, 2012).

En el estado de Jalisco, el Río Ayuquila-Armería, es uno de los más importantes ríos del Occidente de México, no es ajeno a la problemática asociada con la fragmentación y la contaminación de ríos (Jardel, 1992). En la cuenca se localizan importantes áreas para la conservación, como son la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), las Zonas de Protección Forestal y Fauna Sierra de Quila y El Jabalí, el Parque Nacional Nevado de Colima, y el Parque Estatal Bosque Mesófilo Nevado de Colima, que representan

el 10% de la superficie de la cuenca, juegan un papel importante para la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas (Santana *et al.*, 1993). Desde el punto de vista de la conservación de fauna silvestre, el Río Ayuquila-Armería juega un papel relevante, reconocido como el primer lugar en diversidad biótica en el estado de Colima y el segundo en el estado de Jalisco, albergando a más de 29 especies de peces de las cuales doce se encuentran dentro de la RBSM y dos son endémicas de México (Santana *et al.*, 1993).

La cuenca es también una importante zona productora de agua para riego, la cual es almacenada en cuatro grandes embalses, Tacotán, General Ramón Corona (Trigomil), Basilio Badillo (Las Piedras) y El Nogal. Estas presas, durante la temporada de lluvias, cortan todo el flujo natural y lo almacenan para el riego del siguiente año (Martínez *et al.*, 2000). Sin embargo, el almacenamiento del agua ocasiona cambios en los patrones hidrológicos y geomorfológicos naturales del río, como producto de este método de operación de los embalses para sostener los distritos de riego 094 El Grullo-Autlán en el Estado de Jalisco y el 053 Peñitas II en el Estado de Colima, han desecado varias secciones, ocasionado principalmente por el desvío de agua, afectando la continuidad longitudinal y transversal y disminuyendo la diversidad de hábitat en el río. Aumentado el caudal del río durante la temporada de secas (debido al aporte de agua para riego) y disminuido durante la época de lluvias (Martínez *et al.*, 2000).

Inversamente a la gran importancia ecológica de la cuenca mencionada anteriormente, el programa de reservas potenciales de agua en México (RPA), presento resultados menos favorables, dando más peso a los factores de presión de uso de agua (concesiones y asignaciones entre los usuarios), definiendo de esta manera un objetivo ambiental “D” deficiente, establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012.

Esta investigación busca estimar una propuesta de caudal ecológico de distribución mensual, apoyado en que la biodiversidad de los ecosistemas dulceacuícolas se desarrolla en torno a un medio físico variable a lo largo del año y por ende las especies presentan diferentes requerimientos de hábitat, difiriendo con la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece un volumen total anual como caudal ecológico. Con el uso combinado de métodos hidrológicos e hidrobiológicos, adaptado a los requerimientos de las especies objetivo, se busca dar una mayor certeza a la determinación del caudal ecológico dentro de la cuenca y que esta información pueda ser utilizada por los tomadores de decisiones para un mejor uso y manejo de los recursos hídricos de

la cuenca. Los resultados esperados no tratan de identificar el periodo con condiciones más naturales o prístinas del río, sino aquel periodo donde las acciones humanas que modifican el régimen de caudal hidrológico no afecten significativamente a las comunidades biológicas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Cuenca del Río Ayuquila-Armería

La cuenca se localiza entre los estados de Jalisco y Colima en el occidente de la México en las coordenadas geográficas 18°51'05"-20°28'03"N y 104°38'17"-103°34'41"W (Fig. 1). Las corrientes principales son los Ríos Ayuquila y Tuxcacuesco que nacen en la Sierra de Quila. Estas corrientes confluyen y forman la corriente del Río Armería, que penetra en territorio del estado de Colima en el tramo comprendido entre el Cerro Grande y el Nevado de Colima. La cuenca drena una superficie aproximada de 9.864 km<sup>2</sup> con un trayecto de 321 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en Boca de Pascuales, de los cuales 73 km se encuentran delimitando el Norte y Este de la Reserva de Biosfera Sierra de Manantlán. Su caudal es extremadamente variable, con un flujo permanente durante todo el año. El clima que predomina es semiárido, con una precipitación promedio anual de 800 mL una temperatura promedio de 22°C (Martínez *et al.*, 1991).

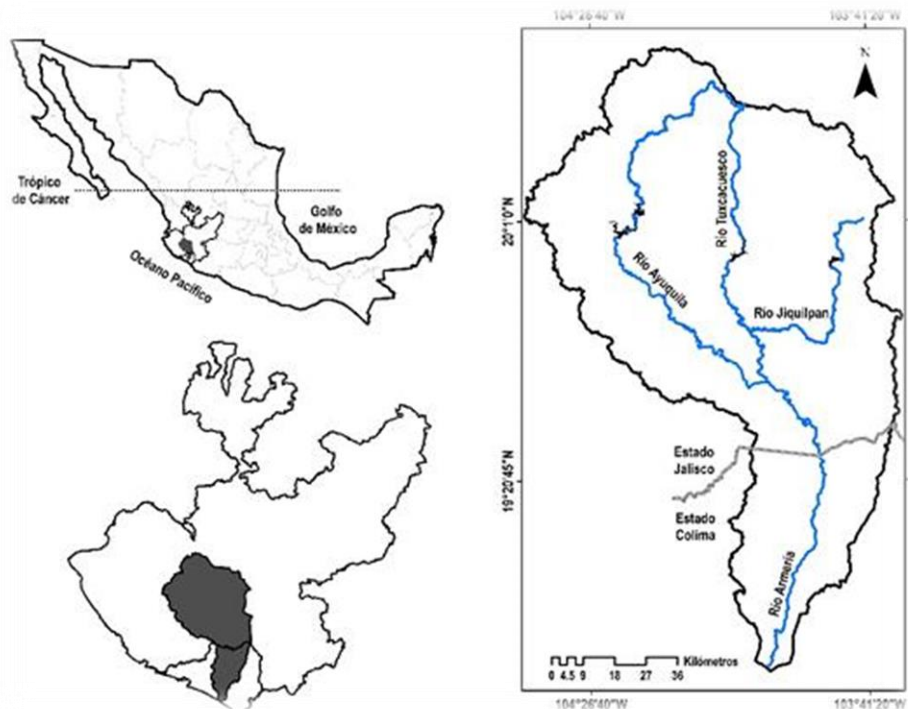
### Método hidrológico

Para generar la propuesta de caudal ecológico de distribución mensual se utilizaron los métodos hidrológicos y los hidrobiológicos establecidos en la norma mexicana. El método hidrológico (Apéndice D), considera dos aspectos para su determinación, los caudales ordinarios estacionales con el volumen total de reserva (VtCoe) y el régimen de avenidas tipo a un año (V<sub>tra</sub>/1 año). La suma de estos resulta en la estimación del volumen total anual de reserva de agua para la propuesta de caudal ecológico.

Para lograr el cálculo de los caudales ordinarios estacionales se reconstruyó el caudal natural de distribución mensual, para un periodo de 29 años (1963-1991), utilizando el modelo determinístico de Témez (1977) “precipitación-escorrentía”, a una escala mensual. Reconstruido el caudal natural se siguieron los pasos establecidos en el Apéndice D de la norma mexicana.

Para estimar el volumen total de reserva (VtCoe), se utiliza la siguiente expresión:

$$VtCoe = (F_{coeMS} * V_{coeMS}) + (F_{coeS} * V_{coeS}) + (F_{coeM} * V_{coeM}) + (F_{coeH} * V_{coeH})$$



**Figura 1.** Localización de la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el ámbito nacional, su superficie se distribuye entre los estados de Jalisco y Colima en el occidente de México.

donde:

$V_{tcoe}$  = Volumen total de reserva

$F_{coe}$  = Frecuencia de ocurrencia de un régimen "I"

$V_{coe}$  = Volumen de reserva para cada condición "I"

I = condiciones muy secas (MS), secas (S), medias (M), y húmedas (H).

Para el cálculo del régimen de avenida tipo, los datos fueron obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para un periodo de 26 años (1970-1995), de las estaciones hidrométricas 15014 Higuera Blanca II (estado de Jalisco, localizada en el Río San Nicolás que drena una superficie de 2.319 km<sup>2</sup>) y la estación 16035 Callejones (estado de Colima, localizada en el Río Coahuayana, drena una superficie de 7.894 km<sup>2</sup>). Para poder utilizar esta información en la cuenca, los datos diarios se extrapolaron a la cuenca del Río Ayuquila-Armería utilizando el método ponderado por superficie.

El método de régimen de avenidas tipo considera tres categorías de avenidas (intraanuales, interanuales de baja magnitud e interanuales de media magnitud), que son las necesarias para mantener a largo plazo los ecosistemas. Los datos de los componentes magnitud, frecuencia, duración, momento de ocurrencia y tasa de cambio, fueron obtenidos a partir de los datos de las

estaciones hidrológicas mencionadas, siguiendo los pasos establecidos en el Apéndice D de la norma mexicana.

Para estimar el volumen total del régimen de avenidas ( $V_{tra}$ ), se utiliza la siguiente expresión:

$$V_{tra} = (F_{al} * D_{al} * V_{al}) + (F_{aII} * D_{aII} * V_{aII}) + (F_{aIII} * D_{aIII} * V_{aIII})$$

donde:

$V_{tra}$  = Volumen total del régimen de avenidas;

$F_{al}$  = Frecuencia de ocurrencia de una avenida "I"

$D_{al}$  = Duración de una avenida "I"

$V_{al}$  = Volumen de una avenida "I"

I = Avenidas tipo I, II y III

Para establecer el volumen final de reserva, se aplicó la expresión:  $V_{fr} = V_{tcoe} + V_{tra}$  1año.

### Método hidrobiológico

El método hidrobiológico (Apéndice E), se denomina como un método de simulación de hábitat, y define el caudal mínimo ecológico a partir de un estudio de todos los factores y condicionantes del hábitat de una especie objetivo del ecosistema fluvial. Para llevar a cabo el cálculo del caudal mínimo ecológico se utilizó la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee & Milhous, 1978), utilizando el

software iRIC (International River Interface Cooperative) en su plataforma conocida como FaSTMECH (Flow and Sediment Transport with Morphological Evolution of Channels) (Nelson *et al.*, 2016).

Para la simulación hidráulica dentro del método hidrobiológico, se midieron las características hidráulicas del cauce y se seleccionaron dos especies objetivo. Estos dos elementos se integraron para relacionar las características físicas del tramo fluvial con las necesidades de hábitat de las especies objetivo. Para la caracterización del cauce de río se seleccionó un tramo dentro del Río Ayuquila-Armería utilizando la imagen satelital de Google Earth®. La selección del tramo obedeció a aspectos de representatividad del canal y de logística (*e.g.*, facilidad de acceso, aspectos de seguridad personal). Dicho tramo se ubicó 30 km aguas abajo de la confluencia de los Ríos Ayuquila y Tuxcacuesco (19°28'56.68"N, 103°50'08.64"W). El sitio tuvo una longitud-segmento de río de 706 m e incluyeron diferentes representaciones de las unidades morfodinámicas (pozas, rápidos, rápidos someros, remansos, tablas, isletas) típicas del río. Utilizando un equipo topográfico de precisión (Estación Total Sokkia 630 R y GPS Astech Promark 3) se levantaron un total de 62 secciones de río con 1.055 puntos.

Cada sección consistió de un transecto perpendicular a la dirección de flujo, partiendo del punto de mayor inundación de un lado del río hasta el otro. En cada una de las secciones de río se establecieron puntos de medición de parámetros: profundidad de la columna de agua (m), velocidad ( $\text{m s}^{-1}$ ) y granulometría del sustrato (mm). Esta medición se estableció atendiendo los cambios de la pendiente, profundidad, velocidad y sustratos. Cada punto de las secciones quedó georreferenciado en coordenadas UTM WGS84 13 Norte.

Con base en información proveniente del programa de monitoreo de largo plazo (1998-2011), de calidad del agua y peces, dentro del Río Ayuquila, se analizaron e identificaron dieciocho especies, de las cuales diez corresponden a especies nativas, una endémica a nivel país y la otra endémica solo para los Ríos Ayuquila-Armería y Coahuayana, así como seis especies exóticas (L.M. Martínez, *com. pers.*), para seleccionar la especie objetivo, se diseñó un análisis multicriterio utilizando la información de las características cualitativas de las especies autóctonas en el río (amplitud del espectro de hábitat, requerimientos de sustratos, calidad de agua, ciclo reproductivo, amplitud del espectro alimenticio, posición en la pirámide trófica, importancia taxonómica, abundancia y detectabilidad), a estos atributos se asignó un valor (V) valor menor 0 y valor mayor 3) y una ponderación (W) (1 alta ponderación al 9 baja ponderación), dando como resultado final la selección de las especies, *Agonostomus monticola* (Bancroft,

1834) y *Allodontichthys zonistius* (Hubbs, 1932), estas obtuvieron los valores más altos de aptitud para ser consideradas como especie objetivo.

La especie *A. monticola* es una especie catádroma, es decir los juveniles y adultos habitan ríos en los cuales se alimentan, aumentan de peso e inician la maduración sexual, para posteriormente dirigirse al mar para reproducirse durante septiembre (época de lluvias); esta especie desova en el mar y los juveniles permanecen ahí hasta que alcanzar los 30-35 mm, posteriormente se dirigen a las serranías tropicales y subtropicales durante los meses octubre-noviembre (época de estiaje) (Anderson, 1957; Lyons & Mercado-Silva, 1999; Torres-Navarro & Lyons, 1999; Rush, 2009). De ahí la importancia que tiene *A. monticola* con relación a los caudales, durante octubre a noviembre, el caudal superficial del río se seca completamente perdiendo la conectividad longitudinal del río, necesaria para realizar su recorrido hacia las partes altas del río. Con base en la información del programa de monitoreo mencionado anteriormente, de la preferencia de los sustrato, profundidad y velocidad para ambas especies, se realizó un análisis de frecuencia para generar las curvas de idoneidad de hábitat siguiendo a Martínez & García de Jalón (1999).

Una vez definidas a las especies objetivo y las características hidráulicas del cauce, se siguió el método IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee *et al.*, 1998), utilizando el programa computacional iRIC (International River Interface Cooperative). Para este modelo, la principal entrada de datos se refiere a los de la topografía, sobre la cual se definió el eje central del río que se utiliza como referencia para la generación de una malla de cálculo. Utilizando iRIC se interpoló la información de la batimetría obtenida en campo a una malla de cálculo utilizando la técnica de TIN (Triangular Irregular Network), asignando a cada nodo de la malla un valor de altura batimétrica (Nelson *et al.*, 2016). Ya con el modelo digital del área, se procedió a ingresar condiciones iniciales, caudal inicial, y la altura de la lámina de agua en su salida. El modelo fue corrido en un proceso de cálculo estableciendo 1.200 interacciones por cantidad de veces hasta alcanzar una conservación de masa (Nelson *et al.*, 2016).

El cálculo del caudal circulante dentro del sitio de estudio. Para ello, en cada sitio donde se estimó la profundidad de las aguas, a diferentes distancias en las secciones de referencia, se definieron unas celdas donde se midió la velocidad del agua, a una profundidad de la superficie del agua de 0,6 veces del calado. Con estas mediciones y utilizando el método de velocidad-área se estimó el caudal circulante. La medición del caudal circulante se llevó a cabo en la

entrada (la sección más aguas arriba del sitio de trabajo) y en la salida (la sección más aguas abajo del sitio) del tramo en estudio. Para validar el caudal circulante se utilizó el modelo regresión polinomial de segundo orden para describir la relación entre la superficie de la lámina de agua calculada por el software iRIC con la superficie de la lámina de agua observada por el caudal circulante, utilizando la información obtenida en campo del Thalweg (parte más profunda del río donde la corriente es más rápida). Asimismo, aprovechando las mediciones topográficas para cada punto se especificó el tipo de granulometría dominante en el sustrato, siguiendo a Martínez & García de Jalón (1999).

La evaluación del hábitat fluvial, el programa computacional iRIC, analiza dos parámetros, la idoneidad del hábitat y el hábitat potencial útil (HPU). La idoneidad de hábitat se calculó con base en un índice que fluctúa de entre 0 (no útil para la especie) al 1 (valor óptimo). El índice de idoneidad del hábitat combinado de un microhábitat concreto (unidad de simulación de un modelo fluvial) se calculó como la media geométrica ponderada del valor de hábitat para cada variable. De esta manera se definió al HPU como superficie del cauce inundado como la anchura por unidad de longitud de río, que puede ser potencialmente utilizado con una preferencia máxima por las especies objetivo (González del Tánago & García de Jalón, 1998).

Estimado el HPU es necesario determinar el caudal mínimo ecológico, utilizando la representación de la curva de relación de caudales bajos/HPU, mediante el criterio de cambio en la pendiente, se define el caudal mínimo ecológico que debe circular, una vez definido este mínimo, se debe establecer un régimen mensual de caudales, de modo que el caudal mínimo ecológico no sea el mismo, si no, que varíe a lo largo del año de un modo similar al régimen natural.

### Propuesta de caudal ecológico

Una vez completado el análisis del régimen de caudales por los métodos hidrológicos, establecidos en el Apéndice D y el método hidrobiológico en el Apéndice E de la norma mexicana, se elaboró la propuesta del caudal ecológico. La propuesta consiste en distribuir de manera mensual ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), el volumen total anual obtenido a través de los métodos hidrológicos. Para distribuir el volumen total obtenido se utilizó el porcentaje mensual del régimen natural de caudales a través del método de Témez (1977).

Para elaborar la propuesta se utilizaron los valores promedios de los caudales naturales y observados, y el valor obtenido del caudal mínimo ecológico que hace referencia que por debajo de este: la “especie objetivo” no podría sobrevivir debido al descenso en picado del

hábitat potencial útil, este caudal mínimo ecológico será inferior en aquellos meses donde el caudal natural exceda de manera negativa al caudal mínimo ecológico, de esta manera se respeta la variabilidad del régimen natural de caudales. En esta propuesta se define el caudal de estiaje, que será establecido en aquellos periodos de sequías prolongadas. Para determinar la asignación de caudal ecológico se siguen los criterios de referencia que se definen en la Tabla 1.

## RESULTADOS

### Métodos hidrológicos

Los resultados se caracterizan por presentar una gran variabilidad intranual, consecuencia del régimen de precipitaciones, presentando durante febrero a mayo los de menor caudal, mientras que los mayores están dados de julio a octubre para cada una de las condiciones, como resultado de esto se presenta el volumen de reserva anual, para años muy secos  $1.050 \text{ (hm}^3 \text{ año}^{-1}\text{)}$ , años secos  $1.303 \text{ (hm}^3 \text{ año}^{-1}\text{)}$ , años medios  $1.605 \text{ (hm}^3 \text{ año}^{-1}\text{)}$  y para años húmedos  $2.506 \text{ (hm}^3 \text{ año}^{-1}\text{)}$ . El volumen total de reserva para efecto de balance de disponibilidad para la propuesta de caudal ecológico fue de  $1.050 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ , representada por años muy secos, definida por el objetivo ambiental (Tabla 2).

El resultado del régimen de avenida tipo, muestra las crecidas para los diferentes periodos de retorno. Estos volúmenes deberán ser aplicados de junio a octubre para categoría I, II y para la categoría III en septiembre; en estos meses se registran las mayores incidencias de crecidas de estas magnitudes del régimen natural. El periodo de retorno para la categoría I de un 1 año con  $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , estos caudales simulan la distribución natural que presenta el río en un año, propiciando la distribución de la comunidades de plantas en la ribera del río, aumentando las planicies de inundación al incorporar nuevo sedimentos en los canales y beneficiando las zonas de desove, de esta manera se aumenta el hábitat para la reproducción y refugio, estos caudales se asocian a sitios con mayor profundidad, con alta concentración de oxígeno disuelto

**Tabla 1.** Criterios de decisión para la asignación de caudal ecológico. CN: caudal natural, CObs: caudal observado, CMH: caudal método hidrológico, CME: caudal mínimo ecológico, CE: caudal de estiaje.

Periodo	Expresión	Asignación de caudal ecológico
Temporada de estiaje	CME, CObs < CMH < CN	CMH
Temporada de estiaje	CN > CME > CObs, CMH	CME
Temporada de estiaje	CRN < CME	CRN
Temporada de lluvias	CMH	CMH
Sequias prolongadas	CE	CE

**Tabla 2.** Volumen estimado para efectos de disponibilidad para los diferentes regímenes de caudales ordinarios estacionales.

Tipo de año	Muy secos		Secos		Medios		Húmedos	
Percentil	P0		P10		P25		P75	
Unidad	m³ s⁻¹	hm³ mes¹	m³ s⁻¹	hm³ mes¹	m³ s⁻¹	hm³ mes¹	m³ s⁻¹	hm³ mes¹
Enero	9,9	26,5	11,9	31,9	13,1	35,0	21,6	57,9
Febrero	6,5	15,7	7,8	18,9	8,6	20,7	12,7	30,6
Marzo	4,3	11,4	5,1	13,7	5,6	15,0	9,3	24,9
Abril	2,8	7,2	3,4	8,7	3,7	9,5	5,5	14,3
Mayo	1,9	4,9	2,2	5,9	2,5	6,7	4,3	11,5
Junio	8,4	21,6	12,8	33,1	36,7	95,0	82,2	213,1
Julio	93,6	250,6	117,3	314,1	133,5	357,6	227,1	608,3
Agosto	100,9	270,2	129,5	346,9	154,1	412,7	190,5	510,3
Septiembre	101,6	263,3	125,8	326,0	152,5	395,3	237,4	615,3
Octubre	34,0	91,0	38,0	101,8	49,3	132,1	87,8	235,1
Noviembre	19,0	49,2	22,9	59,4	28,4	73,7	41,9	108,5
Diciembre	13,9	37,3	15,8	42,2	19,2	51,4	28,3	75,7
Volumen de reserva para cada condición (VCoe-hm³ año¹)	1.05		1.303		1.605		2.506	
Frecuencia de ocurrencia	1		0		0		0	
Volumen total de reserva (VtCoe - hm³ año¹)	1.05							

disuelto y bajas temperaturas, favoreciendo a especies catádomas y diádomas (Tabla 3) (Arthington *et al.*, 2003; Richter *et al.*, 2006).

La categoría II con un periodo de retorno 1,5 años con 300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, este es el caudal formador de cauce (*bankfull*), se presenta principalmente durante el periodo de lluvias, este volumen de agua es necesario para preservar las riberas, el caudal de *bankfull* conserva la forma física del cauce, remueve los sedimentos de arenas, gravas y rocas, previniendo la invasión de la vegetación de ribera, después de un periodo de caudales bajos el caudal de *bankfull* funciona como un limpiador natural restaurando la calidad de agua en el río ver Tabla 3 (Molles *et al.*, 1998; Bunn & Arthington, 2002).

La categoría III con periodo de retorno de 5 años, con 750 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, este caudal está marcado por pequeñas inundaciones, al menos debe darse una vez cada 5 años durante septiembre el mes más lluvioso, este caudal conserva la morfología del cauce y el transporte de sedimentos removiendo los sedimentos del fondo, esto mantiene la cubierta vegetal de los corredores ribereños en buen estado (Tabla 3) (Arthington *et al.*, 1992; Bunn & Arthington, 2002).

La tasa de cambio, el ascenso fue superada en el 11%, para los incrementos positivos y el descenso sólo es superada en el 10% de las ocasiones (Tabla 3). Estos resultados no suponen cambios de caudal significativos en el medio, facilitando zonas de sedimentación para

las comunidades de peces y aumentando la abundancia de invertebrados de las que se alimentan.

Con estos resultados del régimen de avenida tipo, se obtiene una proyección para un horizonte temporal de diez años, con un volumen final de reserva (Vfr/10 años) de 376 hm<sup>3</sup> año<sup>1</sup> donde se asegura suficiente representación de todos los componentes del régimen hidrológico conforme a la variabilidad natural del río. Para efectos de nuestra propuesta a través de este método, la reserva final es un volumen a un año (Vfr/1 año) con 38 hm<sup>3</sup> año<sup>1</sup> (Tabla 3) definida por el objetivo ambiental.

El volumen final ha reserva para la propuesta a través de los métodos hidrológicos (Apéndice D), fue un total de 1.088 hm<sup>3</sup> año<sup>1</sup>.

### Método hidrobiológico

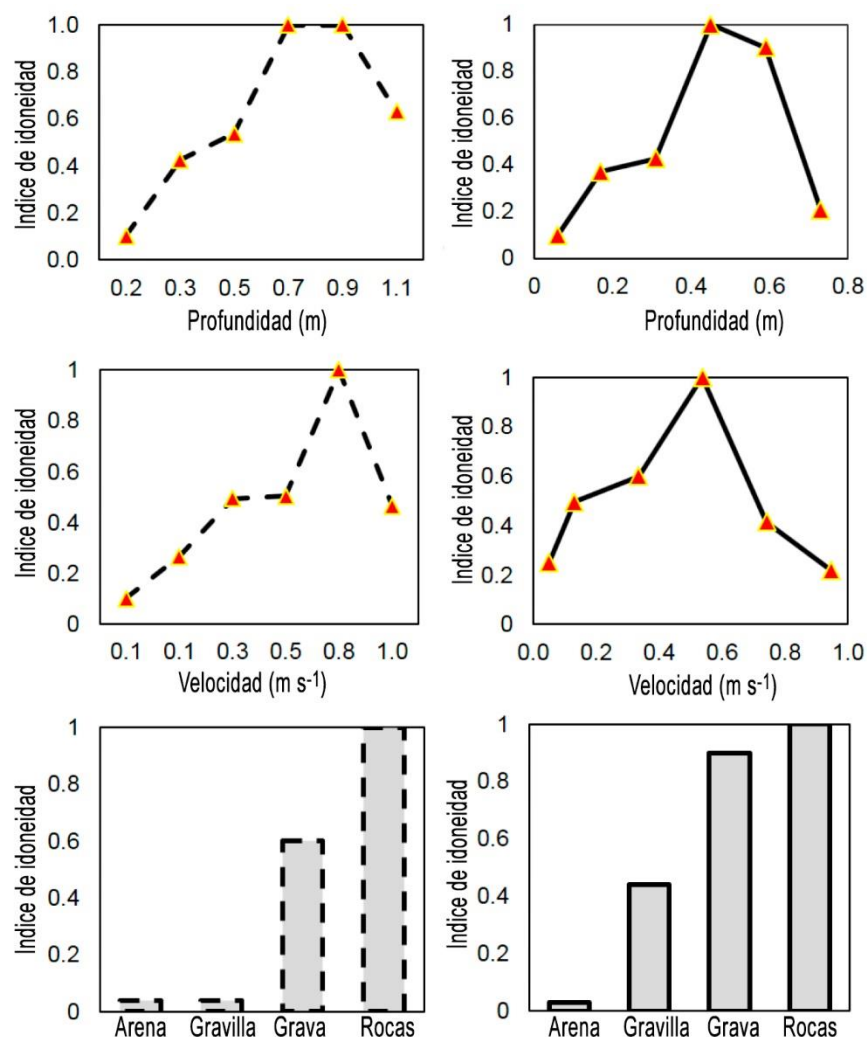
Con base en el análisis del resultado del caudal mínimo ecológico (método hidrobiológico-Apéndice E), el caudal circulante fue estimado en 8,69 (m s<sup>-1</sup>), para ambos, el caudal de entrada y el de salida. Las curvas de idoneidad propuestas para las dos especies objetivo *Agonostomus monticola* y *Allodontichthys zonistius*, para generar la simulación ecohidráulica se muestran en la Figura 2.

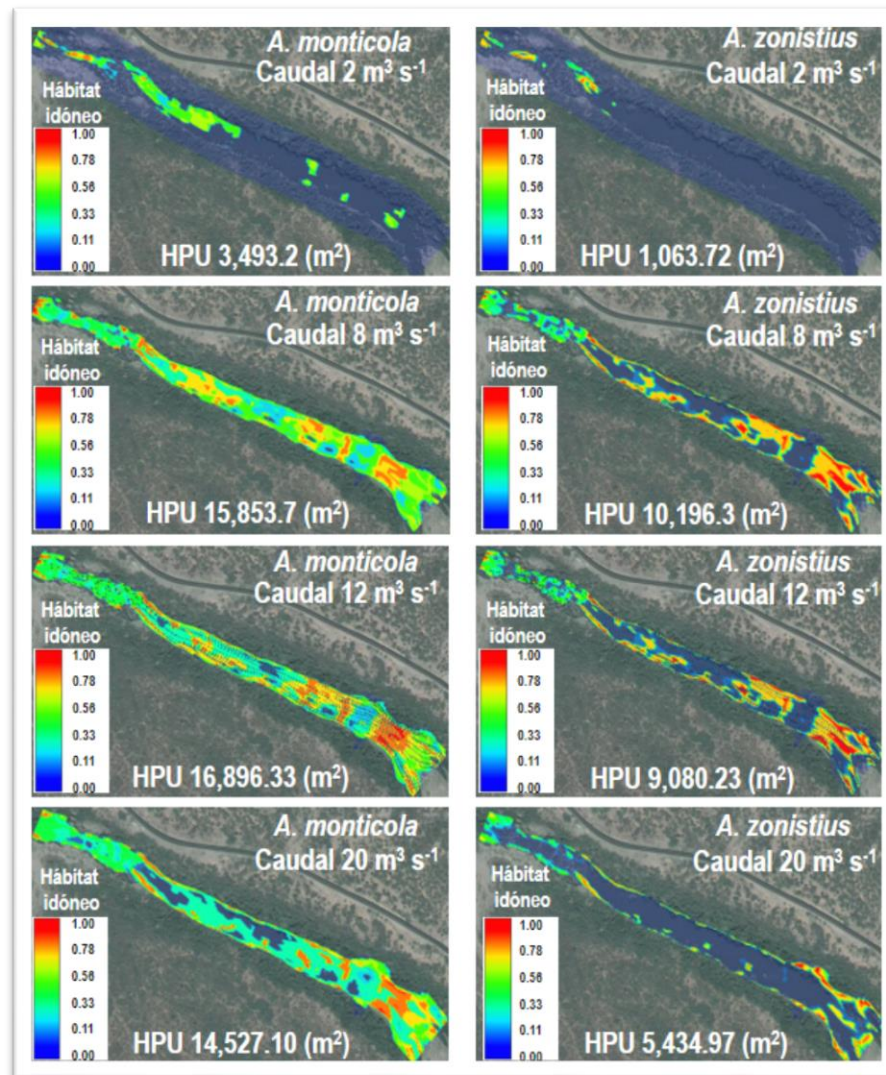
El resultado de la modelación ecohidráulica utilizando el programa computacional iRIC (International River Interface Cooperative), presenta simulaciones a diferentes caudales, obteniendo la idoneidad de hábitat



**Tabla 3.** Régimen de avenidas tipo para las diferentes categorías de datos con sus correspondientes atributos.

Atributo del régimen hidrológico		Categoría I Retorno 1 año	Categoría II Retorno 1,5 años	Categoría III Retorno 5 años
Magnitud	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	150	300	750
	$\text{hm}^3 \text{ día}^{-1} (V_a)$	13	26	65
Frecuencia de ocurrencia ( $F_a$ )		2	1	1
Duración (no. de días - $D_a$ )		7	5	1
Momento de ocurrencia		Junio - Octubre	Junio - Octubre	Septiembre
Tasa de cambio (%)	Ascenso		11	
	Descenso		10	
$V_{t_{ra}}$ a 10 años			376	
$V_{t_{ra}}$ al año			38	

**Figura 2.** Curvas de idoneidad propuestas para la estimación del hábitat potencial útil (HPU), valor 1 representa la máxima idoneidad. Línea punteada *A. monticola*, línea continua *A. zonistius*.



**Figura 3.** Simulación hidráulica a diferentes caudales y la estimación del hábitat potencial útil (HPU), del *A. monticola* y *A. zonistius*, los valores en color rojo definen el máximo hábitat idóneo con un valor de 1, se degrada hasta alcanzar un color azul con un valor estimado de 0 hábitat idóneo.

y el hábitat potencial útil (HPU) para las especies objetivo (Fig. 3).

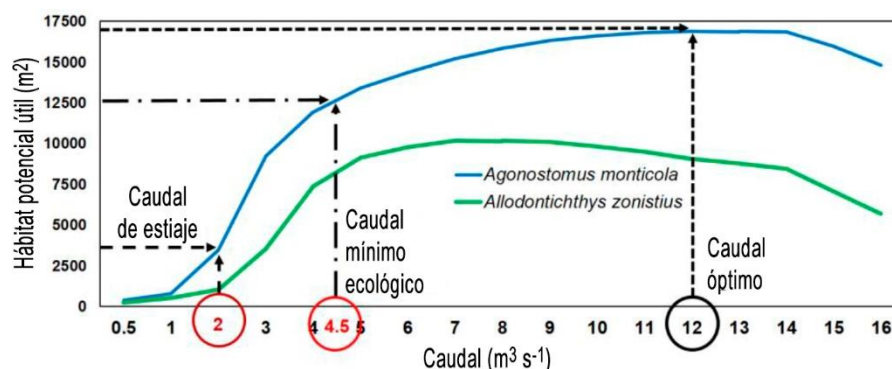
Utilizando el cambio en la pendiente, el resultado del caudal mínimo ecológico fue estimado en  $4,5 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$  para las dos especies objetivo, indicando que por debajo de este las “especies objetivo” no podrían sobrevivir debido al descenso drástico del HPU (Fig. 4).

Mediante el análisis de la Figura 4, HPU/caudales, se identificó el caudal óptimo de  $12 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , para *A. monticola* y un óptimo de  $7 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , para *A. zonistius*, que es el máximo de HPU que alcanza el sistema para las especies. En el análisis también se estimó el caudal de estiaje en  $2 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , para las dos especies, se expresó como el 25% del HPU del caudal óptimo (Fig. 4). Este caudal de estiaje se establecerá cuando existan sequías prolongadas y por ningún motivo disminuirá  $2 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ .

En la Figura 4, se denotan los diferentes intervalos de variación caudales/HPU, de  $0,5$  a  $4 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , se observa una pérdida drástica del HPU para las dos especies, en los intervalos de  $4$  a  $8 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , el *A. monticola* presenta un crecimiento del HPU, para *A. zonistius* este obtiene sus niveles óptimos de HPU. Los intervalos entre  $8$  a  $12 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ , *A. monticola* alcanza el HPU óptimo, a diferencia del *A. zonistius* presenta un descenso moderado de HPU. Para las dos especies intervalos superiores a los  $14 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$  significa una pérdida rápida de su HPU (Fig. 4).

### Propuesta final del caudal ecológico

El resultado final para efectos de conservación de caudal ecológico, como lo marca la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, estima un volumen total de



**Figura 4.** Relación, hábitat potencial útil/caudales, para las especies objetivo y la identificación del caudal mínimo ecológico, caudal óptimo y caudal de estiaje.

1.088 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. La propuesta del régimen de caudal ecológico de distribución mensual, se presenta en la Tabla 4. Durante los meses de época de secas (enero-mayo), de enero a marzo, el caudal de referencia como caudal ecológico es el obtenido a través del método hidrológico, estos meses presentan un caudal de 10,2 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) en enero, 6,1 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) febrero y 5,0 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) marzo. En abril se establece como caudal ecológico el caudal mínimo ecológico con 4,5 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) y para mayo el más seco, se establece como caudal ecológico el referente al régimen natural de caudales con 4,4 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Sin embargo, para aquellos años con sequías prolongadas se deberá definir el caudal de estiaje con 2 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), como caudal ecológico, y su instalación debe ser progresiva hasta alcanzarlo. Durante la época de lluvias (junio-octubre) los valores obtenidos a través del método hidrológico servirán de referente como caudal ecológico, alcanzando su caudal más elevado durante el mes de septiembre con 105,3 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), mayor volumen de agua no supondrá un aumento en el hábitat potencial útil para las especies objetivo. En noviembre y diciembre, el caudal de referencia como caudal ecológico es el obtenido a través del método hidrológico.

El caudal natural, establecido en la Tabla 4 presenta una variabilidad en el tiempo y en el espacio, de manera que el agua que fluye por su cauce este en función de los cambios climáticos estacionales que se dan a lo largo del año, marcado una diferencia con el caudal observado, el cual obedece al uso antropogénico que se le va dando al agua a lo largo del curso fluvial y dependen en gran medida de la oferta y la demanda dentro del río, este caudal observado no presenta una variabilidad a lo largo de los meses, este obedece a un caudal mínimo y no reconoce un régimen y su variabilidad.

El volumen del régimen natural calculado fue de 2.265' 710.400 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, el volumen de la propuesta de caudal ecológico fue de 1.099' 042.560 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, representa el 49% del régimen natural. Para la época de estiaje (noviembre-mayo), un 7% de reserva de agua, para los meses más secos marcados durante marzo a mayo un 2% con respecto al régimen natural, asegurado la protección de la fauna acuática y la conexión longitudinal del cauce. Para la época estival (lluvias), de junio a octubre se deberá mantener una reserva del 41%, este porcentaje de agua tendrá efectos en las llanuras de inundación mediante el transporte y deposición de nutrientes ver (Tabla 4).

## DISCUSIÓN

Actualmente es importante caracterizar y conservar los regímenes naturales de caudales para garantizar el mantenimiento de la biodiversidad acuática de los ríos (Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 1997; Arthington & Pusey, 2003). Esta propuesta de caudales ecológicos es una de las más completas para la determinación del caudal ecológico en México en cuencas con alto grado de alteración hidrológica, en él se abordan la selección de la especie objetivo, la generación de las curvas de idoneidad, así como el modelado hidráulico para definir el hábitat potencial útil de las especies objetivos, necesario para lograr la conservación de los ecosistemas de ríos y arroyos y la combinación de métodos (hidrológicos e hidrobiológicos) para estimar la propuesta de caudales ecológicos a una escala mensual.

Desafortunadamente, en México, la mayoría de los métodos para estimar los caudales ecológicos se han basado en datos hidrológicos (Santacruz & Aguilar, 2009; Santacruz, 2010; De la Lanza *et al.*, 2012; Lanza *et al.*, 2015), y son pocos los que han abordado los caudales ecológicos desde un punto de vista más ecológico.

**Tabla 4.** Propuesta de régimen de caudal ecológico de distribución mensual para la cuenca del Río Ayuquila-Armería ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ).

Meses	Caudal natural 1963-1991	Caudal observado 1971-1994	Caudal método hidrológico	Caudal mínimo ecológico	Caudal de estiaje	Caudal ecológico	% Q. Ecológico / Q. natural medio
Enero	21,5	6,7	10,2	4,5	2	10,2	47,4
Febrero	11,6	3,0	6,1	4,5	2	6,1	52,4
Marzo	10,6	2,1	5,0	4,5	2	5,0	47,0
Abril	5,5	1,9	2,7	4,5	2	4,5	81,3
Mayo	4,4	3,7	2,1	4,5	2	4,4	100
Junio	66,9	17,4	32,7	4,5	2	32,7	48,8
Julio	188,0	53,5	89,1	4,5	2	89,1	47,3
Agosto	184,8	58,7	87,5	4,5	2	87,5	47,3
Septiembre	215,2	101,2	105,3	4,5	2	105,3	48,9
Octubre	81,9	48,4	38,8	4,5	2	38,8	47,3
Noviembre	42,8	16,1	21,0	4,5	2	21,0	49,0
Diciembre	24,5	7,6	11,6	4,5	2	11,6	47,3

Nota: El caudal natural obtenido del modelo de Témez (medio mensual), el caudal observado de los datos históricos de la estación hidrométrica 16032 Coliman (medio mensual), el caudal método hidrológico obtenidos del apéndice D de norma mexicana, el caudal mínimo ecológico y de estiaje obtenido de los métodos hidrobiológicos en el apéndice E de norma mexicana.

gico como los realizados por González & Banderas (2007). Una de las limitaciones en general de los métodos hidrológicos es la dificultad de contar con un registro de datos hidrométricos puntuales y continuos de caudales naturales que son necesarios para la estimación de los caudales ecológicos, esto representa un obstáculo en México y Latinoamérica (Pizarro *et al.*, 2003; Santacruz, 2010; Lanza *et al.*, 2015). Esta limitación obliga a la utilización de modelos hidrológicos para la reconstrucción de los regímenes naturales de caudales, ocasionando una serie de errores e incertidumbres, máximo cuando no existen datos en la misma corriente para su verificación.

La importancia de comprender el significado hidrológico, geomorfológico, la hidráulica fluvial, las características biológicas de las especies (Arthington *et al.*, 1992; Poff *et al.*, 1997; Molles *et al.*, 1998), son necesarios para la implementación de los caudales ecológicos en México, esto llevó a diferentes instituciones en el 2010 a realizar un esfuerzo para identificar las reservas potencial de agua, en el Programa Nacional de Reservas de Aguas (PNRA) (CONAGUA, 2011), que derivó en la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 (DOF, 2012), que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

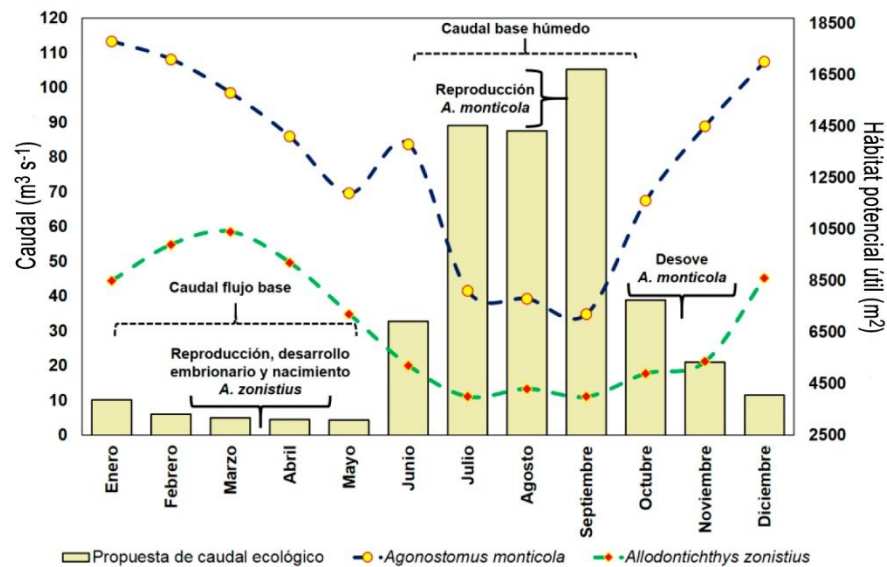
Sin embargo una de las limitaciones de la norma, es el volumen anual estimado con respecto a su régimen natural como caudal ecológico, este volumen de agua no garantiza la funcionalidad de los sistemas loticos en función de los cambios climáticos estacionales (Arthington *et al.*, 1992; Poff *et al.*, 1997). Además, en

la norma no se establece como obligatorio la estimación de los caudales ecológicos a través de métodos hidrobiológicos u holísticos, que son los métodos más completos, dejando vulnerables los ecosistemas acuáticos mediante la aplicación de métodos hidrológicos de series históricas.

La propuesta de caudal ecológico en este estudio a través de los métodos combinados demuestra que la biodiversidad de los ecosistemas dulceacuícolas se desarrolla en un medio físico variable a lo largo del año y por este motivo las especies presentaron diferentes requerimientos de hábitat. La distribución mensual de los caudales, establecidos muestran que en la desembocadura del río en la época de estiaje se mantenga una conexión del caudal aguas abajo y aguas arriba, beneficiando a la especie objetivo *Allodonta zonitius*, el mantener el volumen de agua que se propone beneficiara a la reproducción, y al desarrollo embrionario después de la fecundación hasta su nacimiento durante los meses de marzo a mayo (Fig. 5) (Lyons & Mercado-Silva, 2000; Mercado-Silva *et al.*, 2002; Rush, 2009).

La especie *A. monticola*, al ser catádroma se desplaza más de 120 km para reproducirse a la salida del río en la época de lluvia (septiembre). Los caudales sugeridos son necesarios para el desplazamiento de la especie hasta la parte baja del río, durante los meses de octubre a noviembre la especie retorna a las partes altas de la cuenca para desovar (Fig. 5) (Torres-Navarro & Lyons, 1999; Lyons & Mercado-Silva, 2000; Mercado-Silva *et al.*, 2002; Rush, 2009). El caudal propuesto permite mantener una conexión longitudinal de caudal





**Figura 5.** Propuesta de caudales ecológicos de distribución mensual a lo largo del año y su hábitat potencial útil para las especies *A. monticola* y *A. zonistius*, en ella se identifica la estación seca y húmeda, y los periodos de reproducción, desove y desarrollo embrionario de las especies.

necesaria para la especie. Con respecto al hábitat, el caudal propuesto para la temporada de secas permitirá un aumento del hábitat potencial útil para *A. zonistius*, a diferencia de la temporada de lluvias cuando existe un aumento en el caudal; éste no supondrá mayor hábitat (Fig. 5), pero sí tendrá efectos en las llanuras de inundación mediante el transporte y deposición de nutrientes, que son importantes en la dinámica hidrológica y geomorfológica del río.

La propuesta de caudal ecológico asegura, así como lo marca la norma para la cuenca del Río Ayuquila-Armería, donde pasará de un estado deficiente a un estado moderado, donde las acciones humanas que modifican el régimen de caudal hidrológico, no afectaran significativamente a las comunidades biológicas.

En general de los estudios hidrológicos y en particular de los caudales ecológicos es necesario desarrollar más estudios con mayor profundidad, y veracidad sobre todo cuando se trata de especies endémicas y nativas, analizando información de sus ciclos de vida como son: freza, alevín, juvenil y adulto, y sus preferencias de hábitat, a través de estudios de probabilidad de uso ponderado según su hábitat disponible, como los trabajos realizados por Mayo *et al.* (1995) y Martínez & García de Jalón, (1999).

Finalmente es importante regular las descargas de aguas residuales, que mejoren las condiciones para la vida acuática dentro del río (Santacruz, 2010). Nuestra propuesta de caudales ecológicos no debe ser interpretada solo como un volumen de agua, sino que

debe de existir una variabilidad de caudales a lo largo del año atendiendo los requerimientos de las especies dulceacuícolas y por tal motivo este volumen mensual debe tener las condiciones de calidad agua como lo marca la normatividad ambiental, por lo que a partir de él no se pueden producir efectos de contaminación dentro del río.

La aplicación metodológica de la norma mexicana de caudales ecológicos en la cuenca del Río Ayuquila-Armería, presenta resultados favorables, si bien esta propuesta metodológica no involucra un análisis holístico que involucre factores socioeconómicos que cuantifique los costos y beneficios de la posible adopción de esta metodología propuesta. Se sugiere en el futuro realizar un estudio que aborde esta cuantificación.

Para finalizar se deben de realizar acciones de refinamiento de la norma mexicana de caudales ecológicos, debido a que es una norma de referencia técnica, y no establece con detalle a que profundidad se deben aplicarse los métodos hidrobiológicos y holísticos, debido a la no obligatoriedad. En la norma se debe de garantizar la conservación de agua para uso ecológico y social. Integrando el componente social y económico en la norma se demostrará que la reserva de agua para el caudal ecológico no es solo conservar la biodiversidad, sino que también tiene relevancia en el desarrollo social y económico de la región y es una manera de amortiguar los impactos de los cambios ambientales globales, y estos componentes ecológicos y socioeconómicos no deben ser incompatibles.

## AGRADECIMIENTOS

El autor principal, agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con número 310158, para la realización de este estudio doctoral y al apoyo económico internacional del proyecto SERELAREFA Semillas Red LATina Recuperación Ecosistemas Fluviales y Acuáticos, dentro del programa *Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme* (IRSE-PEOPLE 2009), para realizar las estancias de investigación en la Universidad Politécnica de Madrid. Se agradece a las aportaciones críticas del referee encargado de la evaluación de este artículo.

## REFERENCIAS

- Anderson, W.W. 1957. Larval forms of the fresh-water mullet (*Agonostomus monticola*) from the open ocean off the Bahamas and south Atlantic coast of the United States. United States Department of the Interior, Fred A. Seaton, Secretary Fish and Wildlife Service. Fish. Bull., 120(57): 1-13.
- Armour, C.L. & J.G. Taylor. 1991. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. Fish and Wildlife Service field users. Fisheries, 16(5): 36-43.
- Arthington, A.H. & B.J. Pusey. 2003. Flow restoration and protection in Australian rivers. Riv. Res. Applic., 19(5-6): 377-395.
- Arthington, A.H., J.L. Rall, M.J. Kennard & B.J. Pusey. 2003. Environmental flow requirements of fish in Lesotho Rivers using the DRIFT methodology. Riv. Res. Applic., 19(5-6): 641-666.
- Arthington, A.H., J.M. King, J.H. O'Keeffe, S.E. Bunn, J.A. Day, B.J. Pusey, D.R. Bluhdorn & R.E. Tharme. 1992. Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystems. In: J.J. Pigrim & B.P. Hooper (eds.). Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment, Centre for Water Policy Research, Armidale, pp. 69-76.
- Baxter, R.M. 1977. Environmental effects of dams and impoundments. Ann. Rev. Ecol. System., 8: 255-238.
- Bovee, K.D. & R. Milhous. 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. Instream Flow Information Paper, N°5. FWS/OBS-78/33, Fish and Wildlife Service, 156 pp.
- Bovee, K.D., B.L. Lamb, J.M. Bartholow, C.B. Stalnaker, J. Taylor & J. Enriksen. 1998. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, Fort Collins CO, U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD, VIII. 131 pp.
- Bunn S.E. & A.H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. Environ. Manage., 30: 492-507.
- Cavendish, M.G. & M.I. Duncan. 1986. Use of the instream flow incremental methodology: a tool for negotiation. Environm. Imp. Assess. Rev., 6: 347-363.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2011. Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tlalpan, México D.F., 87 pp.
- De la Lanza, E.G., J.L.P. Carbajal, S.A.R. Salinas & J.E.O. Barrios. 2012. Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo. Invest. Geogr., 78: 62-74.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2012. Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, Diario Oficial de la Federación, México, 123 pp.
- García-Rodríguez, E., P.F. Martínez-Austria, D.M. García de Jalón-Lastra & L.A. Ochoa-Franco. 2009. Determinación del hábitat potencialmente utilizable por la especie *Salmo trutta* en un tramo del Río Lozoya, España. Ingeniería Hidráulica en México, 24(1): 19-32.
- González, I.D.M., G.E. de la Lanza & R.N. Sánchez. 2009. Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco. Word Widelife Foundation, Fundación Río Arronte Gonzalo. [[http://awsassets.panda.org/downloads/4\\_memoria\\_taller\\_ce\\_czh.pdf](http://awsassets.panda.org/downloads/4_memoria_taller_ce_czh.pdf)]. Revisado: 21 enero 2014.
- González del Tánago, M.R. & D.L. García de Jalón. 1998. Restauración de ríos y riberas. Coedición, Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Presa, pp. 187-204.
- González, V.R. & A.T. Banderas. 2007. Estudio comparativo de tres metodologías para el manejo y cálculo de caudales ambientales en el río Santiago, Nayarit. Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Universidad Autónoma de Querétaro. [[http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong\\_nal\\_06/tema\\_03/27\\_rebecca\\_gonzalez.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_03/27_rebecca_gonzalez.pdf)]. Revisado: 12 marzo 2014.
- Hubbs, C.L. 1932. Studies of the fishes of the Order Cyprinodontes. XI. *Zoogoneticus zonistius*, a new Species from Colima, Mexico. Copeia, 1932(2): 68-71.
- Jardel, P.J. (coord.). 1992. Estrategias para la conservación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán. Editorial Universidad de Guadalajara, Jalisco, 316 pp.

- Lanza, E.G.D., S.A.R. Salinas. & J.L.P. Carbajal. 2015. Calculo del lujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Invest. Geogr.*, 87: 25-38.
- Lyons, J. & N. Mercado-Silva. 1999. Patrones taxonómicos y ecológicos entre comunidades de peces en ríos y arroyos en el oeste de Jalisco, México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Zool.*, 70(2): 169-190.
- Lyons, J. & N. Mercado-Silva. 2000. Peces dulceacuícolas mexicanos. XVIII. *Allodontichthys* (Cyprinodontiformes: Goodeidae). *Zoología informa*, 43: 3-16.
- Martínez, C.F. & D.L. García de Jalón. 1999. Desarrollo de curvas de preferencia de microhábitat para *Leuciscus pyrenaicus* y *Barbus bocagei* por buceo en el río Jarama (Cuenca del Tajo). *Limnetica*, 17: 71-83.
- Martínez, R.L.M., J.J. Sandoval & R.D. Guevara. 1991. El clima en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (Jalisco-Colima, México) y en su área de influencia. *Agrociencia Serie Agua-Suelo-Clima*, 2(4): 107-118.
- Martínez, R.L., A. Carranza & M. García. 2000. Aquatic ecosystem pollution of the Ayuquila River, Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Mexico. In: M. Munawar, S.G. Lawrence, I.F. Munawar & D.F. Malley (eds.). *Aquatic ecosystems of Mexico: status and scope*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 165-181.
- Mayo, R.M., B.B. Gallego, D.L. García De Jalón & F.P. Brotóns. 1995. Preferencia de hábitat de la trucha común en la época de freza, Río Dulce, Guadalajara. *Limnética*, 11(1): 49-54.
- Mercado-Silva, N., J.D. Lyons, G.M. Salgado & M.N. Medina. 2002. Validation of a fish-based index of biotic integrity for streams and rivers of central Mexico. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 12: 179-191.
- Molles, M.C., C.S. Crawford, L.M. Ellis, H.M. Valett & C.N. Dahm. 1998. Managed flooding for riparian ecosystem restoration. *BioScience*, 48: 749-756.
- Nelson, J.M., Y. Shimizu, T. Abe, K. Asahi, M. Gamou, T. Inoue, T. Iwasaki, T. Kakinuma, S. Kawamura, I. Kimura, T. Kyura, R.R. McDonald, M. Nabi, M. Nakatsugawa, F.R. Simões, H. Takebayashi & Y. Watanabe. 2016. The international river interface cooperative: public domain flow and morphodynamics software for education and applications. *Adv. Wat. Res.*, 93: 62-74.
- Pizarro, T.R., F.F. Marabolí, V.J.P. Flores & N.M.G. Icaza. 2003. Evaluation of three rainfall-runoff formulas in Achibueno Basin, Chile. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 18(3): 95-104.
- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks & J.C. Stromberg. 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47: 769-784.
- Resh, V.H., A.V. Brown, A.P. Covich, M.E. Gurtz, H.W. Li, G.W. Inshall, S.R. Reice, A.L. Sheldon, J.B. Wallace & R. Wissmar. 1988. The role of disturbance in stream ecology. *J. North Am. Benthol. Soc.*, 7(4): 433-455.
- Revenga, C., S. Murray, J. Abramovitz & A. Hammond. 1998. Watersheds of the world. Ecological value and vulnerability. World Resources Institute. [<http://eduterre.ens-lyon.fr/ressources/scenarioeau/annexes/bassinsaridity.pdf>]. Revisado: 17 agosto 2014.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell & D.P. Braun. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conserv. Biol.*, 10: 1163-1174.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, R. Wigington & D.P. Braun. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biol.*, 37: 231-249.
- Richter B.D., A.T. Warner, J.L. Meyer & K. Lutz. 2006. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *Riv. Res. Appl.*, 22: 297-318.
- Rush, M.R. 2009. Peces dulceacuícolas de México. Editorial. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 545 pp.
- Santacruz, D.G. 2010. Variación cronoespacial de los caudales ecológicos en la cuenca del Río Valles, México. *Aqua-LAC.*, 2(1): 26-36.
- Santacruz, D.G. & M.R. Aguilar. 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica*, 19(1): 25-32.
- Santana, E., S. Navarro, L.M. Martínez, A. Aguirre, P. Figueroa & C. Aguilar. 1993. Contaminación, aprovechamiento y conservación de los recursos acuáticos del Río Ayuquila, Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima. *Tiempos de Ciencia*, 30: 29-38.
- Tharme, R.E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *Riv. Res. Appl.*, 19: 397-441.
- Témez, P.J. 1977. Modelo matemático de transformación "Precipitación-Aportación". Comisión E. Explotación y Garantía. Grupo de Trabajo de Predicciones de Precipitación y Relación entre Precipitaciones y Caudales, Madrid, 51 pp.
- Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. U.S. Fish and Wild Life Service, Montana, 15 pp.
- Torres-Navarro, C.I. & J. Lyons. 1999. Diet of *Agonostomus monticola* (Pisces: Mugilidae) in the Río Ayuquila, Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, México. *Rev. Biol. Trop.*, 47(4): 1087-1092.