



# Modelos hidrológicos para la estimación de caudal ecológico

## Hydrological models for the estimation of ecological flow

Jairo Isaí Alvarez Villanueva<sup>1,\*</sup>; José Francisco Huamán Vidaurre<sup>2</sup>

1 Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Posgrado, Av. Juan Pablo II N° 1050.

2 Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería, Av. Atahualpa N° 1050.

\*Autor correspondiente: [jialvarezvi@unitru.edu.pe](mailto:jialvarezvi@unitru.edu.pe) (J. I. Alvarez Villanueva).

ID ORCID de los autores

Jairo Isaí Alvarez Villanueva:  <https://orcid.org/0000-0001-8777-3943>

José Francisco Huamán Vidaurre:  <https://orcid.org/0000-0002-4896-0479>

---

### RESUMEN

Fijar el caudal ecológico en los ríos del mundo contribuye a la preservación de ecosistemas fluviales y a la gestión del recurso hídrico, relacionado con lo social y económico; es el volumen de agua necesario para mantener un ecosistema fluvial sano capaz de brindar bienes y servicios. El método hidrológico fue el primer método planteado para estimar el caudal ecológico, desarrollado en las épocas de los años 60 y 70 del siglo 20. Existen diferentes métodos para estimar el caudal ecológico, tales como: hidrológicos, hidráulicos, eco-hidráulicos y métodos holísticos. En el presente trabajo se realizó una revisión de siete métodos hidrológicos, estos son: asturiano, curva de permanencia de los caudales, ecuatoriano o 5% del promedio anual, referencial-normatividad peruana, escocés o 3 meses críticos, suizo y Tennant-Montana (1976). Estos métodos hidrológicos utilizan registros históricos de caudales de estaciones hidrométricas para obtener de forma rápida y económica un resultado de fácil interpretación. Tennant-Montana (1976) es el método más usado en cuencas hidrográficas de 25 países para determinar el caudal ecológico, y es el segundo método más aplicado en EE UU y Canadá. Estos métodos son aplicables para una investigación en cualquier río del territorio peruano.

**Palabras clave:** caudal ecológico, métodos hidrológicos.

### ABSTRACT

Fixing the ecological flow in the world's rivers contributes to the preservation of river ecosystems and the management of water resources, related to the social and economic aspects; It is the volume of water necessary to maintain a healthy river ecosystem capable of providing goods and services. The hydrological method was the first proposed method to estimate the ecological flow, developed in the 60s and 70s of the 20th century. There are different methods to estimate the ecological flow, such as: hydrological, hydraulic, eco-hydraulic and holistic methods. In the present work, a review of seven hydrological methods was carried out, these are: Asturian, flow permanence curve, Ecuadorian or 5% of the annual average, referential-Peruvian regulations, Scottish or 3 critical months, Swiss and Tennant-Montana (1976). These hydrological methods use historical records of flows from hydrometric stations to quickly and cheaply obtain an easily interpreted result. Tennant-Montana (1976) is the most widely used method in river basins in 25 countries to determine ecological flow, and it is the second most widely used method in the US and Canada. These methods are applicable for an investigation in any river of the Peruvian territory.

**Keywords:** ecological flow, hydrological methods

---

Recibido: 26-01-2022.

Aceptado: 09-05-2022.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

Las primeras civilizaciones se formaron alrededor de las llanuras de inundaciones de los ríos. Conocían la importancia de sus aguas para el mantenimiento y supervivencia de los seres vivos en la naturaleza. Sin embargo estos ríos presentan cambios en el régimen de flujo de muchos ríos de la tierra, alterados en magnitud, frecuencia, duración y tiempo, debido a las variaciones de precipitación y a las actividades antrópicas (Palmer & Ruhi, 2019a). Los modelos climáticos están proyectando variaciones en las precipitaciones, conjuntamente con el crecimiento poblacional y contaminación de fuentes de agua. Esto obliga a realizar una mejor gestión del agua para el futuro (Sidder, 2021). En las últimas décadas algunas regiones del mundo están sufriendo escasez de agua azul (superficial subterráneo) y de agua verde (humedad del suelo) poniendo el peligro la producción de cultivos (Liu

et al., 2021). Por ello existe actualmente la necesidad de mantener y preservar ecosistemas acuáticos en fuentes naturales (lagos, ríos, lagunas y otros cuerpos de agua) (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015). La importancia de evaluar el flujo ecológico aguas arriba de un río, permite observar las respuestas ecológicas, de distintos regímenes de flujo, en condiciones climáticas cambiantes y con actividades antropogénicas constantes. (Tang et al., 2021b). Entender, cuánta agua puede lograr regular una cuenca mediante la liberación de flujo para mantener un ecosistema fluvial en época de estiaje por sí sola, es un desconocimiento real por parte de la sociedad civil, estado y empresas. Frente a esto, el objetivo general es: conocer métodos hidrológicos que permitan estimar el caudal ecológico.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Caudal ecológico

La metodología de Tennant o de Montana (1976) define al caudal ecológico como el porcentaje de volumen de agua, el cual permite el desarrollo de organismos acuáticos y el buen estado de su hábitat (De la Lanza Espino et al., 2014). Este caudal tiene denominaciones, tales como: “caudal de reserva ecológico” o “caudal mínimo medioambiental”, o simplemente “caudal ecológico” (Infante et al., 2018). En Estados Unidos de Norteamérica en los años 60 nace el concepto de caudal ecológico, con la finalidad de conservar ecosistemas acuáticos de salmones. Posteriormente, esta idea fue enfocada hacia otros organismos (Meza et al., 2017). El término caudal ecológico es llamado como “caudal ambiental”, esta definición es más amplia ya que abarca factores sociales y económicos (Marraco et al., 2010). El caudal ecológico es el mínimo necesario para mantener un volumen de agua dentro del cauce. (Infante et al., 2018). Este caudal es un instrumento de gestión que permite determinar la cantidad de agua requerido para mantener ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (Brown Manrique et al., 2016). Un caudal circulante en un cauce natural, podría ser considerado como caudal ecológico, siempre y cuando este volumen de agua sea capaz de mantener una comunidad biológica, compuesta por microorganismos, plantas y animales, cuya estructura y funcionamiento dependen de las características del río (Jalón y del Tánago, 1998). Realizar evaluaciones al caudal ecológico permitirá entender las respuestas ecológicas del río frente a condiciones climáticas y antropogénicas (Gao et al., 2009). Este caudal se define como el régimen fluvial en un cuerpo de agua que permite mantener ecosistemas acuáticos en condiciones naturales (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009). Caudal ecológico, según el Artículo 153° del reglamento de la Ley de Recursos Hídricos N° 29338, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG, es el volumen de agua necesario para

mantener fuentes naturales (cauces de ríos), permite la conservación, preservación y mantenimiento de ecosistemas acuáticos. Estos caudales pueden sufrir variaciones a lo largo del año en relación a su caudal. Estos caudales según señala no podrán ser aprovechados bajo ninguna modalidad de uso consuntivo (agricultura, vivienda y minería) (Ley de los Recursos Hídricos [LRH], 2009). En casos de escasez hídrica estos caudales ecológicos serán priorizados para uso poblacional (LRH, 2009). Los caudales ecológicos serán mantenidos en épocas de estiaje, es decir, en meses de ausencia de precipitaciones y por ende de disponibilidad de agua (J. E. Alata, 2020). El caudal ecológico es útil en época de sequía extrema (Yupa et al., 2020a). La finalidad de evaluar el caudal ecológico, es lograr mantener saludable e íntegra el ecosistema fluvial, por ello se establece que el caudal ecológico es un instrumento de la gestión del agua, es decir, permite proteger un ecosistema fluvial mediante un determinado volumen de agua de río. Existen diferentes métodos para estimar dicho caudal, estos son: hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos y de carácter holístico (Eugenio & Ordóñez, 2012). Existen 200 métodos para evaluar el caudal ecológico, frente a estos diversos métodos, fue Tharme (1999) quien propuso categorizar las diferentes metodologías en cuatro grupos: métodos hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos y holísticos (Marraco et al., 2010). Cada una de las metodologías presentan una determinada complejidad para lograr determinar el caudal ecológico, pero la escasa información limita a la aplicación de todos los métodos (Eugenio & Ordóñez, 2012). Los métodos hidrológicos basan su metodología en la data histórica de aforos, el método hidráulico basa su metodología en la morfología del cauce, los métodos hidrobiológicos basan su metodología realizando simulaciones de hábitat con diferentes regímenes de caudal y utilizan una especie de estudio, mientras que el método holístico integra los procesos biológicos,

físicos y químicos para un sistema fluvial (Meza et al., 2017). Los métodos mencionados pueden determinar el estado de los ríos, bajos sus propios parámetros de los modelos. Sin embargo, señalan que los métodos hidráulicos, hidrobiológicos y holísticos necesitan de una gran cantidad de datos de entrada y no pueden ser utilizados en la mayoría de zonas (Yang et al., 2012, Yupa et al., 2020). En las últimas décadas se han proporcionado un gran número de derechos para el uso de las aguas de fuentes naturales, y para ello no se ha tomado en cuenta al caudal ecológico, dejando un vacío de desconocimiento de caudal ecológico necesarios para los ecosistemas de las fuentes naturales (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales [UICN], 2012). En el Perú con el establecimiento del Código de Aguas de 1902 el cual rigió hasta la Ley General de Aguas (Decreto Legislativo 17752) del año 1969, no se contempló el concepto de caudales ecológicos, dejando un gran vacío por varias décadas de nula información de cuantificación y procedimiento para cuantificar el caudal ecológico (UICN, 2012). Frente a esto el nuevo reglamento peruano Ley de Recursos Hídricos 29338, aún trata superficialmente respecto a la importancia del caudal ecológico, se establece su obligatoriedad pero no la cantidad agua que se debe dejar en los ríos para la subsistencia del hábitat (J. E. Alata, 2020). El concepto de caudal ecológico fue incorporado por primera vez en la nueva Ley de los Recursos Hídricos 2009 (ANA, 2015). A nivel nacional hay indicios de no respetar al caudal ecológico (UICN, 2012). Existe la necesidad de fijar caudales ecológicos en los cuerpos de agua a nivel nacional, ya que en la mayoría de nuestros ríos del Perú no están establecidos (Ley de Recursos Hídricos [LRH], 2009).

#### **Efectos naturales y antrópicos sobre el caudal ecológico.**

El régimen de caudales de ríos ha permitido mantener la integridad de ecosistemas fluviales en todo el mundo, es decir, los caudales de ríos permiten el mantenimiento y supervivencia de seres vivos (Palmer & Ruhi, 2019b). El caudal ecológico es de vital importancia ya que determina la necesidad hídrica para la conservación de ecosistemas fluviales frente al cambio climático (Infante et al., 2018). El régimen hidrológico de las fuentes naturales depende de dos factores, estos son: factores climáticos y antropogénicos (Chang et al., 2016a). Los ríos durante siglos han venido contribuyendo al desarrollo socioeconómico del humano. Se está evaluando la variabilidad del cambio climático futuro, analizando la profundidad de lluvias y las descargas de ríos naturales (Sharafati & Pezeshki, 2019). El caudal de los ríos está afectado por el cambio climático principalmente, mediante las variaciones de las precipitaciones. Algunas investigaciones señalan, que para determinar la influencia del cambio climático en el régimen hidrológico de los ríos, será a través de las precipitaciones anuales y no a través de características estacionales (Tang et al., 2021b). Los recursos hídricos a medida que pasa el tiempo

están cambiando tanto en variabilidad climática como por las actividades humanas cerca a fuentes naturales (Chang et al., 2016a). Los cambios en las precipitaciones son debido al cambio climático. La cual está relacionado a inundaciones, olas de calor, sequías etc., afectando a los recursos hídricos, medio ambiente y energía (Homsí et al., 2020). Actualmente el caudal ecológico o flujo ecológico, están siendo influenciados por las variaciones del régimen hidrológico, lo que conlleva a realizar un mejor manejo de la cuenca y de los recursos hídricos para la protección de ecosistemas fluviales sensible al cambio climático (Mezger et al., 2021). El cálculo del caudal ecológico en las cuencas es importante para mantener los servicios ecosistémicos de regulación, soporte, culturales y provisión (De la Lanza Espino et al., 2014). Los cambios en el régimen hidrológicos relacionados con la precipitación, son los que han tenido más impacto en los ecosistemas fluviales (Tang et al., 2021a). Asimismo, las actividades antrópicas y los aprovechamientos hidráulicos, los cuales están relacionados con la construcción y operación de presas, embalses y centrales hidroeléctricas, están alterando el régimen hidrológico natural de los ríos, impactando a los ecosistemas fluviales, por ello, la necesidad de asegurar la permanencia de un caudal ecológico mínimo para preservar las reservas ecológicas de una cuenca hidrográfica (Infante et al., 2018). Son importantes los ecosistemas fluviales por su biodiversidad, su influencia en los ciclos biogeoquímicos globales y por contribuir en gran parte a preservar los servicios ecosistémicos (Palmer & Ruhi, 2019a).

#### **Indicadores para evaluar el caudal ecológico**

La identificación de indicadores será clave para evaluar el caudal ecológico, estos son: a) La construcción de presas, la cual ha cortado la relación precipitación y caudal ecológico cuyo impacto es el déficit de caudal en épocas secas y excedente en operaciones de la presa en épocas de inundaciones. b) Alteración en el régimen de caudales naturales debido a las variaciones hidrológicas, llevando a tener déficit en épocas secas y excedencias en épocas de lluvias. (Tang et al., 2021a). Por ello, identificar las características físicas de las corrientes, los patrones históricos del régimen de caudal registrados en estaciones hidrométricas, permitirá reproducir la variabilidad estacional de cada año (Rodríguez Torres & Gómez Balandra, 2013)

#### **Método hidrológico**

Este tipo de metodologías son las más apropiadas para realizar planificación de desarrollo de los recursos hídricos. También son utilizados para realizar estimaciones preliminares de caudal ecológico (Tharme, 2003). No existe un método ideal para estimar el caudal ecológico. Pero existe una variedad de métodos para determinar el caudal ecológico, cada uno de ellos tienen sus objetivos y criterios de evaluación (Marraco et al., 2010). El método hidrológico es el más empleado para calcular el caudal ecológico debido a ser práctico, económico y sencillo. Y es el primer método para

estimar caudales ecológicos y el más utilizado mundialmente (García et al., 1999). Los métodos hidrológicos basan su cálculo en información registrada de un régimen hidrológico fluvial (registros de datos hidrométricos de caudales naturales) y sus resultados representan a un flujo que garantiza un nivel de protección de los ecosistemas fluviales (De. Yang et al., 2012). la norma mexicana indica que para poder estimar el caudal ecológico se debe de contar con una base de datos mayores a 20 años De la Lanza Espino et al. (2014). El reglamento peruano también recomienda la misma cantidad de información para poder estimación dicho caudal (Ley de Recursos Hídricos [LRH] 2009). Al no contar con a base de datos mayor a 20 años para calcular el caudal ecológico, es posible tomar diez años como mínimo como base de datos, los resultados serían, parecidos a los de 20 años. Una forma de demostrar esto, es dividiendo las series de tiempo de manera consecutiva en intervalos o lapsos de 10, 20 y mayores a 20 De la Lanza Espino et al. (2014). El método hidrológico es el estimador del caudal

ecológico en las naciones de Chile (10% del caudal medio anual) y Brasil (curva de permanencia) (Meza et al., 2017). Los métodos: ecuatoriano, escocés, suizo y asturiano son aplicables solamente para ríos costeros, los cuales presentan limitaciones en épocas de estiaje (Alata, 2020). En la normativa peruana, la metodología (Resolución Jefatural N° 154-2016-ANA, aprobación de metodología para determinar el caudal ecológico) para determinar el caudal ecológico será establecida por la Autoridad Nacional del Agua en coordinación con el Ministerio de la Agricultura, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función de las particularidades de cada cuerpo de agua. Es la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recurso Hídrico proponer normas en materia para establecer el caudal ecológico (LRH, 2009). En la aprobación de la "metodología para determinar el caudal ecológico" se establece que para estimar el caudal ecológico se usará información de los últimos 20 años. Y a falta de información, se generará mediante modelamiento hidrológico o estocástico.

**Tabla 1**  
Estudios específicos de caudal ecológico según proyecto

Proyecto	Métodos
Declaración de impacto ambiental	Método hidrológico o hidráulico
Estudio de impacto ambiental detallado o semi detallado.	Método de simulación de habitad u holístico

Fuente: Resolución Jefatural N° 154-2016-ANA

**Método Asturiano:**

Este método es aprobado por la legislación suiza, para dar protección al ecosistema fluvial. Según este método el caudal ecológico será el mayor de los valores obtenidos por las siguientes fórmulas, las cuales se expresan en L/s. Si no se cuenta con información de caudales medios diarios el caudal Q347 se calcula utilizando la Fórmula 7 (Alata, 2020, Consuegra, 2013).

$$Q_E = 50 \tag{1}$$

$$Q_E = (0,35 * Q_{347}) \tag{2}$$

$$Q_E = \frac{15 * Q_{347}}{(Ln Q_{347})^2} \tag{3}$$

$$Q_E = 0,25 * Q_{347} + 75 \tag{4}$$

**Método de la Curva de Permanencia de los caudales**

Conocido como la curva de duración de caudales. Permite visualizar el rango completo de caudales mínimos y máximos Smakhtin ( 2001, como se citó en Yupa et al., 2020a). El caudal ecológico se estima como el 5% de Q90%, tal como se presenta en la fórmula (Brown et al, 2016).

$$Q_E = 0,05 * Q_{90\%} \tag{5}$$

Donde: Q90%: Caudal de permanencia al 90%.

QE: Caudal ecológico

**Método ecuatoriano o 5% del promedio anual**

$$Q_E = 5\% * Q_m \tag{6}$$

Donde: Qm=Caudal medio anual.

**Método referencial-Normatividad peruana**

El caudal ecológico referencial se define como el caudal al 95% de persistencia Q (95); este se obtiene a partir de cada serie de datos medios mensuales, de una serie histórica de por lo menos 20 años Autoridad Nacional del Agua ([ANA], 2016). Siguiendo el procedimiento puesto por la ANA (2016), el valor de Q(95) no se calculará de manera exacta por lo que es necesario interpolar los valores (Yupa et al., 2020a).

**Método Suizo**

Este método se basa en la legislación suiza, la cual permite calcular caudales de estiaje para 347 días por año (Q347) para obtener el valor de Q347 se utiliza la ecuación 7 (Rey, 2020;Yupa et al., 2020a). El caudal Q347 permite encontrar al caudal mínimo y definir si son aguas piscícolas o no piscícolas, ver Tabla 2 (Consuegra, 2013).

$$Q_{347} = (a_0 * Q_m) / 10 \tag{7}$$

Donde: Q347: Caudal superado a 347 días del año.

Qm: Caudal medio anual (interanual).

ao: Coeficiente que toma los valores de 0,5; 1,0; 1,5 y 1,8.

Adicionalmente para calcular el caudal ecológico por el método suizo se usa la Tabla 2.

**Tabla 1**  
Caudales ecológicos definidos por la legislación suiza

Tipo Cauce	Q <sub>347</sub> [L/s]	Caudal Ecológico [L/s]
Aguas no piscícolas	[0 - 1000]	0.35*Q <sub>347</sub>
	[0 - 60]	50
	[60 - 160]	50+0,8*(Q <sub>347</sub> - 50)
	[160]	130
	[160 - 500]	130+0,44*(Q <sub>347</sub> -160)
Aguas piscícolas	500	280
	[500 - 2500]	280 + 0,31*(Q <sub>347</sub> - 500)
	2500	900
	[2500 - 10000]	900+0,2131*(Q <sub>347</sub> - 2500)
	10000	2500
	[10000 - 60000]	21500 + 0,15*(Q <sub>347</sub> -10000)
	60000	10000

Fuente: (Dirección General de Aguas, 2008).

**Método escocés**

Este método es llamado tres meses críticos. Para calcular el caudal ecológico se toma el 20 % de tres meses consecutivos de caudales medios mensuales críticos (Alata, 2020). Estos caudales críticos están relacionados con los caudales mínimos (Yupa et al., 2020a). El método Rafael Heras (1976) señala que de tres meses consecutivos se puede determinar el caudal mínimo. El caudal ecológico se calcula mediante el 20% del caudal promedio (Yupa et al., 2020a) y (Brown et al, 2016).

$$Q_E = 0.20 * Q_m \text{ año crítico} \tag{8}$$

$$Q_m \text{ año crítico} = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} Q_{min}}{3} \text{Caudal promedio de los tres meses críticos} \tag{9}$$

Donde  $Q_m \text{ año crítico}$ : Caudal medio de años críticos,  
Q<sub>E</sub>: Caudal ecológico

**Método de Tennant**

El método hidrológico más conocido para determinar el caudal ecológico, es el método de Tennat, desarrollado en Estados Unidos de Norteamérica. Este método es usado en cuencas hidrográficas en 25 países (Santacruz de León & Aguilar-Robledo, 2009). Este método es sencillo, práctico, y económico. Para lograr un cálculo de caudal ecológico de distribución mensual, solamente requiere información de estación hidrométricas o pluviométrica (García et al., 1999). Según Zalucki & Arthington (1998, como se citó e Yupa et al., 2020a) este método se usa en ríos donde no existe estructuras hidráulicas de regulación tales como presas o diques. Asimismo, este método está vinculado con: el promedio anual

de caudal y con las condiciones ecológicas de distintas estaciones. Este método fue establecido teniendo en cuenta hábitats, condiciones hidráulicas y biológicas. Según (De la Lanza Espino et al. (2014) teniendo en cuenta el ancho, profundidad y velocidad de la corriente, se obtienen intervalos como: el 10% del caudal medio anual, el cual sería el mínimo para la sobrevivencia de organismos acuáticos; el 30% sería lo recomendable para la sobrevivencia de diferentes formas de vida acuática; el 60% sería lo recomendable para un hábitat de características excelentes, y el 100% del gasto medio anual sería lo más adecuado para que la mayoría de los organismos acuáticos se desarrollen. Este método es rápido y económico a pesar de ser solo una aproximación

$$Q_{E(10\%)} = 0,10 * Q_m \tag{10}$$

$$Q_{E(30\%)} = 0,30 * Q_m \tag{11}$$

$$Q_{E(60\%)} = 0,60 * Q_m \tag{12}$$

Donde: Q<sub>E (10%)</sub>: caudal mínimo recomendable para mantener la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática. Q<sub>E (30%)</sub>: caudal recomendable para mantener un hábitat adecuado para las diversas formas de vida acuática. Q<sub>E (60%)</sub>: caudal recomendable para lograr excelentes condiciones de hábitat para las formas de vida acuática, durante los periodos de crecimiento inicial. Q<sub>m</sub>= modulo interanual del periodo de estudio (Brown et al, 2016)

**ANÁLISIS**

En los modelos hidráulicos e hidrológicos no se toman los aspectos biológicos. Estos métodos necesitan de pocos insumos para la estimación del caudal ecológico. Asimismo, señala que los métodos hidrológicos suizo y asturiano podrían ser utilizados en ríos costeros (Alata, 2020). Por otro lado, existen más de 200 métodos para estimar el caudal ecológicos en más de 50 países (Díez Hernández, 2011). Los métodos hidrológicos señalados en la Tabla 3, indican que para estimar el

caudal ecológicos necesitan de un registro histórico de caudales para calcular el caudal medio anual, el cual es utilizado en los métodos: suizo, método ecuatoriano o 5% del promedio anual (Fórmula 6). Por otro lado, el método asturiano presentado en la Tabla 3, necesita del caudal medio anual para determinar el caudal mínimo continuo, ver Fórmula 2, 3 y 4. El método suizo utiliza el caudal medio anual y coeficientes 0,5; 1,0; 1,5 y 1,8, pero en este método no se especifica en que situaciones

se usarán estos coeficientes, ver Fórmula 7, este método está orientado a preservar la vida y la migración de peces como el salmo trutta y salmo salar. Mientras que el método de la curva de permanencia de los caudales necesita del registro histórico de caudales para generar la curva de duración de caudales y obtener el porcentaje de persistencia para la estimación del caudal

ecológico, ver Fórmula 5. Para estimar el caudal ecológico mediante el método escocés, se necesita del registro histórico de caudales para establecer los meses más críticos y obtener el promedio, ver Fórmula 8 y 9. Finalmente el método de Tennant necesita determinar el caudal medio multianual para determinar el caudal ecológico (Fórmula 10, 11 y 12)

**Tabla 3**  
Características de método hidrológicos para fijar el caudal ecológico

N°	método	Características
1	Método Asturiano:	El caudal mínimo cuantitativo es de 50 L/s. A partir de este caudal de define el caudal ecológico en función de $Q_{347}$ , estos caudales deben de mantener una profundidad mínima de 20 cm para el movimiento migratorio de peces. La selección del caudal ecológico será el mayor de las Fórmulas 1,2 y 3 (Alata, 2020).
2	Método de la Curva de Permanencia de los caudales	Este método permite construir la curva de duración de caudales, logrando identificar rangos de caudales máximos y mínimos. Permite identificar el porcentaje de tiempo de observación de caudales igualados o excedidos al 90%. Permitiendo determinar el caudal ecológico al 5% del caudal igualado al 90% (Brown et al, 2016).
3	Método ecuatoriano o 5% del promedio anual	Este método permite calcular el caudal ecológico a partir del 5% del caudal medio anual (J. E. Alata, 2020)
4	Método referencial-Normatividad peruana.	La legislación peruana establece al caudal ecológico como el 95 % de persistencia de la fuente natural de interés (LRH, 2009)
5	Método Suizo	En el caso de no contar con información de caudales diarios, pero se cuente con caudal anual. Este método identifica el caudal mínimo continuo que circula durante los 347 días al año y para identificarlo utiliza el caudal medio anual (interanual), así como de coeficientes de valores 0,5; 1; 1,5 y 1,8. Este método está orientado a preservar la vida y la migración de peces como el salmo trutta y salmo salar (Rey, 2020; Yupa et al., 2020 <sup>a</sup> , Consuegra, 2013)
6	Método escocés	Para el cálculo de caudales ecológicos se utiliza tres meses críticos consecutivos, es decir, meses con menores valores de caudal. Se calcula el caudal medio mensual y se le multiplica con el 20% (Alata, 2020)
7	Método de Tennant	Este método es aplicable para corrientes que no tienen estructuras de regulación (presas, diques etc.). Es el método hidrológico más conocido para determinar el caudal ecológico. Este método utiliza información de caudal medio multianual. Para ello, es necesario contar con caudales medios mensuales multianuales. Este método está basado en calcular el caudal ecológico en diferentes proporciones (10%, 30% y 60%) de flujo de agua respecto del caudal medio anual. (Brown et al, 2016, Alata, 2020, Ilbay-Yupa et al., 2021)

## CONCLUSIONES

El establecimiento de un régimen de caudal (caudal ecológico) representa el volumen necesario para mantener ecosistemas fluviales. Asimismo, presenta una dependencia de las precipitaciones, las cuales están variando debido al cambio climático y reflejándose en las características estacionales. Por ello, es un instrumento de gestión que determina la cantidad de agua requerido para mantener ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad. Esto con lleva a proteger los ecosistemas fluviales, los cuales son sensibles al cambio climático, estos brindan los servicios ecosistémicos de regulación, soporte, cultural y provisión. El método hidrológico es el más empleado para calcular el caudal ecológico debido a ser práctico, económico y sencillo. Para su cálculo se recomienda utilizar una data histórica de 20 años o más, tanto la norma peruana y mexicana coinciden en utilizar 20 años de registros de caudales para su estimación. Para lograr que el método hidrológico obtenga un régimen natural de caudal en un cauce, es necesario contar con

patrones de variabilidad de regímenes hidrológico fluviales tanto interanual o modulo interanual (comportamiento histórico del régimen de caudales de un río), intra-anual (vinculados a variabilidad mensual o bimestral de caudales) y estacional. El método hidrológico es el primer método para estimar caudales ecológicos y el más utilizado mundialmente. Los resultados del método asturiano, método de la Curva de Permanencia de los caudales, método ecuatoriano o 5% del promedio anual, método referencial-Normatividad peruana, método suizo, método escocés a 3 meses críticos y el método de Tennant (1976) o de Montana, representan a un volumen de agua que garantiza protección a los ecosistemas fluviales. No hay un método ideal para estimar el caudal ecológico, pero sin existe una variedad de métodos para determinar el caudal ecológico, cada uno de ellos tienen sus propios criterios de evaluación. Siendo el método de Tennant-Montana (1976) el método más usado en cuencas hidrográficas de 25 países.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brown Manrique, O., Gallardo Ballat, Y., Williams Harriote, P. W., & Torres Martínez, Y. (2016). Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 58-71.
- Chang, J., Zhang, H., Wang, Y., & Zhu, Y. (2016a). Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1547-1560.
- Chang, J., Zhang, H., Wang, Y., & Zhu, Y. (2016b). Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1547-1560.
- Consuegra, C. (2013). Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (qe), resultados y posibles consecuencias. *Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito Posgrados En Ingeniería Civil*, 53, 1689-1699.
- De la Lanza Espino, G., Salinas Rodríguez, S. A., & Carbajal Pérez, J. L. (2014). Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 87, 25-38.
- Díez Hernández, J. M. (2011). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y competitividad*, 7(2), 11-18.
- Dirección General de Aguas. (2008). Determinación de caudales ecológicos en cuencas con fauna íctica nativa y en estado de conservación. *S.I.T. N°187. Mop.*, 187, 1-193pp.
- Eugenio, J., & Ordóñez, B. (2012). *De la Lanza Espino, G., et al. 2012. Medición del caudal ecológico del río Acajoneta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo. Inv.Geogr.*, 74, 62-74.
- Gao, Y., Vogel, R. M., Kroll, C. N., Poff, N. L. R., & Olden, J. D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 136-147.
- Homsí, R., Shiru, M. S., Shahid, S., Ismail, T., Harun, S. Bin, Al-Ansari, N., Chau, K. W., & Yaseen, Z. M. (2020). Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 90-106.
- Ilbay-Yupa, M., García-Mora, M., & Llugsha, N. (2021). Ecological Flow to Protect Aquatic Resources on the Cebadas River, Chambo River Basin. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*
- Infante, P., Salomón, M., Guisasaola, L., Rodríguez, S., & Delgado, J. (2018). *Caudales ecológicos en el Río Grande*. [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/11289/infante.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/11289/infante.pdf)
- J. E. Alata. (2020). Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico. *Anales Científicos*, 81(1), 204-219.
- Liu, W., Liu, X., Yang, H., Ciais, P., & Wada, Y. (2021). Global water scarcity assessment incorporating green water in crop production. *Water Resources Research*, 58(1), e028570.
- Marraco, G., Hillman, G., Cabido, D., Pagot, M., Pozzi, C., Plencovich, G., Juncos, R., Rodríguez, A., & Farias, H. D. (2010). *Estudio de caudal ecológico para sistemas del río dulce y sus humedales*. 1-29.
- Mezger, G., González del Tánago, M., & De Stefano, L. (2021). Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case. *Journal of Hydrology*, 598, 125732.
- Palmer, M., & Ruhi, A. (2019a). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(6459).
- Palmer, M., & Ruhi, A. (2019b). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(6459).
- Rodríguez Torres, S., & Gómez Balandra, M. A. (2013). Caracterización del régimen de caudal natural para la asignación del agua en la cuenca del Río Verde, Oaxaca, México. *Aqua-LAC*, 5(1), 70-83.
- Santacruz de León, G., & Aguilar-Robledo, M. (2009). Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica*, 19(1), 25-32.
- Sharafati, A., & Pezeshki, E. (2019). A strategy to assess the uncertainty of a climate change impact on extreme hydrological events in the semi-arid Dehbar catchment in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1), 389-402.
- Sidder, A. (2021). Tracing Water from River to Aquifer. *Eos*, 102.
- Tang, Y., Chen, L., & She, Z. (2021a). Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China. *Ecological Indicators*, 130, 108104.
- Tang, Y., Chen, L., & She, Z. (2021b). Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China. *Ecological Indicators*, 130, 108104.
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research And Applications*, 19, 397-441.
- Yang, F., Xia, Z., Yu, L., & Guo, L. (2012). Calculation and analysis of the instream ecological flow for the Irtysh River. *Procedia Engineering*, 28(2011), 438-441.
- Yupa, M. Ilbay, Albarrasín, P., & García, V. M. (2020a). Determinación de caudales ecológicos en el río Cutuchi, Ecuador. *Revista Bases de La Ciencia. e-ISSN 2588-0764*, 5(2), 33-52.
- Yupa, M. Ilbay, Albarrasín, P., & García, V. M. (2020b). Determinación de caudales ecológicos en el río Cutuchi, Ecuador. *Revista Bases de La Ciencia*, 5(2), 33.