

Recibido: 24/12/2025

Aceptado: 15/01/2026

Artículo original

## **Criterios hidrológicos y cálculo del caudal ecológico en los ríos cubanos**

José Luis Batista-Silva\*

Instituto de Geografía Tropical, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba.

\*Autor para correspondencia: [jolubasi@gmail.com](mailto:jolubasi@gmail.com)

### **Resumen**

**Introducción:** La gestión sostenible de los recursos hídricos en Cuba enfrenta importantes desafíos debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, principal fuente de alimentación de los ríos, y a la regulación hidráulica mediante presas. Históricamente, el desarrollo hidráulico del país no incorporó el concepto de caudal ecológico, lo que ha generado alteraciones en los ecosistemas fluviales. El objetivo de este estudio es seleccionar y aplicar una metodología adecuada para la determinación del caudal ecológico en ríos cubanos, considerando las particularidades hidrológicas y la disponibilidad de información. **Materiales y métodos:** Se realizó una caracterización hidrológica y físico-geográfica de los ríos de Cuba, junto con una revisión de metodologías internacionales para la estimación del caudal ecológico. Debido a la limitada disponibilidad y continuidad de las series hidrométricas, se seleccionó el método hidrológico de Tennant. Este se aplicó en las cuencas de los ríos Chambas, Herradura y Muñoz, empleando registros históricos de caudal y, en ausencia de estos, estimaciones indirectas basadas en precipitación, área de cuenca y módulo de escurrimiento. **Resultados y discusión:** El método permitió definir regímenes mensuales de caudales ecológicos acordes con la estacionalidad climática del país, evidenciándose que los caudales mínimos liberados aguas abajo de las presas no garantizan el mantenimiento de las funciones ecosistémicas. **Conclusiones:** El método de Tennant constituye una alternativa viable y operativamente eficiente para la determinación del caudal ecológico en Cuba, especialmente en contextos con información hidrométrica limitada.

**Palabras clave:** *caudal ecológico, presas, escorrentia.*

## **Hydrological criteria and calculation of ecological flow in cuban rivers**

### **Abstract**

**Introduction:** Sustainable water resources management in Cuba faces significant challenges due to the high spatial and temporal variability of rainfall, which represents the main source of river discharge, and the extensive hydraulic regulation through dams. Historically, national water infrastructure development did not incorporate environmental flow considerations, leading to alterations in fluvial ecosystems. This study aims to select and apply an appropriate methodology for environmental flow determination in Cuban rivers, considering hydrological characteristics and data availability. **Materials and methods:** A hydrological and physical-geographical characterization of Cuban rivers was carried out, along with a review of internationally recognized environmental flow methodologies. Given the limited availability and continuity of hydrometric records, the Tennant hydrological method was selected. The method was applied to the Chambas, Herradura, and Muñoz river basins using historical discharge data and, where unavailable, indirect estimates based on precipitation, basin area, and runoff modulus. **Results and discussion:** The results show that the Tennant method allows the definition of monthly environmental flow regimes consistent with Cuba's climatic

seasonality. It was observed that minimum flows historically released downstream of dams are insufficient to preserve fluvial ecosystem functions. **Conclusions:** The Tennant method represents a feasible and operationally efficient approach for environmental flow assessment in Cuba, particularly under conditions of limited hydrometric information.

**Keywords:** *ecological flow, dams, runoff.*

## 1. Introducción

En las últimas décadas el manejo ambiental de los recursos hídricos ha sido una preocupación integral para especialidades, donde el elemento “agua” es indispensable y Cuba no es una excepción, por tanto, es necesario atender las demandas hídricas, cada día con mayores tasas para el abasto a la población. Las precipitaciones pluviales son conocidas como la única fuente de alimentación de las aguas superficiales en el país.

A partir de los inicios de la década de los 60 del pasado siglo, se inició un intenso proyecto nacional para construir obras hidrotécnicas, con el objetivo de captar la escurrimiento que fluía directamente al mar durante el denominado período lluvioso (mayo–octubre). Paralelamente a las construcciones hidráulicas, se desarrollaron las mediciones e investigaciones hidrológicas y se construyeron estaciones hidrométricas (aforo) para medir el caudal en los principales ríos, la mayoría en sitios donde ulteriormente serían construidos los diques o cortinas de las presas.

En determinado momento existían casi 80 estaciones de aforo para medir los caudales, algunas de ellas posteriormente destruidas para darle paso a los diques de las presas. En esa época, se contempló continuar con la recopilación del caudal de las corrientes fluviales mediante la instalación, en cada cierre de presa, de equipos hidrometeorológicos para determinar el caudal utilizando el método del balance hídrico, o sea, mantener los datos de las series hidrométricas en los años subsiguiente, sin embargo, esto no se llevó a cabo, y actualmente solo existe la información hidrológica hasta la fecha del inicio de la construcción de las obras hidráulicas.

Con relación al caudal ecológico, es importante señalar que nunca se incluyó este tema en las obras hidrotécnicas construidas en el país, y no existía una ley que obligara destinar determinado caudal o gasto para verterlo aguas abajo de la cortina de la presa. En el año 1999 se publicó la Resolución No 24/99 del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) (*Resolución No 24/99, 1999*), donde se incluye el caudal sanitario o ecológico de los cursos naturales aguas abajo de las presas y derivadoras, necesario para mantener las funciones ecosistémicas de la corriente y las condiciones de la biodiversidad.

Globalmente existen innumerables publicaciones al respecto, pero en Cuba prácticamente no se ha tocado el tema, ni cómo determinar el caudal ecológico. Por esta razón, el objetivo de este artículo es seleccionar la metodología más adecuada para determinar el caudal ecológico, teniendo en cuenta las características y el contexto del territorio cubano. Para cumplir con el objetivo planteado, es necesario identificar las limitaciones de los métodos existentes y analizar los resultados a obtener porque, desde el punto de vista ambiental, no solo son importantes los recursos hídricos aguas abajo de las presas, sino también el curso de la corriente fluvial con y sin obras hidrotécnicas construidas.

## 2. Materiales y métodos

Para seleccionar la metodología más adecuada de determinación del caudal ecológico, se partió de una caracterización de los ríos de Cuba, teniendo en cuenta diferentes elementos como la disposición de la red fluvial y diferentes factores físico-geográficos. Se realizó una revisión de las metodologías disponibles internacionalmente y se seleccionó la más adecuada en el contexto cubano. Se aplicó del método de Tennant para calcular el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas Herradura y Muñoz.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Características de los ríos de Cuba

“El agua es un recurso natural que tiene extraordinaria significación para el desarrollo de cualquier país; sin embargo, este recurso, aunque renovable, demandado en cantidades cada día más crecientes para el desarrollo de la industria, la agricultura y los núcleos urbanos, es escaso, ya que sus condiciones naturales de formación y distribución no siempre resultan homogéneas ni en tiempo ni en espacio” (Oliva Gutiérrez et al., 1989).

La posición latitudinal y la configuración de Cuba, alargada y estrecha, condicionan determinadas peculiaridades en la disposición de su red fluvial, distinguiéndose un parteaguas principal, situado al centro y a todo lo largo del territorio, que lo divide en dos vertientes, la Norte y la Sur; esto hace

que los ríos tengan sus fuentes hacia el centro del país y casi todos corran de Sur a Norte o de Norte a Sur, según estén situados en una u otra vertiente. Igualmente condicionan la longitud de los ríos y el área de sus cuencas, (Figura 1).

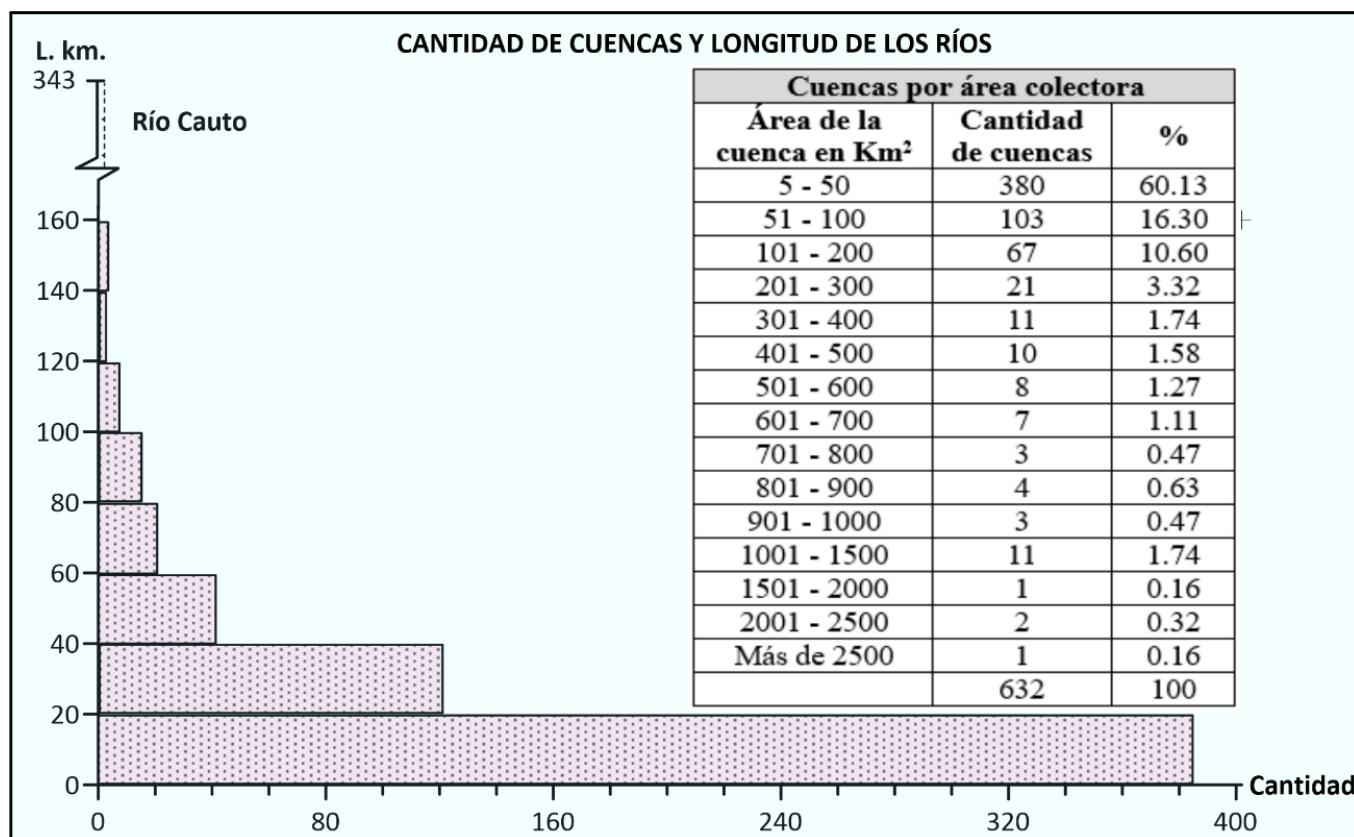
La red fluvial presenta, además, características determinadas por la influencia de los diferentes factores físico-geográficos, tales como las precipitaciones, las condiciones geomorfológicas y geológicas, la cubierta vegetal y las propiedades hidrofísicas de los suelos. Entre ellos, uno de los más importantes es la precipitación.

Los valores máximos de precipitación anual y el relieve abrupto de los sistemas montañosos dan lugar a un desarrollo apreciable de la red fluvial, excepto en las áreas de relieve cársico, donde su densidad es menor debido a la infiltración de las aguas. En las zonas llanas, con menor precipitación y relieve menos abrupto, los valores de la densidad de drenaje disminuyen, principalmente en los territorios de carso semidesnudo (llanuras de La Habana-Matanzas y Júcaro-Morón) y de carso desnudo (llanuras de Guanahacabibes, sur de Isla de la Juventud y Zapata), donde es escaso.

En gran parte de la periferia de la isla de Cuba, la existencia de extensas llanuras transgresivas carbonatadas e intensamente carsificadas, y el desarrollo en ellas de acuíferos abiertos al mar, provoca la pérdida de grandes volúmenes de agua dulce en forma de escurrimiento subterráneo directo al mar, fenómeno éste aún no bien estudiado ni cuantificado. Las zonas bajas y pantanosas se localizan hacia las costas, presentando anchos variables que no exceden unos cuantos kilómetros y su alimentación proviene no sólo de las precipitaciones y los ríos que en ella desembocan, sino también del escurrimiento subterráneo de las zonas aledañas. En las ciénagas se produce una alta evapotranspiración, debido al empantanamiento de las aguas, y el escurrimiento tiene lugar superficialmente, a través de canales y en forma subterránea. Las principales ciénagas son las de Zapata, Lanier y Birama”, Atlas Nacional de Cuba (1989).

### 3.2. Concepto del caudal ecológico

La denominación de “caudal ecológico” surge por la importancia que adquieren las corrientes fluviales debido a las afectaciones de origen antrópico a este vital recurso,



**Figura 1.** Datos de las cuencas superficiales y ríos de Cuba (fuente: elaboración propia).

por tanto, se hace necesario delimitar la relación hídrica con distintos factores socio-económicos. En la década de los 40 del pasado siglo, a nivel internacional solo existían algunos estudios relacionados con el tema y es en los años 70 cuando se toma en serio el problema y se proponen distintas metodologías para analizar y mantener la escorrentía superficial, sobre todo desde el punto de vista ambiental. Más adelante, en los años 80 se propusieron reformas sociales y económicas en los cauces y también se tuvo en cuenta el uso racional de los recursos hídricos. A partir de este momento, con el objetivo de ampliar su visión holística, se han desarrollado conceptos que involucran todo lo relacionado con la actividad humana y los recursos hídricos, lo cual amplió el concepto primario.

Posteriormente han surgido varias definiciones del caudal ecológico, algunas de ellas difieren en su enfoque, otras son solamente hidrológicas, ecológicas y combinan ambas disciplinas en las nuevas ramas de la ciencia, como la ecohidrología y ecohidráulica. Incluso, existen conceptos que utilizan un único parámetro hidrológico descriptivo u otros que se centran en un régimen de caudales descrito por algunas variables. Se ha llegado a definiciones bastante amplias y que consideran como un todo distinto la suma de las partes que lo componen.

Concurren otros términos similares a caudal ecológico que en su momento fueron considerados sinónimos, tales como: caudales mínimos, básicos, aconsejables, óptimos, de sequía, fluvio-ecológicos, entre otros (Dominguez & Rodríguez, 2005); que se definen como: el caudal capaz de mantener algunas de las funciones básicas del ecosistema fluvial.

**Caudal mínimo:** caudal que ocurre en tiempos de sequía o estiaje por el agotamiento de las reservas del subsuelo que afloran en los cursos superficiales del agua.

**Caudal ecológico:** caudal que se mantiene en el cauce de un río para la conservación de los ecosistemas o biodiversidad acuática.

**Caudal ambiental:** caudal que asegura el cumplimiento de las funciones ecológicas, sociales y económicas de los cursos de agua.

Para el archipiélago Cubano es obligatorio reflexionar sobre las características hidrológicas antes descritas: ríos de corto curso con escaso caudal; régimen con dos períodos definidos, lluvioso (mayo-octubre) y menos lluvioso (noviembre-abril); desarrollo cársico intenso y una alta variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones.

En el país no existen experiencias prácticas, legales y/o hidrológicas con respecto al caudal ecológico. El desarrollo hidráulico del país comenzó a finales de la década del 60, pero el concepto de caudal ecológico no se tuvo en cuenta en las construcciones hidroeconómicas, cuyo objetivo fundamental era almacenar agua para menguar el escurrimiento directo al mar y disponer del agua acumulada en los embalses para distintos usos. Generalmente los cierres de presa se construyeron aprovechando el cauce natural de la corriente superficial que sería regulada, por esto, el área inundada, la altura de la presa y la longitud de la cortina dependieron de la topografía del lugar de la obra.

Todos los embalses construidos poseían obra de toma, con el propósito de poder utilizar el agua acumulada en diferentes usos, desde el vaso de la presa hacia estaciones de bombeo, que la impulsan hacia los diferentes destinos (Figura 2). Además, casi todas las presas tienen el sistema de vertimiento con aliviaderos tipo “mexicano”, es decir, la cota del nivel de aguas normales (NAN) coincide con la del vertedor. De manera que, cuando el vaso de la presa se llena (cota mayor que el NAN), el agua rebasa el nivel del vertedor y corre aguas abajo (Figura 3). Por supuesto, no puede considerarse este vertimiento como un “caudal ecológico”, ya que gran parte del año la mayoría de los embalses no presentan vertimientos.



Figura 2. Descarga ecológica de la presa Chambas.



Figura 3. Vertimiento presa Chambas.

Por otro lado, el vertimiento depende de la cantidad de precipitaciones que recibe la cuenca superficial alimentadora del embalse, por tanto, los volúmenes vertidos aguas abajo de la cortina de la presa pueden variar en distintas épocas del año.

### 3.3. Embalses

Cuba cuenta con 987 embalses, con una capacidad total de 9661,85 hm<sup>3</sup>, almacenándose 95,4 % del total nacional en 243 embalses y el restante 4,6 % en 744 pequeños embalses. Entre la totalidad de embalses del país existen 21 con capacidad superior a los 100 hm<sup>3</sup>, los cuales almacenan 53,0 % de la capacidad total. Entre ellos, el Zaza, con un volumen total de 1020 hm<sup>3</sup>, es la mayor del archipiélago Cubano. Para la conducción y entrega del agua desde las fuentes hasta los sistemas de entrega de los usuarios, se manejan 61 derivadoras, 20 grandes estaciones de bombeo y 791,2 km de canales, divididos en 635,8 km de canales magistrales, 91,7 km de trasvase y 63,7 km de otros canales.

Según los boletines hidrológicos publicados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), en el mes de diciembre del año 2022 la situación de los embalses terminó favorablemente, presentando un llenado de 95% con relación a la capacidad total proyectada (Tabla 1).

**Tabla 1.** Estado resumido de los embalses por territorios, con cierre al final del mes de diciembre de 2022 (Boletín hidrológico, INRH)

| Territorio          | Cantidad Embalses | Capacidad (hm <sup>3</sup> ) |                |
|---------------------|-------------------|------------------------------|----------------|
|                     |                   | Total                        | Útil           |
| Pinar del Río       | 24                | 780.8                        | 710.9          |
| Artemisa            | 14                | 269.8                        | 259.6          |
| La Habana           | 15                | 157.3                        | 152.8          |
| Mayabeque           | 8                 | 293.7                        | 267.9          |
| Matanzas            | 9                 | 183.5                        | 173.9          |
| Villa Clara         | 12                | 1 012.3                      | 971.5          |
| Cienfuegos          | 6                 | 326.8                        | 247.5          |
| Sancti Spiritus     | 9                 | 1 308.4                      | 1 208.2        |
| Ciego de Ávila      | 6                 | 149.1                        | 146.7          |
| Camagüey            | 53                | 1 208.8                      | 1 172.2        |
| Las Tunas           | 23                | 350.9                        | 328.9          |
| Holguín             | 21                | 919.5                        | 824.2          |
| Granma              | 11                | 940.6                        | 887.6          |
| Santiago de Cuba    | 11                | 690.3                        | 605.2          |
| Guantánamo          | 6                 | 344.4                        | 314.4          |
| Isla de la Juventud | 14                | 230.0                        | 223.0          |
| <b>Nación</b>       | <b>242</b>        | <b>9 166.2</b>               | <b>8 494.2</b> |

Es importante reiterar que, en el diseño y proyección de las presas existentes no se incluyó el “cálculo ecológico”, aunque en algunos casos se manejó abrir la obra de toma para mantener un caudal mínimo aguas abajo de la cortina de las presas. En las Figuras 4 y 5 puede apreciarse la toma de agua y la continuidad del curso de agua del embalse “Ejército Rebelde” hacia “Paso Sequito” (La Habana), lo cual muestra la pobreza del caudal necesario para mantener una corriente permanente.



**Figura 4.** Descarga ecológica del embalse “Ejército Rebelde”.



**Figura 5.** Curso de agua hacia “Paso Sequito”.

Los embalses, también llamados “lagos artificiales” resuelven muchos problemas donde los recursos hídricos no son abundantes y el régimen hidrológico variable, dependiente de una sola fuente de alimentación como es el caso del archipiélago Cubano, de las precipitaciones pluviales. Sin embargo, la construcción de las presas conlleva consecuencias ambientales, debidas a la alteración

de los flujos de agua y a las acciones colaterales, por ejemplo, no limpiar el vaso del embalse antes de proceder a su llenado. Estos factores pueden producir un deterioro de la calidad del agua en los embalses por acidificación, disminución del oxígeno y retención de sedimentos y nutrientes.

Aguas abajo de las presas tiene lugar un cambio en el ciclo hidrológico, intensidad de las sequías y las inundaciones, lo cual se refleja en la calidad física y química de los hábitats, así como modificaciones morfológicas y pérdida de la biodiversidad. Por otra parte, en mayor o menor medida ocurre el acarreo de los sedimentos hacia la cortina de la presa, lo cual origina una reducción de la capacidad del embalse.

Se ha incluido información sobre los embalses de capacidad mayor a 100 hm<sup>3</sup> tomada de los boletines hidrológicos mensuales del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos

INRH (2001–2019), con el propósito de señalar los objetivos más importantes para en un futuro iniciar los cálculos de la determinación del caudal ecológico (Tabla 2).

### 3.4. Ley de aguas terrestres

Durante el período de intensas construcciones hidráulicas en la década de los 80 del siglo pasado, no se exploró el tema del caudal ecológico en las etapas de estudios de factibilidad, diseño y proyectos finales de las obras hidroeconómicas, ni tampoco en ninguno de los Consejos Técnicos para aprobar la construcción de las obras. No obstante, durante muchos años existió la preocupación de elaborar una ley que contemplara todos los aspectos relacionados con la utilización de los recursos hídricos del país. Transcurridas más de tres décadas se publicó en la Gaceta Oficial Extraordinaria No 51, del 16 de noviembre, 2017, la Ley No 124 (Ley No 124 sobre las aguas terrestres,

**Tabla 2.** Embalses de capacidad almacenamiento (WNAN) mayor de 100 hm<sup>3</sup>

| Nº | Embalse        | Provincia       | Corriente fluvial | Usos      | Año Const. | Área espejo km <sup>2</sup> | W <sub>NAN</sub> (hm <sup>3</sup> ) |
|----|----------------|-----------------|-------------------|-----------|------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1  | Zaza           | Sancti Spíritus | Zaza              | 2/4/6/10  | 1972       | 86.97                       | 1020                                |
| 2  | Mayarí         | Holguín         | Mayarí            | 1/11/9    | 2020       | 15.15                       | 430                                 |
| 3  | Alacranes      | Villa Clara     | Sagua Grande      | 1/4       | 1972       | 65.87                       | 352                                 |
| 4  | Cauto El Paso  | Granma          | Bayamo-Cauto      | 2/ 4      | 1991       | 72.45                       | 330                                 |
| 5  | Hanabanilla    | Villa Clara     | Hanabanilla       | 1/9       | 1960       | 26.40                       | 286                                 |
| 6  | P. de Baraguá  | Stgo. de Cuba   | Cauto             | 1/4/6/8   | 1980       | 35.57                       | 250                                 |
| 7  | C. M. Céspedes | Stgo. de Cuba   | Contramaestre     | 1/4/5/6/8 | 1967       | 17.00                       | 243                                 |
| 8  | Jimaguayú      | Camagüey        | San Pedro         | 2         | 1974       | 32.04                       | 200                                 |
| 9  | Avilés         | Cienfuegos      | Arimao            | 1/4/6/10  | 1980       | 17.94                       | 190                                 |
| 10 | Porvenir       | Camagüey        | Caonao            | 4/6/10    | 1975       | 45.92                       | 172                                 |
| 11 | La Yaya        | Guantánamo      | Gunatánamo        | 1/5/6/10  | 1975       | 11.19                       | 160                                 |
| 12 | Bueycito       | Granma          | Buey y Yao        | 2/4/6     | 1977       | 11.83                       | 159                                 |
| 13 | Mampostón      | Mayabeque       | A. La Luz         | 3-7       | 1978       | 15.21                       | 154                                 |
| 14 | Moa            | Holguín         | Moa               | 1         | 1988       | 7.24                        | 141                                 |
| 15 | A.Cub-Búlgara  | Camagüey        | Saramaguacán      | 1         | 1986       | 21.54                       | 138                                 |
| 16 | Minerva        | Villa Clara     | Sagua Chica       | 1/4/10    | 1971       | 2.57                        | 123                                 |
| 17 | Jaibo          | Guantánamo      | Jaibo             | 4         | 1979       | 11.00                       | 120                                 |
| 18 | Muñoz          | Camagüey        | Muñoz             | 2         | 1977       | 27.22                       | 116                                 |
| 19 | Nipe           | Holguín         | Nipe              | 1/4/6     | 1977       | 16.37                       | 112                                 |
| 20 | Juan Sáez      | Las Tunas       | Chaparra          | 4/6       | 1987       | 20.23                       | 112                                 |
| 21 | La Juventud    | Pinar del Río   | San Diego         | 3/2       | 1973       | 7.96                        | 105                                 |

1.-Abasto; 2.-Arroz; 3.-Acuicultura; 4.-Caña; 5.-Cítricos y frutales; 6.-Cultivos varios  
7.-Derivadora; 8.-Ganadería; 9.-Hidroenergía; 10.-Pastos y forraje; 11.-Trasvase

2017) sobre las aguas terrestres, donde se aborda el tema del caudal ecológico.

De la citada ley se han tomado las siguientes notas:

## **TÍTULO VII: DE LA UTILIZACIÓN DEL PATRIMONIO HIDRÁULICO**

### **CAPÍTULO I: DE LOS USOS DE LAS AGUAS TERRESTRES**

#### **SECCIÓN PRIMERA**

##### **Del caudal sanitario y ecológico**

###### **ARTÍCULO 45.**

*1. El caudal sanitario equivale al gasto mínimo de estiaje del río en condiciones naturales, que se garantiza aguas abajo de presas y derivadoras, con carácter prioritario en el uso del agua, excepto cuando pueda afectar el consumo humano y animal.*

*2. El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos establece y actualiza el caudal sanitario, sobre la base del resultado del estudio del comportamiento de la lluvia.*

*3. El caudal ecológico, consiste en el gasto aguas abajo de las presas y derivadoras, necesario para mantener las funciones ecosistémicas de la corriente y las condiciones de la biodiversidad.*

*4. El caudal ecológico es determinado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, en consulta con el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.*

*5. El caudal ecológico calculado se incluye en el proceso de elaboración del plan de asignaciones anual y su orden de prioridad se modifica cuando las circunstancias lo demanden.*

###### **Comentarios sobre las notas tomadas de la ley 124 – Artículo 45:**

En el punto 1 “se establece que el **“caudal sanitario” equivale al gasto mínimo de estiaje del río en condiciones naturales**. Vale señalar que, en cualquier artículo, investigaciones, estudios y comentarios consultados sobre el tema del caudal ecológico, no se menciona el caudal sanitario. Según opinión del autor del presente artículo, la definición de **caudal sanitario** podría ser la siguiente:

*El caudal sanitario es la cantidad de agua que se utiliza en una vivienda o edificio para fines sanitarios, como el lavado de manos, la ducha, el inodoro, etc. En otras*

*palabras, es la cantidad de agua que se consume en un hogar o edificio para fines higiénicos y sanitarios.*

*El caudal sanitario se mide en litros por segundo (L/s) o metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h). La cantidad de agua que se utiliza en un hogar o edificio varía según varios factores, como el número de personas que viven allí, la frecuencia con la que se usan los baños y otros factores similares. Es importante tener en cuenta que el caudal sanitario no incluye el agua utilizada para otros fines, como la limpieza del hogar, el riego del jardín o el llenado de piscinas. El caudal sanitario solo se refiere al agua utilizada para fines sanitarios y de higiene personal.*

El punto 2 señala que el INRH “actualiza el caudal sanitario en base al resultado del comportamiento de la lluvia”. Realmente el caudal sanitario es el vertimiento debido al uso del agua en las viviendas y edificaciones, pero no tiene relación con las precipitaciones.

El punto 3 se refiere al caudal ecológico, considerando “el gasto aguas abajo de las presas y derivadoras, necesario para mantener las funciones ecosistémicas de la corriente y las condiciones de la biodiversidad”. Internacionalmente, a diferencia de lo planteado en este punto, se plantea que el escenario del “caudal ecológico” es el río con su cuenca hidrográfica, por eso, en este artículo se incluyeron los conceptos de **“caudal mínimo, ecológico y ambiental”**.

Los puntos 4 y 5 plantean que el CITMA debe calcular el caudal ecológico en consulta con el INRH y luego este organismo lo modificará cuando las circunstancias lo demanden. Además, no se menciona quién y cómo determinará el caudal sanitario y el caudal ecológico.

Un análisis muy amplio e interesante, relacionado con el tema, es el presentado en el artículo publicado por los profesores Daimar Cánovas y Yaset Martínez (2021), titulado “Desafíos jurídicos para la implementación del caudal ambiental en Cuba” (Cánovas González & Martínez Valdés, 2021).

### **3.5. Caudales ecológicos, manglares y humedales**

Los humedales y manglares requieren determinada cantidad de agua para sostener su ecología y suministrar al hombre sus beneficios relacionados con el recurso hídrico, también llamados “caudales ecológicos”. Estos procesos contribuyen a una mejor distribución del agua y reducir la pérdida de biodiversidad, todo ello en concordancia con el cambio climático, lo cual puede determinar la

disponibilidad de agua para distintas necesidades en el espacio de las cuencas hidrográficas.

Los caudales ecológicos constituyen una herramienta importante para la utilización racional de los humedales y apoyar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Por otra parte, los manglares, humedales y las corrientes fluviales de una cuenca hidrográfica constituyen una unidad que no puede separarse, por lo que es conveniente estudiarla integralmente. Esto significa que el concepto de caudal ecológico no es posible circunscribirlo solamente a la existencia de presas y derivadoras, también debe estudiarse y contemplar todo el curso del río y su relación con los humedales y la influencia de un dique (presa) que ha regulado (alterado) el régimen hídrico de la cuenca.

Cuando se aborda y estudia el caudal ecológico también debe tenerse en cuenta que, en el caso especial de Cuba, es importante conocer e introducir en los estudios la existencia de cientos de pequeños embalses, llamados “micropresas”. La mayoría de estas obras son diques de tierra construidos en cualquier tramo del curso fluvial, sin haber realizado serios estudios e investigaciones requeridos al efecto. Ante el azote de un huracán, asociado con intensas y prolongadas precipitaciones, muchas micropresas son destruidas, alterando todo el sistema ecológico de la cuenca hidrográfica y, por tanto, afectando todo el ecosistema, incluyendo los manglares y humedales.

La implementación de un sistema de gestión adaptativa para los caudales ecológicos, sustentado en la vigilancia y evaluación permanentes, puede incrementar la aceptación social de los requerimientos hídricos necesarios para preservar las funciones ecológicas de humedales y manglares. Este enfoque, que debe considerar las condiciones específicas de cada ubicación, podría fortalecer la resiliencia comunitaria y mejorar simultáneamente la integridad ecológica de los ríos, humedales y manglares asociados.

### 3.6. Determinación del caudal ecológico

Existen más de 200 metodologías diferentes para determinar regímenes de caudales ecológicos que han sido desarrolladas en más de 50 países. Cualquiera de ellas es válida si se parte del entendimiento ecológico de cada componente del régimen natural y genera recomendaciones para su conservación o restablecimiento total o parcial desde el punto de vista práctico.

Según el tipo de información usada en su aplicación, las metodologías se pueden dividir en cuatro grandes grupos: métodos hidrológicos, hidráulicos, de simulación de hábitat y holísticos. Los métodos hidrológicos son los más utilizados, pues consisten en cálculos basados en el análisis de series hidrológicas del régimen natural del río, es decir, datos medidos en estaciones hidrométricas (aforos) con una duración mínima, por lo menos de 20 años, para que la serie sea suficientemente representativa.

Las características hidrológicas del territorio y la disponibilidad de la información requerida contribuyen a seleccionar cuál de los métodos hidrológicos debe aplicarse. Entre los métodos más conocidos para determinar el caudal ecológico, tanto para cuencas hidrográficas con caudales regulados como no regulados, se encuentran los siguientes:

**1. Tennant o de Montana.** Establece caudales mínimos como porcentaje fijo del caudal medio anual ( $Q_m$ ); por ejemplo, 10% (mínimo) para condiciones degradadas, 30% (excelente) para hábitat moderado y 60% (excepcional) para óptimo. Requiere datos de los caudales medios anuales registrados en determinado punto ( $Q_m$ ), aunque no son necesarias largas series históricas. Es un método simple y rápido, ideal para estudios preliminares o donde no existan datos. No tiene en cuenta la variabilidad del régimen hídrico (Tennant, 1976).

**2. Caudal medio mensual.** Aplica un porcentaje constante (p.ej., 20%, 40%) al caudal medio de cada mes, respetando así el patrón estacional básico. Es imprescindible contar con una serie de algunos años de observaciones y mediciones de los caudales. Es un método simple y mantiene la estacionalidad, aunque no tiene en cuenta los eventos extremos como las crecidas (Annear & Conder, 1984), (Tharme, 2003).

**3. Rafael Heras.** Propone un régimen de caudales ecológicos que incluye: caudal de mantenimiento (similar a Tennant), caudales de las crecidas (para limpieza y desbordamientos) y un caudal mínimo extraordinario para sequías severas. Es uno de los primeros métodos en integrar conceptualmente no solo el mínimo, sino también las crecidas necesarias para el funcionamiento fluvial. Requiere datos de serie histórica de caudales para calcular percentiles ( $Q_{m95}$ ,  $Q_{m50}$ ,  $Q_{m10}$ , etc.). Tiene la desventaja que los porcentajes/umbrales propuestos pueden no ser universalmente aplicables (Heras, 2001).

**4. 90% de excedencia.** Toma como caudal ecológico el valor igualado o superado al 90% del tiempo en la

serie histórica (percentil 90 de la curva de duración). Representa un caudal bajo, pero frecuente. Los datos para poder aplicar esta metodología deben ser series históricas largas de caudales diarios para construir la curva de duración de caudales. Tiene la ventaja de estar basado en estadísticas hidrológicas y garantiza un caudal presente la mayor parte del tiempo (Orth & Leonard, 1990), (Gordon et al., 2004).

**5. Tessman.** Adaptación del método de Tennant que introduce estacionalidad. Usa un porcentaje alto del Qm en meses húmedos y uno bajo en meses secos, pero nunca por debajo de un mínimo absoluto. Los datos para realizar los cálculos deben ser los valores de caudales medios mensuales para definir las estaciones húmedas/seca, además del caudal medio anual (Qm) (Tessmann, 1980) (López Silva et al., 2025).

**6. Perímetro mojado.** Es un método hidráulico. Busca una relación entre el caudal y el perímetro mojado del cauce (indicador de espacio habitable). Se suele elegir el caudal donde un incremento adicional da pocos beneficios (punto de quiebre en la curva). Uno de los requisitos más importantes es llevar a cabo mediciones de campo de la geometría del cauce y realizar aforos en varias secciones transversales. Se considera una aplicación más científica que hidrológica, aunque es bueno para definir mínimos que mantengan una área mínima para organismos acuáticos (Te Chow, 1959), (Gippel & Stewardson, 1998).

**7. Variación hidráulica.** Es un método hidráulico. Busca mantener, con el caudal ecológico, valores hidráulicos clave (velocidad, profundidad, perímetro) similares a los del régimen natural no alterado en un porcentaje alto (p.ej., 80%). Es un método complejo y requiere la aplicación de modelos hidráulicos, como HEC-RAS y una serie de caudales de referencia. Mantiene características físicas del hábitat de manera más integral y robusta que el perímetro mojado (Parasiewicz, 2001), (Booker & Dunbar, 2004).

**8. Caudal de garantía ambiental.** Es un concepto normativo español. Se define como el régimen de caudales necesario para alcanzar o mantener el “buen estado ecológico” según la Directiva Marco del Agua. No es un método de cálculo por sí mismo, sino un objetivo que puede lograrse aplicando diversos métodos (hidrológicos, hidrobiológicos, etc.). El requerimiento de datos varía según el método empleado para su determinación, pero idealmente integra datos

hidrológicos, biológicos y morfológicos. Es un concepto holístico y legalmente vinculante, orientado a un objetivo ecológico claro, pero su cálculo específico no está definido, lo cual puede llevar a inconsistencias (Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional., 2001), (Hernández-Mora & Del Moral, 2015).

### **9. IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology*).**

Es la metodología holística y de hábitat físico más completa. Combina modelación hidráulica 2D/3D con modelos de preferencia de hábitat de especies objetivo (usando curvas ID -Idoneidad vs. Profundidad, Velocidad, Sustrato-). Genera curvas de hábitat disponible vs. caudal. Los datos necesarios son costosos: topografía detallada del cauce, mediciones de caudal y velocidades, estudios biológicos para definir especies y sus preferencias (Bovee et al., 1982).

**10. Caudal básico de mantenimiento.** Generalmente se refiere a un caudal mínimo permanente que debe mantenerse en el cauce para evitar daños ecológicos irreversibles (evitar la desconexión, mantener oxígeno, temperatura). Suele ser un valor definido por métodos como Tennant, Q90, o análisis más detallados. La necesidad de datos está en dependencia del método a utilizar para su cálculo (desde solo el Qm, hasta estudios de hábitat). Concepto claro y de fácil comunicación para gestión operativa (es el “piso” de agua que siempre debe quedar). Si se define con métodos simples, puede ser insuficiente. No constituye por sí solo un régimen ecológico completo, que necesita también crecidas (Peredo-Parada et al., 2014).

Después de analizadas las características de los métodos mencionados, elegimos el método de Tennant por las razones que se relacionan a continuación, en el próximo punto.

### **3.6.1. Método de Tennant o de montana**

Dadas las características hidrológicas de Cuba y de la disponibilidad de datos de observaciones hidrométricas, se adopta el método de Tennant como el más apropiado para determinar el caudal ecológico en el país, por las siguientes razones:

- Las series de los caudales disponibles son de corta duración y se interrumpieron cuando se construyeron las presas, por tanto, no es posible comparar los resultados obtenidos en la mayoría de los casos.

- En la revisión de la literatura relacionada para determinar el caudal ecológico, se comprueba que casi la totalidad de los métodos propuestos requieren los datos de los caudales medidos en las estaciones.
- El método de Tennant posibilita determinar el caudal ecológico por medio de las observaciones de los caudales, pero también ofrece la variante de utilizar métodos indirectos para obtener los caudales requeridos.
- Tennant estudió y comprobó en el terreno el proceso que le permitió fundamentar su metodología, razón por la cual es la más utilizada en la mayoría de los países, además, es un procesamiento simple si se dispone de las herramientas hidrológicas y geomáticas necesarias.

Tennant (Tennant, 1976) observó que la variación del caudal circulante fluctuaba entre los valores de 0% y 10% del caudal medio anual ( $Q_m$ ), ocasionando un cambio en las dimensiones de la anchura de la lámina de agua, profundidad y velocidad, y que, en promedio, el 10% del  $Q_m$  cubría aproximadamente 60% del máximo del perímetro mojado.

Asimismo, para un caudal equivalente al 10% del  $Q_m$ , se observan profundidades y velocidades medias de 0.3 y 0.23 m/s respectivamente. Estos valores estaban al límite de lo aceptable basándose en otros estudios realizados. Además, concluyó que un 30% del  $Q_m$  creaba un hábitat suficiente para la supervivencia de la mayoría de formas de vida acuática ya que proporcionaba anchuras, profundidades y velocidades satisfactorias.

Para el caso de caudales que representaban el 60% del  $Q_m$ , se esperaba que la mayoría del cauce estuviese cubierto con agua, incluyendo las zonas poco profundas, y que la mayoría de la ribera sirviera como refugio para los peces. Así, Tennant concluyó que el 60% del  $Q_m$  proporcionaba condiciones de hábitat excelentes, mediante un procedimiento de fácil aplicación, bajo costo y rápida ejecución cuyo único requerimiento son registros históricos de caudal, y que están recomendados para su aplicación a gran escala, es decir, a nivel de planificación de grandes cuencas.

Si existieran datos recopilados sobre los caudales, es relativamente fácil la aplicación de esta metodología. Sin embargo, ante la ausencia de las mediciones es posible calcular el gasto medio anual empleando una metodología indirecta y distribuir los porcentajes mensuales (según recomendaciones de Tennant), previamente determinados a partir de la serie histórica de las precipitaciones en la cuenca.

Según recomendaciones de esta metodología, es conveniente dividir el año en dos periodos (año húmedo y año seco), en cada uno de los cuales se asignan porcentajes del caudal medio interanual para obtener una calidad de hábitat fluvial determinada. De esta forma se asume que existe una relación entre los niveles de caudal y las características del hábitat aguas abajo, además se garantiza la variación temporal de las mediciones de los caudales. Lo óptimo sería disponer de datos hidrométricos medidos en un cierre donde se construyó la presa, pero en la mayoría de los casos no existe la información requerida.

La búsqueda bibliográfica para determinar el caudal ecológico en Cuba mostró poca información relacionada con el tema; el autor encontró el artículo “Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila”, publicado en la Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental por Brown Manrique, O., et al. (2016).

La investigación se desarrolló en la cuenca hidrográfica del río Chambas y se estudió una serie de 21 años de caudales medios mensuales y anuales en el período comprendido de 1966 a 1986, obtenidos de forma sistemática en la estación hidrométrica “Puente Circuito Norte”. Los autores aplicaron varios métodos para determinar el caudal ecológico y recomendaron los de Permanencia, Rafael Heras y del Perímetro Mojado como los más apropiados para el caso del río Chambas (fueron utilizados los datos de la estación hidrométrica de Chambas), pero no está claro el gráfico elaborado por el método de Tennant.

### 3.6.1.1. Aplicación del método de Tennant para calcular el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas Chambas, Herradura y Muñoz

#### *Cuenca hidrográfica Chambas*

El autor de este informe tiene la serie de caudales anuales y distribución mensual para el período 1966–1981, registrado en la estación hidrométrica antes citada, los cuales se han utilizado para determinar el caudal hidrológico del río Chambas aplicando el método de Tennant (Tabla 3). La Tabla 4 contiene los registros hidrométricos observados en la estación del río Chambas).

El siguiente paso es distribuir mensualmente los promedios obtenidos de la serie observada, expresada en la distribución del año hidrológico, según la metodología propuesta por Tennant para los distintos por cientos, asignando las características de Natural, Mínimo, Aceptable, Bueno, Excelente y Excepcional (Tabla 5 y Figura 6).

**Tabla 3.** Datos de la cuenca del río Chambas.

| Río Chambas                | A                  | Hm         | Yc   | Yr  | Lr   | Dd                    |
|----------------------------|--------------------|------------|------|-----|------|-----------------------|
|                            | (km <sup>2</sup> ) | (m s.n.m.) | (‰)  | (‰) | (km) | (km/km <sup>2</sup> ) |
| Nacimiento - desembocadura | 335                | 87.3       | 54.3 | 2.4 | 60.6 | 0.5                   |
| Nacimiento–estac. Hidrom.  | 187                | 139.4      | 86   | 4.4 | 29.8 | 0.83                  |

Fuente: Elaboración propia.

A, Hm, Yc- área, altura media y pendiente de la cuenca, respectivamente; Yr-pendiente del río; Dd-densidad de drenaje.

**Tabla 4.** Caudales registrados en la estación hidrométrica “Puente Circuito Norte”, río Chambas (m<sup>3</sup>/s).

| Años        | Meses       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Ene         | Feb         | Mar         | Abr         | May         | Jun         | Jul         | Ago         | Set         | Oct         | Nov         | Dic         |
| 1966        | 0.45        | 2.95        | 1.57        | 0.79        | 18.50       | 25.30       | 5.05        | 3.12        | 1.40        | 6.66        | 1.18        | 0.66        |
| 1967        | 0.70        | 0.33        | 0.30        | 0.60        | 1.03        | 5.26        | 0.72        | 1.11        | 3.10        | 2.25        | 1.08        | 0.54        |
| 1968        | 0.30        | 0.24        | 0.18        | 0.16        | 2.50        | 12.90       | 2.42        | 2.61        | 2.42        | 18.60       | 5.11        | 0.76        |
| 1969        | 2.08        | 0.77        | 0.47        | 1.15        | 2.18        | 31.60       | 7.42        | 5.44        | 4.57        | 5.84        | 2.71        | 0.89        |
| 1970        | 0.86        | 1.56        | 1.33        | 0.87        | 2.60        | 1.79        | 1.27        | 1.90        | 6.12        | 3.58        | 2.35        | 1.34        |
| 1971        | 0.20        | 0.18        | 0.12        | 0.07        | 1.77        | 1.46        | 0.36        | 0.57        | 0.92        | 3.43        | 4.81        | 0.79        |
| 1972        | 0.52        | 0.43        | 0.43        | 0.34        | 1.93        | 9.45        | 2.62        | 1.04        | 4.30        | 4.22        | 0.86        | 2.08        |
| 1973        | 1.13        | 0.56        | 0.22        | 0.12        | 2.72        | 2.76        | 1.78        | 2.62        | 7.57        | 17.00       | 2.45        | 0.89        |
| 1974        | 0.41        | 0.24        | 0.22        | 0.46        | 1.21        | 5.24        | 2.79        | 2.05        | 2.12        | 16.20       | 2.82        | 0.67        |
| 1975        | 0.41        | 0.29        | 0.18        | 0.14        | 0.45        | 2.54        | 1.27        | 1.43        | 2.91        | 1.86        | 1.02        | 0.40        |
| 1976        | 0.21        | 0.14        | 0.09        | 0.14        | 2.46        | 8.46        | 1.16        | 1.84        | 4.25        | 5.11        | 5.02        | 2.10        |
| 1977        | 0.61        | 0.55        | 0.24        | 0.26        | 21.90       | 9.95        | 1.72        | 1.56        | 4.17        | 3.01        | 1.44        | 0.79        |
| 1978        | 0.52        | 0.46        | 1.38        | 1.58        | 14.30       | 18.10       | 5.81        | 2.76        | 6.40        | 22.00       | 5.29        | 1.60        |
| 1979        | 1.36        | 0.69        | 0.57        | 0.62        | 1.53        | 6.48        | 5.19        | 1.21        | 2.69        | 4.68        | 2.91        | 1.04        |
| 1980        | 0.62        | 0.43        | 0.31        | 0.48        | 2.99        | 13.90       | 6.27        | 8.48        | 6.34        | 10.70       | 8.88        | 1.60        |
| 1981        | 0.81        | 0.58        | 0.43        | 0.35        | 0.89        | 3.01        | 2.89        | 4.48        | 3.92        | 4.59        | 2.13        | 1.15        |
| <b>PROM</b> | <b>0.70</b> | <b>0.65</b> | <b>0.50</b> | <b>0.51</b> | <b>4.94</b> | <b>9.89</b> | <b>3.05</b> | <b>2.64</b> | <b>3.95</b> | <b>8.11</b> | <b>3.13</b> | <b>1.08</b> |

Fuente: Elaboración propia.

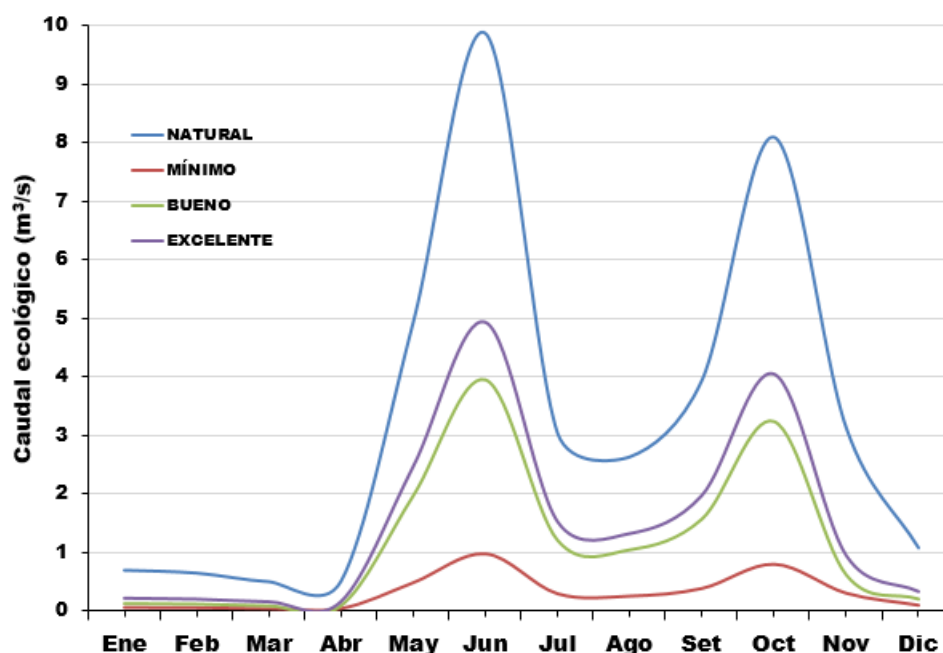
**Tabla 5.** Caudales registrados en la estación hidrométrica “Puente Circuito Norte”, río Chambas (m<sup>3</sup>/s).

| Meses | Natural             | Mínimo | Aceptable | Bueno   | Excelente | Excepcional |
|-------|---------------------|--------|-----------|---------|-----------|-------------|
|       | (m <sup>3</sup> /s) | 10%    | 10%-30%   | 20%-40% | 30%-50%   | 40%-60%     |
| May   | 4.9                 | 0.49   | 1.48      | 1.97    | 2.47      | 2.96        |
| Jun   | 9.9                 | 0.99   | 2.97      | 3.96    | 4.94      | 5.93        |
| Jul   | 3.0                 | 0.30   | 0.91      | 1.22    | 1.52      | 1.83        |
| Ago   | 2.6                 | 0.26   | 0.79      | 1.06    | 1.32      | 1.58        |
| Set   | 4.0                 | 0.40   | 1.19      | 1.58    | 1.98      | 2.37        |
| Oct   | 8.1                 | 0.81   | 2.43      | 3.24    | 4.05      | 4.86        |
| Nov   | 3.1                 | 0.31   | 0.31      | 0.63    | 0.94      | 1.25        |

| Meses | Natural<br>(m <sup>3</sup> /s) | Mínimo<br>10% | Aceptable<br>10%-30% | Bueno<br>20%-40% | Excelente<br>30%-50% | Excepcional<br>40%-60% |
|-------|--------------------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| Dic   | 1.1                            | 0.11          | 0.11                 | 0.22             | 0.32                 | 0.43                   |
| Ene   | 0.7                            | 0.07          | 0.07                 | 0.14             | 0.21                 | 0.28                   |
| Feb   | 0.7                            | 0.07          | 0.07                 | 0.13             | 0.20                 | 0.26                   |
| Mar   | 0.5                            | 0.05          | 0.05                 | 0.10             | 0.15                 | 0.20                   |
| Abr   | 0.5                            | 0.05          | 0.05                 | 0.10             | 0.15                 | 0.20                   |

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de las características **Aceptable**, **Bueno**, **Excelente** y **Excepcional** (Tabla 5) se obtiene tomando el por ciento menor para los meses menos lluviosos (noviembre – abril) y para los meses del período lluvioso (mayo – octubre). El por ciento mayor del caudal se clasifica como Natural.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.** Marcha mensual del caudal ecológico en el río Chambas.

En la actualidad, el caudal ecológico en la mayoría de las presas existentes en Cuba solo se puede determinar utilizando métodos indirectos, para tener una idea de la distribución cuantitativa durante los meses del año y tomar las decisiones adecuadas mediante las tomas de agua en la presa, de forma que se garantice el escurrimiento aguas abajo de la obra. Esta recomendación la incluye Tennant en su descripción de la metodología, donde aclara: “*ante la ausencia de las mediciones es posible calcular el gasto medio anual empleando una metodología indirecta y distribuir los porcentajes mensuales*”. Por tanto, el método de Tennant es el único posible en estos momentos

para las condiciones de Cuba, ya que la mayoría de las metodologías requieren los datos de los caudales medidos en una estación hidrométrica.

Se ha aplicado también, la citada metodología de Tennant en los cálculos realizados para la cuenca hidrográfica del río Herradura, municipio de Consolación del Sur, provincia de Pinar del Río y en la cuenca Muñoz, municipio de Florida, provincia de Camagüey. Los cálculos para determinar el caudal ecológico se refieren al área de la cuenca hasta los cierres de las presas y no existen mediciones directas de los caudales.

De acuerdo con la recomendación de Tennant, es posible determinar el caudal medio anual ( $Q_m$ ) en cuencas hidrográficas sin observaciones hidrométricas y ríos no regulados, según la ubicación geográfica de la cuenca (Figura 7), utilizando las ecuaciones propuestas por el autor del presente trabajo (Batista Silva, 1991):

I. Para los ríos de las regiones Occidental y Central.

$$Mo = 1.15P^{4.74} \cdot 10^{-14} \quad \text{-----} \quad r=0.91 \quad (1)$$

II. Para los ríos de la región Oriental 1.

Si  $P < 1\,500$  y  $H_m < 250$  m s.n.m.,

$$Mo = 0.258P^{3.65} \cdot 10^{-10} \quad \text{-----} \quad r=0.95 \quad (2)$$

III. Para los ríos de la región Oriental 2.

Si  $P > 1\,500$  mm y/o  $H_m > 250$  m s.n.m. (Se cumplen ambas condiciones o una de ellas)

$$Mo = 2.53P^{2.72} \cdot 10^{-8} \quad \text{-----} \quad r=0.92 \quad (3)$$

Donde:

**Mo** – módulo de escurrimiento ( $L/s.km^2$ );

**P** – precipitación media anual (mm);

**A** – área ( $km^2$ );

**Hm** – altura media (m. s.n.m.) de la cuenca respectivamente, m.s.n.m.- (metros sobre el nivel del mar).

El caudal medio anual ( $Q_m$ ) se calcula a partir del módulo de escurrimiento ( $Mo$ ), según la relación:

$$Q_m = \frac{M_o A}{10^3} \quad (m^3/s) \quad \text{-----} \quad (4)$$

El área de la cuenca  $A$  ( $km^2$ ) y su altura media  $H_m$  (m s.n.m.) puede determinarse con la ayuda de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y la aplicación de un Sistema de Información Geográfica. La precipitación media anual  $P$  (mm) es posible obtenerla por medio del mapa isoyético para Cuba, elaborado por Rodríguez & et. al., (2005).



Fuente: Elaboración propia. (Batista Silva, 2019).

**Figura 7.** Regiones hidrológicas de Cuba .

### Cuenca hidrográfica Herradura

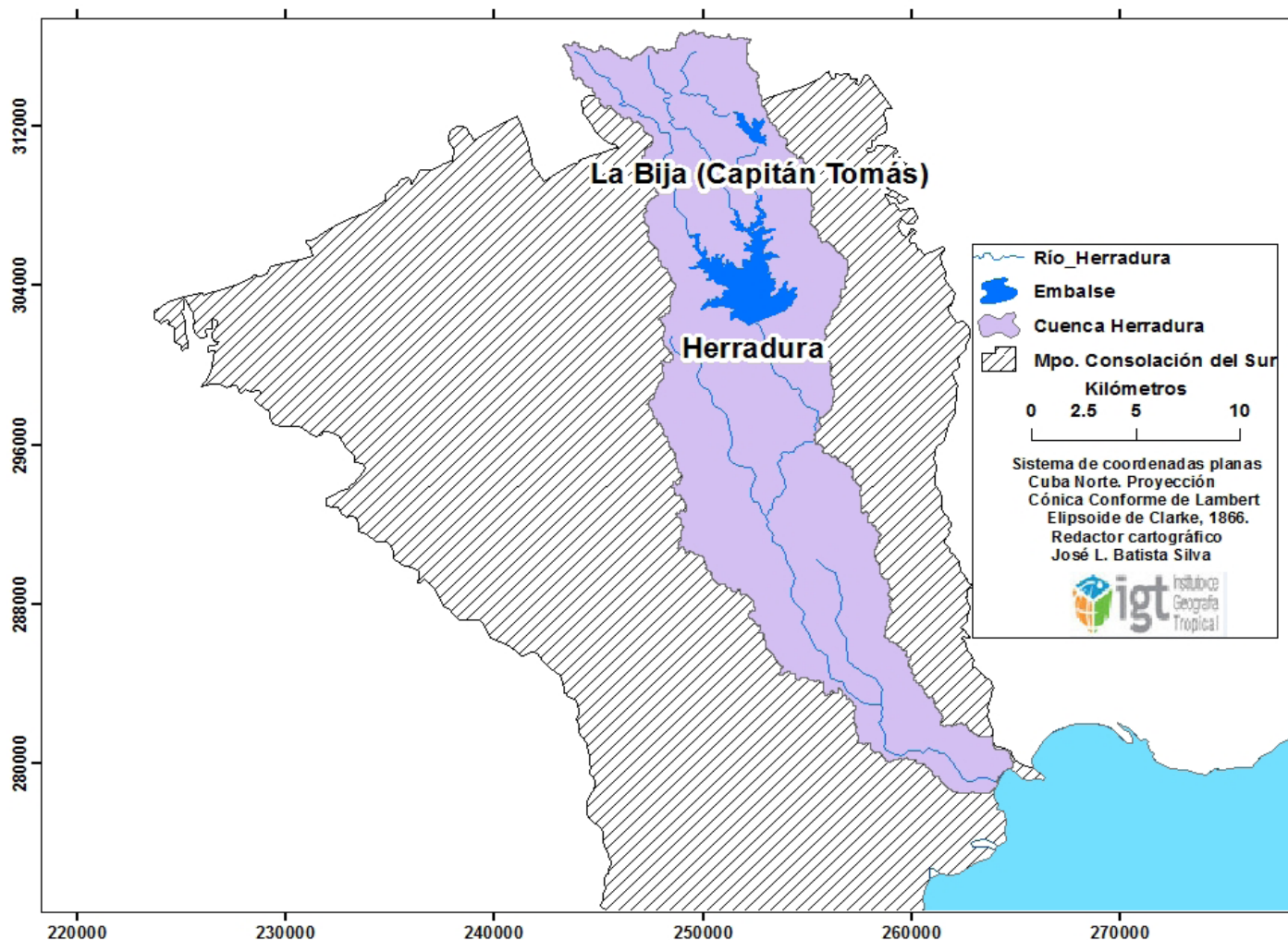
El caudal medio anual del río Herradura (natural) desde su nacimiento hasta el cierre de la presa “Herradura” (Figura 8) es igual a 1.72 m<sup>3</sup>/s, obtenido por la ecuación (5) para los ríos de las regiones occidental y central (Batista Silva, 1991), con un área de la cuenca hidrográfica de 101.5 km<sup>2</sup> y una precipitación media anual de 1 586 mm. Se determinaron a partir del mapa isoyético (Rodríguez & et. al., 2005) los por cientos de la distribución mensual mediante el procesamiento de los datos de lluvia decenal del municipio Consolación del Sur (2004–2019), publicados en los boletines hidrológicos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

La Tabla 6 muestra la distribución mensual de las precipitaciones (año hidrológico), sus porcentajes y los caudales correspondientes, los cuales serán utilizados para la aplicación del método de Tennant.

Los por cientos de P (mm) se obtuvieron según valores decenales de la lluvia del municipio Consolación del Sur, publicados en los Boletines hidrológicos.

La Tabla 7 y la Figura 9 muestran el resultado del cálculo del caudal ecológico mensual de la cuenca del río Herradura, desde su nacimiento hasta el cierre de la presa “Herradura”. Se han tenido en cuenta los períodos lluviosos (mayo-octubre) y menos lluvioso (noviembre-abril).

$$Mo = 1.15P^{4.74} \cdot 10^{-14} \quad \text{-----} \quad (5)$$



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8.** Cuenca hidrográfica Herradura.

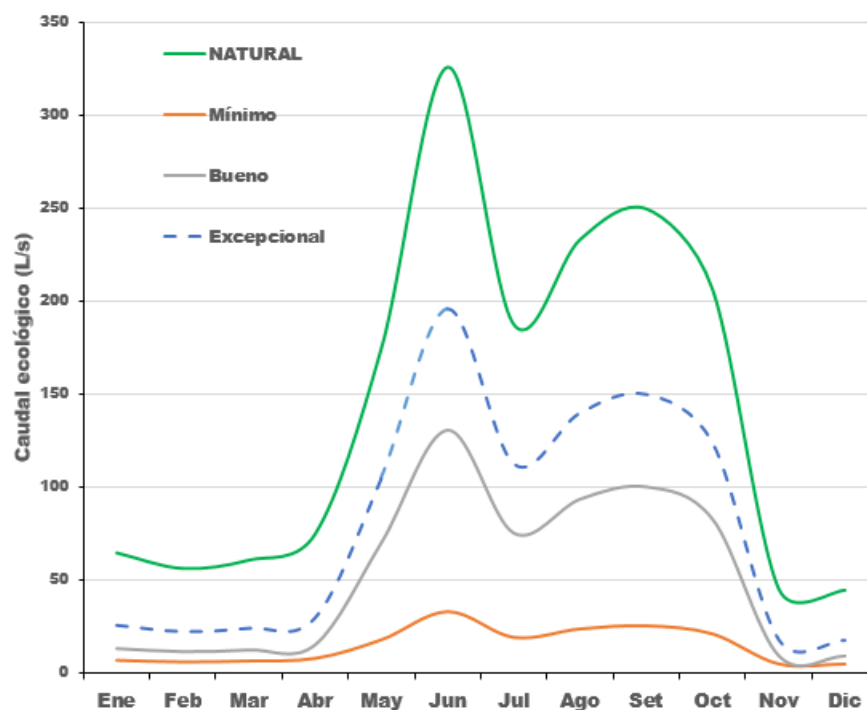
**Tabla 6.** Distribución mensual de las precipitaciones P (mm) y caudal Q (L/s) Cuenca Herradura.

| Meses   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Set   | Oct   | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | Anual |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| P (mm)  | 161.0 | 300.3 | 172.5 | 214.8 | 230.0 | 190.0 | 41.4 | 40.7 | 59.3 | 51.5 | 55.7 | 68.7 | 1 586 |
| %       | 10.2  | 18.9  | 10.9  | 13.5  | 14.5  | 12.0  | 2.6  | 2.6  | 3.7  | 3.2  | 3.5  | 4.3  | 100   |
| Q (L/s) | 174.6 | 325.7 | 187.1 | 232.9 | 249.4 | 206.1 | 44.9 | 44.2 | 64.3 | 55.9 | 60.4 | 74.5 | 1 720 |

**Tabla 7.** Variantes del caudal ecológico determinado a partir del escurrimiento natural del río Herradura (L/s).

| Meses | Natural<br>(l/s) | Mínimo<br>10% | Aceptable<br>10%-30% | Bueno<br>20%-40% | Excelente<br>30%-50% | Excepcional<br>40%-60% |
|-------|------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| May   | 174.6            | 17.46         | 52.38                | 69.83            | 87.29                | 104.75                 |
| Jun   | 325.7            | 32.57         | 97.71                | 130.28           | 162.85               | 195.42                 |
| Jul   | 187.1            | 18.71         | 56.13                | 74.84            | 93.56                | 112.27                 |
| Ago   | 232.9            | 23.29         | 69.88                | 93.18            | 116.47               | 139.76                 |
| Set   | 249.4            | 24.94         | 74.83                | 99.77            | 124.71               | 149.66                 |
| Oct   | 206.1            | 20.61         | 61.82                | 82.42            | 103.03               | 123.64                 |
| Nov   | 44.9             | 4.49          | 4.49                 | 8.98             | 13.46                | 17.95                  |
| Dic   | 44.2             | 4.42          | 4.42                 | 8.83             | 13.25                | 17.66                  |
| Ene   | 64.3             | 6.43          | 6.43                 | 12.86            | 19.29                | 25.72                  |
| Feb   | 55.9             | 5.59          | 5.59                 | 11.18            | 16.77                | 22.36                  |
| Mar   | 60.4             | 6.04          | 6.04                 | 12.08            | 18.12                | 24.17                  |
| Abr   | 74.5             | 7.45          | 7.45                 | 14.91            | 22.36                | 29.81                  |

El cálculo de las características **Aceptable**, **Bueno**, **Excelente** y **Excepcional** se obtiene tomando el por ciento menor para los meses menos lluviosos (noviembre – abril) y para los meses del período lluvioso (mayo – octubre), el por ciento mayor del caudal se adopta como NATURAL.

**Figura 9.** Marcha mensual del caudal ecológico Herradura (Fuente: Elaboración propia).

### Cuenca hidrográfica Muñoz

Para la cuenca Muñoz se obtuvieron los siguientes resultados, siguiendo el mismo procedimiento explicado antes para la cuenca hidrográfica de Herradura.

El caudal medio anual del río Muñoz (natural) desde su nacimiento hasta el cierre de la presa “Muñoz” (Figura 10) es igual a 3.04 m<sup>3</sup>/s, obtenido por la ecuación (6) para los ríos de las regiones occidental y central (Batista Silva, 1991), para un área de la cuenca hidrográfica de 336.3 km<sup>2</sup> y una precipitación media anual de 1 388 mm, determinada a partir del mapa isoyético (Rodríguez & et. al., 2005); los por cientos de la distribución mensual mediante el procesamiento de los datos de lluvia decenal del municipio Florida (2004–2019), publicados en los boletines hidrológicos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

$$Mo = 1.15P^{4.74} \cdot 10^{-14} \quad \text{-----} \quad (6)$$

La Tabla 8 muestra la distribución mensual de las precipitaciones, sus porcentajes y los caudales correspondientes, los cuales serán utilizados para la aplicación del método de Tennant.

Los por cientos de P (mm) se obtuvieron según valores decenales de la lluvia del municipio Florida, publicados en los Boletines hidrológicos.

La Tabla 9 y la Figura 11 muestra el resultado del cálculo del caudal ecológico mensual de la cuenca del río Muñoz, desde su nacimiento hasta el cierre de la presa “Muñoz”. Se han tenido en cuenta los periodos lluvioso (mayo-octubre) y menos lluvioso (noviembre-abril).

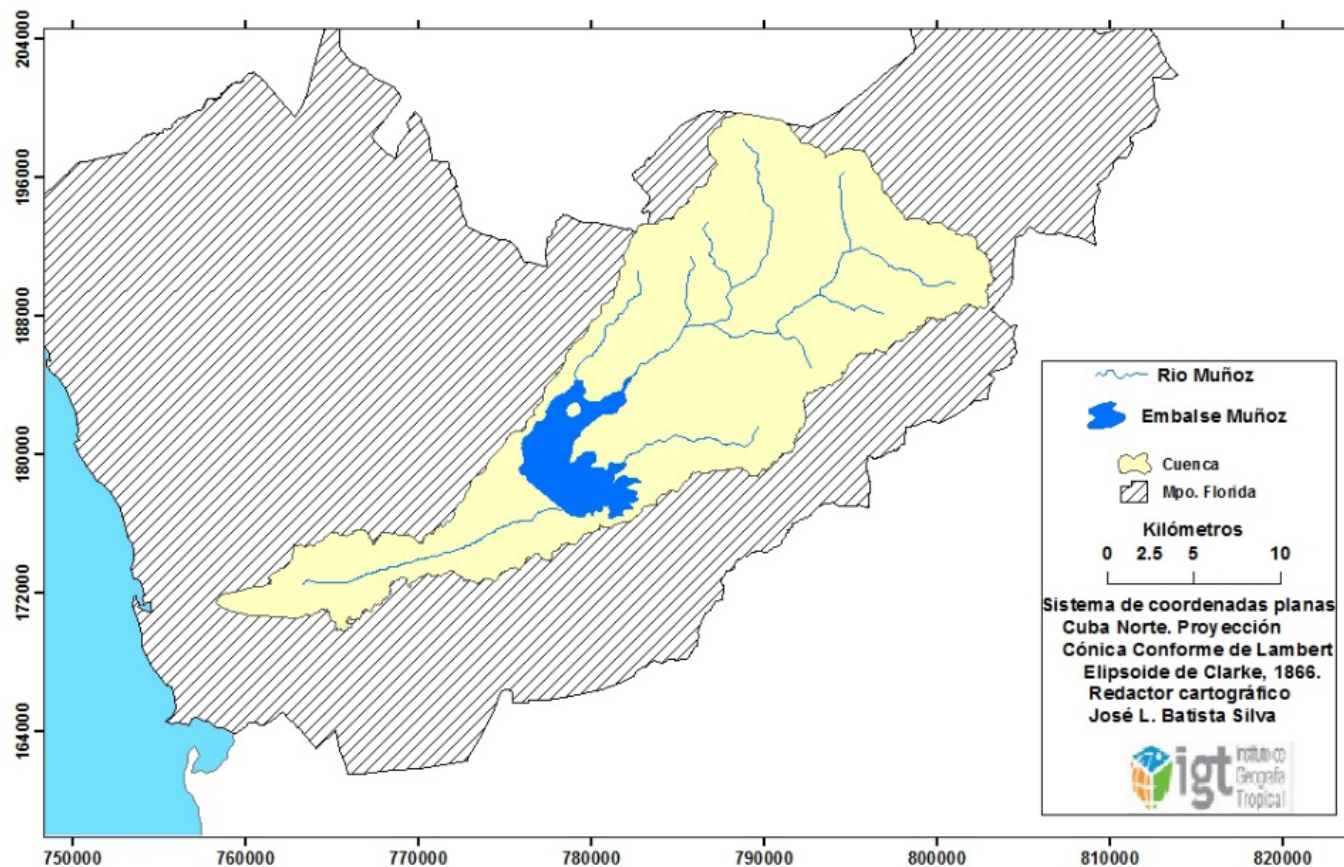


Figura 10. Cuenca hidrográfica Muñoz.

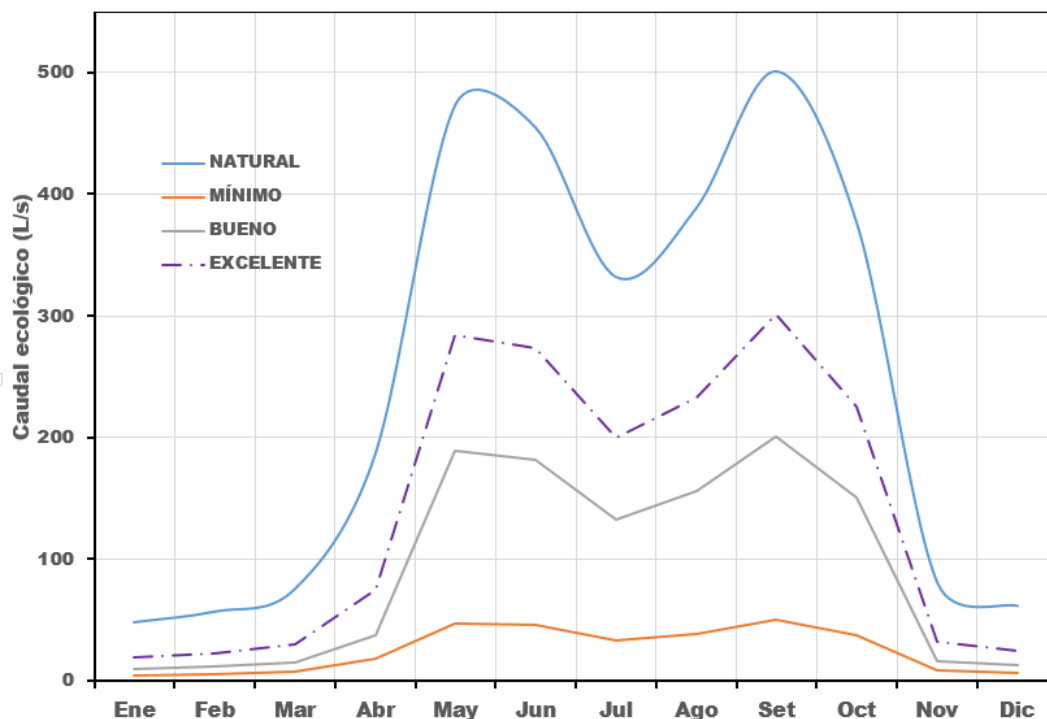
Tabla 8. Distribución mensual de las precipitaciones P (mm) y caudal Q (L/s).

|         | May  | Jun | Jul  | Ago  | Set  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr   | Anual |
|---------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| %       | 15.6 | 15  | 10.9 | 12.8 | 16.5 | 12.4 | 2.7  | 2.0  | 1.6  | 1.9  | 2.5  | 6.1   | 100   |
| Q (L/s) | 474  | 455 | 332  | 389  | 501  | 376  | 80.7 | 61.7 | 48.3 | 57.0 | 75.4 | 185.7 | 3036  |

**Tabla 9.** Variantes del caudal ecológico determinado a partir del escurrimiento natural del río Muñoz (L/s).

| Meses | Natural<br>(l/s) | Mínimo<br>10% | Aceptable<br>10%-30% | Bueno<br>20%-40% | Excelente<br>30%-50% | Excepcional<br>40%-60% |
|-------|------------------|---------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| May   | 473.7            | 47.37         | 142.11               | 189.48           | 236.85               | 284.22                 |
| Jun   | 455.0            | 45.50         | 136.51               | 182.02           | 227.52               | 273.03                 |
| Jul   | 332.3            | 33.23         | 99.69                | 132.91           | 166.14               | 199.37                 |
| Ago   | 389.0            | 38.90         | 116.69               | 155.59           | 194.49               | 233.38                 |
| Set   | 501.3            | 50.13         | 150.39               | 200.52           | 250.65               | 300.78                 |
| Oct   | 375.8            | 37.58         | 112.75               | 150.33           | 187.92               | 225.50                 |
| Nov   | 80.7             | 8.07          | 8.07                 | 16.15            | 24.22                | 32.30                  |
| Dic   | 61.7             | 6.17          | 6.17                 | 12.34            | 18.51                | 24.68                  |
| Ene   | 48.3             | 4.83          | 4.83                 | 9.65             | 14.48                | 19.31                  |
| Feb   | 57.0             | 5.70          | 5.70                 | 11.40            | 17.09                | 22.79                  |
| Mar   | 75.4             | 7.54          | 7.54                 | 15.09            | 22.63                | 30.17                  |
| Abr   | 185.7            | 18.57         | 18.57                | 37.14            | 55.71                | 74.28                  |

El cálculo de las características **Aceptable**, **Bueno**, **Excelente** y **Excepcional** se obtiene tomando el por ciento menor para los meses menos lluviosos (noviembre – abril) y para los meses del período lluvioso (mayo – octubre), el por ciento mayor del caudal se adopta como NATURAL.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 11.** Marcha mensual del caudal ecológico en río Muñoz.

### 3. Conclusiones:

La aplicación de la metodología seleccionada (metodología de Tennant) adaptada a las características hidrológicas del país y a la poca información generalmente disponible, presenta las siguientes ventajas en el caso de su aplicación en el archipiélago Cubano:

- 1) Posibilita determinar el caudal ecológico por medio de las observaciones de los caudales, pero también ofrece la variante de utilizar métodos indirectos para obtener los caudales requeridos.
- 2) Es un procesamiento simple si se dispone de las herramientas hidrológicas y geomáticas necesarias, ya que solo necesita el caudal medio anual, dato generalmente disponible y fácil de aplicar en cuencas con información limitada, generalmente el escenario con el que se cuenta actualmente.
- 3) Bajo costo comparado con métodos eco-hidráulicos o holísticos ya que:
  - a) No requiere campañas de campo extensas.
  - b) No necesita expertos en biología acuática ni modelos hidráulicos avanzados.
- 4) Estandarización y comparabilidad
  - a) Ampliamente documentado y utilizado internacionalmente.
  - b) Permite comparaciones rápidas entre ríos o escenarios de gestión.
- 5) Como se demuestra en el proceso de cálculo del caudal ecológico en las cuencas estudiadas es un procedimiento simple si existen las herramientas hidrológicas y geomáticas necesarias.
- 6) Ante la ausencia de las mediciones (en el país los datos son incompletos y las series de poca duración o inexistentes) es posible calcular el gasto medio anual empleando una metodología indirecta y distribuir los porcentajes mensuales previamente determinados a partir de la serie histórica de las precipitaciones en la cuenca.
- 7) Esta metodología asume la presencia de una relación entre los niveles de caudal y las características del hábitat aguas abajo.
- 8) Las informaciones contenidas en las tablas y gráficos resultantes de los cálculos son herramienta para tomar decisiones sobre el caudal ecológico en cauces regulados por obras hidroeconómicas.

Este método se aplica en corrientes que no estén reguladas, por tanto, los datos hidrométricos deben ser obtenidos de una estación sin influencia de presas (si existiera), diques u otras estructuras, es decir, aguas arriba del dique de la presa o en todo el cauce del río no regulado.

La aplicación del concepto de caudal ecológico conllevaría a que las corrientes fluviales, aguas abajo de las presas, tuviesen un régimen hídrico razonablemente adecuado de funcionamiento.

### 4. Recomendaciones

Asumir como premisa de trabajo que el caudal sanitario es una componente del caudal ecológico.

Aplicar el método de cálculo ecológico propuesto en todas las zonas del país a fines de ofrecer datos que permitan la toma de decisiones a las autoridades de los territorios.

En aquellas zonas donde se den las condiciones adecuadas, utilizar este método como complemento inicial antes de aplicar métodos más complejos.

### Referencias

- Annear, T. C., & Conder, A. L. (1984). Relative Bias of Several Fisheries Instream Flow Methods. *North American Journal of Fisheries Management*, 4(4B), 531-539. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1984\)4<531:RBOSFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1984)4<531:RBOSFI>2.0.CO;2)
- Batista Silva, J. L. (1991). Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. *Revista Voluntad Hidráulica*, 85, 2-7.
- Batista Silva, J. L. (2019). Evaluación de los recursos hídricos de Cuba. *Revista Geográfica*, 0(157), 73-83. <https://www.revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/212>
- Booker, D. J., & Dunbar, M. J. (2004). Application of physical habitat simulation (PHABSIM) modelling to modified urban river channels. *River Research and Applications*, 20(2), 167-183. <https://doi.org/10.1002/rra.742>
- Bovee, K. D., Energy, W., Flow, L. U. T. I., Group, A. S., Fish, U. S., Service, W., Agency, U. S. E. P., Service, U. S. S. C., & Survey (U.S.), G. (1982). *A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. Western Energy and Land Use Team, Office of Biological

- Services, Fish and Wildlife Service, U.S. Department of the Interior. <https://books.google.com/books?id=VzcUCyywjC>
- 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, 58-71. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382016000100005&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100005&nrm=iso)
- Cánovas González, D., & Martínez Valdés, Y. (2021). Desafíos jurídicos para la implementación del caudal ambiental en Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(3), 64-79. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382021000300103&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382021000300103&nrm=iso)
- Dominguez, G., & Rodríguez, A. (2005). Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil. *Global Water Partnership, South America*, 2(1), 83-96.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. (1999). *Resolución No. 24/1999: Reglamento sobre el gasto sanitario o ecológico de los cursos naturales de agua interrumpido por presas*. La Habana, Cuba.
- Gippel, C. J., & Stewardson, M. J. (1998). Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 14(1), 53-67.
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., & Nathan, R. J. (2004). *Stream hydrology: An introduction for ecologists*. John Wiley and Sons.
- Heras, R. (2001). *Recursos hidráulicos: Planificación y medio ambiente : modelos metodología y normas* (1. ed). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones.
- Hernández-Mora, N., & Del Moral, L. (2015). Developing markets for water reallocation: Revisiting the experience of Spanish water mercantilización. *Geoforum*, 62, 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.04.011>
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional., 161 BOE-A-2001-13042 44 (2001). <https://www.boe.es/eli/es/l/2001/07/05/10/con>
- Ley No 124 sobre las aguas terrestres, 124/17, GOC-2017-715-EX51 (2017). <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2017-ex51.pdf>
- López Silva, M., Luna Rivera, J. H., & Osorio Aranguri, E. J. (2025). Caudal ecológico en cuenca andina: Enfoque de Tessmann, Q95, Q90 y FDC. *Perfiles de Ingeniería*, 22(24). <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v22i24.8098>
- Oliva Gutiérrez, G., Lorenzo Rodríguez, A. C., Mon León, M., Azcue Berard, A., Hernández Santana, J. R., Propín Frejomil, E., & Buznego Rodríguez, A. (with Instituto de geografía & Instituto cubano de geodesia y cartografía). (1989). *Nuevo atlas nacional de Cuba* (1a edición). Instituto de geografía de la Academia de Ciencias de Cuba Instituto cubano de geodesia y cartografía.
- Orth, D. J., & Leonard, P. M. (1990). Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5(2), 129-138. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450050204>
- Parasiewicz, P. (2001). MesoHABSIM: A concept for application of instream flow models in river restoration planning. *Fisheries*, 26(9), 6-13. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(2001\)026<0006:M>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(2001)026<0006:M>2.0.CO;2)
- Peredo-Parada, M., Sandoval, G. S., & Tejada, D. Q. (2014). *DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO MEDIANTE EL MÉTODO CAUDAL BÁSICO DE MANTENIMIENTO EN EL RÍO BUREO*. <https://doi.org/10.13140/2.1.5022.6886>
- Rodríguez, F., & et. al. (2005). *Estudio pluvial de Cuba. Período principal 1961-2000, INRH*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Te Chow, V. (1959). *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.cu/books?id=q0xKvgAACAAJ>
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1, 6-10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)

- Tessmann, S. (1980). Environmental assessment, technical appendix E in environmental use sector reconnaissance elements of the Western Dakotas region of South Dakota study. *Water resources research institute, South dakota state university, Brookings, SD*, 18.
- 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(5-6), 397-441. <https://doi.org/10.1002/rra.736Z>
- Acerca del autor:**  
Dr. C. José Luis Batista Silva. Investigador Titular del Instituto de Geografía Tropical (IGT), Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio ambiente (CITMA). Especialista en hidrología, estudios ambientales, riesgos de origen natural. Correo electrónico: [jolubasi@gmail.com](mailto:jolubasi@gmail.com). ORCID: 0009-0000-0149-9067

**Conflicto de intereses:** El autor de este trabajo declara no presentar conflicto de intereses.

**Contribución de autores: José L. Batista Silva:** Conceptualización, Metodología, Investigación, Análisis formal, Recursos, Curación de datos, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Visualización, Administración del proyecto.