

Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila

Oscar Brown Manrique e-mail: obrown@unica.cu.
Profesor Titular del Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH).
Universidad de Ciego de Ávila (Unica). Cuba.

Yurisbel Gallardo Ballat e-mail: yurisbel@unica.cu.
Profesor Auxiliar del Departamento de Ingeniería Hidráulica.
Universidad de Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

Patricio W. Williams Harriot e-mail: ticho@unica.cu.
Asistente del Departamento de Matemática.
Universidad de Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

Yuneisi Torres Martínez e-mail: yuneisi@unica.cu.
Estudiante de quinto año. Carrera de Ingeniería Hidráulica.
Universidad de Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

RESUMEN

La investigación se desarrolló en el río Chambas de la provincia Ciego de Ávila con el objetivo de determinar el caudal ecológico mediante cinco metodologías: Curva de Permanencia de Caudales, Rafael Heras, Tennant, Franquet y Perímetro Mojado. Se analizó una serie de 21 años de gastos medios mensuales en el periodo comprendido de 1976 al 1986, obtenidos de la estación hidrométrica Puente Circuito Norte. Los principales resultados demostraron que los caudales promedios del río Chambas presentaron tendencia al decrecimiento. De los métodos evaluados el de la Curva de Permanencia, el de Rafael Heras y del Perímetro Mojado resultaron los más apropiados para la estimación del caudal ecológico en las condiciones del régimen fluvial del río Chambas. Entre estos no se encontraron diferencias estadísticas significativas.

Palabras clave: ecosistema fluvial, recursos biológicos del río, régimen de caudales.

Ecological flow of Chambas River in Ciego de Avila province

ABSTRACT

The research was conducted in Chambas river of Ciego de Ávila province in order to determine the ecological flow for which five methodologies were tested: Flows Permanency Curve, Rafael Heras, Tennant, Franquet and Wet Perimeter. The research analyzed a series of 21 years of monthly average flows in the period 1976 to 1986, obtained from the hydrometric station Puente Circuito Norte. The main results showed that the average flow of the river Chambas presented a decreasing trend. From the methods evaluated the Flows Permanency Curve, Rafael Heras and Wet Perimeter proved to be the most appropriate, for the estimate of the ecological flow under the conditions of the fluvial régime of the river Chambas. Among these methods there were not significant statistical differences.

Keywords: river ecosystem, biological resources of the river, flow regime.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de las naciones está estrechamente ligado con el uso de los recursos hídricos, lo que ocasiona una fuerte presión sobre los mismos y puede provocar alteraciones en el régimen natural de los ríos y los ecosistemas fluviales; por ello se han desarrollado y perfeccionado técnicas y estrategias para asegurar la disponibilidad del agua sin ocasionar daños en el entorno. Ejemplos de lo anterior son las modificaciones que causa el hombre al medio natural mediante la construcción de canales, presas, diques, lagos artificiales, entre otras obras hidráulicas para acceder de forma permanente al agua (Garrido et al. 2008).

El régimen de caudales en los ríos está fuertemente determinado por la variabilidad espacio-temporal de las lluvias y la capacidad de almacenamiento de la cuenca. Esta última determinada por el relieve, las características del suelo y su cobertura; sin embargo, por muy variadas razones el hombre realiza intervenciones que afectan las corrientes naturales y originan modificaciones en el flujo de agua y el cauce (Vélez y Ríos 2004).

El caudal ecológico es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad.

En la práctica el caudal ecológico busca reproducir en alguna medida el régimen hidrológico natural, conservando los patrones estacionales de caudales mínimos y máximos en las temporadas de sequías y lluvias respectivamente; por lo que presenta especial interés para la gestión de infraestructura hidráulica o hidroeléctrica (WWF 2010).

Las obras hidráulicas están presentes prácticamente en todas las corrientes de agua superficiales, por lo que son pocos los ríos que no tienen sus caudales regulados artificialmente. En estas condiciones la gestión del agua y de los recursos biológicos debe enfrentar la problemática representada por estas obras y su relación con los caudales mínimos circulantes, de manera tal que no provoquen efectos negativos sobre los ecosistemas fluviales.

Teniéndose en cuenta que en el río Chambas de la provincia Ciego de Ávila se han producido afectaciones debido al desarrollo de proyectos hidráulicos como embalses, pequeñas centrales hidroeléctricas, canales y sistemas de riego, el objetivo del trabajo consiste en estimar el caudal ecológico a partir de diferentes metodologías para permitir el diseño de obras hidráulicas destinadas al aprovechamiento del agua con el menor impacto posible sobre los organismos que habitan en el río.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la cuenca hidrográfica del río Chambas (figura 1), la cual limita al norte con la Bahía de Buena Vista, por el sur con las cuencas Charco Hondo-Naranja y Majagua, por el este con la cuenca del río Calvario y por el oeste con la cuenca del río Jatibonico del Norte. Se estudió una serie de 21 años de caudales medios mensuales y anuales en el periodo comprendido de 1966 al 1986 (tabla 1) obtenidos de forma sistemática en la estación hidrométrica “Puente Circuito Norte”.

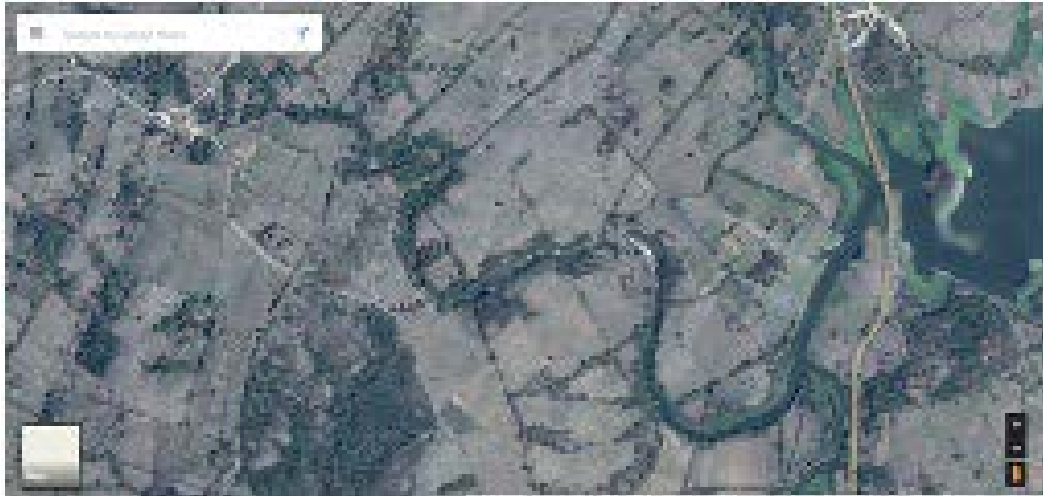


Figura 1. Imagen satelital de la cuenca hidrográfica del río Chambas

Tabla 1. Caudales ecológicos del río Chambas en el periodo 1966-1986

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	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	18,80	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	1,24	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	0,47	0,35	0,89	3,01	2,89	4,48	3,92	4,59	2,13	1,15
1982	0,03	0,03	0,05	0,06	0,03	0,40	0,26	0,20	0,35	0,02	0,01	0,01
1983	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	3,04	1,29	0,11	0,10	0,39	3,97	0,42
1984	0,82	0,71	0,84	0,62	0,08	0,45	0,26	0,32	1,04	0,65	0,34	0,26
1985	0,43	0,25	0,16	0,07	0,10	0,23	0,46	0,16	1,15	0,57	0,18	0,04
1986	0,03	0,03	0,02	0,02	0,78	0,44	0,24	1,02	0,40	0,23	0,73	0,03

Determinación de la homogeneidad de la serie de caudales

Se determinó la homogeneidad de la serie de caudales mediante la prueba paramétrica T de Student y Cramer (González et al. 2007), luego se aplicó la técnica de estadística descriptiva para analizar los estadígrafos fundamentales de la serie. También se realizó el análisis de las series de caudales para determinar la variabilidad interanual de los caudales medio anuales y estacional de los caudales mínimos (Q_{min}), máximos (Q_{max}) y medios mensuales (Q_m).

Se obtuvo el caudal ecológico a partir de cinco metodologías: Curva de Permanencia de los caudales, método de Rafael Heras, método de Tennant, método de Franquet y método del Perímetro Mojado.

Método de la Curva de Permanencia de los caudales

La construcción de la curva de permanencia de los caudales se realizó según criterios de Silveira y Silveira (2001) la cual permitió definir el porcentaje en que el caudal es igualado o excedido en el 90% del tiempo de observación ($Q_{90\%}$) y luego se estimó el caudal ecológico (Q_E) como el 5% de $Q_{90\%}$ como se muestra en la ecuación (1).

$$Q_E = 0,05 (Q_{90\%}) \quad (1)$$

Método de Rafael Heras

El caudal ecológico según el método de Rafael Heras se determina como el 20% del caudal medio mensual en tres meses consecutivos como sugiere la Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A (Egasa 2009). Este procedimiento define el año crítico como aquel año de la serie, donde se presentan tres meses consecutivos con los menores valores de caudales ($Q_{m_{año\ crítico}}$), según se expresa en la ecuación (3) y estima el caudal ecológico mediante la ecuación (2).

$$Q_E = 0,20 Q_{m_{año\ crítico}} \quad (2)$$

$$Q_{m_{año\ crítico}} = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} Q_{\min}}{3} \quad (3)$$

Método de Tennant

El método de Tennant estima el caudal ecológico para diferentes niveles de flujo como un porcentaje de los caudales medios (Acreman and Dunbar 2004), (Stewardson 2005). Este método ha sido extensamente utilizado por tener la ventaja de estimarlo de forma rápida y económica a partir de los siguientes criterios:

- $Q_{E(10\%)}$: Caudal mínimo recomendable para *mantener la sobrevivencia* de la mayoría de las formas de vida acuática.
- $Q_{E(30\%)}$: Caudal recomendable para mantener un *hábitat adecuado* para las diversas formas de vida acuática.
- $Q_{E(60\%)}$: Caudal recomendable para lograr *excelentes condiciones* de hábitat para las formas de vida acuática, durante los periodos de crecimiento inicial.

Con base en lo anteriormente explicado el caudal ecológico se determinó como un porcentaje del caudal medio del río (Q_m) a partir de las ecuaciones (4), (5) y (6) que se muestran.

$$Q_{E(10\%)} = 0,10 Q_m \quad (4)$$

$$Q_{E(30\%)} = 0,30 Q_m \quad (5)$$

$$Q_{E(60\%)} = 0,60 Q_m \quad (6)$$

Método de Franquet

El método de Franquet (2009) se sustenta en la aplicación de cuatro ecuaciones para el cálculo del caudal ecológico según las cuatro categorías de rugosidades de los cauces naturales (K) sugeridas por el propio autor. El valor del coeficiente K se puede obtener en el apartado 5.2.2 de

esta propia literatura donde es posible ver que sus valores se encuentran comprendidos en el intervalo de 9 a 12 según las características de la rugosidad que presenten las paredes y fondo del río. La estimación del coeficiente se realiza de forma tabular o analítica mediante la ecuación (7).

$$K = 34,8377 + 3,7397 S_o + 5,0707 \ln(R_h) - 7,4794 \ln(v) \quad (7)$$

El proceso de cálculo del caudal ecológico a partir de la utilización del método de Franquet consistió en:

- Conocer la pendiente longitudinal promedio del río (S_o), el coeficiente de rugosidad según las cuatro categorías de rugosidades de los cauces naturales (K), la separación entre verticales (B); la altura de cada vertical (h) y la velocidad media del río (v).
- Determinar la cantidad de áreas parciales del río en función del ancho del río y las áreas parciales (ΔA).
- Calcular los parámetros geométricos e hidráulicos del río como área total (A), caudal total (Q), radio hidráulico (R_h) y perímetro mojado (P_m).
- Calcular los caudales ecológicos por las ecuaciones (8, 9, 10, 11).

$$Q_E = 31,55 P_m R_h^{1,7083} S_o^{0,5} \quad K = 9 \quad (8)$$

$$Q_E = 27,05 P_m R_h^{1,7111} S_o^{0,5} \quad K = 10 \quad (9)$$

$$Q_E = 23,21 P_m R_h^{1,7166} S_o^{0,5} \quad K = 11 \quad (10)$$

$$Q_E = 19,53 P_m R_h^{1,7192} S_o^{0,5} \quad K = 12 \quad (11)$$

Método del Perímetro Mojado

El método del Perímetro Mojado se basa según Benetti et al. (2003) en la construcción de una curva de caudal (Q) en función del perímetro mojado del río (P_m), lo que permite encontrar el caudal ecológico en el punto de inflexión de esta curva. En el presente trabajo se siguió el siguiente procedimiento:

- Conocer la pendiente longitudinal promedio del río (S_o), el coeficiente de rugosidad de Manning del cauce (n), la separación entre verticales (B); la altura de cada vertical (h) y la velocidad instantánea promedio en cada vertical (Δv).
- Determinar la cantidad de áreas parciales del río en función del ancho del río.
- Determinar las áreas parciales (ΔA) y los caudales parciales (Δq) para cada área parcial.
- Calcular los parámetros geométricos e hidráulicos del río como área total (A), caudal total (Q), velocidad media (v), radio hidráulico (R_h) y perímetro mojado (P_m).
- Dibujar la sección transversal del río a partir de dibujarlos valores de distancia (D) en función de la profundidad (h).
- Deducir los modelos estadísticos para la simulación de $\Delta v=f(\Delta A)$ y $h=f(D)$.
- Simular los parámetros geométricos e hidráulicos del río para valores de h y Δv determinados con los modelos anteriores, variando los valores de h en cada iteración con diferencias de 2% ($h_0, h_1, h_2, \dots, h_n$).

- Construir la curva de caudales totales (Q) contra perímetro mojado (P_m), graficarla mediante una curva de dispersión y determinar el punto de inflexión que representa el caudal ecológico (Q_E).

Determinación de los métodos más apropiados para la estimación del caudal ecológico

La determinación de los métodos más apropiados para la estimación del caudal ecológico se realizó mediante el análisis de varianza de un factor (ANOVA) para un nivel de significación (α) de 0,05 y la comparación de medias a través de la prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la homogeneidad de la serie de caudales

En la tabla 2 se exponen los resultados del análisis de homogeneidad realizado a la serie de caudales correspondiente al río Chambas. Se observa que en ambas pruebas paramétricas el estadígrafo calculado fue inferior al estadístico crítico. Por otro lado, los niveles de significación (α) de 0,01 y 0,05 resultaron ser en ambos casos inferiores a la probabilidad calculada. De esta manera se demostró que se cumple con el criterio de homogeneidad.

Tabla 2. Resultados de las pruebas para la evaluación de la homogeneidad de la serie

Prueba paramétrica	Estadígrafo calculado	Estadígrafo crítico	Probabilidad	Evaluación
T de Student	0,499	1,734	0,312	Homogénea
Cramer	0,527	1,831	0,329	Homogénea

Análisis del comportamiento de los caudales mínimos, máximos y medios

En la figura 2 se representa el comportamiento de los caudales mínimos (Q_{min}), máximos (Q_{max}) y medios (Q_m) a lo largo de todo el año. Se observa que en los meses de enero a abril y en diciembre prácticamente coinciden los gastos mínimos y los medios mensuales. En este caso los caudales mínimos muestran un comportamiento aproximadamente lineal durante todo el año; sin embargo, tanto el caudal medio como el máximo mantienen valores superiores al mínimo en este periodo de tiempo.

La figura 3 muestra la variación interanual del escurrimiento en el periodo analizado. Se observa que existe una tendencia marcada de decrecimiento de los caudales durante el periodo analizado; comenzando desde el año 1979 al 1998 y haciéndose mucho más intenso desde el año 1982 al 1986.

Análisis de la curva de permanencia de caudales

La curva de permanencia de caudales para el río Chambas se presenta en la figura 4, la cual respondió a un modelo estadístico exponencial con un coeficiente de determinación de 0,985; por lo que puede utilizarse para la predicción del caudal para un 90% de probabilidad ($Q_{90\%}$). En este caso se obtuvo un caudal $Q_{90\%}$ con un valor de $1,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a partir del cual se estimó el caudal ecológico que representa el 5% del caudal antes calculado. Se alcanzó un valor de $0,065 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En la figura 5 se expone el comportamiento del caudal ecológico determinado por el método de la Curva de Permanencia y su comparación con el caudal mínimo del río. Puede observarse que el valor de $0,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ obtenido para el caudal ecológico es próximo en los meses de octubre a mayo y muy inferior en el periodo comprendido de junio a septiembre; pero en general el caudal ecológico es similar al caudal mínimo medio del río durante todo el año que resultó ser de $0,069 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; lo que denota que este criterio contribuye a la preservación de la flora y la fauna acuática sin provocar impactos negativos.

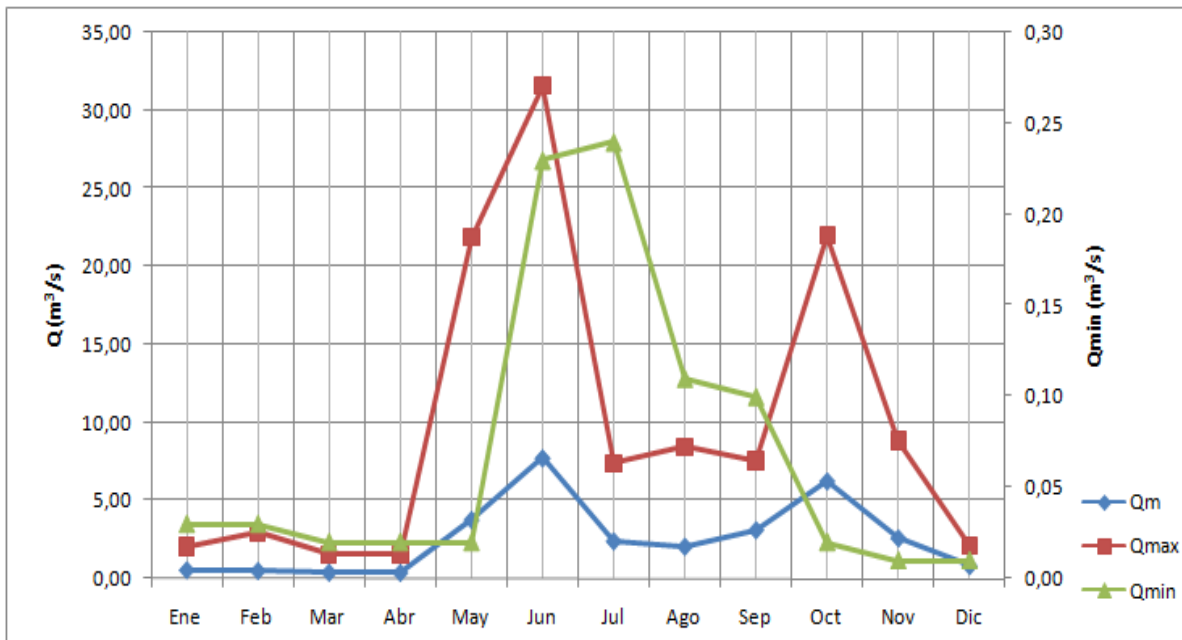


Figura 2. Caudales medios y extremos mensuales

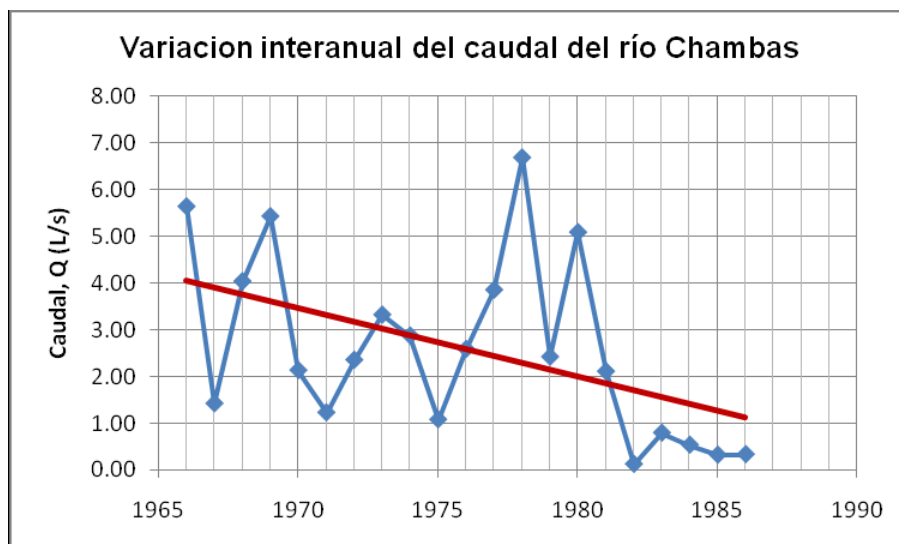


Figura 3. Caudales medios anuales

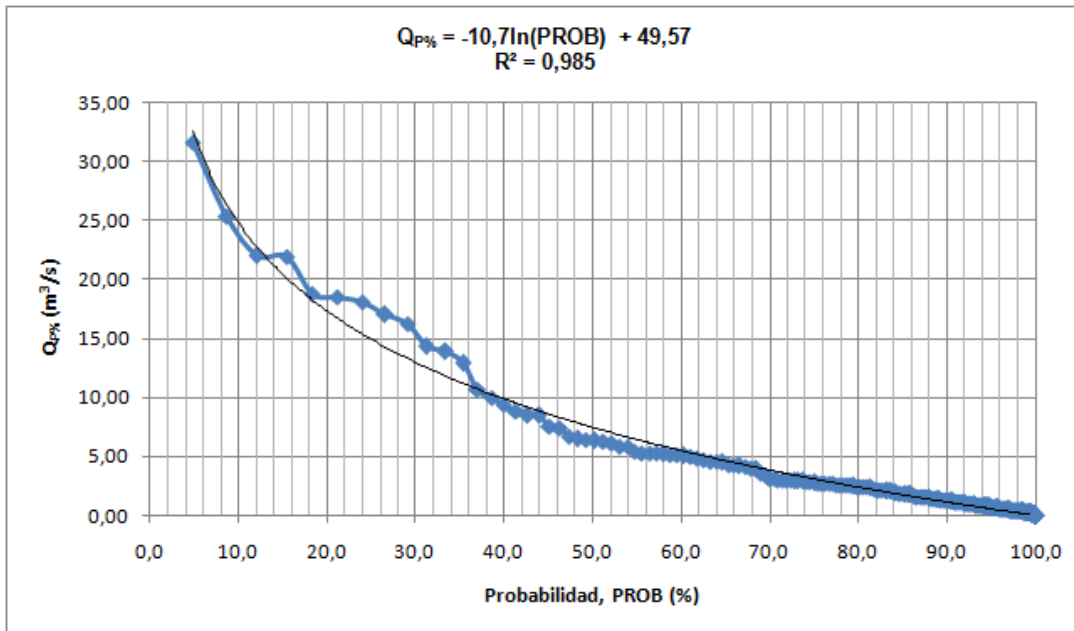


Figura 4. Curva de permanencia de caudales para el río Chambas

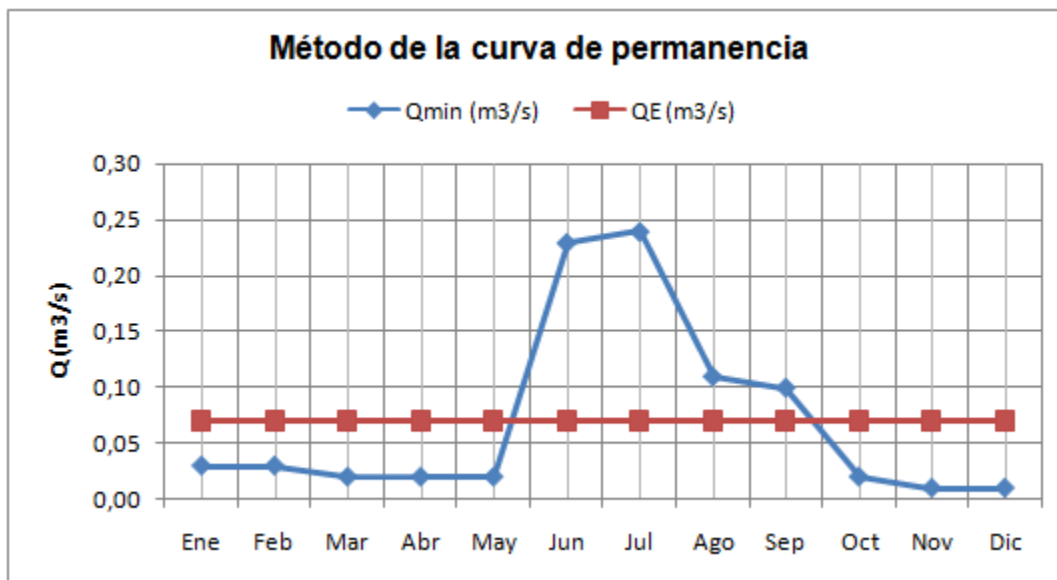


Figura 5. Caudal ecológico por el método de la curva de permanencia

Análisis del método de Rafael Heras

El método de Rafael Heras demostró que los menores caudales se encontraron de forma consecutiva en el año 1986 en los meses de febrero, marzo y abril con valores de 0,03; 0,02 y 0,02 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ respectivamente con un valor promedio de 0,023 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. De esa manera el valor del caudal ecológico determinado por este método fue de 0,0047 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

En la figura 6 se representa el caudal ecológico determinado por el método de Rafael Heras y su comparación con los caudales mínimos mensuales del río. Se puede observar que su valor está próximo al caudal mínimo del río en los meses de enero a mayo y en octubre, noviembre y

diciembre y en el resto de los meses inferior a este valor. Los resultados permiten deducir que en todos los casos este criterio garantiza la preservación de la vida acuática. Estos son similares a los encontrados por Egasa (2009) en la aplicación de los métodos del 10% y el de Rafael Heras en la determinación del caudal ecológico en el río Molloco localizado en el departamento de Arequipa, Perú.

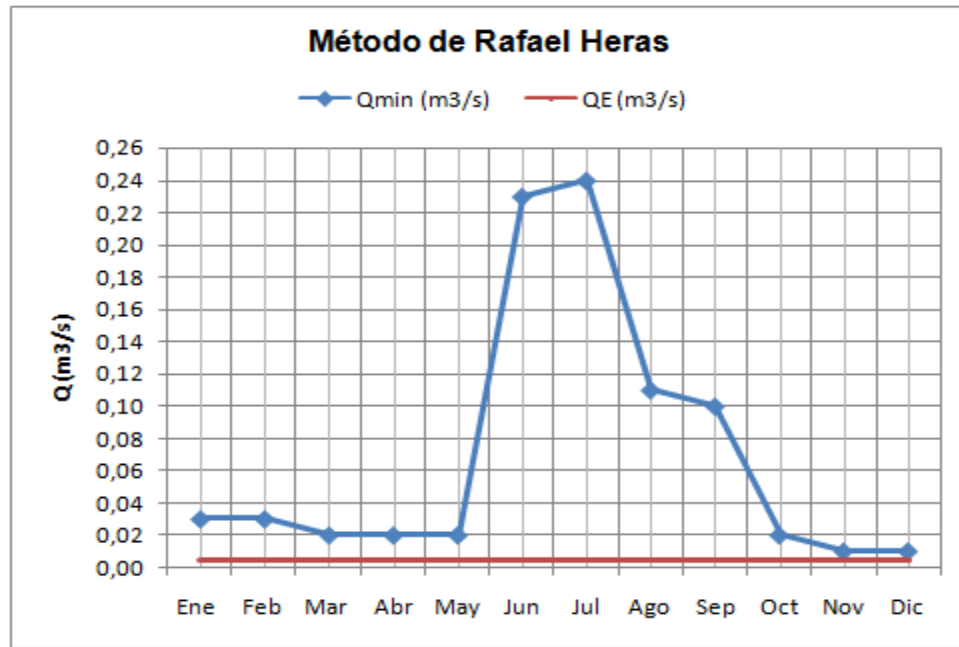


Figura 6. Caudal ecológico por el método de Rafael Heras

En la figura 7 se expone la evolución de los caudales del río en los periodos de estiaje (Q_{est}) y de avenidas (Q_{ave}). Se observa que los valores de los caudales en el periodo de estiaje estuvieron en todos los casos por debajo de $1,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y en el periodo de avenidas sobrepasan los $2,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta alcanzar valores máximos comprendidos entre $6,0$ y $7,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en octubre y junio respectivamente.

Análisis del método de Tennant

Con la aplicación del método de Tennant se encontró que los caudales ecológicos de sobrevivencia, el adecuado y el excelente fueron de $0,26$; $0,78$ y $1,55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente como se observa en la figura 8. Estos resultados indican que el caudal adecuado y el excelente no garantizan plenamente las condiciones hidráulicas necesarias para la vida de los organismos que habitan en el ecosistema fluvial en ninguno de los meses del año, debido a que sus valores se encuentran por encima del caudal mínimo medio del río; sin embargo, el caudal de sobrevivencia solo es válido en los meses de junio y julio con valor de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, por lo que se adopta como el caudal ecológico para estos dos meses.

A pesar de que el método de Tennant es uno de los más utilizados en la estimación del caudal ecológico, en este caso los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, pues no se logra en los meses del periodo seco mantener el valor de caudal que se obtuvo a partir de la aplicación de esta metodología. Según Stewardson (2005) es necesario considerar en la estimación del caudal

ecológico la protección de la fauna acuática y asegurar que en la época de estiaje se mantenga el caudal ecológico estimado.

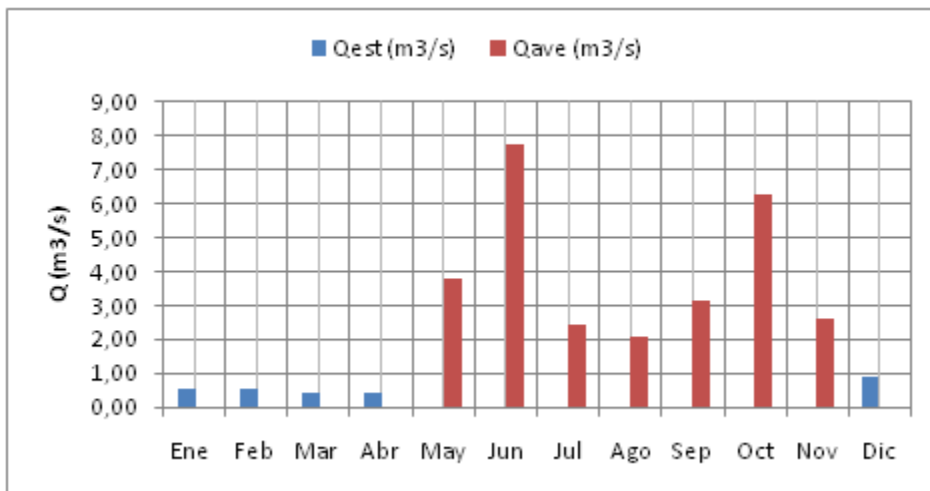


Figura 7. Caudal del río en los periodos de estiaje y avenidas

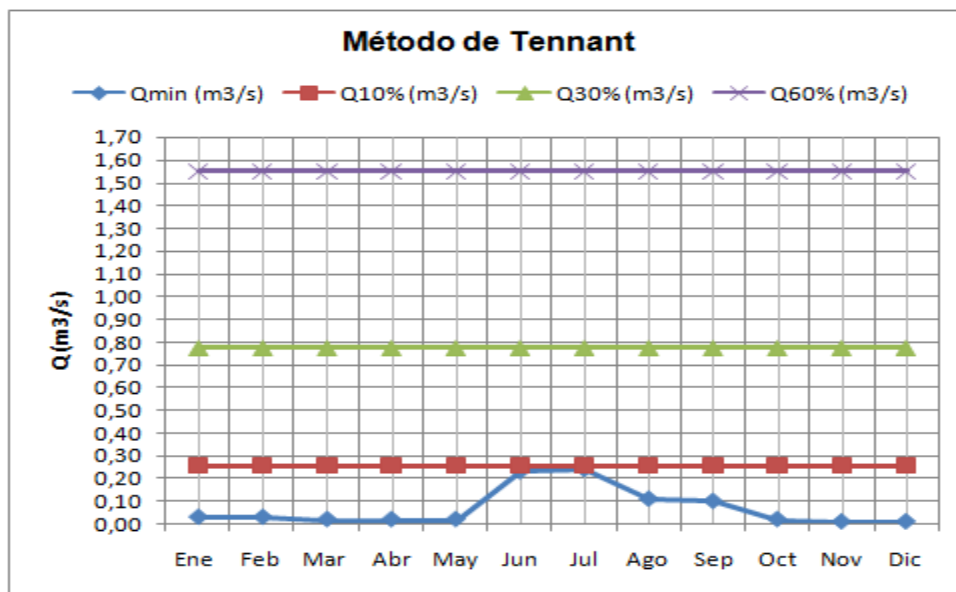


Figura 8. Caudal ecológico por el método de Tennant

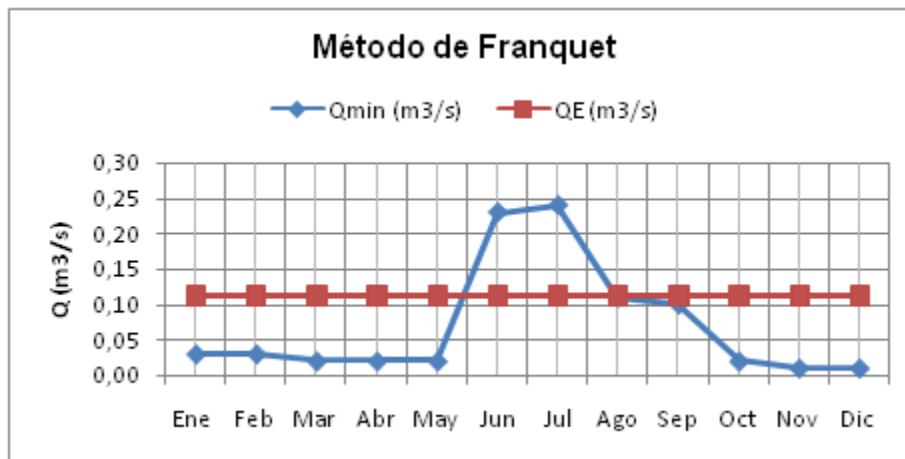
Análisis del método de Franquet

El método de Franquet parte del conocimiento del ancho del río, números de verticales a medir, profundidad de las verticales, número de secciones transversales, velocidad media de la corriente y el coeficiente K propuesto por Franquet (2009) que, en el caso del río Chambas, se estimó un valor de 9 que es recomendado para cauces naturales consolidados con una rugosidad alta. A partir de lo anterior se calcularon los parámetros geométricos e hidráulicos del río que se presentan en la tabla 3, los cuales constituyeron la base para la obtención de un caudal ecológico de $0,112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como se representa en la figura 9.

Tabla 3. Parámetros hidráulicos y geométricos del río

Secciones	h (m)	Δv (m s ⁻¹)	ΔA (m ²)	Δq (m ³ s ⁻¹)	Parámetros del río	
I	0,21	0,26	0,0315	0,0082	A (m ²)	0,264
II	0,26	0,59	0,0705	0,0416	Q (m ³ s ⁻¹)	0,135
III	0,24	0,63	0,0750	0,0473	v (m s ⁻¹)	0,510
IV	0,17	0,52	0,0615	0,0320	R _h (m)	0,046
V	–	0,22	0,0255	0,0056	P _m (m)	0,176

La comparación de este caudal con el caudal mínimo medio del río, como se muestra en la propia figura 9, permite comprobar que, en el caso del río Chambas, no es posible la preservación de la vida acuática durante los meses de octubre a mayo, pudiéndose aseverar que los resultados alcanzados con este criterio no contribuyen a la protección de este ecosistema fluvial.

**Figura 9. Caudal ecológico según Franquet (2009)**

Análisis de método del Perímetro Mojado

En la figura 10 aparece graficada la sección transversal original del río Chambas para valores promedios del ancho superficial del agua (T). Esta sección se utiliza como punto de partida para las simulaciones posteriores de la velocidad del flujo y las profundidades esperadas en cada vertical de la sección transversal al variar el caudal promedio del río.

La relación funcional entre la velocidad instantánea promedio en cada vertical (Δv) y las áreas parciales (ΔA) en la sección transversal del río respondió a un modelo lineal con pendiente positiva de 8,366 y elevado coeficiente de determinación, como se expone en la ecuación(12).

$$\Delta v = 8,366\Delta A + 0,002 \quad \text{con } R^2 = 0,999 \quad (12)$$

En la figura 11 se muestra la sección transversal generada a partir del modelo estadístico matemático de tipo polinomial de segundo orden, que permite la determinación de la profundidad de cada vertical en la sección transversal del río con suficiente confianza, ecuación (13). Este modelo presentó un coeficiente de determinación de 0,978, por lo que puede utilizarse con fines predictivos.

$$h = -0,472D^2 + 0,695D + 0,015 \quad \text{con } R^2 = 0,981 \quad (13)$$

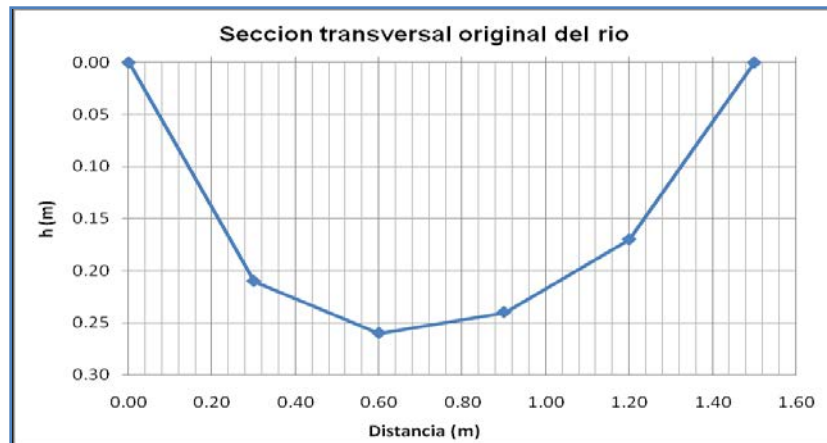


Figura 10. Sección transversal del río Chambas

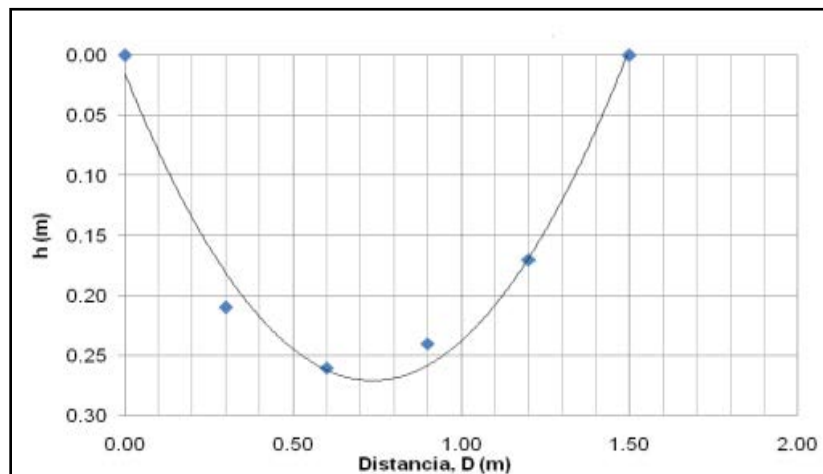


Figura 11. Modelo que relaciona la profundidad con la distancia

El proceso de iteración que requiere este método permitió calcular el perímetro mojado en función de la variación de la profundidad del agua en el cauce y consecuentemente estimar el caudal correspondiente. Con los datos de caudal y perímetro se trazó la curva que se muestra en la figura 12, en la que se observa un punto de inflexión a partir del cual se encontró el caudal ecológico con valor de $0,038\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este valor es cercano al caudal mínimo promedio del río, por lo que se puede considerar al método del perímetro mojado como un estimador aceptable del caudal ecológico en las condiciones del río Chambas.

Análisis de los métodos apropiados para la estimación del caudal ecológico

En la figura 13 se observa el comportamiento del valor del caudal ecológico determinado a partir de los cinco métodos estudiados. Se comprobó que para estas condiciones sólo los métodos de Permanencia, Rafael Heras y del Perímetro Mojado presentaron valores cercanos al caudal mínimo promedio del río, siendo por lo tanto los que presentan las condiciones para que fluya un caudal ecológico que satisfaga el criterio de conservación de las especies que habitan en este sistema fluvial.

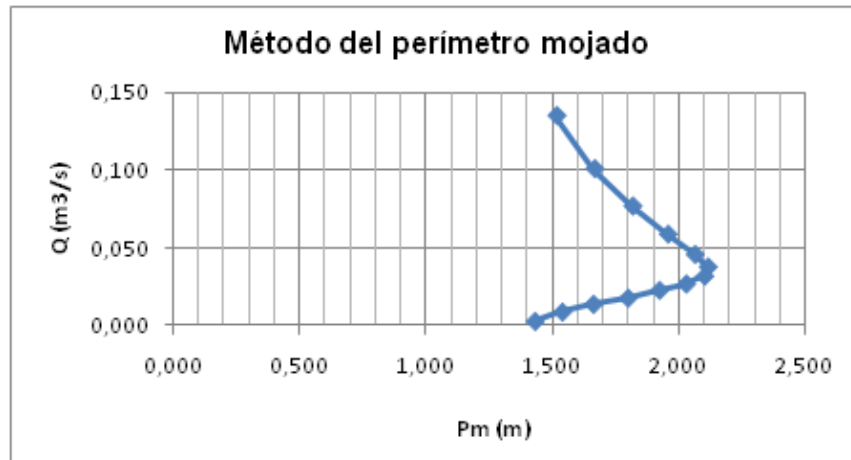


Figura 12. Caudal respecto al perímetro mojado

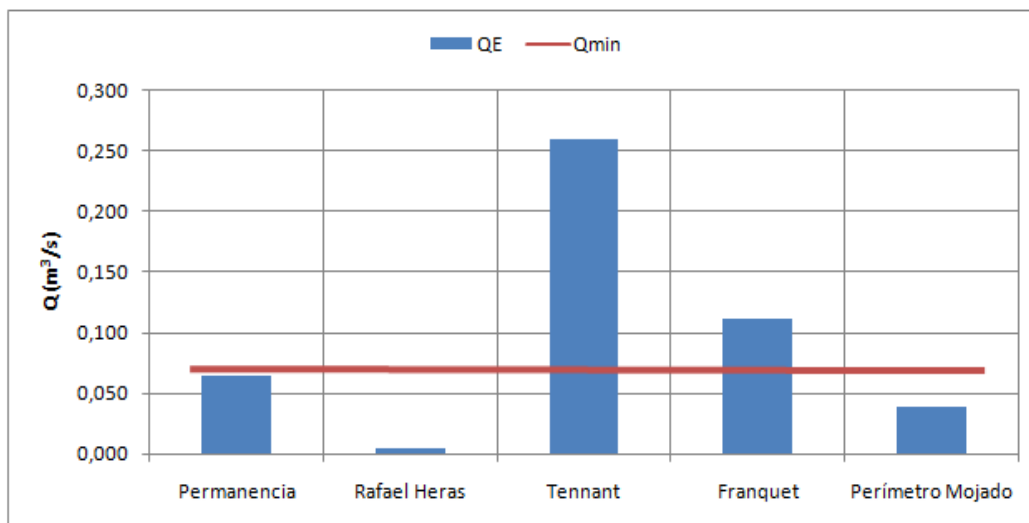


Figura 13. Comparación del caudal ecológico según los métodos utilizados

En la tabla 4 se presenta el resultado de la comparación estadística de los cinco métodos estudiados mediante el análisis de varianza de un factor. Se comprobó que existen diferencias estadísticas para el nivel de significación (α) de 0,05 al encontrarse que el valor de “ F ” calculado fue superior al valor crítico de “ F ”.

Tabla 4. Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	0,196	4	0,049	129,518	2,866
Dentro de los grupos	0,008	20	0,003		
Total	0,204	24			

La comparación de las medias mediante la prueba de Tukey demostró que no existen diferencias significativas entre los métodos de Permanencia, Rafael Heras y del Perímetro

Mojado, por lo que son los que proporcionaron los mejores resultados en la estimación del caudal ecológico para el Río Chambas.

CONCLUSIONES

- La caracterización del río Chambas, a partir de la técnica de la estadística descriptiva, revela que la serie cronológica de caudales experimenta una reducción significativa, la cual se hace intensa en los últimos cinco años.
- Los caudales mínimos promedios más críticos se presentan en los meses de enero-abril y diciembre con valores que oscilan entre $0,01 - 0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- El método de Permanencia, Rafael Heras y del Perímetro Mojado resultaron ser, según su valor, los más apropiados para la estimación del caudal ecológico para las condiciones del régimen de flujos del río Chambas por ser próximos o inferiores al caudal mínimo promedio del río y no encontrarse, entre estos, diferencias estadísticas significativas.

REFERENCIAS

- Acreman M. and Dunbar M. J.** (2004). "Defining environmental river flow requirement". *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, no.5, pp. 861-876, ISSN 1027-5606, European Geosciences Union, Germany.
- Benetti A., Lanna E y Cobalchini M.** (2003). "Metodologías para la determinación de caudales ecológicos en ríos". *Revista Brasileña de Recursos Hídricos*, vol. 8, no. 2, pp. 149-160, ISSN 2318-0331, Asociación Brasileña de Recursos Hídricos, Brasil.
- Egasa** (2009). "Determinación de caudal ecológico mínimo del río Molloco". Estudio de Impacto Ambiental de la Central Hidroeléctrica Molloco, Lahmeyer Agua y Energía S.A, Perú.
- Franquet J. M.** (2009). "El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro". Edición electrónica gratuita. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Centro Asociado de Tortosa. ISBN: 978-84-930671-7-5, pp.342, España.
- González L., Marrero N., Jorge M. del C. y Martínez J. B.** (2007). "Temas de Hidrología Superficial para Ingenieros". Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-0310-2, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Garrido A., Cuevas M. L., Cotler H., Enríquez C. y Díaz A.** (2008). "Estimación de la afectación potencial al caudal ecológico y la condición ambiental de los ríos de México: un modelo de análisis geográfico". Instituto Nacional de Ecología, México.
- Silveira L.A. y Silveira L.G.** (2001). "Caudales mínimos. Gestión de pequeñas cuencas hidrográficas". *Hidrología Aplicada*, Editorial ABRH, ISSN 0104-1169, Porto Alegre, Brasil.
- Stewardson M.** (2005) "Environmental flow analysis". Technical Report 05/13. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia.
- Vélez J. I. y Ríos L.** (2004). "Corrientes naturales, intervenciones y condiciones ecológicas". Seminario Internacional sobre eventos extremos mínimos en regímenes de caudales: diagnóstico, modelamiento y análisis, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- WWF** (2010). "Caudal ecológico. Salud al ambiente, agua para la gente". Programa Agua, CONAGUA, México.