



## Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico

Determination of the ecological flow in hydroelectric power plants of Peru,  
application to a typical case

Josue Eliezer Alata Rey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: [josue@lamolina.edu.pe](mailto:josue@lamolina.edu.pe)

Recepción: 27/08/2019; Aceptación: 15/05/2020

### Resumen

En las diferentes leyes y reglamentos del Perú sobre el uso del agua se trata superficialmente sobre la importancia del caudal ecológico, pero no se determina su obligatoriedad y la cantidad que se debe dejar en el cauce del río para la subsistencia del hábitat en la zona afectada. En los ríos de nuestra Amazonía este problema es irrelevante puesto que siempre disponen de caudales abundantes, aún en la época de estiaje, por lo que en dicha región no se presentan dificultades con el caudal ecológico, lo que si sucede en los ríos costeros, ya que en algunos cauces el caudal se anula y en todo el tiempo de estiaje no se dispone de este vital elemento, causando efectos adversos silvícolas, ecológicos y de salud humana. En este trabajo se pretende elaborar una metodología en base a la experiencia internacional, a fin de calcular exactamente el caudal ecológico que debe dejar aguas debajo de la captación cualquier central hidroeléctrica que utilice las aguas de los ríos costeros del Perú. Como parte práctica se evaluó experimentalmente la central hidroeléctrica de Molloco-Arequipa, a partir de mediciones de caudales mensuales del río Molloco.

**Palabras clave:** Caudal ecológico; medio ambiente; central hidroeléctrica; desertificación; cuenca hidrográfica; estiaje.

### Abstract:

In the different Laws and Regulations of the Peru on the use of the Water, it is superficially about the importance of the ecological flow, but it is not determined there should and the quantity that it should be left in the bed of the river for the subsistence of the habitat in the affected area. In the rivers of our Amazonia this problem is irrelevant since they always have abundant flows, still in the low water time, for what in this region difficulties are not

**Forma de citar el artículo:** Alata, J. 2020. Determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico. *Anales Científicos* 81 (1):204-219(2020).

presented with the ecological flow, that that if it happens in the coastal rivers, since in some beds the flow is annulled and in the whole time of low water it doesn't have this vital element, causing effects adverse silvícals, ecological and of human health. In this work it is sought to elaborate a methodology based on the international experience, in order to calculate the ecological flow that it should leave waters under the reception any Hydroelectric Power station that uses the waters of the coastal rivers of the Peru exactly. As part practice it was evaluated the hydroelectric power station of Molloco-Arequipa experimentally, starting from mensurations of monthly flows of the river Molloco.

**Keywords:** Ecological flow; Environment; hydroelectric power; desertification; hydrographic basin; low wáter.

## 1. Introducción

El caudal ecológico es un concepto y a la vez una exigencia, para el desarrollo de actividades extractivas, de producción, transformación y servicios, que tienen relación con los recursos hídricos, con la finalidad de contribuir a la protección y conservación ambiental y consecuentemente a la sostenibilidad de las actividades. El caudal ecológico es el caudal mínimo que se requiere para conservar la biodiversidad y los servicios ecológicos de los ríos, el cual debe permitir a los organismos desarrollarse y mantener su población en un buen estado, afirman [Jamett y Rodríguez \(2010\)](#).

La idea de caudal ecológico nace en EEUU en los años 60 como una preocupación por preservar los sistemas acuáticos de los salmones, una especie importante desde el punto de vista económico. Con el transcurrir del tiempo se fueron adicionando nuevos conceptos en los cuales no solamente se tomaban en cuenta peces, sino también otros organismos que forman parte del desarrollo, afirman [Meza et al. \(2017\)](#). A continuación, veamos algunos conceptos que existen sobre caudal ecológico:

Según el reglamento de la Ley de Recursos Hídricos en el artículo 153 menciona: Se entenderá como caudal ecológico al volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico

o cultural.

Se asocia al caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un sistema acuático preestablecido, cuando no se tienen datos de antecedentes biológicos del río se utilizarán los métodos hidrológicos. El caudal ecológico debe pensarse o definirse con el propósito de mantener los atributos característicos de un ecosistema, afirma [Baeza \(2008\)](#).

En los ríos donde se construyen estructuras hidráulicas de captación (bocatomas), o regulación (embalses), se considera como caudal ecológico, el flujo aguas abajo de dichas estructuras, cuya cantidad debe permitir la vida acuática en el río, en condiciones adecuadas, así como también satisfacer las necesidades de las poblaciones, animales y vegetales si fuera el caso. Este caudal también debe permitir la dilución de efluentes, la conducción de sólidos y el mantenimiento de las características estéticas y paisajistas del medio, afirma [Scotta \(2014\)](#).

Si bien no se indica, que los valores de caudal ecológico serán mantenidos en los períodos de estiaje, queda sobre entendido que el término de caudal ecológico es aplicable para las condiciones más críticas de disponibilidad de agua, es decir para los meses de estiaje que se presentan entre los meses de abril a noviembre. Los siguientes meses, la disponibilidad de agua es mayor, por lo tanto, los caudales ecológicos se verán superados ampliamente.

La modificación del flujo hídrico para el funcionamiento de centrales hidroeléctricas o por la extracción del agua ha causado cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. Por esta razón surge el concepto de “caudal ecológico” que pretende proteger mediante la mantención de un cierto volumen de agua dentro del cauce los valores ecológicos de los ríos. Sin embargo, las aproximaciones metodológicas utilizadas para determinar esa cantidad de agua necesaria han sido ampliamente criticadas por estimar caudales mínimos constantes sin criterios ecológicos y sin considerar la importancia de la variabilidad natural del régimen afirma [Peredo-Parada et al. \(2014\)](#). En este trabajo, por tanto, se presentan y analizan los distintos tipos de métodos utilizados a nivel mundial para la estimación de un caudal ecológico apropiado al Perú.

La gestión ambiental de los recursos hídricos afronta un gran desafío puesto a que se maneja un recurso imprescindible para la vida que ha sido reconocido como escaso y que seguirá siendo demandado a altas tasas. Por otra parte, se intenta asegurar la disponibilidad del agua para múltiples usos dentro de los cuales se reconocen aquellos de tipo ambiental, como lo son la navegación, la recreación y la conservación de los ecosistemas acuáticos, entre otros afirma [García de Jalón \(1998\)](#).

## 2. Material y métodos

### Metodologías existentes a nivel mundial

No existe un método óptimo o ideal, para determinar el caudal ecológico apropiado en forma general. Pero si existen una serie de métodos para determinar el caudal ecológico de acuerdo a criterios, objetivos y los servicios ambientales que ofrece la fuente hídrica a lo largo de su recorrido, afirman [Marraco et al. \(2012\)](#). Entre los más comunes, tenemos: Métodos hidrológicos. Métodos hidráulicos. Métodos hidrobiológicos. Métodos holísticos. Métodos eco hidrológicos.

En la [Tabla 1](#), se comparan los métodos en base a aspectos ecológicos y de gestión. Se detalla si los métodos contienen indicadores para su revisión, así como su grado de aplicabilidad en distintos tipos de ecosistemas. Se consideran de baja aplicabilidad métodos que no pueden ser utilizados en la mayoría de los ecosistemas acuáticos, como por ejemplo, los métodos hidráulicos que consideran ríos con cauces estables y secciones rectangulares. En cuanto a métodos de aplicabilidad alta con precaución, se refiere a que pueden ser aplicados en una alta variedad de ecosistemas acuáticos, pero con el cuidado de no adoptar los valores que se determinan con los métodos en diferentes ecosistemas; solo serían generalizables sus procedimientos. Los costos que en ella se presentan son relativos a los costos de los métodos con que se comparan, así mismo la complejidad fue estimada por estos investigadores tomando en cuenta el tiempo requerido para llevar a cabo la determinación, el grado de conocimientos y la necesidad de personal calificado o número de especialistas.

### Situación actual en el Perú

En el Perú la autoridad competente “Autoridad Nacional del Agua” dependencia que pertenece al Ministerio de Agricultura, aún no ha definido la metodología a aplicar, sin duda debido a la heterogeneidad de regímenes hídricos de cada una de las cuencas del país, tal como se menciona: “Las metodologías para la determinación del caudal ecológico, serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados”. Dejando a potestad de las empresas ejecutoras, la estimación de los caudales ecológicos, con criterios subjetivos y aplicables a cada uno de los espacios donde se desarrollan los proyectos.

Tabla 1. Comparación de métodos

Tipo	Aspectos Ecológicos		Aspectos de Gestión		
	Objetivos de conservación	Indicador	Aplicabilidad	Complejidad	Costos relativos
Hidrológico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Baja	Bajos
Hidráulico	Ecosistemas	SI	Alta con precaución	Baja a media	Medios
Hidro-biológico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Baja a media	Bajos a medio
Holístico	En general, poblaciones y peces	SI	Baja	Media a alta	Altos
Eco-hidrológico	Ecosistemas, valores económicos y culturales	SI	Alta	Media	Medios a altos

Fuente: (Jamett y Rodrigues, 2010).

Los caudales ecológicos se fijarán en los planes de gestión de los recursos hídricos en la cuenca. Para su establecimiento, se realizarán estudios específicos para cada tramo del río. Actualmente, el Perú cuenta con 14 macro cuencas y 103 cuencas

hidrográficas ( Figura 1), es por ello que para determinar los caudales ecológicos no se puede considerar un solo método generalizado a diferencia de otros países europeos.

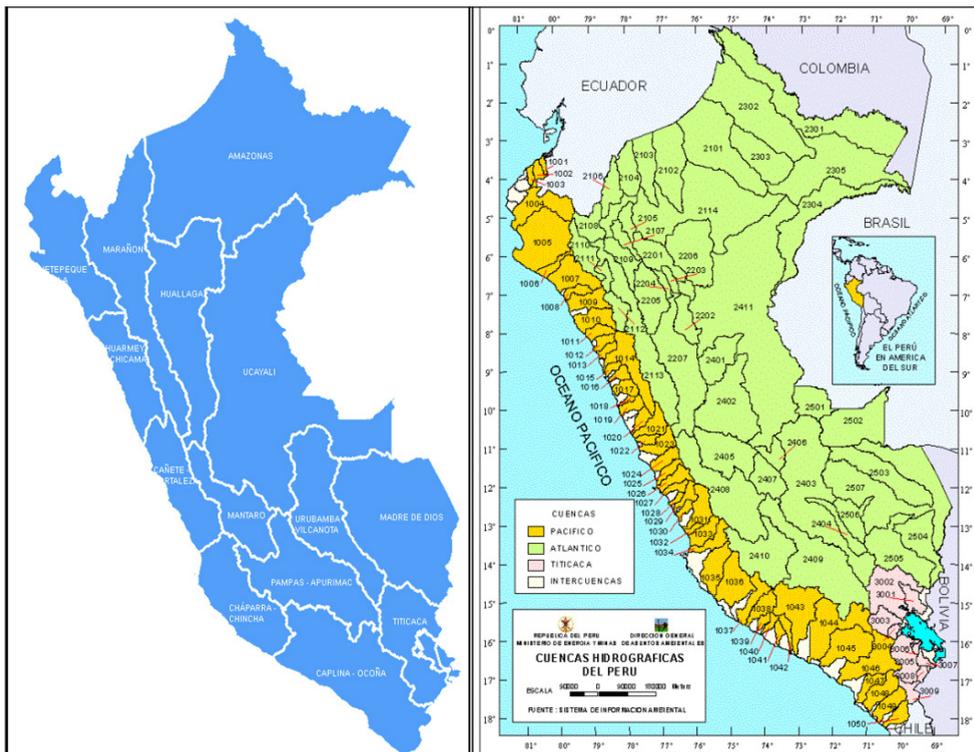


Figura 1. Cuencas hidrográficas del Perú

### Evaluación de la calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua que deben ser monitoreados entre la captación y la descarga de las instalaciones hidráulicas, y/o mineras, tienen que guardar relación con los contaminantes potenciales que pueden estar presentes en las aguas residuales. Los parámetros que se muestran a continuación, deben estar incluidos, como mínimo, en cualquier programa de monitoreo de calidad del agua, como en centrales hidráulicas, extracción de petróleo, aguas residuales de las refinerías de petróleo, y explotación minera.

### Parámetros de monitoreo

Los parámetros de monitoreo son: Temperatura, pH, Aceites y grasas, Demanda bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales Disueltos, Oxígeno Disuelto, Conductividad eléctrica, Cianuro libre, Sólidos totales suspendidos, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Cloruros, Sulfatos, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Amoniacal, Sulfuros, Fenoles, Hidrocarburos totales de Petróleo, Metales totales, Mercurio, Coliformes Totales; afirma [Palomino \(2016\)](#). Los requisitos y estándares de calidad del agua se observan en las [Tablas 2, 3 y 4](#).

**Tabla 2.** Requisitos para muestras de agua

Parámetro	Material del frasco	Volumen requerido	Conservación o preservación	Tiempo máximo para análisis
pH			determinación en campo	
Temperatura			determinación en campo	
Turbiedad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Alcalinidad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Color	P o V	500 mL	refrigerar a 4°C	48 horas
Sólidos sedimentables	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	48 horas
	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	7 días
Cloruros	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Fluoruros	P o V	300 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Sulfatos	P o V	100 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Conductividad	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	28 días
Dureza	P o V	500 mL	Agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH <2	3 meses
Oxígeno disuelto			determinación en campo	
DBO	P o V	1000 mL	refrigerar a 4°C	24 horas
Fosfato	V	200 mL	refrigerar a 4°C	18 horas
Cianuros	P o V	1000 mL	Agregar HaOH hasta pH = 12 refrigerar a 4°C	14 días 24 h / sulfuros
Nitritos	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	48 h
Nitratos	P o V	200 mL	refrigerar a 4°C	48 horas 28 /clorada
Aceites y grasas	V ámbar boca ancha	1000 mL	Agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
DQO	P o V	200 mL	Agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
Metales				
En general	P o V	1000 mL	Agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH <2	2 meses
Arsénico	P o V	500 mL	Agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH <2 refrigerar 4°C	2 meses
Mercurio	P o V	500 mL	Agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días
Hidrocarburos	V	1000 mL	Agregar CHI hasta pH <2 refrigerar 4°C	28 días

Fuente: [DIGESA](#)

Tabla 3. Estándares de calidad del agua, categoría 1: poblacional y recreacional

PARÁMETRO	UNIDAD	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Aguas superficiales destinadas para recreación	
		A1	A2	A3	B1	B2
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Contacto primario	Contacto secundario
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>						
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	1	1	1	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,005	0,022	0,022	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,085	0,08	0,08	0,08	**
Cloruros	mg/L	250	250	250	**	**
Color	Color verdadero escala Pt/Co	15	100	200	Sin cambio normal	Sin cambio normal
Conductividad	US/cm(a)	1500	1600	**	**	**
D.B.Q.	mg/L	3	5	10	5	10
D.Q.O.	mg/L	10	20	30	30	50
Dureza	mg/L	500	**	**	**	**
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	0,5	Na	0,5	Ausencia de material flotante
Fenoles	mg/L	0,003	0,01	0,1	**	**
Floruros	mg/L	1	**	**	**	**
Fósforo Total	mg/LP	0,1	0,15	0,15	**	**
Materiales Flotantes		Ausencia de material flotante	**	**	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos	mg/LN	10	10	10	10	**
Nitritos	mg/LN	1	1	1	1(5)	**
Nitrógeno amoniacal	mg/LN	1,5	2	3,7	**	**
Olor		Aceptable	**	**	aceptable	**
Oxígeno Disuelto	mg/L	>= 6	>=5	>=4	>=5	>=4
pH	Unidad de pH	6,5-8,5	5,5-9,0	5,5-9,0	6-9 (2,5)	**
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1000	1000	1500	**	**
Sulfatos	mg/L	250	**	**	**	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**	**	0,05	**
Turbiedad	UNT(b)	5	100	**	100	**

Fuente: DIGESA

**Tabla 4.** Estándares de calidad del agua, categoría 2: actividades marino costeras

PARAMETRO	UNIDADES	AGUA DE MAR		
		Sub Categoría 1	Sub Categoría 2	Sub Categoría 3
		Extracción y cultivo de Moluscos Bivalvos (C1)	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas (C2)	Otras Actividades (C3)
<b>ORGANOLÉPTICOS</b>				
Hidrocarburos de Petróleo		No Visible	No Visible	No Visible
<b>FÍSICO QUÍMICOS</b>				
Aceites y grasas	mg/L	1	1	2
DBO5	mg/L	*	10	10
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=4	>=3	>=2,5
pH	Unidad de pH	7-8,5	6,8-8,5	6,8-8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	**	50	70
Sulfuro de Hidrogeno	mg/L	**	0,06	0,08
Temperatura	Celsius	***delta 3°C	***delta 3° C	***delta 3° C
<b>INORGÁNICOS</b>				
Amoniac	mg/L	**	0,08	0,21
Arsénico total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cadmio total	mg/L	0,0093	0,0093	0,0093
Cobre total	mg/L	0,0031	0,05	0,05
Cromo Vi	mg/L	0,05	0,05	0,05
Fosfatos (P-P04)	mg/L	**	0,03-0,09	0,1
Mercurio total	mg/L	0,00094	0,0001	0,0001
Níquel total	mg/L	0,0082	0,1	0,1
Nitratos (N-NO3)	mg/L	**	0,07-0,28	0,3
Plomo total	mg/L	0,0081	0,0081	0,0081
Silicatos (Si-SiO3)	mg/L	**	0,14-0,70	**
Zinc total	mg/L	0,081	0,081	0,081
<b>ORGÁNICOS</b>				
Hidrocarburos de petróleo totales (fracción aromática)	mg/L	0,007	0,007	0,01
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	* £14 (área aprobada)	£30	1000
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	* £ 88 (área restringida)		

Fuente: DIGESA

#### Información de la Central Hidroeléctrica

En la cuenca del río Molloco, se cuenta con dos centrales hidroeléctricas a la vez, sus especificaciones técnicas lo vemos en la [Tabla 5](#).

C.H. Molloco I (4 grupos Pelton de 50 MW c/u), con la bocatoma en el embalse

Japo, túnel de aducción a presión de 7630 m de longitud y 2,8 m de diámetro con 16,4 m<sup>3</sup>/s de capacidad de conducción, chimenea de equilibrio con cámara de expansión superior e inferior, cámara de válvulas en caverna, conducto forzado en subterráneo de 1757 m de longitud, casa de máquinas en caverna y subestación al exterior.

C.H. Molloco II (2 grupos Pelton de 55 MW c/u), toma en Llatica para 16,4 m<sup>3</sup>/s, túnel de conducción en presión de 3630 m de longitud, 2,8 m de diámetro y 16,4 m<sup>3</sup>/s de capacidad, chimenea de equilibrio, cámara de válvulas, conducto forzado de 915 m de longitud al exterior y en subterráneo, casa de máquinas en subterráneo y subestación al exterior.

Los embalses están ubicados en los distritos de Choco, Chachas y Orcopampa, en la provincia de Castilla y Caylloma en la región Arequipa. Para la aplicación, se tomó los datos existentes de la Presa Japo.

#### Información Hidrológica Existente

Para el presente estudio se ha desarrollado en forma exhaustiva la hidrología de la cuenca del río Molloco y la cuenca alta del río Palca (derivación al río Molloco), entre los que se destacan la determinación de los caudales de los ríos Molloco y Palca. Sin embargo es preciso aclarar que la información

hidrológica a nivel nacional es generalmente baja, o con períodos de registro muy cortos, lo cual obliga a utilizar modelos matemáticos para la extensión y generación de descargas o caudales en los puntos de interés.

Para la cuenca del río Molloco se ha utilizado las series históricas de los caudales mensuales del río Molloco. Asimismo, se ha determinado el rendimiento hídrico en la cuenca baja, generando caudales en las sub cuencas que componen la cuenca baja del río Molloco entre la Presa Japo hasta el río Colca. Para la generación de caudales en dichas sub cuencas fue necesario recurrir a la estación de caudales registrados en la Estación La Calera.

En la [Tabla 6](#), se presentan los caudales promedios mensuales del río Molloco en la Presa Japo; se presentan las descargas medias mensuales desde 1984 hasta el 2007; obteniéndose una descarga media anual de 12,85 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas de las CHs de Molloco

	C.H. Molloco 1	C.H. Molloco 2
Potencia Instalada	200 MW	110 MW
Turbinas	4 turbinas Pelton, 50 MW c/u	2 turbinas Pelton, 55 MW c/u
Tubería forzada (subterráneo)	1757 m.	915 m.
Diámetro de la tubería	2,8 m.	2,8 m.
Caudal nominal	16,4 m <sup>3</sup> /s	16,4 m <sup>3</sup> /s

Fuente: MINEM

**Tabla 6.** Caudales mensuales del río Molloco

Año	Meses												Media Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1984	30,20	53,60	81,80	25,40	10,50	4,90	3,80	3,40	2,40	2,50	8,80	5,70	19,26
1985	3,90	24,30	52,50	24,80	10,90	5,00	3,90	3,70	3,10	2,40	3,10	4,90	11,81
1986	27,30	47,20	71,10	33,80	14,30	5,80	5,00	3,90	2,90	2,40	2,30	3,60	18,16
1987	32,40	21,20	14,30	7,40	2,90	2,50	1,80	1,40	0,99	2,20	2,20	4,40	7,78
1988	17,70	44,10	61,20	26,00	10,60	5,00	4,00	2,90	2,10	2,80	2,30	3,50	15,03

Continuación [Tabla 6.](#)

1989	23,50	46,80	46,60	13,53	5,20	3,50	2,40	2,30	1,90	2,10	2,40	5,30	12,45
1990	20,20	27,30	24,50	9,10	3,10	2,70	1,80	1,20	0,56	1,40	3,50	4,80	8,26
1991	18,60	41,40	48,90	16,30	6,00	3,70	2,80	2,00	1,80	1,70	2,60	4,30	12,36
1992	11,30	3,40	3,40	6,20	2,40	2,40	1,60	0,93	0,50	0,66	1,70	3,00	4,84
1993	31,60	35,50	42,50	18,90	6,70	4,10	3,20	2,50	2,00	2,70	4,80	5,30	13,21
1994	40,00	54,70	29,60	13,20	6,60	3,60	2,60	2,10	1,50	0,77	1,80	3,20	13,00
1995	10,60	20,10	72,90	15,40	4,50	3,40	2,50	1,30	0,80	0,82	1,70	3,40	11,45
1996	23,10	48,20	24,70	14,10	4,30	3,20	2,60	1,40	0,90	0,87	1,70	2,80	10,44
1997	20,00	48,70	43,70	10,50	3,60	3,10	2,20	1,50	1,80	1,70	1,80	3,10	11,61
1998	49,60	50,30	35,90	11,30	6,80	4,00	2,90	2,00	0,98	0,39	1,80	4,00	14,00
1999	25,90	54,00	68,70	30,90	16,20	6,20	5,20	2,70	2,00	3,80	2,40	3,50	17,33
2000	34,30	56,00	54,40	13,70	5,50	3,60	2,60	1,90	1,30	2,00	2,20	3,10	14,69
2001	43,40	49,60	56,20	25,80	10,70	5,00	4,00	3,20	2,60	2,10	1,70	3,70	17,68
2002	18,60	51,30	55,30	21,60	9,00	4,50	3,50	2,70	2,40	1,80	2,90	4,20	14,49
2003	37,30	51,00	65,00	20,70	8,00	4,50	3,50	2,50	1,70	0,77	1,60	2,90	16,49
2004	32,50	42,70	43,00	17,20	6,70	4,00	3,10	2,40	2,10	1,20	1,60	3,50	13,83
2005	14,10	50,50	48,80	17,50	5,30	3,80	2,90	1,20	0,72	0,40	1,30	2,60	11,61
2006	36,10	40,10	60,40	19,10	8,30	4,40	3,30	2,40	2,00	1,40	2,40	4,20	16,05
2007	17,00	40,16	44,20	16,30	6,30	3,90	3,10	2,10	1,30	0,96	1,90	3,60	11,58
<b>Media</b>	<b>25,73</b>	<b>41,30</b>	<b>46,39</b>	<b>16,86</b>	<b>6,77</b>	<b>3,93</b>	<b>2,99</b>	<b>2,20</b>	<b>1,95</b>	<b>1,85</b>	<b>2,79</b>	<b>4,12</b>	<b>12,85</b>
<b>Máximo</b>	<b>67,80</b>	<b>56,30</b>	<b>81,80</b>	<b>33,9</b>	<b>16,20</b>	<b>6,30</b>	<b>5,60</b>	<b>3,90</b>	<b>4,90</b>	<b>4,00</b>	<b>11,50</b>	<b>11,60</b>	<b>20,72</b>
<b>Mínimo</b>	<b>2,00</b>	<b>7,00</b>	<b>13,80</b>	<b>6,20</b>	<b>2,40</b>	<b>2,20</b>	<b>1,60</b>	<b>0,93</b>	<b>0,50</b>	<b>0,39</b>	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>4,84</b>

Fuente: Informe de Hidrología e Hidráulica del estudio para la Viabilidad Técnico Económico de la C.H. Molloco 2008

Asimismo, en la [Figura 2](#) se presenta el comportamiento del caudal máximo, medio y mínimo del río Molloco.

#### Metodología en la determinación del caudal ecológico

La metodología a considerar en el presente estudio con el objeto de calcular el caudal ecológico en el Perú consiste en:

A) Disponer de un régimen de caudales mensuales de los últimos 10 años del río

a evaluar.

- B) Aplicar los métodos más usados a nivel internacional, como el Método Ecuatoriano, Escocés, Suizo y Asturiano.
- C) Construir un canal artificial y con la ayuda de un correntómetro controlar el flujo de agua, de acuerdo a los resultados anteriores.
- D) Con los resultados de cada método, realizar mediciones de calidad del agua, a fin de contrastarlo con las normas existentes.

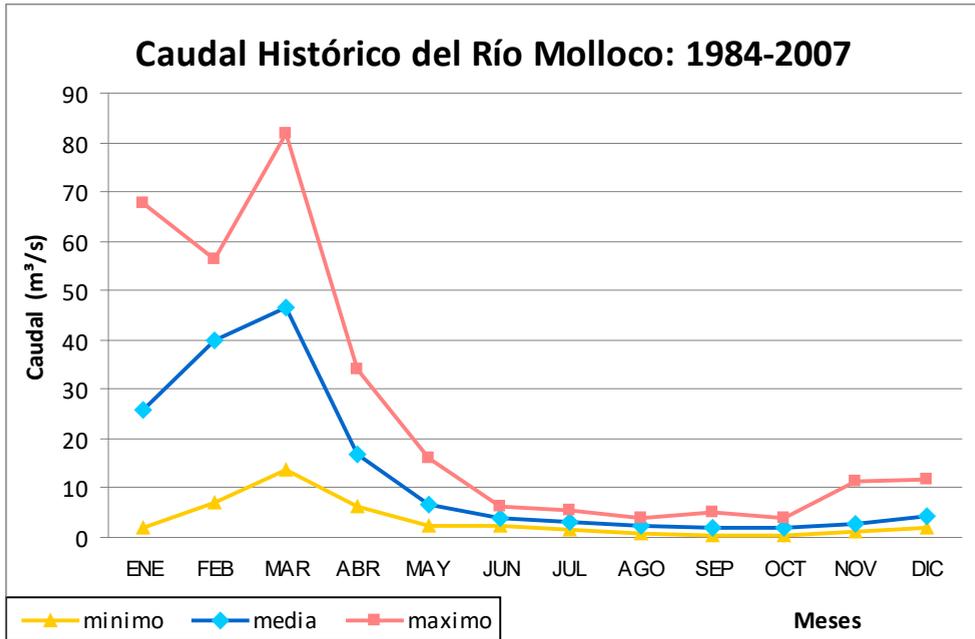


Figura 2. Caudales mensuales del río Molloco

- E) Seleccionar la especie representativa.
- F) Finalmente, el caudal ecológico se determina al promediar los caudales que cumplan con todas las normas establecidas, referentes a la calidad del agua.

Método Ecuatoriano (5% del promedio anual)

$$Q_{ECO} = 5\% * Q_{MEDIA ANUAL}$$

$$Q_{MEDIA ANUAL} = 12,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ECO} = 0,05 * 12,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ECO} = 0,6425 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### Aplicación de los métodos planteados

Tomando como referencia los métodos planteados, considerando los métodos más usados a nivel mundial, siendo conscientes de la necesidad de preservar las especies más representativas del río Molloco y considerando el factor ecológico y medio ambiental de la zona; se ha tomado como referencia 4 métodos del presente estudio, estos son:

- Método Ecuatoriano.
- Método Escocés.
- Método Suizo.
- Método Asturiano.

En la Figura 3, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método del 5% del caudal medio anual que es de  $0,6425 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se tuvo que construir un canal artificial y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de  $0,6425 \text{ m}^3/\text{s}$ , luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad (Tabla 7).

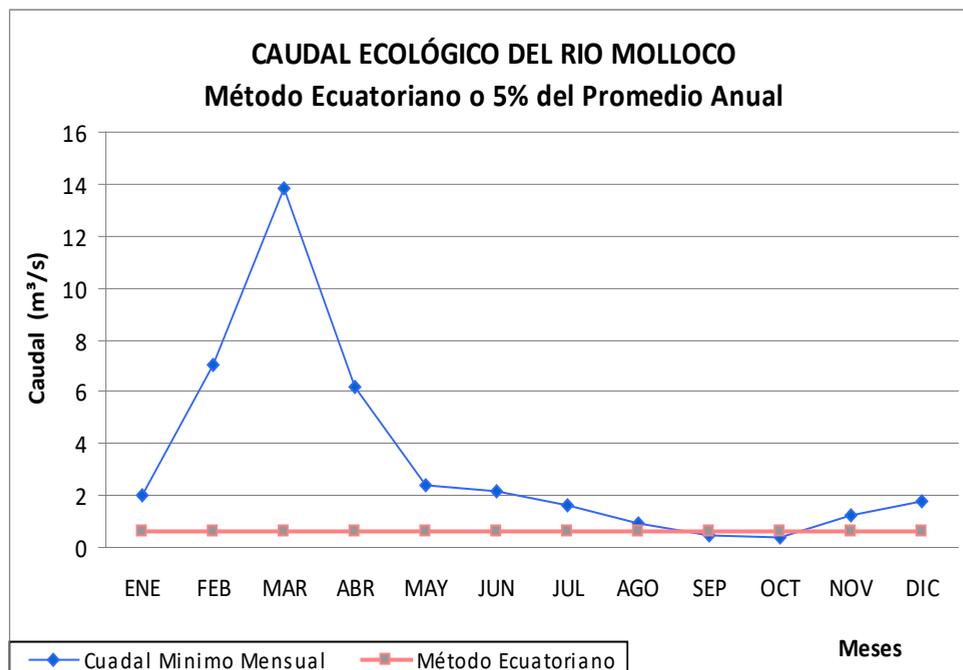


Figura 3. Caudal ecológico: Método Ecuatoriano

Tabla 7. Resultados de las mediciones con el Método Ecuatoriano

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	17	<10	NO
Oxígeno Disuelto	mg/L	3	>5	NO
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	13	25-100	NO
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	5,5	6,5-8,5	NO

De los resultados podemos concluir que dicho caudal no es conveniente, ya que no cumple con todas las normas establecidas.

#### Método Escocés (3 meses críticos)

Consiste en tomar el 20% del caudal medio mensual de 3 meses críticos consecutivos, de acuerdo a este concepto tenemos que los valores más bajos corresponden a los meses de Agosto, Setiembre y Octubre de 1992.

$$Q_{\text{PROM. 3 MESES CRIT. (1992)}} = (0,93 + 0,50 + 0,66) / 3$$

/ 3

$$Q_{\text{PROM. 3 MESES CRIT. (1992)}} = 0,6967 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{ECO}} = 0,20 * 0,67 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{ECO}} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Figura 4, se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Escocés ó método de los tres meses más bajos, cuyo resultado es 0,139 m³/s.

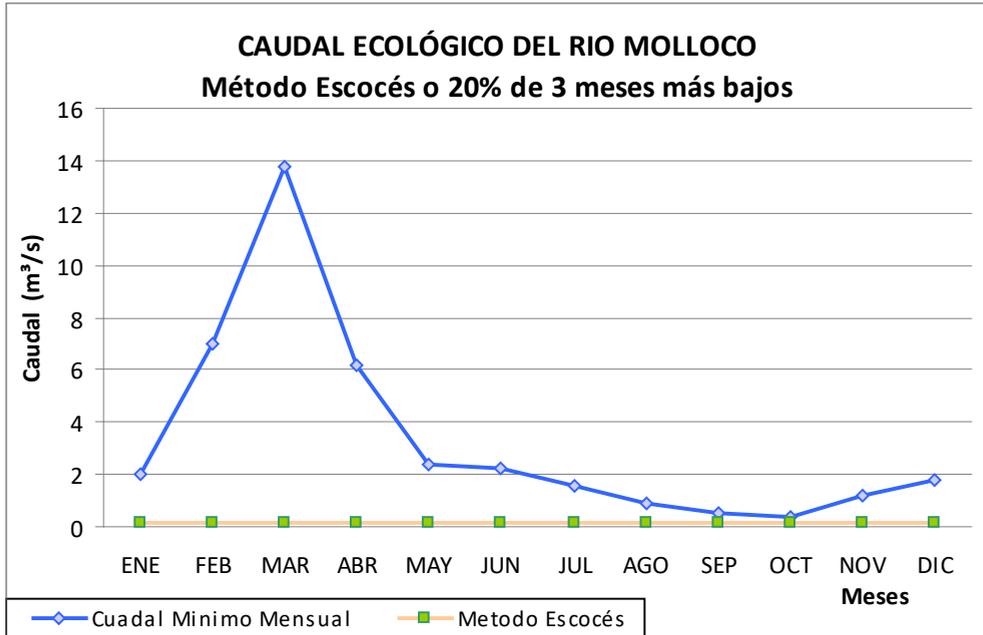


Figura 4. Caudal ecológico: Método Escocés

#### Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de 0,139 m³/s, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la [Tabla 8](#).

#### Método Suizo

Considerando el caudal medio anual de los últimos 10 años, se tiene un caudal medio anual de 12,85 m³/s; y considerando un coeficiente de 1,8; valor promedio de lo recomendado, tenemos:

$$Q_{ps} = (a \cdot Q_{M-A}) / 10$$

$$a = 1,8$$

$$Q_{M-A} = 12,85$$

$$Q_{ps} = 2,313 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ps} = 2313 \text{ l/s}$$

$$Q_{ps} = 560 + 1753 \text{ l/s}$$

Aplicando la metodología, se tiene:

Para  $Q_{ps} > 560 \text{ l/s}$ ; el caudal ecológico mínimo sería 280 l/s, añadiéndose 31 l/s por cada 100 l/s adicionales.

$$Q_E = 280 + 1753/100 \cdot 31$$

$$Q_E = 280 + 543,43$$

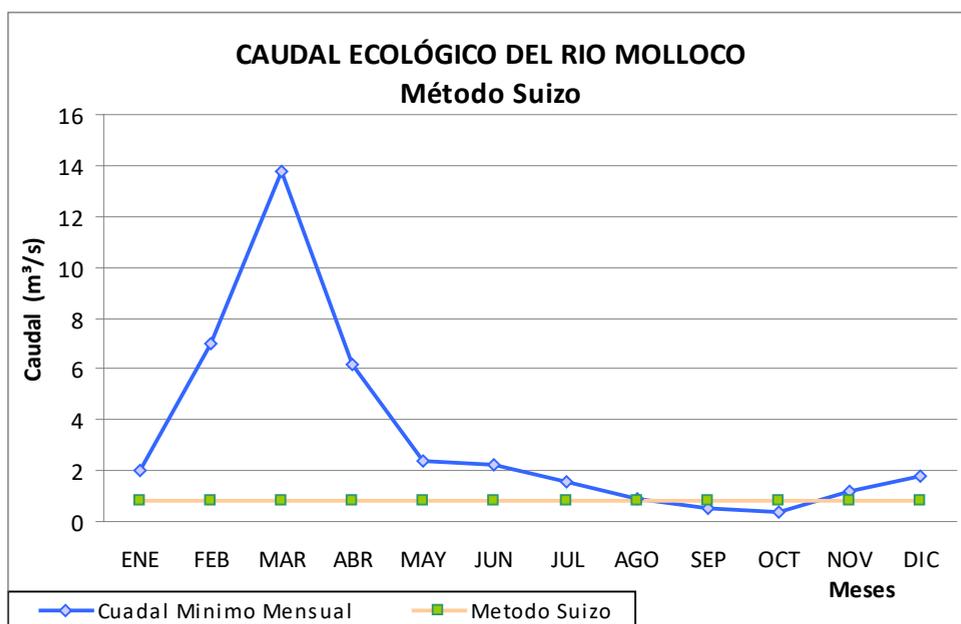
$$Q_E = 823,43 \text{ l/s}$$

$$Q_E = \mathbf{0,823 \text{ m}^3/\text{s}}$$

En la [Figura 5](#), se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Suizo, cuyo resultado es 0,823 m³/s.

**Tabla 8.** Resultados de las mediciones con el Método Escocés

INDICADORES	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	13	<10	NO
Oxígeno Disuelto	mg/L	2	>5	NO
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	27	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	4,5	6,5-8,5	NO



**Figura 5.** Caudal ecológico: Método Suizo

### Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de 0,823 m³/s, luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la [Tabla 9](#).

### Método Asturiano

El caudal ecológico mínimo se calcula a partir del Qps, obtenido mediante la fórmula aceptada por la legislación suiza antes mencionada. Para el nivel de protección, el caudal ecológico mínimo será el mayor de los valores obtenidos de las siguientes fórmulas:

$$\text{➤ } Q_{ECO} = 50 \text{ l/s} \quad (1)$$

$$\text{➤ } Q_{ECO} = 0,35 * Q_{ps} \quad (2)$$

$$\text{➤ } Q_{ECO} = (15 * Q_{ps}) / (\ln Q_{ps})^2 \quad (3)$$

$$\text{➤ } Q_{ECO} = 0,25 * Q_{ps} + 75 \text{ l/s} \quad (4)$$

En este caso, con un  $Q_{ps} = 2313 \text{ l/s}$ , obtenemos los siguientes resultados

$$Q_{ECO} = 50 \text{ l/s} \quad (1)$$

$$Q_{ECO} = 810 \text{ l/s} \quad (2)$$

$$Q_{ECO} = 578,2 \text{ l/s} \quad (3)$$

$$Q_{ECO} = 653,3 \text{ l/s} \quad (4)$$

Por lo tanto,  $Q_E = 0,810 \text{ m}^3/\text{s}$

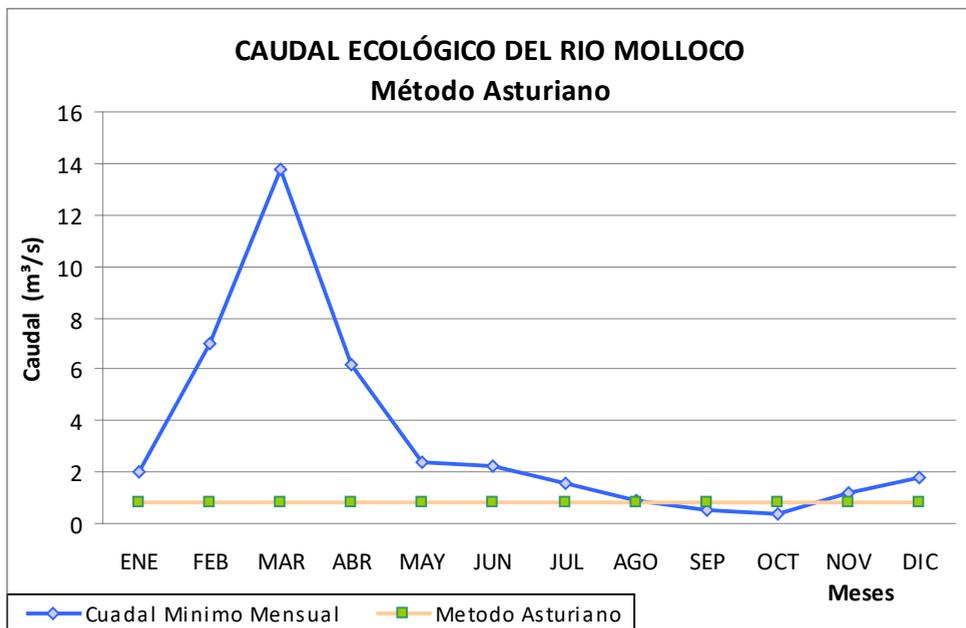
En la [Figura 6](#), se muestra gráficamente el caudal ecológico mínimo que se deberá de dejar pasar por la presa Japo según el método Asturiano, cuyo resultado es  $0,810 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Evaluación Experimental

Para la evaluación de este método se usó el canal artificial ya construido, y con la ayuda de un correntómetro se pudo ir controlando los flujos de agua en forma progresiva. Para este método se dispuso de un caudal de  $0,810 \text{ m}^3/\text{s}$ , luego se procedió a tomar las muestras del agua a fin de determinar la calidad; los resultados de las mediciones se ven en la [Tabla 10](#).

**Tabla 9.** Resultados de las mediciones con el Método Suizo

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	8	<10	SI
Oxígeno Disuelto	mg/L	7	>5	SI
Sólidos Suspendingos Totales	mg/L	35	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	7,5	6,5-8,5	SI



**Figura 6.** Caudal ecológico: Método Asturiano

**Tabla 10.** Resultados de las mediciones con el método de Asturiano

Indicadores	Unidades	Valor Medido	Valor Normado	¿Aprueba las Normas?
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	9	<10	SI
Oxígeno Disuelto	mg/L	8	>5	SI
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	30	25-100	SI
Aceites y Grasas	mg/L	-	0	SI
Plomo	mg/L	-	<0,001	SI
Mercurio	mg/L	-	<0,0001	SI
Índice de Iones de Hidrogeno (pH)	unidad	7,2	6,5-8,5	SI

### 3. Resultados y discusión

Debido al alcance del estudio que constituye una primera aproximación de caudal ecológico, para la determinación de los caudales ecológicos se adopta el promedio entre el valor del caudal ecológico obtenido por el método suizo y el método asturiano. Para complementar esta evaluación se recomienda desarrollar programas de monitoreo que permitan completar por lo menos los ciclos hidrológicos característicos. De la [Tabla 11](#), se obtiene el caudal ecológico mínimo de 0,8165 m<sup>3</sup>/s.

Con respecto al Método Ecuatoriano; podemos observar en la [Tabla 11](#), que no todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que no es recomendable usar dicho caudal (0,6425 m<sup>3</sup>/s) ya que pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica, así como la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Escocés; podemos observar en la [Tabla 11](#), que no todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que no es recomendable usar dicho caudal (0,1390 m<sup>3</sup>/s) ya que pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica, así como la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Suizo; podemos observar en la [Tabla 11](#), que todos los indicadores de calidad de agua han cumplido

las exigencias normativas, por lo que sí es recomendable usar dicho caudal (0,8230 m<sup>3</sup>/s) ya que no pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica; preservando la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al Método Asturiano; podemos observar en la [Tabla 11](#), que todos los indicadores de calidad de agua han cumplido las exigencias normativas, por lo que sí es recomendable usar dicho caudal (0,8100 m<sup>3</sup>/s) ya que no pondría en riesgo el hábitat existente entre la bocatoma y la descarga de la central hidroeléctrica; preservando la ecología y el medio ambiente.

Con respecto al caudal mínimo recomendado (0,8165 m<sup>3</sup>/s), podemos observar en la [Tabla 11](#), que dicho caudal se obtiene de promediar los caudales de los métodos que si cumplen las normas establecidas, es decir con el Método Suizo y el Método Asturiano; descartando los primeros dos Métodos (Ecuatoriano y Escocés) debido a que sus indicadores de calidad del agua no están en el rango establecido por las normas.

Finalmente, esta metodología difiere de lo planteado por Peredo-Parada *et al.* (2014), ya que en los ríos costeros del Perú el caudal es bajo, esto debido a que la mayor cantidad de agua que cae en la sierra de nuestro país se va hacia la selva, desembocando finalmente en el océano atlántico.

Tabla 11. Resumen de los métodos aplicados – fuente propia

Nº	Métodos	Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> /s)	¿Es aplicable en el Perú?	Observaciones
1	Ecuatoriano	0,6425	NO	NO cumple las normas vigentes
2	Escocés	0,1390	NO	NO cumple las normas vigentes
3	Suizo	0,8230	SI	SI cumple las normas vigentes
4	Asturiano	0,8100	SI	SI cumple las normas vigentes
	Promedio (3 y 4)	0,8165		

#### 4. Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo es aplicable sólo a los ríos costeros de nuestro país, en los cuales se tienen serias limitaciones en las épocas de estiaje. Los métodos hidrológicos e hidráulicos no consideran parámetros biológicos; tienen pocos antecedentes sobre requerimientos ambientales y requieren levantamiento de línea de base de alto costo. Las razones por las cuales se escogieron a los métodos Suizo y Asturiano son por que más se acercan a nuestra realidad debido a que consideran los aspectos ecológicos y medio ambientales. El monitoreo de los parámetros ambientales de los ríos requiere de una cuidadosa evaluación sobre donde recolectar las muestras aguas arriba y aguas debajo de la captación y de la descarga de la central hidroeléctrica, respectivamente.

#### 5. Agradecimientos

A mis profesores de pre-grado y post-grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### 6. Literatura citada

Baeza, D.; Vizcaíno, P. 2008. Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía: uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

García de Jalón, D. 1998. El régimen ecológico de caudales: bases y criterios para su aplicación en los ríos

españoles.

Jamett, G.; Rodrigues, A. 2010. Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil.

Marraco, G.; Hillman, G.; Cabildo, D.; Pagot, M.; Pozzi, C.; Plencovich, G.; Juncos, R.; Rodríguez, A.; Farias, H. 2012. Estudio de caudal ecológico para el sistema del río dulce y sus humedales.

Meza, D.; Martínez, L.; Mercado, N.; García, D.; Gonzales, M.; Marchamalo, M.; De la Mora, C. 2017. Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del Río Ayuquila-Armería en el Occidente de México. ISSN 0718-560X

Palomino, P. 2016. Evaluación de la calidad del agua en el río Mashcón, Cajamarca.

Peredo-Parada, M.; Salcedo, G.; Quevedo, D. 2014. Determinación del caudal ecológico mediante el método caudal básico de mantenimiento en el río Bureo.

Scotta, E. 2014. Cálculo para el paso del caudal ecológico en la Central Hidroeléctrica del Río Picoquén, Italia.