



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Estimación de caudal ecológico en el Río Chilloroya
usando métodos de enfoque hidrológico y de
simulación de hábitat**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Cristhian Erick MARCA PACHECO

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Marca, C. (2022). *Estimación de caudal ecológico en el Río Chilloroya usando métodos de enfoque hidrológico y de simulación de hábitat*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	CRISTHIAN ERICK MARCA PACHECO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47941646
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1673-0417
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	-
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	-
URL de ORCID	-
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07136313
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08566064
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01284486
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	PROPIA
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cusco Provincia: Chumbivilcas Distrito: Vellille Latitud: -14°26'45.51" Longitud: -71°49'13.08"
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2022
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

XIII CAP DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE LA MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE TITULACIÓN M-3 – POR SUFICIENCIA PROFESIONAL

Siendo las 15:00 horas del día jueves 20 de octubre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA y con la asistencia de los miembros Dr. Ing. EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA y el Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de la Monografía Técnica para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-3 Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

CRISTHIAN ERICK MARCA PACHECO

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller CRISTHIAN ERICK MARCA PACHECO, a realizar la Exposición del trabajo de la Monografía Técnica titulada “ESTIMACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL RÍO CHILLOROYA USANDO MÉTODOS DE ENFOQUE HIDROLÓGICO Y DE SIMULACIÓN DE HABITAT”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Se procedió a promediar la nota final del curso de actualización y la nota de la sustentación para obtener la calificación final.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por el Bachiller, la misma que fue:

.....**DIECISEIS**..... 16.....

El Presidente del Jurado Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller CRISTHIAN ERICK MARCA PACHECO Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 16:15 horas, del mismo día, se levantó la sesión.

Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
PRESIDENTE DEL JURADO

Dr. Ing. EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA
MIEMBRO DEL JURADO

Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE
MIEMBRO DEL JURADO



UNMSM

Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 05.11.2022 08:19:11 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/82430078691?pwd=YVZjcVNpL2QxbUF4T0tnM2FuV1d1Zz09>

ID: ID de reunión: 824 3007 8691

Código de acceso: 550527

Grabación archivada en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1hROGPNmMCt03vKG-8_8AmXXVx6QmQiSP/view?usp=sharing

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
"ESTIMACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL RÍO CHILLOROYA USANDO MÉTODOS DE ENFOQUE HIDROLÓGICO Y DE SIMULACIÓN DE HABITAT"
7. Autor del documento (2)
CRISTHIAN ERICK MARCA PACHECO
8. Fecha de recepción del documento 29/9/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 30/09/22
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
7%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 15 /11 /22



UNMSM

Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.11.2022 22:54:31 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca
DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

-
- 1 Otro (especificar) Monografía Técnica Modalidad de Titulación M-3 Suficiencia Profesional
 - 2 Apellidos y Nombres completos
 - 3 En letras y números
 - 4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

Tabla de contenido

Capítulo 1 - Condiciones Generales	1
1.1. Introducción	1
1.2. Importancia del Tema	1
1.3. Identificación del Problema.....	2
1.3.1. Problema General:	2
1.3.2. Problemas Específicos:	2
1.4. Propuesta de Solución.....	3
1.5. Objetivos del Trabajo.....	3
1.5.1. Objetivo General	3
1.5.2. Objetivos Específicos	3
1.6. Limitaciones.....	4
1.7. Antecedentes	5
1.7.1. Antecedentes Nacionales	5
1.7.2. Antecedentes Internacionales	6
Capítulo 2 - Marco Teórico	8
2.1. Marco Legal del Caudal Ecológico en Países de la Región.....	8
2.1.1. Normativa en Chile.....	8
2.1.2. Normativa en Bolivia.....	9
2.1.3. Normativa en Ecuador	9
2.1.4. Normativa en Perú	10
2.2. Las Denominaciones del Caudal Ecológico	14
2.3. Metodología para calcular el caudal ecológico.....	15
2.3.1. Métodos Hidrológicos.....	16
2.3.2. Métodos Hidráulicos.....	20
2.3.3. Métodos Eco Hidráulicos, Hidrobiológicos o de Simulación de Hábitat	24

2.3.4.	Métodos Holísticos	30
Capítulo 3 - Descripción Metodológica		32
3.1.	Descripción de la Zona en Estudio	32
3.2.	Planteamiento Hidrológico.....	33
3.2.1.	Información Hidrométrica.....	33
3.2.2.	Procesamiento de Cálculo	38
3.3.	Planteamiento Eco Hidráulico, Hidrobiológico o de Simulación de Hábitat.....	38
3.3.1.	Información Hidrométrica.....	39
3.3.2.	Trabajos de Campo	39
Capítulo 4 - Resultados y Discusiones.....		56
4.1.	Enfoque Hidrológico.....	56
4.1.1.	Método del Caudal Referencial – ANA	56
4.1.2.	Método del Caudal Medio Mensual.....	58
4.1.3.	Método New England Aquatic Base Flow (ABF)	58
4.1.4.	Método de Rafael Heras.....	60
4.1.5.	Método de Tennant	61
4.2.	Enfoque Eco Hidráulico, Hidrobiológico o de Simulación de Hábitat.....	62
4.2.1.	Preparación del Modelo	62
4.2.2.	Ejecución del Modelo	68
4.3.	Resultados y Discusión	73
4.3.1.	Resultados hidrológicos	73
4.3.2.	Resultados Eco hidráulicos	75
4.3.3.	Comparación de Metodologías	80
Capítulo 5 - Conclusiones y Recomendaciones.....		82
5.1.	Conclusiones	82
5.2.	Recomendaciones	87

Bibliografía	89
Anexos	95

Lista de Tablas

Tabla 1 Regímenes de caudal para peces, vida silvestre, recreación y recursos ambientales	17
Tabla 2 Recomendaciones de caudal medio para tres periodos del año	18
Tabla 3 Criterios recomendados para las variables de R2CROSS según el ancho del río	22
Tabla 4 Asunciones consideradas por King y Louw para la ejecución del método BBM	31
Tabla 5 Coordenada (centroide) de la estación RC-05	33
Tabla 6 Estación Meteorológica Constancia.....	34
Tabla 7 Estaciones Hidrométricas consideradas en la U.M. Constancia	35
Tabla 8 Etapas Consideradas en el Modelo	36
Tabla 9 Ubicación de las Transectos Perpendiculares	39
Tabla 10 Coeficientes de rugosidad de Manning.....	44
Tabla 11 Valores de preferencia según la velocidad para los Organismos seleccionados	47
Tabla 12 Valores de preferencia según la profundidad para los Organismos seleccionados	51
Tabla 13 Valores de Caudales Ecológico al 95% de Persistencia, Promedio y Mínimo	57
Tabla 14 Caudal Ecológico correspondiente por Periodos	59
Tabla 15 Valores de WUA (Superficie Ponderada Útil) para los peces a diversos caudales	72
Tabla 16 Cuadro recopilatorio de los valores de caudal ecológico por métodos	73
Tabla 17 Proporción del Caudal Ecológico respecto al Caudal Medio Mensual	74
Tabla 18 Puntos de inflexión de las curvas Caudal vs WUA.....	77
Tabla 19 Caudal Recomendado para Trucha - Estadio Juvenil, Preservando un 75% de Hábitat	78
Tabla 20 Caudal Recomendado para Trucha - Estadio Adulto, Preservando un 75% de Hábitat.....	78
Tabla 21 Caudal Recomendado para el Bagre, Preservando un 75% de Hábitat.....	79
Tabla 22 Caudales Ecológicos determinado a nivel mensual (PHABSIM)	79
Tabla 23 Cuadro resumen de caudales ecológicos: Metodología Hidrológica y Eco-hidráulicos	80

Lista de Figuras

Figura 1 Gráfica de Perímetro Mojado vs Caudal y Sección Transversal	21
Figura 2 Esquema del funcionamiento del método IFIM	25
Figura 3 Ubicación de la estación RC-05	32
Figura 4 Serie histórica de caudales en el punto PEH-09	38
Figura 5 Vista Panorámica del Tramo Evaluado durante Época Húmeda	40
Figura 6 Vista Panorámica del Tramo Evaluado durante Época Seca	40
Figura 7 Levantamiento de Información hidrotopográfica	41
Figura 8 Toma de datos de velocidad y sustrato, en el transecto de estudio	42
Figura 9 Esquema de toma de puntos	42
Figura 10 Evaluación de peces empleando equipo de pesca eléctrica	46
Figura 11 Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat por características de velocidad	51
Figura 12 Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat por características de profundidad	55
Figura 13 Gráfica de Curva de Caudal Ecológico al 95% de Persistencia, Caudal Promedio y Mínimo	57
Figura 14 Gráfica del Hidrograma del Caudal Ecológico - Método de Caudal Medio Mensual	58
Figura 15 Gráfica del Hidrograma Generado por el Método NEABF	59
Figura 16 Gráfica del Hidrograma Generado por el Método de Rafael Heras	60
Figura 17 Gráfica del Hidrograma Generado por el Método Tennant para condiciones recomendables y excelentes	61
Figura 18 Datos para la creación del Proyecto en el programa PHABSIM	62
Figura 19 Ventana de Edición de las Secciones Transversales	63
Figura 20 Ventana de Ingreso de Data de Calibración	64
Figura 21 Ventana de Ingreso de Coordenadas de las Secciones Transversales	65
Figura 22 Ventana de Criterios de Idoneidad de Hábitat	66
Figura 23 Ventana de Ingreso de Curvas de preferencia	67
Figura 24 Ventana de Caudales de Simulación	67
Figura 25 Ventanas de Asignación de Valores y Corrida del Modelo MANSQ	69
Figura 26 Ventanas de Simulación de Velocidad	70
Figura 27 Ventanas de Simulación de Hábitat y Corrida	71
Figura 28 Gráfica de relación de Caudal vs. Superficie Ponderada Útil (WUA)	72
Figura 29 Gráfica del Perfil Longitudinal de los WSL Simulados, WSI Observado y Thalweg	75
Figura 30 Gráfica de distribución de velocidades en el transecto 1	76
Figura 31 Gráfica de Caudal (m ³ /s) vs. WUA	77
Figura 32 Gráfica del Régimen de Caudales ecológicos considerados en el estudio	80

Capítulo 1 - Condiciones Generales

1.1. Introducción

Actualmente, la mayoría de los ecosistemas fluviales afrontan alteraciones provocadas por el hombre, como la escasez y contaminación del agua, el cambio de paisaje, uso excesivo de los recursos biológicos, cambios en las condiciones hidrológicas y alteraciones naturales, como sequías, inundaciones y erosión de los suelos. El concepto de caudal ecológico se planteó para disminuir el deterioro de los ecosistemas fluviales originadas por el uso desmesurado del agua. Los principales términos asociados con el caudal ecológico representan a cierta cantidad y calidad de agua, que se mantiene o descarga en un ecosistema para sostener los ambientes acuáticos, al igual que los servicios que proporciona a la sociedad.

Las metodologías para calcular los caudales ecológicos son cuantiosas globalmente, no obstante, estas pueden agruparse en métodos hidrológicos, hidráulicos y simulación de hábitats.

Según lo expuesto, la presente monografía describe de forma teórica y conceptual, las metodologías bajo enfoques hidrológicos y simulación de hábitat, para estimar los caudales ecológicos del tramo en análisis del río Chilloroya, con el propósito de compararlos y establecer el caudal ecológico.

1.2. Importancia del Tema

El aprovechamiento del recurso hídrico es un eje importante para el desarrollo de la humanidad. Históricamente, la gestión del agua se basaba en alcanzar un mayor crecimiento económico, desestimando la salud del ecosistema fluvial y ocasionando cambios en las características hidrológicas de los cauces.

Actualmente, todo proyecto que intervenga el cauce o lecho de un río debe considerar como objetivo primordial la evaluación de su impacto sobre el medio fluvial y las posibles

medidas a aplicar para controlar estos impactos (Morales Coronel, 2017). La disponibilidad mayor a 200 metodologías para la estimación del caudal ecológico (Diez Hernández & Olmeda Sanz, 2008), nos muestra que no hay un enfoque o metodología universal que pueda asegurar un caudal ecológico perfecto.

Asimismo, el aumento poblacional, además del progreso industrial hacen que el recurso hídrico sea cada vez más escaso; primeramente, por carecer de una planificación del uso adecuado del agua conforme a la demanda poblacional, y segundo, debido a los vertimientos depositados en los márgenes de los ríos, los cuales terminan degradando la vida acuática.

De lo expuesto, el presente trabajo busca definir una metodología que permita estimar de manera sencilla y detallada el caudal ecológico, asimismo realizar la comparación de dos enfoques existentes para su determinación.

1.3. Identificación del Problema

1.3.1. Problema General:

¿Cuál es la comparación de los caudales denominados ecológicos en el tramo de estudio del río Chilloroya, usando métodos con enfoque tanto hidrológico y de simulación de hábitat haciendo uso del software PHABSIM?

1.3.2. Problemas Específicos:

- ¿Cuáles son las metodologías existentes para el cálculo del caudal ecológico en base a los enfoques tanto hidrológico y de simulación de hábitat?
- ¿Cuáles son los caudales ecológicos del tramo de estudio en el río Chilloroya, a través del enfoque hidrológico y determinar las variables participantes en el cálculo?

- ¿Cuál es el caudal ecológico del tramo de estudio en el río Chilloroya, a través de simulación de hábitat mediante el software PHABSIM, por medio del enfoque eco hidráulico?
- ¿Cuál es la comparación de los resultados alcanzados bajo el enfoque hidrológico y eco hidráulico?

1.4. Propuesta de Solución

- Se realizó una búsqueda de las metodologías más utilizadas bajo los enfoques hidrológicos, hidráulicos, Eco-hidráulicos o de Simulación de hábitat y holísticos.
- En el capítulo 3, sección 3.2 del presente documento se desarrolla las metodologías para evaluar el caudal ecológico el tramo del río Chilloroya bajo el enfoque hidrológico, indicando las variables que intervienen para su determinación.
- En el capítulo 3, sección 3.3, se desarrolla el método de IFIM, indicando las variables a intervenir y los trabajos a realizar para su cálculo.
- En el capítulo 4, sección 4.4 se realiza la comparación de los resultados mostrando los valores en tablas y la gráfica de los regímenes del caudal ecológico.

1.5. Objetivos del Trabajo

1.5.1. Objetivo General

Realizar la comparación de los caudales denominados ecológicos en el tramo de estudio del río Chilloroya, usando métodos con enfoque tanto hidrológico y de simulación de hábitat haciendo uso del software PHABSIM.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Investigar las metodologías existentes para el cálculo del caudal ecológico en base a los enfoques tanto hidrológico y de simulación de hábitat.

- Estimar los caudales ecológicos del tramo de estudio en el río Chilloroya, a través del enfoque hidrológico y determinar las variables participantes en el cálculo.
- Determinar el caudal ecológico del tramo de estudio en el río Chilloroya, a través de simulación de hábitat mediante el software PHABSIM, por medio del enfoque eco hidráulico.
- Realizar la comparativa de los resultados obtenidos por el enfoque hidrológico y eco hidráulico.

1.6. Limitaciones

La monografía técnica para el desarrollo de la estimación del caudal ecológico en el tramo en estudio del río Chilloroya, a través del Software PHABSIM, presenta las siguientes limitaciones: inicialmente el presente trabajo requiere data de campo relacionada al aspecto biológico de las especies que existen en las inmediaciones del tramo elegido, esta información es especializada y requiere de personal que conozca la biología de las especies que subsisten bajo la influencia del cauce, las cuales son convertidas en curvas de preferencia de hábitat para dichas especies, lo cual se considera un estudio costoso, por ello se utilizó la información de caracterización de la Unidad Minera Constancia, la cual cuenta con información de Curvas de preferencia ya definidas, las cuales están siendo consideradas para el estudio. Además, este tipo de estudios requiere de información actualizada en referencia al levantamiento Hidrotopográfico, el cual se ha considerado la información de caudales simulados en Línea Base de la UM Constancia, que contiene solo información hasta el 2018 de caudales sintéticos generados en el río Chilloroya, y solo la información de 2 aforos realizados en el año 2017. El realizar este estudio de forma particular sería muy costoso, por el uso de equipos especializados y por el requerimiento de especialistas en el área biológica.

1.7. Antecedentes

Este subcapítulo expone las normativas aplicadas en algunos países de la región y el Perú, referentes al caudal denominado ecológico, las cuales se han descrito en la presente monografía.

1.7.1. Antecedentes Nacionales

- Ley de Recursos Hídricos, Ley N°29338 (Autoridad Nacional del Agua, 2009).
<https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29338.pdf>
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N°29338 (MINAGRI, 2010).
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-ley-recursos-hidricos-ley-no-29338#:~:text=El%20Reglamento%20tiene%20por%20objeto,en%20la%20Ley%20de%20Recursos>
- Diagnóstico sobre los caudales ecológicos en el Perú (primera fase), donde aluden al Informe Técnico N°023-2012-ANA-DCPRHERH-SUP-GPT y al Informe Técnico N°015-2014-ANA-DCPRH-ERH-CLI/FCC (Autoridad Nacional del Agua, 2015). <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1927>
- Metodología para determinar caudales ecológicos, aprobado bajo la Resolución Jefatural N°154-2016-ANA (Autoridad Nacional del Agua, 2016).
https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._154-2016-ana.pdf
- Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos, aprobado bajo Resolución Jefatural N°267-2019-ANA (Autoridad Nacional del Agua, 2019).
<https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/RJ%20267-2019-ANA.pdf>

1.7.2. Antecedentes Internacionales

1.7.2.1. Normativa en Chile

- Reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo, decreto supremo N°14 (Ministerio del Ambiente, 2012).
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053200&idParte=0>
- Decreto N°71 con el cual se modifica el decreto N°14 aprobado en el 2012 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1073494&idParte=9549274&idVersion=2015-01-15>
- Ley 20017 aprobada el año 2005, modifica e incorpora artículos al Código de aguas, que hace mención a la necesidad de establecimiento de un caudal ecológico (Ministerio de Obras Públicas, 2005).
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=239221&idVersion=2009-12-29&idParte=8131089>

1.7.2.2. Normativa en Bolivia

- Ley de Medio Ambiente, Ley 1333, promulgada el año 1992.
http://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/bolivia/bolivia_1333.pdf
- Constitución del Estado plurinacional de Bolivia, promulgada el año 2009.
http://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic3_blv_constpolitica.pdf
- En el año 2009, se promulga la Constitución del Estado plurinacional de Bolivia.
https://www.oas.org/dil/esp/constitucion_bolivia.pdf

1.7.2.3. Normativa en Ecuador

- Normas Técnicas Ambientales para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental para los Sectores de Infraestructura Eléctrico, Telecomunicaciones y Transporte Puertos y Aeropuertos, Anexo 1B (Registro Oficial No. 41, 2007).
<https://www.gob.ec/regulaciones/normas-tecnicas-ambientales-prevencion-control-contaminacion-ambiental-sectores-infraestructura-electrico-telecomunicaciones-transporte-puertos-aeropuertos>
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, Ley 0, promulgada el año 2014 (Asamblea Nacional República del Ecuador, 2014).
<http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADdricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>

Capítulo 2 - Marco Teórico

2.1. Marco Legal del Caudal Ecológico en Países de la Región

El presente subcapítulo detalla las normativas aplicadas en algunos países de la región referentes al caudal denominado ecológico para contrastarlas con las del Perú.

2.1.1. Normativa en Chile

En mayo de 2012 se aprueba el reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo, decreto supremo N°14 (Ministerio del Ambiente, 2012). Dicho decreto presenta en su artículo 3 los criterios para el establecimiento del caudal ecológico mínimo, considerando el caudal medio mensual al 20% de la cuenca y con el límite máximo de 20% del caudal medio anual. La información de caudales que se usará debe tener como mínimo una serie temporal de 25 años. No obstante, en el caso de que no exista esta información se deberá utilizar el método hidrológico más adecuado, el cual deberá fundamentarse en el informe técnico (Ministerio del Ambiente, 2012).

En el año 2015, se aprueba el decreto N°71 con el cual se modifica el decreto N°14 aprobado en el 2012 correspondiente al reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). Dicha modificación consiste en sustituir el artículo 3 correspondiente a los criterios para la determinación del caudal ecológico mínimo, considerando ahora el 50% del caudal de probabilidad de excedencia de 95%, para cada mes, teniendo restricciones en caso estas hayan sido calculadas considerando criterios descritos en los literales a y b del artículo 3 modificado (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

En la ley 20017 aprobada el año 2005, se modifica e incorpora artículos al Código de aguas de dicho país. Uno de los artículos incorporados es el N°129 bis 1, que hace mención a la necesidad de establecimiento de un caudal ecológico: “Al constituir los derechos de

aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo” (Ministerio de Obras Públicas, 2005, p. 6). Además, dicha ley menciona el uso, extracción y aprovechamiento de los recursos naturales, los cuales deben de presentar planes de manejo de tal modo que aseguren la diversidad biológica y conservación de los cauces.

2.1.2. Normativa en Bolivia

En el año 1992, se promulga la ley de Medio Ambiente como ley 1333. En su Título IV y capítulo II, artículos 36 al 39, señala que la protección del recurso hídrico es una tarea fundamental tanto del estado como de la sociedad. En su artículo 38 indica que el estado fomentará la planificación y uso de las aguas, para beneficiar a la comunidad, cuyo fin es asegurar su disponibilidad en el tiempo. En el año 2009, se promulga la Constitución del Estado plurinacional de Bolivia, donde en su Título II y capítulo V, reconoce al recurso hídrico como un recurso finito y considera a la sociedad como pieza clave para la protección y planificación del agua. Por lo tanto, aunque en la normativa boliviana no está mencionado explícitamente la definición y metodologías para el cálculo del caudal ecológico, su constitución y ley si incluyen las bases para el desarrollo y aplicación del caudal ecológico mediante el manejo integrado de las cuencas hidrográficas.

2.1.3. Normativa en Ecuador

El Ecuador cuenta con los siguientes instrumentos legales, los cuales abordan el tema de caudal ecológico así también

En el año 2007, se publicó el Anexo 1B - Norma para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Recurso Agua en Centrales Hidroeléctricas (Registro Oficial No. 41, 2007), en el cual se define en su numeral 2 al caudal ecológico como: “El caudal de agua que

debe mantenerse en un sector hidrográfico del río, para la conservación y mantenimiento de los ecosistemas, la biodiversidad y calidad del medio fluvial y para asegurar los usos consuntivos y no consuntivos del recurso” (Registro Oficial No. 41, 2007, p. 11). Además, en su numeral 4 la norma indica que se adoptará como caudal ecológico por lo menos el 10% del caudal medio anual.

En agosto de 2014 se aprueba la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Asamblea Nacional República del Ecuador, 2014), donde en el artículo 64 se señala que la naturaleza tiene derecho a la conservación del caudal ecológico para velar por la preservación de los ecosistemas y la biodiversidad. Asimismo, en el artículo 76 se define al caudal denominado ecológico como la “cantidad de agua, expresada en términos de magnitud, duración y frecuencia del caudal específico” (Asamblea Nacional República del Ecuador, 2014, p. 22). Además, señala que la Autoridad Única del Agua en conjunto con la Autoridad Ambiental Nacional serán responsables de establecer los parámetros, criterios y metodologías para determinar el caudal ecológico. Finalmente, en el artículo 77 precisa que el caudal ecológico en los cursos permanentes de agua en toda cuenca hidrográfica es intangible, y que toda institución o persona deberán de respetar tanto la calidad y cantidad de agua que salvaguarde la biodiversidad acuática y de los ecosistemas.

2.1.4. Normativa en Perú

En el año 2009, se promulgó la Ley de Recursos Hídricos, Ley N°29338, la cual establece en el literal 3 del artículo 15 que la Autoridad Nacional del Agua tiene como función el dictaminar normas y establecer los procedimientos que aseguren una gestión integral y sostenible de los recursos hídricos (Autoridad Nacional del Agua, 2009). Además, en el 2010 se aprueba el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, que en su artículo 153 define al caudal ecológico

como el volumen de agua mantenido en las fuentes naturales para la protección y conservación de los ecosistemas involucrados, estética del paisaje u otros aspectos del interés tanto científico o cultural (MINAGRI, 2010). Asimismo, el artículo 155 del Reglamento en mención indica que las metodologías para la determinación del caudal ecológico serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en conjunto con el Ministerio del Ambiente, y las autoridades sectoriales correspondientes (MINAGRI, 2010).

En julio del 2012, fue sustentado los criterios para evaluar el caudal ecológico, por medio del Informe Técnico N°023-2012-ANA-DCPRHERH-SUP-GPT (Autoridad Nacional del Agua, 2015), los cuales son los siguientes:

- Cursos de agua con caudal medio anual inferior a 20 m³/s, para época de avenida su caudal ecológico será mínimamente el 10% del caudal medio mensual, y para estiaje será del 15%.
- Cursos de agua con un caudal medio anual igual o mayor a 20 m³/s y menor o igual a 50 m³/s, para época de avenida su caudal ecológico será el 10% del caudal medio mensual, y para estiaje será del 12%.
- Cursos de agua con un caudal medio anual superior a 50 m³/s, su caudal ecológico será para cada mes del año del 10% del caudal medio mensual.

No obstante, los criterios descritos carecían de sustento con respecto a la parte biológica. Asimismo, el uso de dichos criterios dependía de la experiencia del evaluador, debido a la presencia de situaciones en las que se encuentran especies o ecosistemas de interés. Por ello, en agosto del 2014, en base al Informe Técnico N°015-2014-ANA-DCPRH-ERH-CLI/FCC, se recomendó no aplicar dicha metodología en caso exista ecosistemas con alto valor ambiental, económico, social y/o cultural para la población (Autoridad Nacional del Agua, 2015).

En junio del 2016, se aprueba la “Metodología para determinar caudales ecológicos” (Autoridad Nacional del Agua, 2016, p. 3) bajo la Resolución Jefatural N°154-2016-ANA. En el artículo 3 del documento en mención, se indica que la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) es quien establece los caudales ecológicos al instante de acreditar la disponibilidad hídrica para proyectos de inversión. Asimismo, dicha acreditación se concede mediante “Resolución de Aprobación” o “Opinión Técnica Favorable”.

En el título II de la RJ N°154-2016-ANA, indica que para solicitar la aprobación del caudal ecológico (CE) se presentará opcionalmente un estudio que determine el CE referencial o un estudio específico de caudal ecológico. El CE referencial será el caudal determinado con persistencia del 95% en el tramo de interés (ANA, 2016), además contar con un registro de caudales de los últimos veinte años. Opcionalmente, se realizará un estudio específico de CE cuando los titulares de proyectos de inversión lo soliciten.

Por consiguiente, los proyectos con declaración de impacto ambiental se determinan por medio de métodos hidrológicos o hidráulicos, y para proyectos con estudio de impacto ambiental semidetallado o detallado se determinan mediante metodologías de simulación de hábitat u holísticos (ANA, 2016). Sin embargo, el artículo 8 de la RJ N°154-2016-ANA, señala tres excepciones para el estudio del CE referencial, sobre los cuales está implicado amenazas a especies hidrobiológicas asociadas a actividades de desarrollo, consideradas endémicas, y a proyectos de infraestructura que acarreen repercusiones irreversibles en su régimen hidrológico.

En el año 2019, se reemplaza la metodología vigente aprobada en la Resolución Jefatural N°154-2016-ANA, por el documento con nombre “Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos” (Autoridad Nacional del Agua, 2019) aprobado bajo Resolución Jefatural N°267-2019-ANA. En el artículo 2 de dicho documento, señala que tiene como fin proteger y

conservar las fuentes del agua en la naturaleza, los ecosistemas implicados, el paisaje y aspectos de importancia científica y cultural, considerando el requerimiento de agua para el ecosistema y los usuarios. En el literal 5.1 del art. 5, señala que los caudales ecológicos determinados en la vigente norma no tienen efecto sobre los derechos de uso de agua que fueron otorgados con anterioridad. En el literal 5.2 del art. 5, se indica que no se otorgaran nuevos derechos de uso de agua en los meses que las fuentes de agua y/o trasvase de caudales tengan un caudal menor o igual al caudal ecológico, luego de haber descontado los caudales respectivos a los derechos otorgados de uso de agua. Asimismo, el literal 5.3 del art. 5, indica que los titulares de proyectos de inversión que intervengan en un cuerpo de agua con caudal ecológico aprobado, y que dicha fuente no cubra los requerimientos de agua para el proyecto, el titular tendrá la responsabilidad de realizar infraestructuras hidráulicas que satisfagan la necesidad de agua para dicho proyecto sin comprometer el caudal ecológico.

El art. 6 del título II de la RJ N°267-2019-ANA corresponde a los estudios para aprobar los caudales ecológicos. En el literal 6.1 del presente reglamento, señala que la metodología a usar está sujeta al instrumento de gestión ambiental (IGA), los cuales se clasifican en tres categorías. Los proyectos en la primera categoría son los que cuentan con declaración de impacto ambiental, los cuales se aplicará métodos hidrológicos e hidráulicos, descritos en el Anexo I del presente documento. Los proyectos con segunda y tercera categoría son aquellos que cuentan con un estudio de impacto ambiental semidetallado (EIA-sd) o detallado (EIA-d) respectivamente, para estas categorías se aplicará metodologías de simulación de hábitat u holísticos, descritos en el Anexo II del presente documento. Asimismo, todo estudio de caudal ecológico deberá de contar con la clasificación del proyecto, el cual permite la selección del anexo I o II correspondiente. Además, los proyectos pequeños o que no se encuentren dentro del listado de

inclusión en proyectos de inversión contemplados al Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA), deben de presentar el estudio de caudal ecológico contemplado en el Anexo I.

2.2. Las Denominaciones del Caudal Ecológico

El caudal ecológico representa a cierta cantidad y calidad de agua, que logra una sostenibilidad en el tiempo del recurso hídrico, además del equilibrio de fauna y vegetación en su entorno. En el presente, se cuenta con varias definiciones sobre el caudal ecológico, puesto que ha sido considerado por diversas instituciones y autores, presentando en consecuencia denominaciones como: Caudal de acondicionamiento, Caudal ambiental, Caudal de compensación, Caudal de mantenimiento, Caudal mínimo, Caudal de sequía, etc.

Aun cuando existen un gran número de definiciones sobre dicho termino, se define el caudal ecológico como: “la cantidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para mantener el hábitat del río y su entorno en condiciones óptimas, contemplando las necesidades de las poblaciones humanas, animales y vegetales” (Carrasco Sánchez, 2014, p. 18). A continuación, se indican algunos conceptos que definen a este caudal ecológico.

- Caudal de acondicionamiento: Caudal que puede calcularse como complemento a los caudales ecológicos establecidos, con el propósito de mantener las características del flujo para condiciones referidas a aspectos abióticos o de entretenimiento (Palau, 2003).
- Caudal ambiental: Caudal que se extrae de un río con la finalidad de preservar los ecosistemas y sus beneficios por el uso del recurso hídrico, además contribuye primordialmente a la salud de ríos, al crecimiento económico y a disminuir la pobreza (Dyson et al., 2003).

- Caudal de compensación: Referente al mínimo caudal requerido para mantener y asegurar la subsistencia de un ecosistema acuático natural preestablecido. (Espinoza et al., 1999)
- Caudal de mantenimiento: Caudal que debe mantenerse en un río aguas abajo de toda obra de aprovechamiento, regulación o derivación; para conservar el desarrollo de la vida acuática de manera aceptable (Palau Ibars, 1994).
- Caudal Ecológico Mínimo: Caudal que controla el uso del recurso hídrico en épocas de sequía, capaz de mantener la vida en el río, sin pretensión de considerarse una solución definitiva ni ecológica (J. King et al., 1999; Palau, 2003).
- Caudal de sequía: Caudal muy limitado, correspondiente a años secos, pero adecuado para preservar a las especies en un ecosistema, sin garantizar forzosamente su reproducción (Fernández Yuste & Martínez Santa-María, 2010).

Sobre la base de las definiciones expuestas se considera que el concepto fundamental y común para la definición del caudal ecológico, es el mantenimiento y conservación del ecosistema, flora y fauna, dependientes de una fuente natural de agua.

2.3. Metodología para calcular el caudal ecológico

Actualmente existen diversidad de metodologías y herramientas computacionales que logran estimar caudales ecológicos, teniendo origen en la década de los 70's (Chávez Céspedes & Lara Camarena, 2020).

De manera general se expondrá los métodos con mayor uso que logren estimar el denominado caudal ecológico, Consuegra Martínez (2013) señala que dichos métodos pueden ser agrupados en cuatro metodologías, las cuales se mencionan a continuación:

- Métodos hidrológicos

- Métodos hidráulicos
- Métodos Eco hidráulicos, hidrobiológicos o de simulación de hábitat
- Metodología holística

2.3.1. Métodos Hidrológicos

Estas metodologías están fundamentadas en el uso de datos hidrológicos, comúnmente registros de caudales históricos (diarios o mensuales), conforme a estos se obtiene un caudal mínimo (J. M. King et al., 2008, p. 17). Dicha metodología se sustenta en que existe relación entre el ecosistema y las variaciones del caudal natural en la zona, debido a que dichas especies se han acostumbrado y adaptado a la zona. Además, los métodos hidrológicos consideran que reservando un porcentaje de caudal (generalmente constante) es posible proteger los ecosistemas. Debido a que estas metodologías se fundamentan exclusivamente de datos, se han convertido en los más empleados a nivel mundial por su relativa facilidad de uso, considerando a nivel regional y de planificación hídrica. No obstante, presenta como mayor inconveniente el no considerar aspectos biológicos y geomorfológicos del cauce, además de los aspectos culturales y socioeconómicos de las personas dependientes del ecosistema (Carrasco Sánchez, 2014).

2.3.1.1. Método del Caudal Medio Mensual

Desarrollado en Estados Unidos, plantea que la estimación del caudal ecológico es el promedio del caudal a nivel mensual para el mes más seco, este método requiere el registro histórico de caudales de mínimamente 25 años (Flachier Troya, 2016).

2.3.1.2. Método de Tennant

Considerado como uno de los más conocidos en la metodología hidrológica (Reiser et al., 1989), que requiere la información del registro de caudales históricos medios mensuales de múltiples años. Este método se sustenta en un estudio de diez años de mediciones y

observaciones realizado en once ríos localizados en Estados Unidos de Norteamérica (Montana, Nebraska y Wyoming) para una especie específica (la trucha), identificando la relación entre la disponibilidad de hábitat para dicha especie y los parámetros físicos del cauce (velocidad, profundidad y ancho) (Tennant, 1976).

Este método separa al año en dos periodos (avenida y estiaje), planteando porcentajes al caudal medio anual relacionados con el grado de conservación del hábitat acuático establecido, afirmando que el ecosistema fluvial comenzaba a degradarse con caudales menores al 10% del caudal medio anual (Tennant, 1976).

No obstante, esta metodología tiene como principal inconveniente el estar fundamentada en datos estadísticos de los Estados Unidos, los cuales comparten criterios geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos. En la Tabla 1 se muestra la recomendación de caudales para distintas épocas del año propuesta por Tennant.

Tabla 1

Regímenes de caudal para peces, vida silvestre, recreación y recursos ambientales

Descripción de flujo	Caudal Recomendado	
	Octubre – Marzo	Abril - Septiembre
Máximo	200%	200%
Rango Optimo	60% - 100%	60% - 100%
Sobresaliente	40%	60%
Excelente	30%	50%
Bueno	20%	40%
Malo o Degradante	10%	30%
Pobre o Mínimo	10%	10%
Degradación Severa	10% - 0%	10% - 0%

Nota. Tomado de Tennant (1976).

2.3.1.3. Método New England Aquatic Base Flow (ABF)

Método desarrollado en Nueva Inglaterra por medio del servicio de pesca y vida salvaje de Estados Unidos, comúnmente utilizado para proyectos hidroeléctricos, y requiriendo registros históricos de caudales medios mensuales multianuales mayor a 25 años (U.S. Fish and Wildlife Service, 1980). Se recomienda la partición del año en 3 periodos, donde el caudal ecológico es determinado por la mediana de los caudales medios históricos de dichos meses (Autoridad Nacional del Agua, 2015).

Tabla 2

Recomendaciones de caudal medio para tres periodos del año

Periodo	Caudal medio recomendado
Octubre – Febrero	Febrero
Marzo – Mayo	Marzo / Abril
Junio – Septiembre	Agosto

Nota. Tomado de la Autoridad Nacional del Agua (2015).

2.3.1.4. Método del NGPRP (Northern Great Plains Resource Program)

Desarrollado en Estados Unidos con la finalidad de conservar los peces de importancia económica (especies salmónidas), utiliza registros históricos de caudales medios mensuales en la curva de duración (Flachier Troya, 2016). Además, el método considera caudales conforme a la Curva de duración con persistencia del 90% para meses secos y del 50% para meses húmedos, además requiere un histórico de caudales medios para mas de 20 años (Consuegra Martínez, 2013).

2.3.1.5. Método de Rafael Heras

Este método se fundamenta en la evaluación de las épocas de sequía, considerando al caudal ecológico como el 20% del caudal medio mensualizado de 3 meses más bajos sucesivos (EGASA, 2009). Además, el año considerado crítico es definido como “año de la serie donde se muestran tres meses sucesivos con más bajo caudal” (Brown Manrique et al., 2016, p. 61).

2.3.1.6. Método 7QX

Método desarrollado en Estados Unidos, el cual requiere el histórico de caudales mínimos diarios multianuales. Este método propone que “el caudal ecológico es determinado como el caudal mínimo promedio de 7 días de duración y periodo de retorno de X años, siendo el más utilizado el 7Q10” (Climate Technology Centre and Network, 2018). Dicho método considera que puede generarse estrés ecológico cuando existen valores menores de caudal, dado que se genera una sobrecarga de tensión por la falta de agua, lo cual se manifiesta en el hábitat, debido al surgimiento de anormalidades que dificultan el desarrollo habitual de las comunidades biológicas (Empresa Nacional de Electricidad S.A., 2011). Por esta razón, es apropiado determinar el caudal ecológico en países como Brasil utilizando el método 7Q10.

2.3.1.7. Método de Hoppe

Método también desarrollado en Estados Unidos, siendo uno de los primeros que relaciona las características fluviales óptimas para la fauna acuática con los percentiles de la curva de caudales (Brizga, 1998). Por lo tanto, dicho método señala que para épocas de avenidas y limpieza del sustrato, requiere un caudal con persistencia del 17% (Q17): para mantener en óptimas condiciones los ecosistemas contribuyendo al desove, requiere un caudal con persistencia del 40% (Q40): para garantizar el alimento y abrigo, requiere un caudal con persistencia del 80% (Q80) (Castro Heredia et al., 2006).

No obstante, tienen como limitante haber sido desarrollado específicamente para cauces con poblaciones salmónidas (truchas), no siendo válido para todos los peces y ríos. Además, requiere el histórico multianual de caudales sean diarios, mensuales o anuales (Consuegra Martínez, 2013).

2.3.1.8. Método del Caudal Referencial ANA

Este método define al caudal ecológico como el caudal con persistencia del 95%, el cual se genera en base a las curvas de duración en una serie histórica de datos medios mensuales de al menos 20 años (Autoridad Nacional del Agua, 2016).

2.3.2. Métodos Hidráulicos

Los métodos bajo el planteamiento hidráulico contemplan el cambio de los caudales y las relaciones de las características físicas del cauce como: perímetro mojado, velocidad, tirante, sección del río y caudal que circula en dicha sección (Flachier Troya, 2016). Considerados como una mejora a la metodología hidrológica, debido a que asocia los aspectos de la alteración del cauce debido al cambio del caudal, lo cual representaba una limitante para especies piscícolas y acuáticas vinculadas al ecosistema (Agualimpia Dualiby & Castro Méndez, 2006).

La metodología hidráulica a diferencia de la hidrológica incorpora labores de campo, no obstante, presenta como desventaja el querer representar la totalidad de un ecosistema fluvial usando solo un conjunto de variables hidráulicas, sin considerar los requerimientos de la biota.

2.3.2.1. Método del Perímetro Mojado

Considerado de los más utilizados y conocidos en Estados Unidos de Norteamérica. Dicho método asume la directa relación entre el área húmeda en la sección de análisis y la integridad del hábitat; además, se fundamenta en la elaboración de curvas que evidencian la relación entre el perímetro mojado con el caudal (Araujo Delgado & Sarmiento Soto, 2020). En

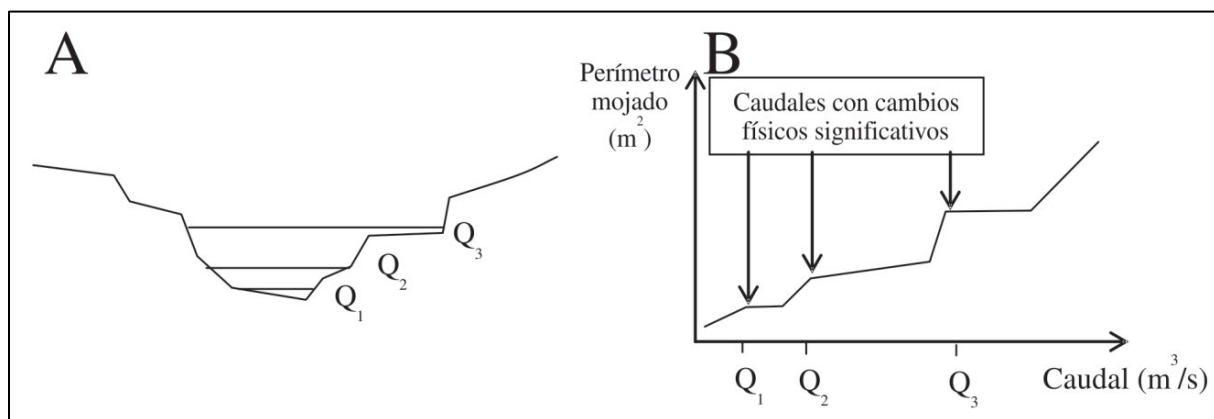
base a dichas curvas, se aprecia que a medida que aumenta el caudal, el perímetro se incrementa con rapidez hasta determinado volumen de agua, considerado como punto de inflexión; no obstante, superado este volumen se mantiene el perímetro mojado casi constante (Villanueva Uré & Alata Rey, 2011). Por lo tanto, el caudal propuesto es el cercano a dicho punto de inflexión, considerado “el nivel idóneo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos” (ENDESA, 2011, p. 15).

Sin embargo, este método no considera la calidad, ni condiciones de hábitat para las especies acuáticas, ni los cambios del caudal a lo largo del tiempo; aspectos esenciales para el cálculo de un caudal ambiental.

La Figura 1 muestra la relación del caudal y el perímetro mojado, en un cauce o río.

Figura 1

Gráfica de Perímetro Mojado vs Caudal y Sección Transversal



Nota. Tomado de Aguilera & Pouilly (2012, p. 20).

2.3.2.2. Método R2Cross

Propuesto inicialmente por Nehring en 1979 y utilizado con éxito en los programas hídricos de demanda en Colorado, Estados Unidos (Ye et al., 2013). El método se fundamenta bajo la presunción de que el caudal seleccionado para conservar el ecosistema en un rápido, es

adecuado para mantener el hábitat de peces e invertebrados acuáticos en las secciones del río (Pang et al., 2012). Considerando a los tramos de reducido tirante con moderada velocidad de corriente como rápidos, los cuales presentan una superficial turbulencia, mayor pendiente y lecho con forma convexa (Linnansaari et al., 2012). Asimismo, Kushner (2008) señala que en términos ecológicos, son importantes los rápidos para el desarrollo de invertebrados acuáticos y vida de los peces residentes, disponiendo áreas para el desove, incubación, alimentación y refugio.

Este método requiere que el caudal mínimo para la protección del hábitat, asegure cumplir determinados criterios para tres parámetros hidráulicos: profundidad media, porcentaje del perímetro mojado y velocidad promedio del flujo (Parker et al., 2004).

El R2Cross define ciertos requerimientos de descarga respecto a las estaciones de invierno y verano (Gallo Vélez, 2016). Para la estación de verano es fundamental que el caudal ecológico cumpla con tres criterios; además, para la estación de invierno, el caudal debe cumplir por lo menos dos de los tres criterios indicados en la Tabla 3.

Tabla 3

Criterios recomendados para las variables de R2CROSS según el ancho del río

Ancho promedio (m)	Profundidad promedio (m)	Perímetro mojado del cauce (%)	Velocidad promedio (m/s)
0.3 – 6	0.003 – 0.06	50	0.30
6 – 12	0.06 – 0.12	50	0.30
12 – 18	0.12 – 0.18	50 – 60	0.30
18 – 30	0.18 – 0.3	≥ 70	0.30

Nota. Tomado de Gallo-Vélez (2016).

2.3.2.3. Método de Múltiples Transectos

En comparación con el método del perímetro mojado, empleado para un solo transecto, este método evalúa un conjunto de secciones transversales para conocer de este ecosistema fluvial sus características físicas (Consuegra Martínez, 2013). En cada sección analizada mide datos de cobertura vegetal, sustrato, nivel de agua y velocidad de corriente para diversos caudales en las distintas temporadas. Estas variables se emplean en la modelación hidráulica con el fin de determinar cambios en ellas, dando una idea del comportamiento del río ante variaciones del caudal, las cuales definirán el caudal ecológico más favorable para asegurar la movilidad de las especies, calidad del agua, transporte de sedimentos y potencialidad de recreación (Zalucki & Arthington, 1998).

2.3.2.4. Método de Washington

Método orientado a la protección de hábitat para especies salmónidas y su ciclo de vida, desarrollado para establecer el caudal que brinde profundidades y velocidades apropiadas en cada sección representativa del cauce, apropiadas para el desove (Flachier Troya, 2016). Utilizando estos datos se realizan mapas que caracterización los tramos para determinado caudal; además, recalcar que este método fue aplicado a especies salmónidas que viven en arroyos pequeños al occidente de Washington (Swift, 1975).

2.3.2.5. Método de Modelación Hidráulica

Planteamiento que efectúa una simulación hidráulica, “la cual presenta como requerimiento una precedente recolecta de valores correspondientes a características físicas e hidráulicas como: cobertura vegetal, forma de fondo, profundidad, etc.” (Chávez Céspedes & Lara Camarena, 2020, p. 31).

2.3.3. Métodos Eco Hidráulicos, Hidrobiológicos o de Simulación de Hábitat

Métodos también conocidos como de tercera generación debido a que utilizan caudales históricos, parámetros morfo hidráulicos en las secciones representativas, parámetros fisicoquímicos y variables biológicas; además, relacionan las características hidráulicas de los cauces con el entorno del ecosistema fluvial (Oyola Sánchez, 2017). Estas metodologías posibilitan tener una mayor comprensión de la ecología en ecosistemas lóticos y lénticos (Poff et al., 2009). A continuación, se describen algunos métodos clasificados como hidrobiológicos o de simulación de hábitat.

2.3.3.1. Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)

Método llevado a cabo en los años 70 por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos con participación de especialista interdisciplinarios (Bovee & Milhous, 1978). Es una metodología usada para cuantificar impactos en el medio ambiente, teniendo en cuenta que la influencia en el hábitat es directa y fácil de determinar; además, precisa que las poblaciones acuáticas (especies salmónidas) están relacionadas a las variaciones de los caudales (Mayo Rustarazo, 2000). Este método IFIM evalúa la superficie de hábitat útil para distintas especies según las variaciones del caudal; además, señala que existe relación entre la “habitabilidad” (términos físicos) y la “funcionalidad” (términos ecológicos) la cual posibilita asumir que: condiciones en teoría adecuadas de habitabilidad, proporcionan un adecuado nivel de funcionalidad (Climate Technology Centre and Network, 2018).

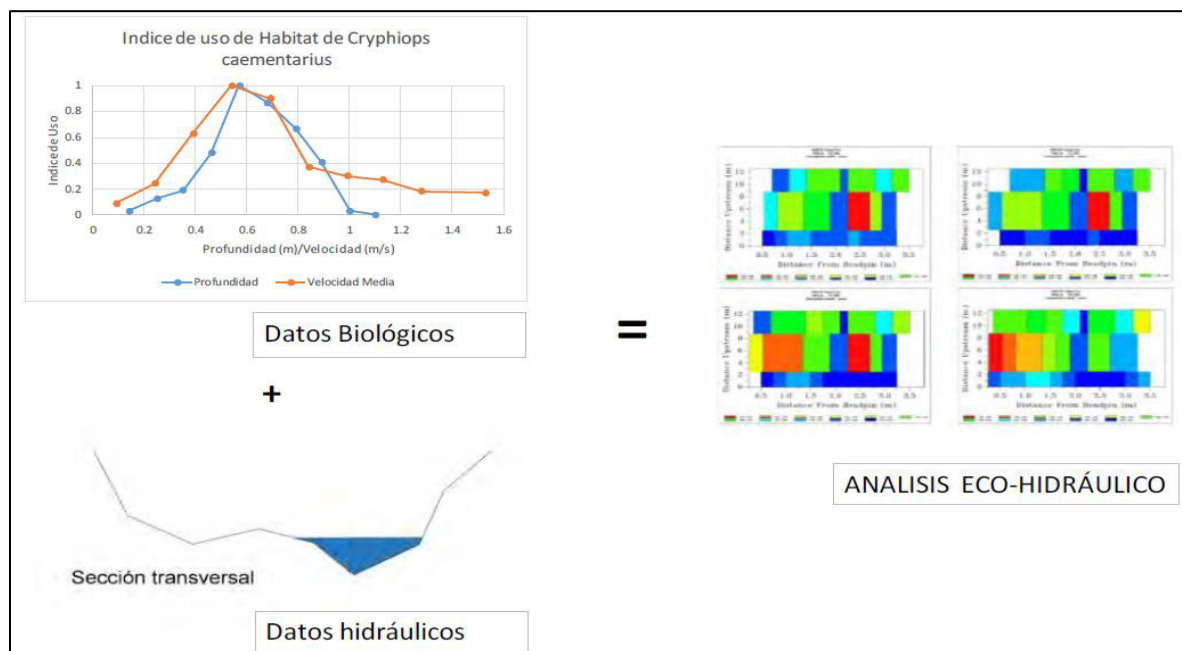
La metodología IFIM se efectúa en cinco etapas consecutivas: “identificación del problema, planeamiento del estudio, implementación del estudio, análisis de alternativas y solución del problema” (Autoridad Nacional del Agua, 2015, p. 71); por lo tanto, el modelo de

simulación calcula para una determinada especie, la superficie de hábitat disponible sujeto al caudal circulante.

Chávez y Lara (2020) señalan que “la información necesaria para el desarrollo de la simulación de hábitat es de carácter hidráulico y biológico, propia del río y a la especie sensible” (p. 32). La data hidráulica es generada previa simulación, utilizando información respecto a las secciones transversales del río, como velocidad y tirante para determinados caudales; además, la información biológica es empleada en curvas de preferencia, que representan el nivel de afinidad de la especie objetivo en referencia a las variables hidráulicas que definen su hábitat físico en distintos estadios de vida (alevín, juvenil y adulto) (Flachier Troya, 2016). La Figura 2 ilustra el esquema del funcionamiento de la Metodología IFIM, la cual requiere de información hidráulica y biológica.

Figura 2

Esquema del funcionamiento del método IFIM



Nota. Tomado de Chávez y Lara (2020, p. 33).

Software PHABSIM (Physical Habitat Simulation)

Aclarando que IFIM y PHABSIM no son equivalentes o sinónimos. En tanto que IFIM es la metodología que nos permite cuantificar impactos en el medio ambiente, PHABSIM es un software que utiliza el modelo de igual nombre, para simular la relación existente del flujo de agua con el hábitat de una especie (Centro de Ciencias de Fort Collins, 2012).

Este modelo presenta dos aspectos esenciales; en primer lugar, considera el comportamiento hidráulico en un río o cauce, y secundariamente el aspecto relacionado al hábitat de la especie en interés. Además, la simulación tiene como finalidad el relacionar las repercusiones de la modificación del caudal con el impacto biológico, tomando en cuenta la parte social, económica y política (Centro de Ciencias de Fort Collins, 2012); entendiéndose, que ante la disminución de hábitat se produce un recorte de beneficios.

La modelación usando el software PHABSIM implica que se divida en celdas al sistema, donde se determina el vínculo entre condiciones hidráulicas (tirante y velocidad) y características del cauce (cobertura y sustrato) con el caudal circulante, con la intención de conocer la modificación de la habitabilidad ante cambios en el caudal. Asimismo, el modelo considera que el agua en el cauce presenta una calidad adecuada para la especie considerada.

Para la presente monografía se empleó el software PHABSIM en su versión 1.5.1, utilizando el manual de PHABSIM para Windows (Waddle, 2001); además, el software ha sido descargado en la página web del Servicio Geológico de E. U. (Centro de Ciencias de Fort Collins, 2012). <https://www.usgs.gov/node/279289>

Bases del modelo

El modelo PHABSIM implementa una colección de métodos utilizados en programas de computadora, para cuantificar los cambios del hábitat ante variaciones del caudal y morfología del cauce. PHABSIM se fundamenta de los siguientes principios (Bovee & Milhous, 1978):

- Las especies en estudio presentan tolerancias o rango de preferencias con respecto a ciertos parámetros de habitabilidad.
- La determinación de fronteras de preferencias puede determinarse para cada especie.
- La superficie en el cauce con dichas características es cuantificable con respecto al caudal y su estructura.

Las componentes fundamentales del PHABSIM son el modelo hidráulico y el de hábitat. Para conocer la velocidad y el tirante, utiliza el modelo hidráulico a partir de datos tomados en campo para un caudal circulante, aplicando para ello técnicas de regresión o formulas empíricas. Para el modelado de hábitat utiliza las secciones transversales, la cual es dividida en celdas y ponderadas, haciendo uso para ello de coeficientes de hábitat por parámetro (tirante, velocidad, cobertura y sustrato), variando en un rango de 0 a 1 (Rodríguez et al., 2008); obteniendo finalmente el WUA (Superficie Ponderada Útil).

La cuantificación del hábitat es determinada a través de celdas que representan al cauce, las cuales poseen una tirante medio y velocidad media para un especificado sustrato y cobertura (Mayo Rustarazo, 2000); finalmente, cada celda es ponderada por un coeficiente de conformidad determinado de esta forma la “superficie ponderada útil” (WUA).

$$WUA_i = C_{i,s} * A_i \quad (1)$$

Donde $C_{i,s}$ el coeficiente de conformidad de la celda i -sima para la especie de interés (único para cada estadio de la especie), y A_i representa la superficie atribuida a la celda.

La ecuación (1) es efectuado para cada celda y caudal; además, la WUA para un transecto y caudal es definido por la ecuación (2), de modo que la superficie ponderada útil es particular para una especie, estadio y caudal (Mayo Rustarazo, 2000).

$$WUA = \sum_{i=1}^n WUA_i \quad (2)$$

Componentes del programa PHABSIM

El modelo está compuesto de seis grupos de programas: hidráulicos, de intercambio, de hábitat, de curvas de preferencia, de dibujo y otros de soporte; sin embargo, el análisis de hábitat requiere del uso conjunto de los programas hidráulicos, de intercambio, y de evaluación de hábitat (Mayo Rustarazo, 2000). Además, los programas de soporte proporcionan acceso a ingresar y modificar los datos en el PHABSIM, y los de dibujo proporcionan de manera gráfica los resultados.

La componente hidráulica utiliza tres programas incluidos en el PHABSIM (Mayo Rustarazo, 2000):

- STGQ (Stage-Discharge), el cual realiza un ajuste de regresión de mínimos cuadrados entre el nivel de superficie libre y el caudal.
- MANSQ, que emplea la ecuación de Manning para régimen uniforme y permanente.
- WSP, empleado para predecir cómo un perfil longitudinal se modifica ante los caudales simulados.

La determinación del WUA se lleva a cabo con tres programas, utilizando las condiciones hidráulicas simuladas (Araujo Delgado & Sarmiento Soto, 2020).

- HABTAE, describe la conducta de los organismos ante un caudal constante o que presente cambios graduales en la velocidad y el caudal.
- HABTAM, simula la situación donde las especies migran lateralmente en un transecto, con el propósito de utilizar la WUA ante variación en el caudal.
- HABEF, determina el hábitat tomando en cuenta dos especies o estadios de vida y/o dos cursos de cauce.

2.3.3.2. Límites Ecológicos en las Alteraciones Hidrológicas (ELOHA)

Método con denominación Ecological Limits of Hydrologic Alteration – ELOHA (Poff et al., 2009). Este método se fundamenta en descubrir relaciones entre características comunes y generales en un conjunto de ríos y aspectos ecológicos; además, dichas relaciones entre cambios del caudal y la reacción ecológica nos permite establecer las consecuencias posibles para las especies del río, también se determinan límites de aprovechamiento que aseguren el estado ecológico natural (Barrera Olarte, 2018).

El método ELOHA requiere tres tipos de procesos secuenciales para determinar el caudal ambiental (Barrera Olarte, 2018): proceso científico, referido a recoger y analizar información de tipo hidrológica en la zona de interés; proceso social, basado en delimitar la alteración hidrológica para preservar los ecosistemas teniendo en cuenta la parte económica y social; proceso de monitoreo y evaluación, el cual señala que la metodología ELOHA se adapta y evoluciona, según a las observaciones futuras a su implementación, permitiendo ajustes y cambios para alcanzar los objetivos planteados.

2.3.4. Métodos Holísticos

Metodología desarrollada en los años 90 y sumamente recurridas en países como Sudáfrica y Australia, los cuales involucran la experiencia de diversos especialistas para que puedan expresar sus recomendaciones (Flachier Troya, 2016); siendo considerado por los críticos como punto negativo, debido a que agrupar a dichos expertos conlleva una inversión económica elevada.

Estos métodos requieren de información de alta calidad y extensa, “registros históricos de caudales, variables hidráulicas y modelos que asocien el caudal con las necesidades de los componentes del ecosistema y biota acuática, conjuntamente con información económica y social” (Castro Heredia et al., 2006, p. 188).

En consecuencia, se considera que estos métodos son apropiados para ser empleados en ríos o tramos con procesos complicados de negociación, de importancia estratégica o necesaria de conservación.

2.3.4.1. Building Block Methodology (BBM)

La metodología BBM se fundamenta sobre el trabajo de diversos expertos de distintas especialidades, considerando como punto crítico la importancia social y económica del área de interés; recurriendo para ello a evaluaciones de dependencia económica y social a los ecosistemas (ENDESA, 2011).

Tabla 4

Asunciones consideradas por King y Louw para la ejecución del método BBM

Asunción	Descripción
1	<p>Los caudales son una característica normal de un río y las especies ya se encuentran adaptadas a las fluctuaciones en el flujo de agua y esta no debería afectar su supervivencia. Sin embargo, caudales que no son característicos de los ríos pueden generar alteraciones en el sistema y modificar su funcionamiento natural.</p>
2	<p>La identificación e inclusión de los elementos más importantes del régimen natural del río en los caudales modificados facilitará el mantenimiento de las especies biológicas y el funcionamiento natural del río.</p>
3	<p>Algunos tipos de flujo pueden influenciar en la morfología del canal, su correcta identificación e inclusión en los regímenes modificados permitirá mantener la estructura natural del cauce y la biodiversidad presente.</p>

Nota. Tomado de King y Louw (1998).

Capítulo 3 - Descripción Metodológica

Esta sección expone la descripción del área de estudio, la elección de las especies sensibles, la información recopilada en campo y registros históricos de caudales sintéticos en el punto PEH-9 (Este 195 448, Norte 8 402 158).

3.1. Descripción de la Zona en Estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el río Chilloroya, distrito de Velille, perteneciente a la Provincia de Chumbivilcas, Departamento de Cusco, a una altitud aproximada de 3 900 msnm, ubicada aproximadamente a 112 km al sur de la ciudad del Cusco (en trayectoria recta), y de 634 km de la ciudad de Lima (dirección sureste).

El punto de evaluación fue la estación RC-05, ubicada aguas abajo de la Unidad Minera Constancia a la cual pertenece, y cerca de la confluencia con la Quebrada Sacrane. La Figura 3 muestra la ubicación de la estación RC-05.

En la Tabla 5 se indica la ubicación geográfica de la estación RC-05, y el Anexo 1 contiene el mapa de ubicación de la zona de interés.

Figura 3

Ubicación de la estación RC-05



Tabla 5*Coordenada (centroide) de la estación RC-05*

Punto céntrico	Ubicación Geográfica (UTM, Zona 19S, Datum WGS 84)		Elevación (msnm)
	Este (m)	Norte (m)	
RC-05	195 856	8 401 040	3 900

El tramo de evaluación del caudal ecológico cuenta con los siguientes accesos:

- Cusco - Urcos - Sicuani - Yauri - Velille - desvío a Livitaca - camino vecinal Chilloroya, con un recorrido total aproximado de 308 km;
- Arequipa – Imata – Yauri, continuando la ruta hacia Velille – Santo Tomás hasta la desviación a Livitaca - UM Constancia.

3.2. Planteamiento Hidrológico

Las metodologías dentro de este grupo requieren de la información hidrométrica del río Chilloroya, dependiendo del método se tratará y se obtendrá los caudales ecológicos correspondientes. Seguidamente, se detalla la información necesaria para los métodos hidrológicos y su procedimiento para el cálculo de su caudal ecológico.

3.2.1. Información Hidrométrica

Se considero los valores de caudales sintéticos que simulan la condición de flujo natural en el Río Chilloroya, dicha información se obtuvo de la Línea Base de la UM Constancia (Hatch Asociados S.A., 2019), en un periodo de 55 años (1964-2018). Los resultados son en el PEH-9 (punto ubicado a 2 km aguas abajo de la estación RC-05), donde presenta un caudal promedio anual de 1967 L/s, presentando en marzo valores máximos y mínimos en setiembre. La Figura 4 muestra la serie histórica de caudales sintéticos en el punto PEH-9 .

La metodología utilizada para obtener los caudales considerados fue desarrollado a través de modelamiento hidrológico, comprendiendo los siguientes pasos (Hatch Asociados S.A., 2021):

- Recogida de datos
- Preparación de los datos para el modelo
- Ejecución, calibración y validación del modelo
- Simulación de caudales históricos

3.2.1.1. Recogida de Datos

Datos Climáticos

Estos datos son provenientes de la estación meteorológica local Constancia, contando con series diarias de registros de humedad relativa, temperatura, precipitación, velocidad del viento, y demás parámetros. La Tabla 6 muestra las coordenadas, elevación y periodo de registro.

Tabla 6

Estación Meteorológica Constancia

Estación	Operador	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19S		Elevación (msnm)	Periodo de Registro
		Este (m)	Norte (m)		
Constancia	Hudbay	200 429	8 399 939	4 281	2007-2019

Registros Hidrométricos

Para el desarrollo del modelo se ha considerado 3 estaciones hidrométricas (NWDT-G02, NWDT-KP04 y NWDT-V02), que cuentan con cargas de agua y registro de aforos, las cuales tienen como finalidad servir para el proceso de calibración y validación. La Tabla 7 presenta la información de las estaciones consideradas.

Tabla 7*Estaciones Hidrométricas consideradas en la U.M. Constancia*

Estación	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19S		Elevación (msnm)	Periodo de Registro
	Este (m)	Norte (m)		
NWDT-G02	203 545	8 398 485	4 223	26/11/2013 al 26/09/2016 – 16/08/2018 al 23/04/2019
NWDT-KP04	200 354	8 395 453	4 062	26/11/13 al 31/01/2014 – 12/08/2018 al 23/04/2019
NWDT-V02	198 660	8 401 031	4 118	26/11/2013 al 25/09/2016 – 16/08/2018 al 23/04/2019

Geomorfología

Se ha tomado al punto PEH-9 (Este 195 448, Norte 8 402 158) como punto de cierre del área de drenaje, no considerando el aporte de las lagunas Yanacocha y Ccuesoccocha. Utilizando para su delimitación el DEM ALOS – PALSAR de la NASA con resolución de 12.5m. Además, empleando la cartografía del IGN (Instituto Geográfico Nacional), se determino sus principales parámetros geomorfológicos, los cuales se ingresarán al modelo de precipitación – escorrentía.

3.2.1.2. Preparación de los datos para el modelo

El modelo desarrollado es determinístico y semidistribuido (discretiza zonas de semejante comportamiento hidrológico para analizarlas independientemente); además, se empleó para el modelo el software RS MINERVE.

El software RS MINERVE, es un programa utilizado en la simulación y propagación de escorrentía. Dicho software contempla modelos de precipitación – escorrentía como: GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J o HBV; el cual en la Línea Base de la UM Constancia se ha considerado usar el modelo SAC-SMA o SACRAMENTO (Hatch Asociados S.A., 2021).

Calibración y Validación

Estas etapas fueron determinadas considerando los registros hidrométricos, descritos en la Tabla 7; siendo la etapa global el periodo que se obtendrá los caudales. La Tabla 8 muestra los periodos para cada etapa considerada.

Tabla 8

Etapas Consideradas en el Modelo

Etapa	Calibración	Validación	Global
Periodo	26/11/2013 al 26/09/2016	16/08/2018 al 23/04/2019	01/01/1964 al 30/11/2019

Precipitación de Ingreso

Contemplando que la data pluviométrica disponible de la estación Constancia es de enero 2007 – noviembre 2019, se completó vacíos y discontinuidades de la serie, y también se extendió los datos diarios para el periodo de 1964-2006; utilizando para ello la generación sintética de precipitación diaria.

La generación sintética utilizó el método de cadenas de Márkov (primer orden) elaborado mediante la plataforma GoldSim. Además, el modelo se calibró utilizando promedios mensuales, anuales, valores mínimos y máximos de los registros (enero 2007 – noviembre 2019).

3.2.1.3. Ejecución del Modelo Hidrológico

Para la ejecución del modelo semidistribuido se ha ingresado la información siguiente:

- Data pluviométrica para el periodo 2007 – 2019 (estación Constancia), empleados para calibrar y simular.
- Evapotranspiración potencial diaria para el periodo 2007 – 2019, evaluada utilizando el método FAO Penman-Monteith (estación Constancia).

- Hidrogramas, que serán utilizados como datos observados para calibración, y posteriormente comparados con los resultados para ser validados.
- Parámetros geomorfológicos correspondientes a las unidades hidrográficas consideradas en el modelo.
- Establecer para cada unidad hidrográfica el modelo SAC-SMA.
- Establecer el método de Muskingum-Cunge como modelo de tránsito de avenidas en los principales cauces.

Luego de integrar la información descrita al modelo, se procede a calibrar para luego validar en las tres cuencas definidas (NWDT-G02, NWDT-V02 y NWDT-KP04)

Etapa de Calibración

Esta etapa se realizó haciendo uso del Módulo de calibración del RS MINERVE, utilizando los datos del periodo (noviembre 2013 - septiembre 2016).

Etapa de Validación

Realizada con el propósito de verificar si el modelo es capaz de predecir de manera adecuada un periodo distinto del calibrado, dicho periodo comprende del 16/08/2018 – 23/04/2019.

3.2.1.4. Simulación de caudales históricos

Finalmente, teniendo al modelo SAC-SMA calibrado y validado, se representó las cuencas y conexiones hidrométricas empleando los parámetros calibrados.

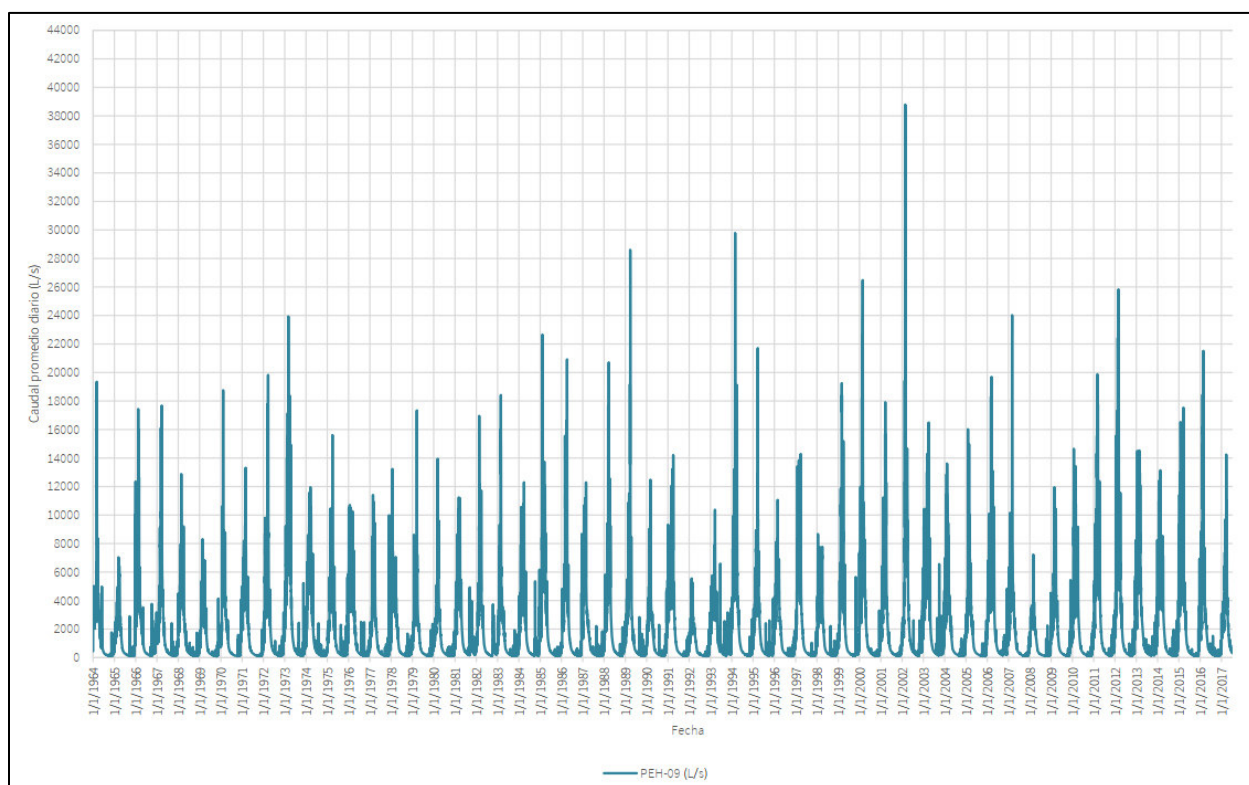
Resultado

De la simulación del modelo hidrológico semidistribuido, se obtiene los caudales promedios diarios para los distintos puntos de control asignados, siendo uno de ellos el punto PEH-9 (enero 1964 – noviembre 2019), utilizado para la estimación del caudal ecológico.

El Anexo 2 muestra el detalle de dicha información hidrométrica a nivel mensual, la cual considera el periodo de 1964 a 2018 por estar este completo a nivel mensual.

Figura 4

Serie histórica de caudales en el punto PEH-09



3.2.2. *Procesamiento de Cálculo*

Para los métodos hidrológicos se desarrollaron hidrogramas y curvas de duración, para ello se utilizó la información hidrométrica en el punto PEH-9.

3.3. **Planteamiento Eco Hidráulico, Hidrobiológico o de Simulación de Hábitat**

Los métodos de este grupo requieren la información hidrométrica, datos morfométricos y biológicos. Seguidamente, se detalla los datos requeridos y el proceso para estimar el caudal ecológico usando el software PHABSIM.

3.3.1. Información Hidrométrica

Para el presente estudio se usó los valores de caudales sintéticos generados para el punto PEH-9 (Este 195 448, Norte 8 402 158).

3.3.2. Trabajos de Campo

Las actividades de campo fueron realizadas para el tramo del Río Chilloroya, ubicado aguas abajo de la UM Constancia (Estación RC-05), la cual se consideró las épocas húmeda y seca para el año 2017. Se registro en cada campaña información física y biológica (curvas de preferencia).

3.3.2.1. Levantamiento Hidrotopográfico

Se establecieron 10 transectos perpendiculares al cauce, con el fin de caracterizar la variación espacial del tramo y la diversidad de hábitats disponibles.

En la Tabla 9 se muestra la ubicación de los transectos perpendiculares evaluados, asimismo la Figura 5 y Figura 6, muestran los transectos evaluados en época húmeda y seca.

Tabla 9

Ubicación de las Transectos Perpendiculares

Transecto	Ubicación Geográfica		Elevación (msnm)
	(UTM, Zona 19S, Datum WGS 84)		
	Este (m)	Norte (m)	
T1	196 086	8 401 462	3 900
T2	196 091	8 401 438	3 899
T3	196 096	8 401 416	3 901
T4	196 110	8 401 397	3 900
T5	196 113	8 401 379	3 900

Transecto	Ubicación Geográfica		Elevación (msnm)
	(UTM, Zona 19S, Datum WGS 84)		
	Este (m)	Norte (m)	
T6	196 123	8 401 359	3 901
T7	196 135	8 401 341	3 901
T8	196 146	8 401 325	3 901
T9	196 150	8 401 315	3 904
T10	196157	8 401 297	3 902

Nota. Tomado de Hatch Asociados S.A. (2021).

Figura 5

Vista Panorámica del Tramo Evaluado durante Época Húmeda



Nota. Tomado de Hatch Asociados S.A. (2021).

Figura 6

Vista Panorámica del Tramo Evaluado durante Época Seca



Nota. Tomado de Hatch Asociados S.A. (2021).

Para cada transecto se realizó un levantamiento topográfico con elevaciones del cauce, empleando una estación total. Los transectos son subdivididos con una separación aproximada de 10% del ancho del cauce, esto se realiza con una soga la cual tienen una longitud igual a la distancia entre los límites máximos de inundación (cotas donde es posible que llegue al agua en temporada húmeda), y la separación marcada con cinta plástica de un color resaltante, en el presente estudio se consideró marcas con separación de un metro, la Figura 7 muestra la sección y la separación mencionada con cinta roja.

Figura 7

Levantamiento de Información hidrotopográfica



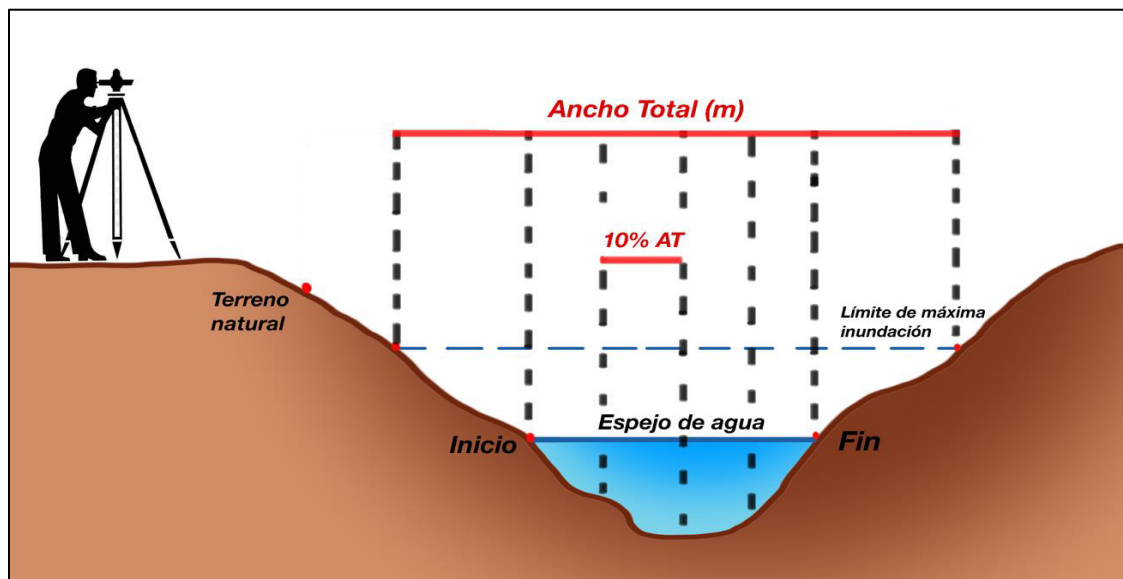
La Figura 8 muestra la toma de datos de velocidad y el registro de esta, además del sustrato encontrado en el punto de medición en el transecto, mientras la Figura 9 representa los puntos de medición por transecto, considerando parte del terreno natural, así también el inicio y fin del espejo de agua, además de considerar una separación del 10% del ancho total del cauce.

Figura 8

Toma de datos de velocidad y sustrato, en el transecto de estudio

**Figura 9**

Esquema de toma de puntos



En cada punto de medición se registró velocidades, empleando un correntómetro; profundidades, con un prisma graduado y el sustrato encontrado visualmente, los cuales deben ser llenados en una libreta de campo. No obstante, la medición de la profundidad puede ser tomada con una vara de profundidad, el cual presenta marcas graduadas.

El sustrato encontrado en las secciones estuvo compuesto en su mayoría por canto rodado y piedra grande, dicha información se muestra en el Anexo 3 del presente documento.

El Anexo 3, presenta la información hidrotopográfica registrada en cada transecto de la estación RC-05.

La pendiente longitudinal entre los transectos se determina con los datos registrados de la estación total, también pueden determinarse con la ayuda de un nivel y una regla, considerando que en caso de no presentar recursos se puede utilizar las pendientes de un estudio o proyecto cercano, que presente características similares a la del tramo de estudio.

Finalmente, se estima el coeficiente de Manning utilizando las tablas que asocian este parámetro con el material de fondo, encontrándose en su mayoría canto rodado y piedra grande. Para la determinación del valor de dicho coeficiente se utilizó el libro de Ven Te Chow (1994) “Hidráulica de canales Abiertos” (p. 111) en su Tabla 10, donde las características descritas del tramo corresponde a considerar de manera conservadora un coeficiente de 0.06, comprendido entre un valor normal y máximo de Manning.

Tabla 10*Coeficientes de rugosidad de Manning*

Tipo de canal y descripción		Mínimo	Normal	Máximo
b. Corrientes montañosas sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos				
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas		0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes		0.040	0.050	0.070
D-2	Planicies de inundación			
a. Pastizales sin matorrales				
1. Pasto corto		0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto		0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas				
1. Sin cultivo		0.200	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros		0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros		0.030	0.040	0.050
c. Matorrales				
1. Matorrales dispersos, mucha maleza		0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno		0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano		0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno		0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano		0.070	0.100	0.160
d. Árboles				
1. Sauces densos, rectos y en verano		0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio con troncos sin retoños		0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños		0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas		0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas		0.100	0.120	0.160
D-3	Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente >100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales		0.025	...	0.060
b. Sección irregular y rugosa		0.035	...	0.100

Nota. Tomado de Ven te Chow (1994)

3.3.2.2. Información biológica

Descripción del Ambiente acuático

Este proceso consiste en evaluar el tramo de interés en términos de hábitat, los cuales son caracterizados por el sustrato, profundidad y velocidad.

La clasificación de estos hábitats se obtuvo del capítulo 3 de la línea Base de la UM Constancia (Hatch Asociados S.A., 2021), la cual considera tres tipos de hábitats (rápido, corrida y poza). Además, clasifica al sustrato según el diámetro de partícula, siendo estos: finos (< 2 mm de diámetro), grava (de 2 mm a 64 mm de diámetro), canto rodado (de 65 mm a 256 mm de diámetro) y piedras grandes (>256 mm de diámetro).

La información descrita requiere de un profesional especializado para definirla, debido a que se debe relacionar los sustratos, profundidades y velocidades, con el desplazamiento, crecimiento, alimentación y refugio de las especies que habitan dicho ecosistema.

Evaluación de peces

Para este paso se emplea un equipo portátil de pesca eléctrica en los hábitats definidos, con el propósito de determinar las preferencias de las especies encontradas en los cauces; estas especies capturadas son contabilizadas, medidas y pesadas, para luego proceder con su liberación. Esta tarea es realizada por profesionales que puedan clasificar dichas especies, así como su estadio de vida.

La Figura 10 muestra la captura de peces en zonas consideradas óptimas para su encuentro, esta consiste en un personal utilizando la caña eléctrica, la cual envía un pulso que aturde a los peces haciendo que estos se queden inmóviles por unos segundos, lo cual es aprovechado por otro especialista que los captura, mientras un tercero se encuentra registrando la cantidad de peces, ubicación de su encuentro y el tipo de especie, así también su estadio de vida.

Figura 10

Evaluación de peces empleando equipo de pesca eléctrica



En base a la evaluación de peces, se identificó la presencia de 2 especies, el bagre (*Trichomycterus rivulatus*) y la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), siendo esta última clasificada en 2 estadios: juveniles (<150mm) y adultos (>150mm).

Curvas de preferencia

La información respecto a las curvas de preferencia se obtuvo del capítulo 3 de la línea Base de la UM Constancia (Hatch Asociados S.A., 2021), estas curvas fueron desarrolladas en función a la profundidad del sector y velocidad del flujo, presentando relación al hábitat de las 2 especies encontradas (bagre y trucha arco iris).

Las curvas de preferencia pueden obtenerse por tres modos: (1) Curvas publicadas en estudios dentro del país o cercanos, considerando la misma especie y estadio de vida; (2) curvas

realizadas en la misma cuenca de estudio y (3) curvas realizadas por pruebas de transferibilidad de funciones para una misma especie. Considerando a las curvas realizadas en la propia cuenca como las más recomendables y fiables, debido a que toman valores in situ (Martínez Capel, 2011).

En la línea Base de la UM Constancia, se desarrolló curvas de preferencia de categoría II (Bovee, 1986), conocidas como curvas de utilización o uso, las cuales son obtenidos por evaluación en los lugares ocupados por los organismos. Además, según recomendaciones de Bovee (1986), las curvas de preferencia se ajustaron utilizando tres tipos de funciones no lineales:

- Función polinómica cuadrática: $aX^2 + bX + c$
- Función polinómica cúbica: $aX^3 + bX^2 + cX + d$
- Función polinómica cuarta: $aX^4 + bX^3 + cX^2 + dX + e$

Seguidamente, se muestra las curvas de preferencia en la Tabla 11 y Tabla 12, y sus gráficos en la Figura 11 y Figura 12 respectivamente.

Tabla 11

Valores de preferencia según la velocidad para los Organismos seleccionados

Velocidad (m/s)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
0.00	1.000	1.000	1.000
0.05	0.996	0.993	0.985
0.10	0.991	0.987	0.971
0.15	0.987	0.981	0.957
0.20	0.983	0.974	0.943
0.25	0.978	0.968	0.930
0.30	0.974	0.962	0.916

Velocidad (m/s)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
0.35	0.970	0.955	0.903
0.40	0.965	0.949	0.890
0.45	0.961	0.943	0.878
0.50	0.957	0.937	0.865
0.55	0.953	0.931	0.853
0.60	0.949	0.925	0.841
0.65	0.945	0.919	0.829
0.70	0.941	0.913	0.818
0.75	0.936	0.907	0.806
0.80	0.932	0.902	0.795
0.85	0.928	0.896	0.784
0.90	0.924	0.890	0.774
0.95	0.920	0.884	0.763
1.00	0.916	0.879	0.753
1.05	0.912	0.873	0.742
1.10	0.909	0.868	0.732
1.15	0.905	0.862	0.722
1.20	0.901	0.857	0.713
1.25	0.897	0.851	0.703
1.30	0.893	0.846	0.694
1.35	0.889	0.841	0.684
1.40	0.885	0.836	0.675
1.45	0.882	0.830	0.666
1.50	0.878	0.825	0.657
1.55	0.874	0.820	0.649
1.60	0.870	0.815	0.640
1.65	0.867	0.810	0.632

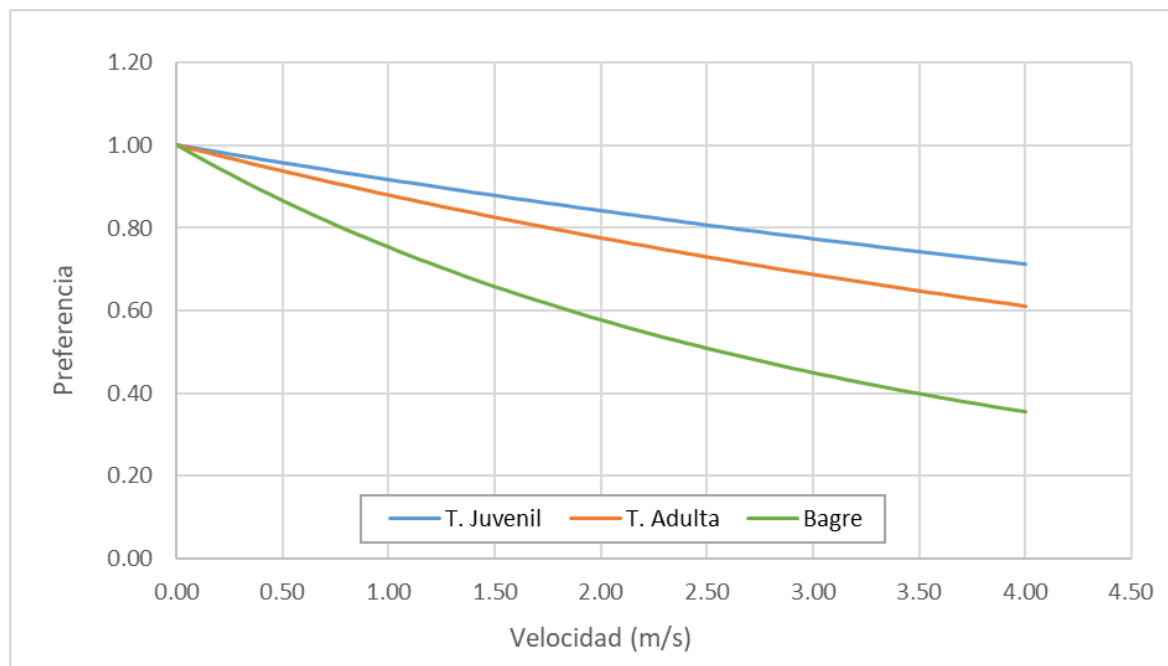
Velocidad (m/s)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
1.70	0.863	0.805	0.624
1.75	0.859	0.800	0.616
1.80	0.856	0.795	0.608
1.85	0.852	0.790	0.600
1.90	0.848	0.785	0.592
1.95	0.845	0.780	0.584
2.00	0.841	0.775	0.577
2.05	0.838	0.771	0.570
2.10	0.834	0.766	0.562
2.15	0.831	0.761	0.555
2.20	0.827	0.757	0.548
2.25	0.824	0.752	0.541
2.30	0.820	0.747	0.534
2.35	0.817	0.743	0.528
2.40	0.813	0.738	0.521
2.45	0.810	0.734	0.515
2.50	0.806	0.729	0.508
2.55	0.803	0.725	0.502
2.60	0.800	0.721	0.496
2.65	0.796	0.716	0.490
2.70	0.793	0.712	0.484
2.75	0.790	0.708	0.478
2.80	0.786	0.703	0.472
2.85	0.783	0.699	0.466
2.90	0.780	0.695	0.460
2.95	0.777	0.691	0.455
3.00	0.773	0.687	0.449

Velocidad (m/s)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
3.05	0.770	0.683	0.444
3.10	0.767	0.679	0.439
3.15	0.764	0.675	0.433
3.20	0.761	0.671	0.428
3.25	0.758	0.667	0.423
3.30	0.754	0.663	0.418
3.35	0.751	0.659	0.413
3.40	0.748	0.655	0.408
3.45	0.745	0.651	0.403
3.50	0.742	0.647	0.399
3.55	0.739	0.643	0.394
3.60	0.736	0.640	0.389
3.65	0.733	0.636	0.385
3.70	0.730	0.632	0.380
3.75	0.727	0.628	0.376
3.80	0.724	0.625	0.372
3.85	0.721	0.621	0.367
3.90	0.718	0.618	0.363
3.95	0.715	0.614	0.359
4.00	0.712	0.610	0.355
100.00	0.000	0.000	0.000

Nota. Tomado de Hatch Asociados S.A. (2021)

Figura 11

Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat por características de velocidad



Nota. Elaborado a partir de Hatch Asociados S.A. (2021)

Tabla 12

Valores de preferencia según la profundidad para los Organismos seleccionados

Profundidad (m)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
0.00	0.00000	0.00000	0.00000
0.05	0.94230	0.95330	0.96420
0.10	0.88870	0.90920	0.89804
0.15	0.83880	0.86760	0.81351
0.20	0.79220	0.82820	0.72243
0.25	0.74880	0.79090	0.63352
0.30	0.70830	0.75570	0.55187
0.35	0.67040	0.72230	0.47965
0.40	0.63490	0.69060	0.41719

Profundidad (m)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
0.45	0.60170	0.66050	0.36385
0.50	0.57050	0.63200	0.31857
0.55	0.54130	0.60490	0.28019
0.60	0.51390	0.57920	0.24763
0.65	0.48810	0.55480	0.21993
0.70	0.46380	0.53150	0.19629
0.75	0.44100	0.50940	0.17600
0.80	0.41950	0.48830	0.15853
0.85	0.39920	0.46830	0.14339
0.90	0.38010	0.44920	0.13023
0.95	0.36200	0.43100	0.11872
1.00	0.34490	0.41360	0.10862
1.05	0.32880	0.39700	0.09971
1.10	0.31360	0.38120	0.09182
1.15	0.29910	0.36610	0.08480
1.20	0.28540	0.35170	0.07853
1.25	0.27250	0.33790	0.07292
1.30	0.26020	0.32470	0.06788
1.35	0.24860	0.31210	0.06333
1.40	0.23750	0.30000	0.05921
1.45	0.22700	0.28850	0.05548
1.50	0.21700	0.27750	0.05208
1.55	0.20750	0.26690	0.04898
1.60	0.19850	0.25680	0.04614
1.65	0.18990	0.24710	0.04354
1.70	0.18180	0.23780	0.04115
1.75	0.17400	0.22880	0.03895

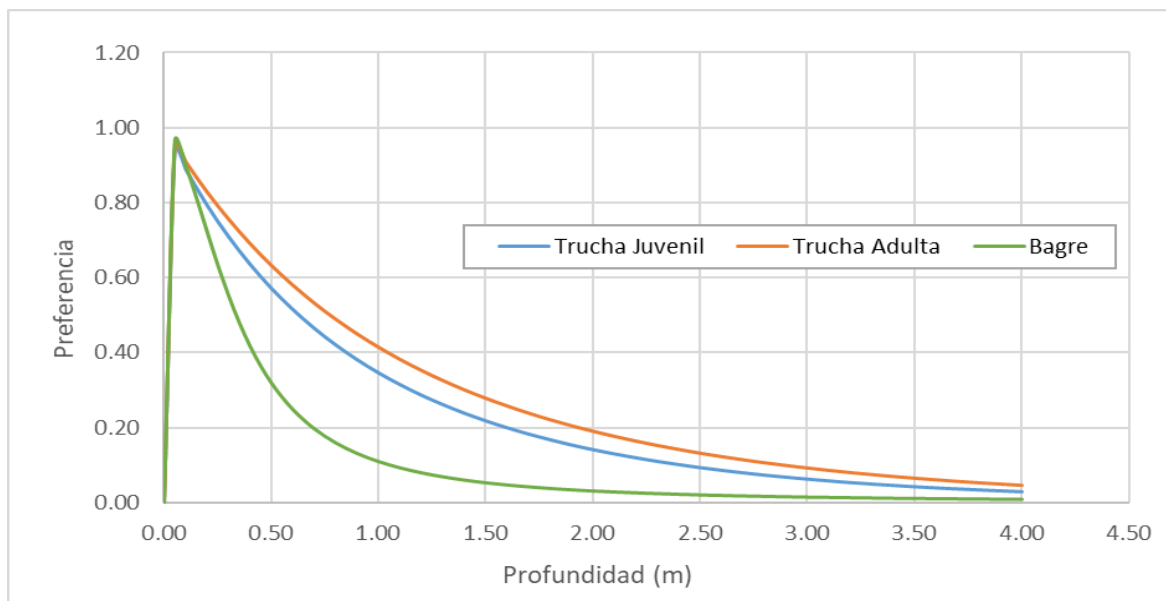
Profundidad (m)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
1.80	0.16660	0.22030	0.03692
1.85	0.15960	0.21210	0.03504
1.90	0.15280	0.20420	0.03330
1.95	0.14640	0.19670	0.03169
2.00	0.14030	0.18950	0.03019
2.05	0.13450	0.18250	0.02879
2.10	0.12890	0.17580	0.02749
2.15	0.12360	0.16940	0.02627
2.20	0.11850	0.16330	0.02513
2.25	0.11370	0.15730	0.02406
2.30	0.10900	0.15160	0.02306
2.35	0.10460	0.14620	0.02212
2.40	0.10040	0.14090	0.02123
2.45	0.09630	0.13590	0.02040
2.50	0.09240	0.13100	0.01962
2.55	0.08870	0.12630	0.01887
2.60	0.08520	0.12180	0.01817
2.65	0.08180	0.11750	0.01751
2.70	0.07850	0.11330	0.01689
2.75	0.07540	0.10930	0.01629
2.80	0.07240	0.10550	0.01573
2.85	0.06960	0.10180	0.01519
2.90	0.06680	0.09820	0.01469
2.95	0.06420	0.09470	0.01420
3.00	0.06170	0.09140	0.01374
3.05	0.05930	0.08820	0.01331
3.10	0.05700	0.08510	0.01289

Profundidad (m)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
3.15	0.05470	0.08220	0.01249
3.20	0.05260	0.07930	0.01211
3.25	0.05060	0.07660	0.01175
3.30	0.04860	0.07390	0.01140
3.35	0.04670	0.07130	0.01107
3.40	0.04490	0.06890	0.01075
3.45	0.04320	0.06650	0.01045
3.50	0.04150	0.06420	0.01016
3.55	0.03990	0.06200	0.00988
3.60	0.03840	0.05990	0.00961
3.65	0.03690	0.05780	0.00935
3.70	0.03550	0.05580	0.00910
3.75	0.03420	0.05390	0.00887
3.80	0.03290	0.05210	0.00864
3.85	0.03160	0.05030	0.00842
3.90	0.03040	0.04860	0.00821
3.95	0.02920	0.04690	0.00800
4.00	0.02810	0.04530	0.00781

Nota. Tomado de Hatch Asociados S.A. (2021)

Figura 12

Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat por características de profundidad



Nota. Elaborado a partir de Hatch Asociados S.A. (2021)

Finalmente, para el presente estudio se considera la combinación de sustrato y cobertura como constante; implicando que la idoneidad de hábitat es óptima para todos los sustratos y temperaturas.

Caudales de Calibración

Para la calibración el modelo tiene como requerimiento la información de caudales, los cuales deben ser como mínimo dos mediciones, correspondientes a las temporadas húmeda y seca; además, requiere la información de la altitud en la que se presentan dichos caudales (WSL – Water Surface Level). La información solicitada para la calibración sirve para verificar la conducta simulada del río, y posibilita la generación de caudales simulados.

La información de los caudales medidos en el tramo de estudio (estación RC-05), se obtuvo de la Línea Base de la UM Constancia, estos son: 0.1 m³/s (temporada seca) y 1.6 m³/s (temporada húmeda).

Capítulo 4 - Resultados y Discusiones

Este apartado detallará el proceso para establecer el caudal ecológico bajo el enfoque Hidrológico, además de la metodología bajo el enfoque Eco-hidráulico haciendo uso del Software PHABSIM.

4.1. Enfoque Hidrológico

Los métodos aplicados para este enfoque son: Caudal Referencial ANA, Caudal Medio Mensual, New England Aquatic Base Flow (ABF), Rafael Heras y Tennant. Dichos métodos son elegidos debido a que se dispone de información mensual de registros históricos de caudal y no de data diaria como solicitan algunos métodos, también se descartó otras metodologías, ya que implicaban que se presente características propias al lugar donde se desarrolló el método.

4.1.1. Método del Caudal Referencial – ANA

Este método utiliza el registro histórico de caudales a nivel mensual, que en nuestro caso son 55 años (1964-2018). La fase inicial consiste en construir curvas de duración para los caudales, las cuales se obtienen haciendo previo ordenamiento en forma descendente de los caudales y otorgándoles un número de orden, el cual empieza del caudal mayor al menor. Acto seguido, se divide la numeración otorgada entre el número total de datos, para luego multiplicarlo por 100; obteniendo la persistencia en porcentaje del caudal evaluado, este proceso es repetido para cada caudal con el propósito de agruparlos en una curva de persistencia. Luego de ordenados y establecido una persistencia, se selecciona los caudales que coincidan con la persistencia al 95%, y en caso de no tener el valor exacto del 95%, se interpolará con los valores cercanos.

La Tabla 13 muestra los valores calculados para el caudal ecológico con persistencia de 95%, a su vez de los caudales promedio y mínimo, para una serie histórica de 55 años (1964-2018); además, la Figura 13 muestra las gráficas generadas para dichos valores de caudal.

Tabla 13

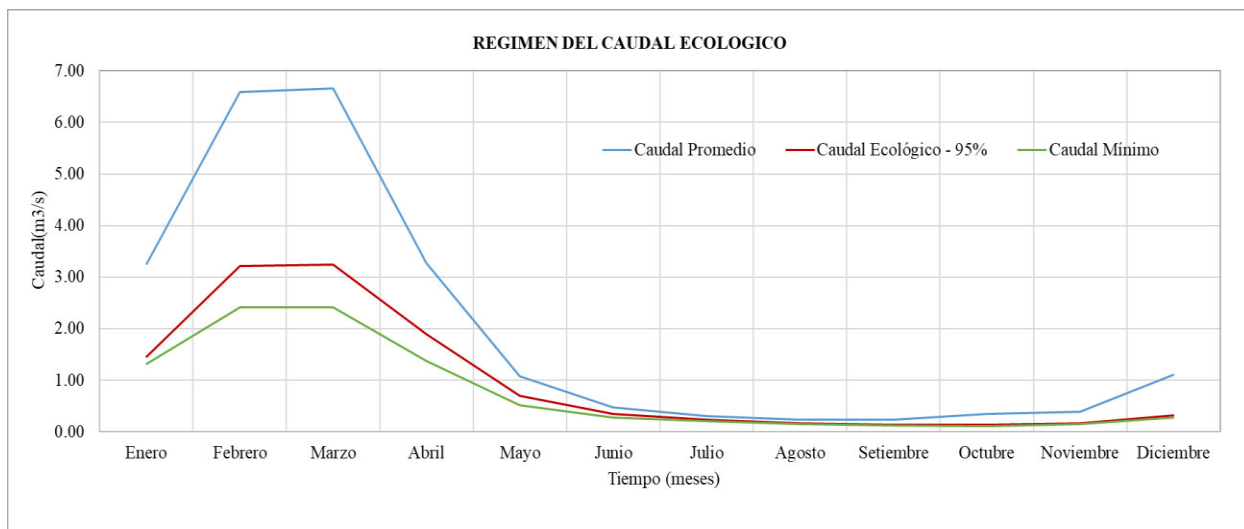
Valores de Caudales Ecológico al 95% de Persistencia, Promedio y Mínimo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Promedio	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
CE (95%)	1.45	3.21	3.24	1.89	0.70	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
Mínimo	1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28

Nota. Las siglas CE denomina al Caudal Ecológico.

Figura 13

Gráfica de Curva de Caudal Ecológico al 95% de Persistencia, Caudal Promedio y Mínimo

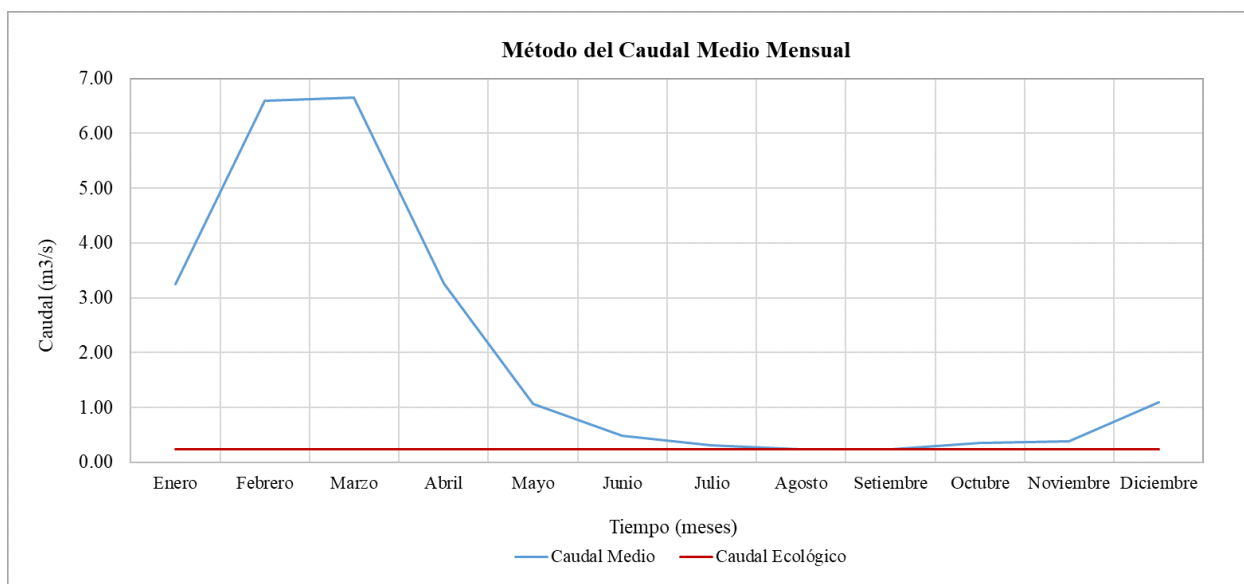


4.1.2. Método del Caudal Medio Mensual

Esta metodología considera al caudal ecológico como el menor caudal del promedio de caudales mensuales, requiere de una data histórica de caudales de al menos 25 años; dado que nuestra data es de 55 años (1964-2018) se cumpliría dicha condición. Inicialmente se realiza un promedio de los caudales a nivel mensual, seguido se selecciona el menor de estos caudales (considerado el mes más seco), estableciéndolo como el caudal ecológico. Para nuestra data el caudal ecológico corresponde al caudal medio mensual de setiembre, presentando un valor de $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figura 14 muestra el hidrograma del caudal medio y ecológico.

Figura 14

Gráfica del Hidrograma del Caudal Ecológico - Método de Caudal Medio Mensual



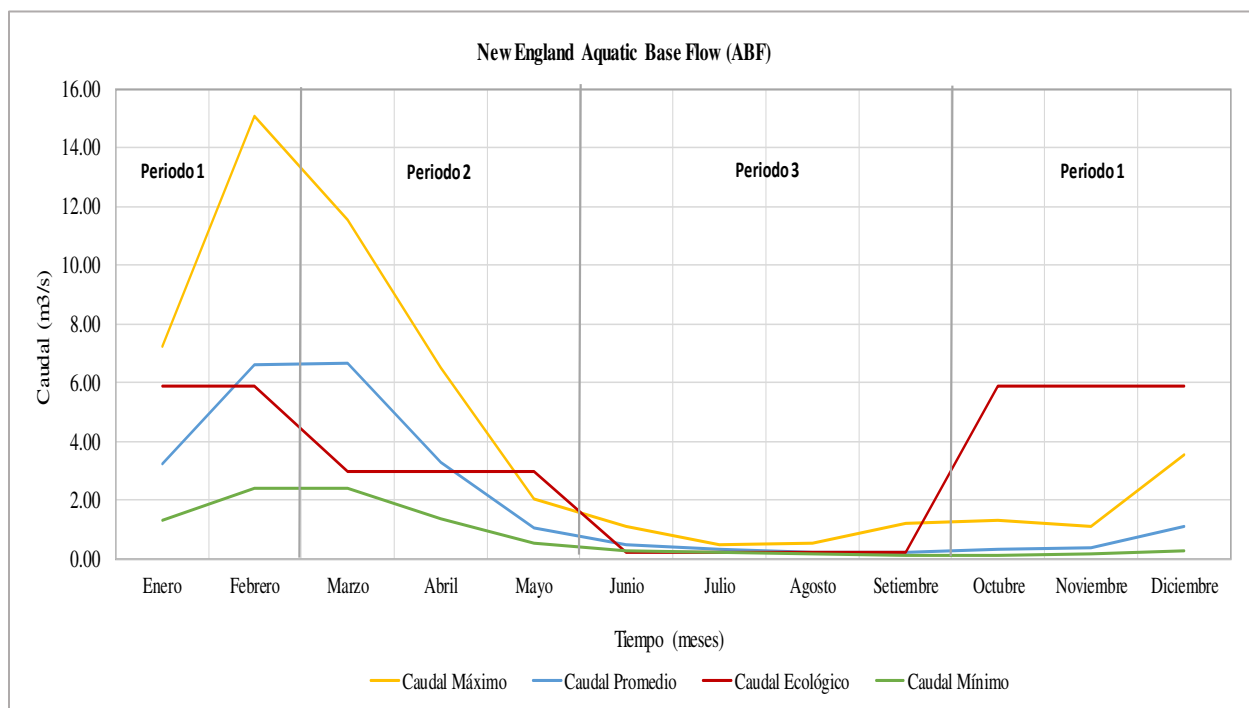
4.1.3. Método New England Aquatic Base Flow (ABF)

Esta metodología particiona en tres periodos el año: marzo a mayo, junio a septiembre y octubre a febrero, para después otorgar un caudal ecológico que represente a dichos periodos. No obstante, estos periodos han sido definidos en base a las épocas de avenida y estiaje, de la ubicación donde se elabora dicho método.

Para su aplicación se debe calcular la mediana en cada mes del histórico de caudales, luego seleccionar en base a los criterios para cada periodo, y finalmente elaborar un hidrograma, el cual se ilustra en la Figura 15.

Figura 15

Grafica del Hidrograma Generado por el Método NEABF



En base a la **Tabla 2** y al hidrograma generado por el método NEABF, se establece que el caudal ecológico para el periodo de octubre a febrero corresponde al mes de febrero; marzo a mayo, el mes de abril; junio a setiembre, el mes de agosto. Estos caudales considerados están resumidos en la Tabla 14.

Tabla 14

Caudal Ecológico correspondiente por Periodos

Periodo	Caudal Ecológico (m³/s)
Octubre – Febrero	5.87

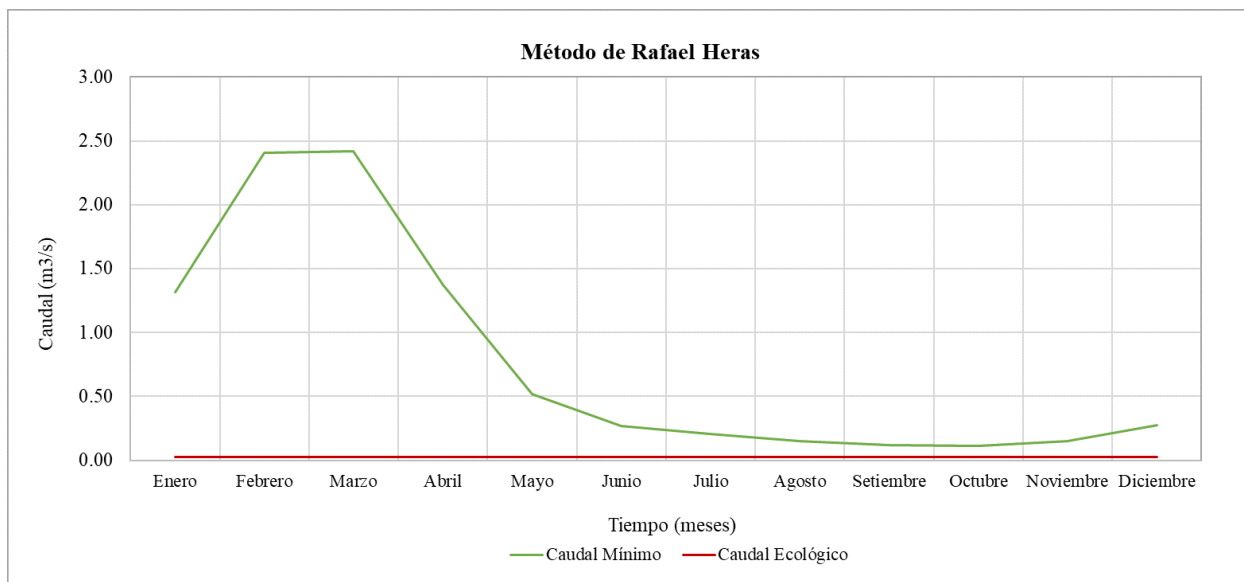
Periodo	Caudal Ecológico (m ³ /s)
Marzo – Mayo	2.97
Junio - Setiembre	0.21

4.1.4. Método de Rafael Heras

Dicho método considera el 20% del caudal medio en el año más crítico como el caudal ecológico. Este año crítico presenta el promedio mensual con menores valores de caudal en los tres meses consecutivos por año. En base lo indicado, se identifica este año crítico y se calcula el promedio de estos meses; posteriormente, se calcula el 20% del promedio de este, obteniendo nuestro caudal ecológico. Para el presente estudio el 1971 es considerado año crítico, presentando un promedio de 0.1345 m³/s o 134.53 L/s, por lo que el caudal ecológico sería 0.0269 m³/s o 26.91 L/s. La Figura 16 muestra el caudal ecológico generado con el presente método y el hidrograma del caudal mínimo de la serie de 55 años (1964-2018).

Figura 16

Grafica del Hidrograma Generado por el Método de Rafael Heras

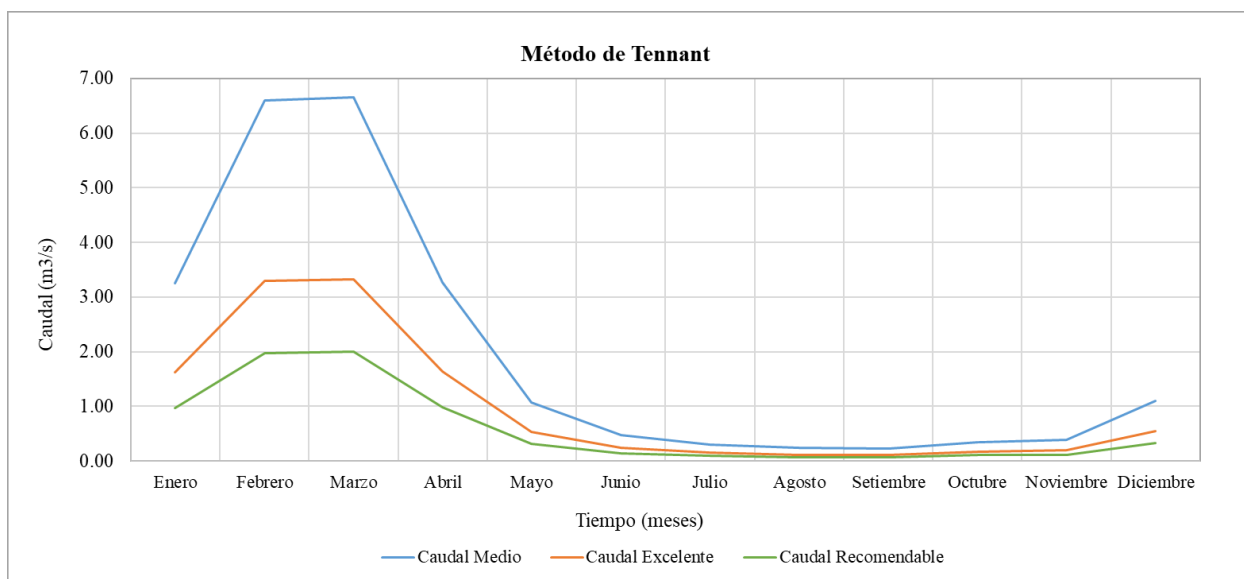


4.1.5. Método de Tennant

Dicha metodología considera al caudal ecológico como cierto porcentaje del caudal medio a nivel mensual, el cual se basa en el mantenimiento de las condiciones del ecosistema dependiente del río. Este método contempla porcentajes de 30 y 50% del caudal medio para mantener en condiciones recomendables y excelentes la conservación del hábitat. La Figura 17 muestra el hidrograma generado para condiciones recomendables (30% caudal medio) y excelentes (50% caudal medio).

Figura 17

Grafica del Hidrograma Generado por el Método Tennant para condiciones recomendables y excelentes



4.2. Enfoque Eco Hidráulico, Hidrobiológico o de Simulación de Hábitat

Para este enfoque se empleó el software PHABSIM en su versión 1.5.1, el cual utilizando curvas de hábitat con potencialidad de utilidad (HPU), permiten llevar a cabo el cálculo de caudal ecológico. Estas curvas manifiestan el área de estudio que es habitable para las diversas especies contempladas como sensibles. Esta sección describe los procedimientos para la ejecución y preparación del modelo.

4.2.1. Preparación del Modelo

Consiste en el ingreso de datos recogidos de campo, en la zona de los transectos evaluados. Además del ingreso de las curvas de preferencia de las especies consideradas.

4.2.1.1. Creación del Proyecto

El primer paso consiste en definir un nombre del proyecto, ruta donde se guardará los datos, indicar una breve descripción del proyecto y el sistema de unidades a utilizar. Para nuestro caso se utilizará el sistema internacional (S.I.), la Figura 18 muestra las configuraciones consideradas.

Figura 18

Datos para la creación del Proyecto en el programa PHABSIM

The screenshot shows a 'New Project' dialog box with the following fields and options:

- Project folder name:** Caudal Ecologico Rio Chilloroya
- Location:** E:\IMPORTANTE\TESIS\4. SOFTWARE PHABSIM\MODELOS (with a 'Browse' button)
- Project:** Caudal ecologico - Especies Trucha y Bagre
- Units:**
 - English
 - Metric
- Buttons:** OK and Cancel

4.2.1.2. Datos Hidrotopográficos

El siguiente paso es ingresar la información recabada de los transectos de estudio en el trabajo de campo. Para este paso se requiere acceder a la ventana de edición de las secciones transversales, para ello se ingresa a la pestaña “Edit” de la barra de menú del programa y se elige la opción de “Cross Sections”. La Figura 19 muestra la ventana de edición de las secciones transversales, la cual consta de tres pestañas que deben ser rellenas con la información de campo.

Figura 19

Ventana de Edición de las Secciones Transversales

The screenshot shows a software window titled "Edit Cross Section Data" with a close button (X) in the top right corner. The window has three tabs: "Cross Section Data" (selected), "Calibration Data", and "Coordinate Data". Below the tabs, there is a section labeled "Cross Section" containing a table with the following data:

	ID	Length	Upstream WF	L Bank WF	R Bank WF
1	1.000	0.000	0.500	1.000	1.000
2	2.000	24.515	0.500	1.000	1.000
3	3.000	22.561	0.500	1.000	1.000
4	4.000	23.601	0.500	1.000	1.000
5	5.000	18.248	0.500	1.000	1.000
6	6.000	22.361	0.500	1.000	1.000
7	7.000	21.633	0.500	1.000	1.000
8	8.000	19.416	0.500	1.000	1.000
9	9.000	10.770	0.500	1.000	1.000

Below the table, there is a text box with instructions: "Add a new cross section with <insert> or <down arrow>. Right-Click to remove a cross section." At the bottom right of the window, there is a "Print" button. At the very bottom center, there is a "Cerrar" button.

En la pestaña de “Cross Section Data” en el apartado del “ID” se ingresa la cantidad de transectos evaluados; apartado “Length”, se ingresa la distancia que se encuentran separados los transectos (considerando una distancia de ceros solo a la primera sección de inicio); apartado “SZF”, corresponde a la información de la altitud mínima en la sección (talweg); “N”, corresponde al valor del coeficiente de Manning para la sección; “Slope”, corresponde a la pendiente hidráulica, dicha pendiente es completada por el programa luego de ingresar las coordenadas del transecto.

El paso que sigue corresponde al ingreso de caudales utilizados para la calibración del modelo, estos se registran en la pestaña de “Calibration Data” y son necesarios como mínimo 2 mediciones, las cuales deben contar con la altitud en la que se encontró el espejo de agua para determinado caudal en cada transecto. El registro de caudales se realiza en los apartados de “Best Est Q” y “Xsec Q”; siendo el primer apartado para el caudal considerado como el medido en una sección mas idónea, y el segundo como el aforado del transecto. Además, se registra en el apartado “User WSL” la altitud o nivel registrado para el espejo de agua.

En nuestro caso la Figura 20 muestra los 2 caudales registrados para distintas temporadas (húmeda y seca) y su respectiva altitud a la cual se encontró el espejo de agua.

Figura 20

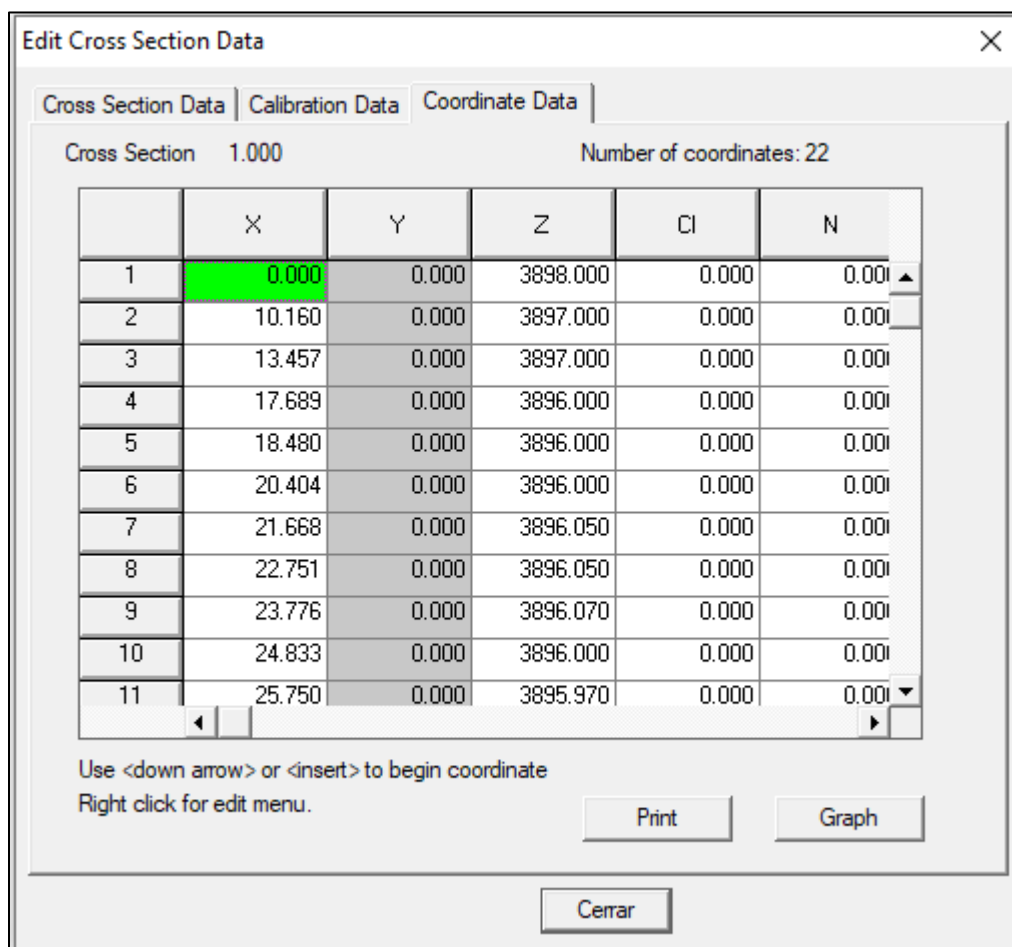
Ventana de Ingreso de Data de Calibración

	Left WSL	Right WSL	User WSL	Best Est Q	Xsec Q
1	0.000	0.000	3895.930	0.100	0.00
2	0.000	0.000	3896.200	1.600	0.00

El paso siguiente es registrar las coordenadas de los transectos, para ello ingresamos en la pestaña “Coordinate Data”, donde se registra las coordenadas “x” y “z”, las cuales corresponde a la distancia entre puntos de medición y la altitud en la que se encuentran. Para nuestro caso se consideró una separación de muestreo de 1 metro para los 10 transectos analizados, además se realizó la medición de altitud con una estación total. Además de las variables descritas el programa solicita la velocidad en cada punto de medición del transecto para cada caudal registrado en la pestaña de “Calibration Data”. Las variables descritas se muestran en la Figura 21, la cual muestra el apartado “Y” con un valor de cero, por ser la primera sección.

Figura 21

Ventana de Ingreso de Coordenadas de las Secciones Transversales



The screenshot shows a software window titled "Edit Cross Section Data" with three tabs: "Cross Section Data", "Calibration Data", and "Coordinate Data". The "Coordinate Data" tab is active. It displays a table for "Cross Section 1.000" with "Number of coordinates: 22". The table has columns for X, Y, Z, CI, and N. The Y column is highlighted in green for the first row, indicating a value of 0.000. Below the table, there are instructions: "Use <down arrow> or <insert> to begin coordinate" and "Right click for edit menu." There are also buttons for "Print", "Graph", and "Cerrar".

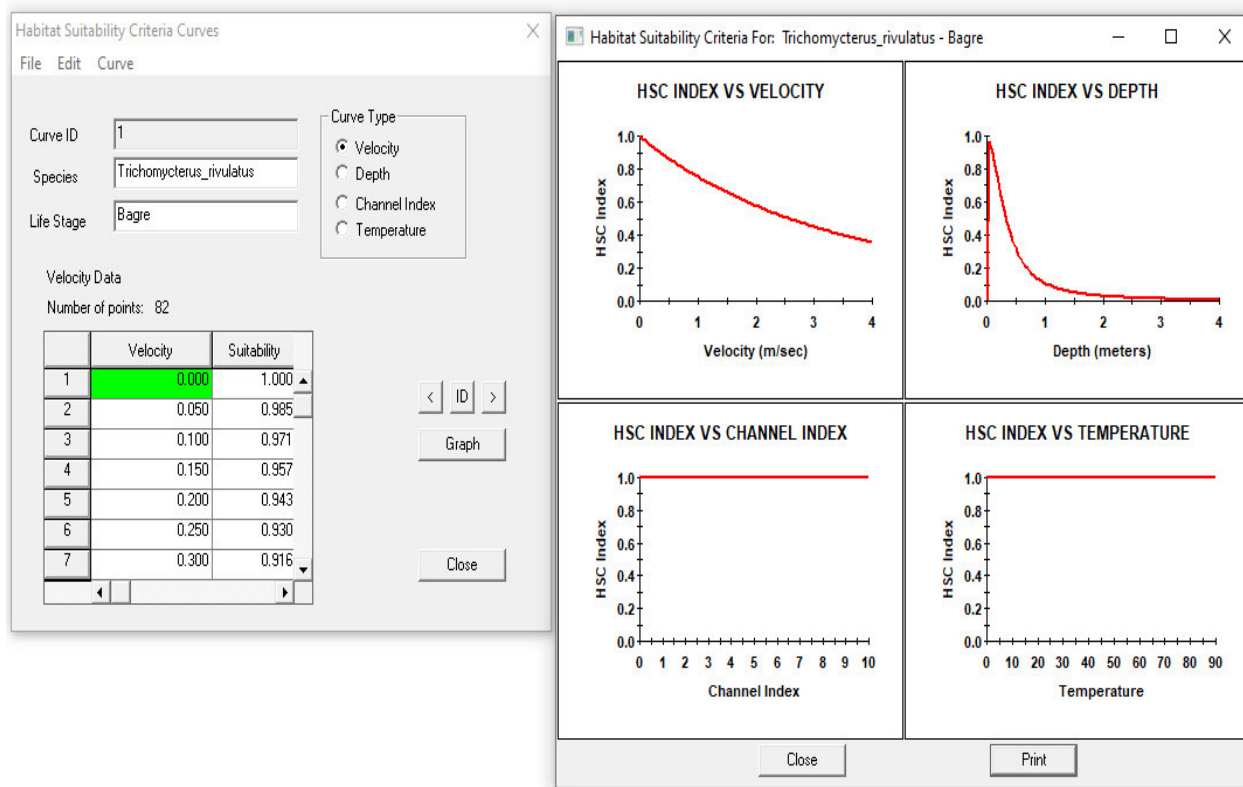
	X	Y	Z	CI	N
1	0.000	0.000	3898.000	0.000	0.000
2	10.160	0.000	3897.000	0.000	0.000
3	13.457	0.000	3897.000	0.000	0.000
4	17.689	0.000	3896.000	0.000	0.000
5	18.480	0.000	3896.000	0.000	0.000
6	20.404	0.000	3896.000	0.000	0.000
7	21.668	0.000	3896.050	0.000	0.000
8	22.751	0.000	3896.050	0.000	0.000
9	23.776	0.000	3896.070	0.000	0.000
10	24.833	0.000	3896.000	0.000	0.000
11	25.750	0.000	3895.970	0.000	0.000

4.2.1.3. Datos de Idoneidad del Hábitat

En este apartado es donde se ingresa las curvas de preferencia, las cuales relacionan dicho índice con el tirante, índice de canal y velocidad de corriente. Para registrar estos datos se ingresa a la pestaña “Edit” del menú y se selecciona la opción de “Suitability Curves”. La Figura 22 muestra la ventana de criterios de idoneidad, donde se registrará las curvas de preferencia para cada especie considerada.

Figura 22

Ventana de Criterios de Idoneidad de Hábitat



En esta ventana se agrega las curvas de preferencia para cada especie y estadio de vida, para ello se debe ingresar a la pestaña “Edit” de la ventana y seleccionar la opción “Add Curve”, luego se debe registrar la especie y estadio de vida de esta como se ilustra en la Figura 23.

Figura 23

Ventana de Ingreso de Curvas de preferencia

Screenshot of the 'Suitability Curve Data' dialog box. The fields are filled with the following information:

Curve ID	2
Species	Trucha arco iris
Life Stage	Juvenil

Buttons: OK, Cancel

4.2.1.4. Caudales de Simulación

En este apartado se introduce los caudales de simulación, los cuales se consideró para el presente estudio 10 valores de caudales: 0.05 m³/s, 0.1 m³/s, 0.12 m³/s, 0.2 m³/s, 0.5 m³/s, 1 m³/s; 1.6 m³/s, 2 m³/s, 5 m³/s y 10 m³/s. Considerando que 2 de los valores mencionados fueron obtenidos de campo. Para registrar esta información se debe ingresar a la pestaña “Edit” del menú y se selecciona la opción de “Dischargues”. Aquellos caudales que presenten como tipo “sim”, son aquellos que serán simulados; y los que presenten tipo “cal”, son aquellos que fueron obtenidos de campo. La Figura 24 muestra la ventana donde se registra los caudales de simulación.

Figura 24

Ventana de Caudales de Simulación

Enter simulation discharges into the table. Calibration discharges are in gray and are added automatically when entered into the calibration data table.

	Discharge	Type
1	0.050	sim ▲
2	0.100	cal
3	0.120	sim
4	0.200	sim
5	0.500	sim

4.2.2. Ejecución del Modelo

La ejecución del Modelo para efectuar una simulación de hábitat consiste en tres módulos: superficie, velocidad de corriente y hábitat.

4.2.2.1. Simulación del Espejo de Agua

Para esta simulación presenta el PHABSIM tres aproximaciones, para calcular la elevación del espejo de agua.: STGQ, etapa – descarga; MANSQ, ecuación de Manning y WSP, perfil de superficie del agua. Para el presente estudio se utilizará el Modelo MANSQ, el cual relaciona los caudales con los valores de manning, además es recomendable en caso de tener pocos datos de caudal (mínimo dos registros de caudal).

Para registrar estos datos se ingresa a la pestaña “Model” del menú y se selecciona la opción de “WSL”, correspondiente al nivel del espejo de agua. En la pestaña “MANSQ Options”, el usuario podrá definir el caudal para calibrar el modelo, apartado “Call Set”. Además, ingresando a la pestaña “Method” se define el metodo utilizar (MANSQ). Finalmente, luego de configurar el método a utilizar se corre el modelo, haciendo click en el botón de “Run”.

La Figura 25 muestra las ventanas donde se asignó dichos valores para la simulación del espejo de agua.

Figura 25

Ventanas de Asignación de Valores y Corrida del Modelo MANSQ

Water Surface Elevation Simulation

Method | Output Options | STGQ Options | MANSQ Options | WSP Options | Results

Write WSL Calculations (IOC 1)
 Write Initial Q/Elevation Table (IOC 3)
 Write Critical WSL Calculations (IOC 4)
 Modify Hyd. Radius by Hyd. Radius at SZF (IOC 10)

Velocity Equation (IOC 9): Manning's, Chezy's
Hydraulic Radius (IOC 6): Normal, Area Weighted

Conveyance Adjustment (IOC 2): Use $(Q/QC)^{\beta}$, Use $(RH/RHC)^{\beta}$, Use $((RHC/RH)^{.167} \cdot \log(2.42(RH/D50)) / \log(2.42(RHC/D50)))$
Note that if the beta/D50 value is not supplied in the above table, no adjustment is made.

Cal sets, discharges, and beta values

	Xsec	Cal Set	Discharge
1	1.000	2	Best Est Q
2	2.000	2	Best Est Q
3	3.000	2	Best Est Q
4	4.000	2	Best Est Q
5	5.000	2	Best Est Q
6	6.000	2	Best Est Q
7	7.000	2	Best Est Q

Run

Aceptar Cancelar Aplicar

Water Surface Elevation Simulation

Method | Output Options | STGQ Options | MANSQ Options | WSP Options | Results

	0.050	0.100	0.120	
1.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
2.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
3.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
4.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
5.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
6.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
7.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
8.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
9.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M
10.000	MANSQ	MANSQ	MANSQ	M

WSL Modeling Method: STGQ, MANSQ, WSP

phabsim

WSL Simulation completed!

Aceptar

Run

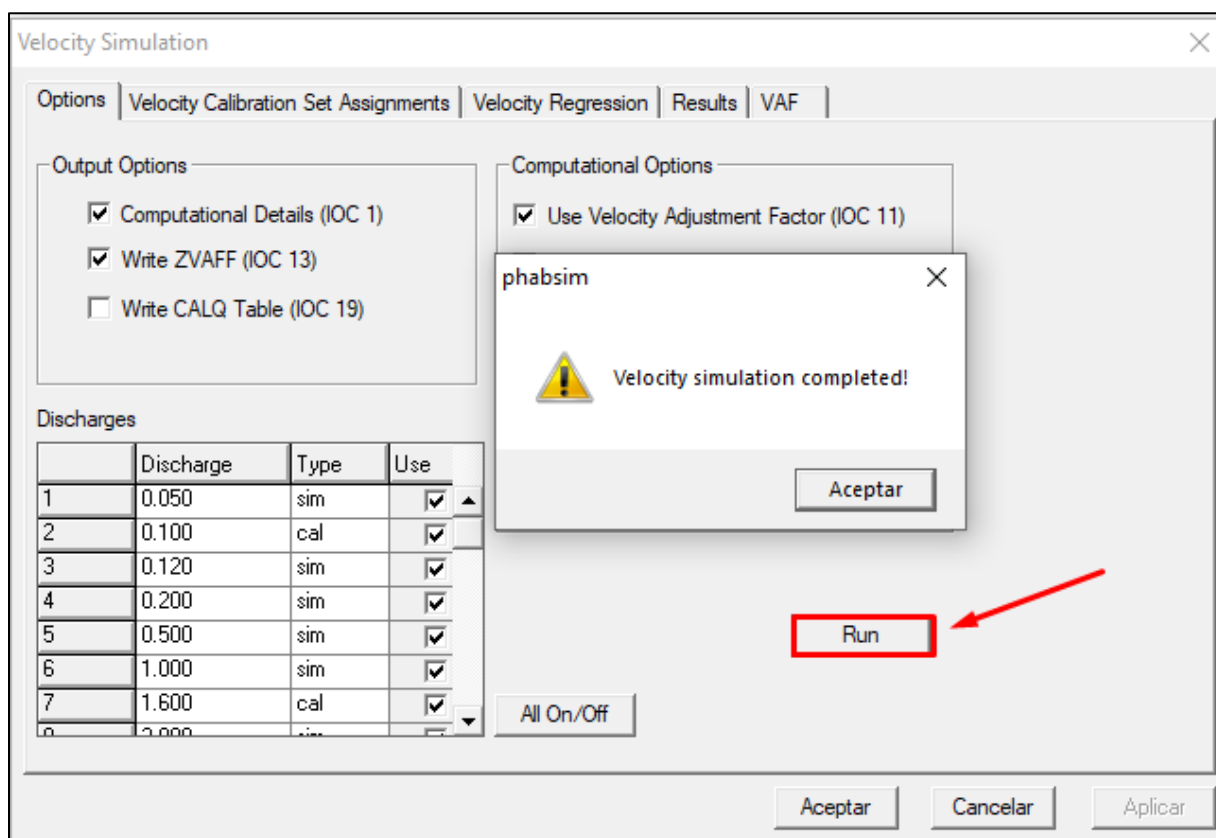
Aceptar Cancelar Aplicar

4.2.2.2. Simulación de Velocidad de Corriente

En base a las estimaciones realizadas en la simulación del espejo, el programa determinará la velocidad promedio para cada celda computacional. Para realizar esta simulación se debe de ingresar a la pestaña “Model” del menú y seleccionar la opción de “Velocity”. Posteriormente, para ejecutar la simulación se debe hacer click en el botón de “Run” tal como se ilustra en la Figura 26.

Figura 26

Ventanas de Simulación de Velocidad



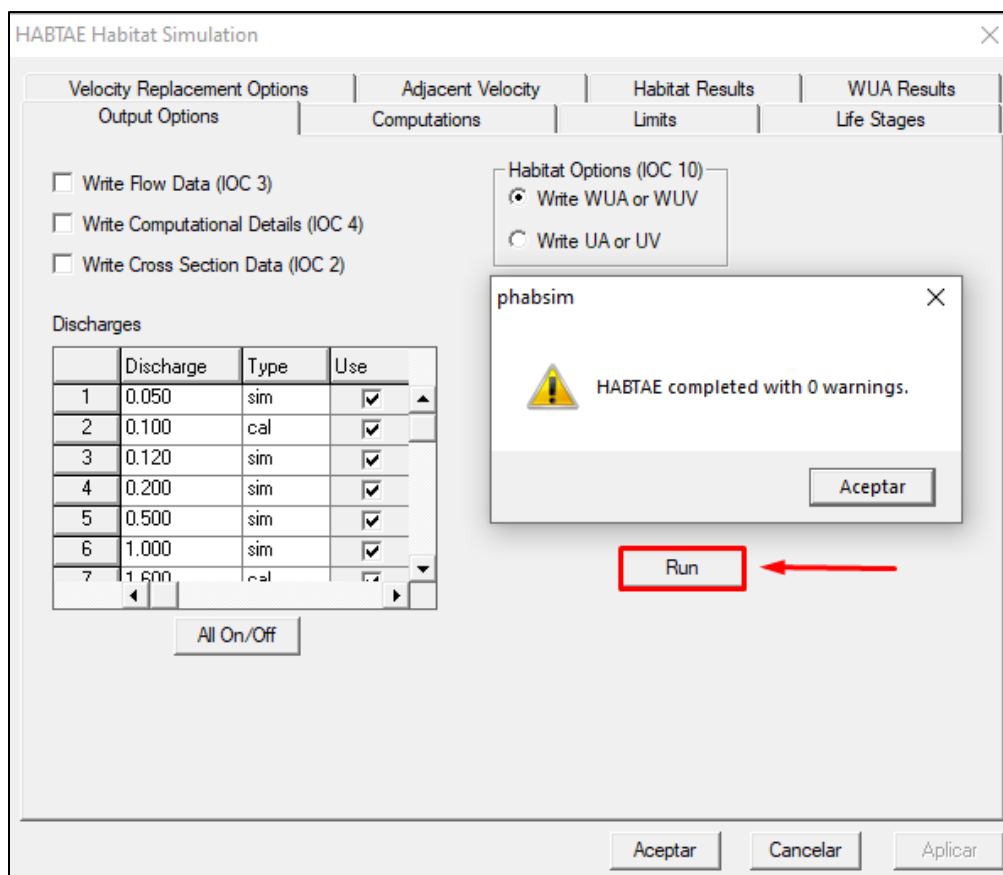
Si todos los valores han sido correctamente ingresados, debe de aparecer un cuadro de dialogo indicando que la simulación de velocidad ha sido completada.

4.2.2.3. Simulación de Hábitat

Esta simulación hace uso de las curvas de preferencia para las especies seleccionadas, simulación del espejo de agua y velocidad de corriente, y las características del canal, transformándola a un indicador de superficie ponderada útil (WUA), la cual es determinada para cada celda. Además, la presente simulación consta de tres modelos: Habtae, Habtam y Habef. Para nuestro estudio se utilizará el método “HABTAE”, para ello es requerido que en la pestaña “Life Stage” se seleccione las especies consideradas para la simulación, en nuestro caso se trabaja con la trucha arco iris y el bagre. La Figura 27 muestra la ventana de simulación de hábitat y la corrida realizada con éxito.

Figura 27

Ventanas de Simulación de Hábitat y Corrida



Seguidamente la Tabla 15 y Figura 28, muestran los valores obtenidos de Superficie ponderada útil (WUA) para peces a diversos caudales, y gráfica de la relación caudal vs (WUA).

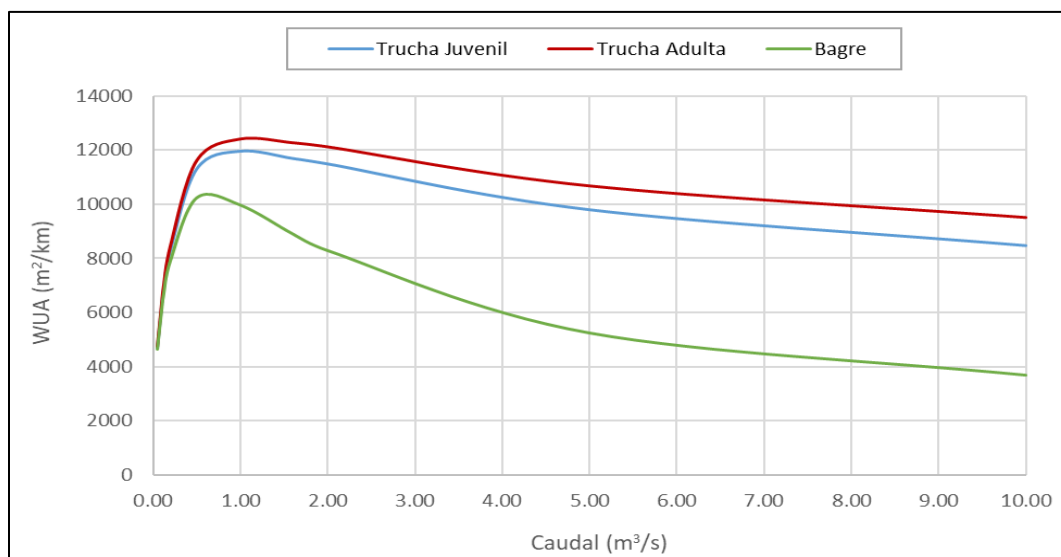
Tabla 15

Valores de WUA (Superficie Ponderada Útil) para los peces a diversos caudales

Caudal (m³/s)	Trucha juvenil	Trucha adulta	Bagre
0.05	4 686	4 740	4 642
0.10	6 292	6 387	6 142
0.12	6 817	6 927	6 620
0.20	8 302	8 471	7 919
0.50	11 291	11 615	10 231
1.00	11 946	12 415	9 966
1.60	11 679	12 277	8 902
2.00	11 478	12 126	8 286
5.00	9 791	10 682	5 244
10.00	8 469	9 512	3 685

Figura 28

Gráfica de relación de Caudal vs. Superficie Ponderada Útil (WUA)



4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Resultados hidrológicos

Los métodos hidrológicos en su mayoría presentan una característica distintiva, la cual contempla un único valor de caudal ecológico a nivel mensual en un año, aun conociendo que los cauces presentan regímenes variables debido a la presencia de épocas tanto de estiaje como de avenida. En el presente documento se recurrió a 2 metodologías que determinaban un único valor de caudal ecológico como: Caudal medio mensual y Rafael Heras; además, un método que consideraba la presencia de tres periodos en un año, como el de New England Aquatic Base Flow (ABF). Asimismo, se contempló tres métodos que consideran al caudal ecológico variable a nivel mensual (Caudal Referencial de la ANA, Tennant Excelente y Recomendable).

La Tabla 16, muestra la recopilación de los valores del caudal ecológico para los métodos utilizados bajo el enfoque hidrológico.

Tabla 16

Cuadro recopilatorio de los valores de caudal ecológico por métodos

Método	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Referencial ANA	1.45	3.21	3.24	1.89	0.70	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
Caudal Medio Mensual	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
New England A.B.F.	5.87	5.87	2.97	2.97	2.97	0.21	0.21	0.21	0.21	5.87	5.87	5.87
Rafael Heras	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Tennant Excelente	1.63	3.30	3.33	1.63	0.54	0.24	0.15	0.12	0.12	0.17	0.19	0.55
Tennant Recomendable	0.98	1.98	2.00	0.98	0.32	0.14	0.09	0.07	0.07	0.10	0.12	0.33

Los caudales ecológicos para los métodos utilizados varían desde 0.03 hasta 5.87 m³/s; además, se visualiza que el método New England Aquatic Base Flow (ABF) presenta significativamente valores mayores para los meses de octubre hasta mayo, en comparación con el resto de los métodos. Asimismo, el método de Rafael Heras presenta los menores valores para el caudal ecológico, siendo este un valor fijo para todos los meses del año.

Para cuantificar la diferencia de valores de caudal en los métodos utilizados, se determina la proporción que representan respecto al caudal medio mensual de la serie histórica de 55 años, esto se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17

Proporción del Caudal Ecológico respecto al Caudal Medio Mensual

Método	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Referencial ANA	45	49	49	58	65	72	78	72	59	40	41	29
Caudal Medio Mensual	7	4	3	7	22	48	75	98	100	66	60	21
New England A.B.F.	181	89	45	91	276	45	70	91	93	1 683	1 518	533
Rafael Heras	1	0	0	1	3	6	9	11	12	8	7	2
Tennant Excelente	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Tennant Recomendable	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Caudal Promedio Mensual	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10

Examinando el caudal ecológico obtenido por el método de Rafael Heras se determina que es muy reducido, representando en el mejor de los casos al 12% del caudal promedio en setiembre. Caso contrario muestra el método New England Aquatic Base Flow (A.B.F.) que representa el 1683% del caudal promedio en octubre.

De la información expuesta a través de las tablas, vemos que el método de New England Aquatic Base Flow (A.B.F.) es muy poco viable que se implemente debido a que plantea en su mayoría valores muy superiores al régimen natural del río.

Finalmente, de lo expuesto se entiende que el caudal ecológico debe presentar un margen amplio, independiente del método que se elija; además, los métodos bajo este enfoque definen valores referenciales, dado que estos han sido desarrollados para condiciones no necesariamente iguales al río de estudio.

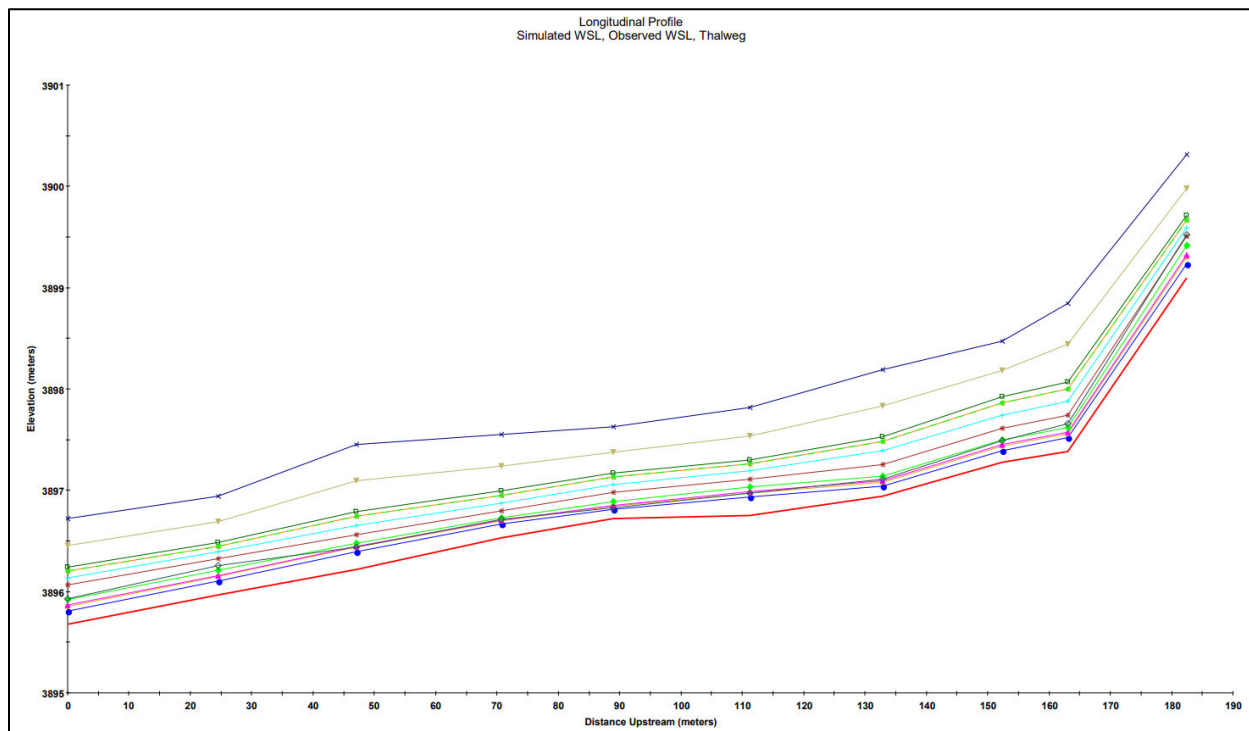
4.3.2. Resultados Eco hidráulicos

Para este tipo de métodos, los cuales funcionan con un programa como el PHABSIM, es fundamental que los resultados de cada etapa se corroboren con la información recopilada, con el propósito de que presenten funcionamientos razonables, para de esta forma proceder con el modelo.

Uno de los aspectos principales para esta metodología es corroborar que la simulación del espejo de agua (WSL), utilizando para ello los gráficos resultantes a fin de que estos no presente incongruencias. Uno de los problemas que puede suscitarse es que haya descensos del nivel del agua en tanto que el recorrido aguas arriba aumente; esto advertiría que el flujo se encontraría en contra pendiente. Por lo tanto, la Figura 29 correspondiente al perfil longitudinal simulado para el espejo de agua es consistente y permite proseguir con la simulación.

Figura 29

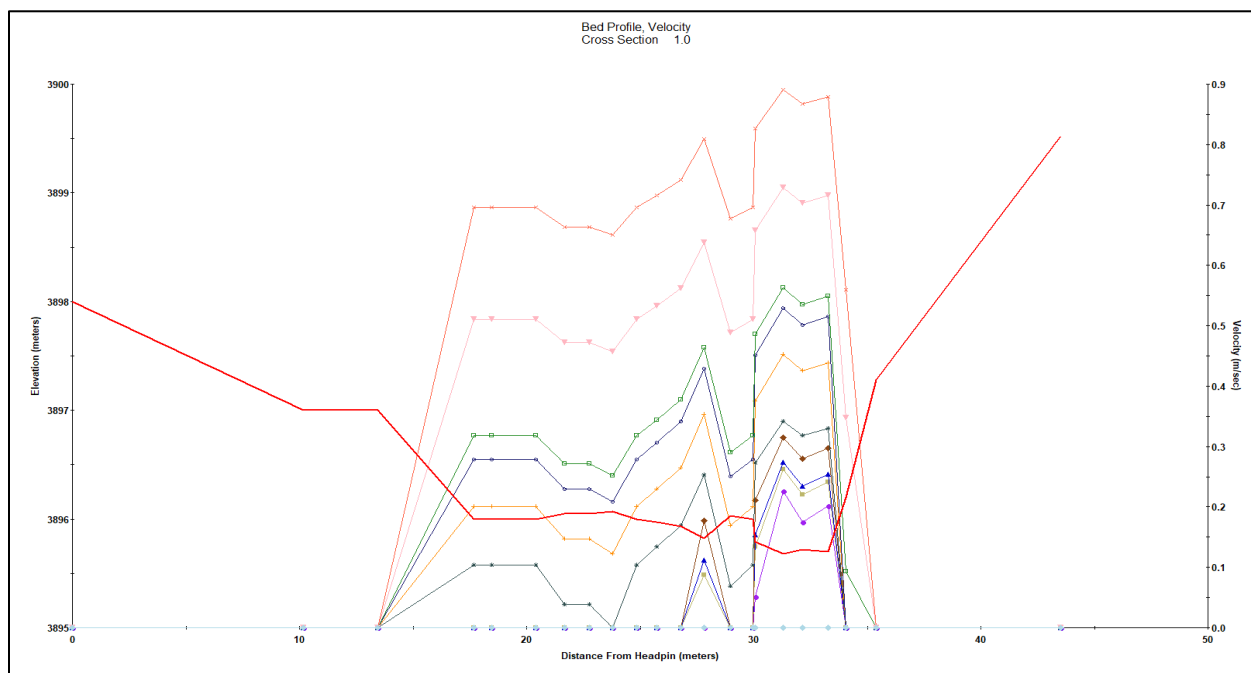
Grafica del Perfil Longitudinal de los WSL Simulados, WSL Observado y Thalweg



Otro aspecto por corroborar es referente a los resultados de la simulación de velocidad, el cual se fundamenta en analizar los resultados de la simulación de tal forma que no presenten funcionamiento irracional; como presentar a caudales mayores simulados, velocidades en comparación menores a los de caudales superiores. La Figura 30 muestra un comportamiento adecuado de las velocidades simuladas para distintos caudales, por lo cual se concluye que las velocidades generadas son coherentes, y por ende se permite continuar la simulación.

Figura 30

Grafica de distribución de velocidades en el transecto 1



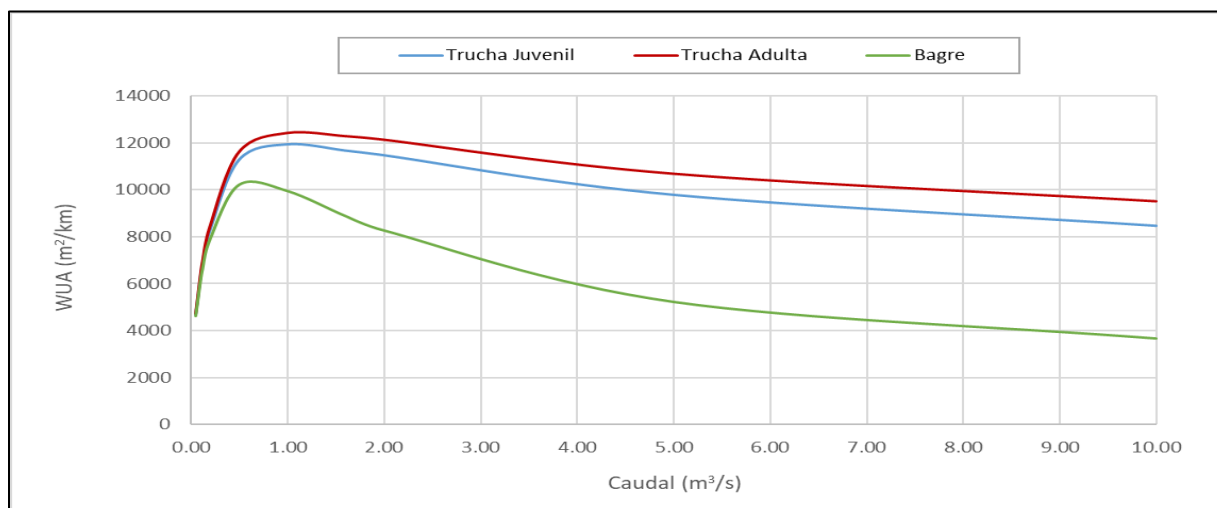
De la Figura 30 se aprecia que las mayores velocidades se encuentran en la zona con más profundidad (talweg), además se visualiza que las zonas de ribera presentan velocidades menores.

De las curvas Caudal (m^3/s) vs. WUA (superficie ponderada útil), las cuales fueron obtenidas para la trucha arco iris (juvenil y adulta) y el bagre, se visualiza que a mayores caudales la habitabilidad disminuye, esto se muestra en la Figura 31. Además, el nivel de

idoneidad de hábitat está condicionado según la especie y estadio de vida. En la Figura 31, los puntos de cambio o de inflexión superiores hacen referencia a la presencia de condiciones óptimas para la especie y su desarrollo.

Figura 31

Grafica de Caudal (m³/s) vs. WUA



La Tabla 18 muestra los puntos de inflexión de la gráfica Caudal vs. WUA (superficie ponderada útil), dichos puntos representan condiciones óptimas (propicias para el desarrollo y permanencia de la especie). Además, los caudales superiores a dichos puntos de inflexión producirán niveles de habitabilidad menores como se muestra en la Figura 31.

Tabla 18

Puntos de inflexión de las curvas Caudal vs WUA

Condición		Trucha Juvenil	Trucha Adulta	Bagre
Punto de inflexión	WUA	12 005	12 509	10 231
	Q (m ³ /s)	1.10	1.20	0.50

Para establecer caudales ecológicos óptimos se procedió a desarrollar un análisis temporal, con la intención de replicar el estado natural del flujo (considerando su variación). Por

lo tanto, se calculó la WUA (superficie ponderada útil) en función de los caudales medios mensuales generados para un periodo de 55 años (1964-2018). Además, considerando arbitrariamente el 25% de hábitat perdido como “aceptable” se procedió a determinar para cada mes del año, el caudal que logre conservar el 75% de hábitat.

El caudal ecológico resultante se presenta en la Tabla 19 para la trucha arco iris (estadio juvenil), Tabla 20 para la trucha (estadio adulto) y Tabla 21 para el bagre.

Tabla 19

Caudal Recomendado para Trucha - Estadio Juvenil, Preservando un 75% de Hábitat

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Natural (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Hábitat Disponible (m ²)	10 654	9 251	9 234	10 643	11 989	11 177	9 511	8 610	8 525	10 118	10 533	12 005
75% del Hábitat Disponible (m ²)	7 991	6 938	6 925	7 982	8 992	8 383	7 133	6 458	6 393	7 589	7 900	9 004
Caudal Mínimo Recomendado (m ³ /s)	0.175	0.125	0.124	0.174	0.265	0.211	0.133	0.106	0.104	0.153	0.170	0.266

Tabla 20

Caudal Recomendado para Trucha - Estadio Adulto, Preservando un 75% de Hábitat

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Natural (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Hábitat Disponible (m ²)	11 441	10 211	10 196	11 431	12 472	11 495	9 744	8 802	8 710	10 375	10 811	12 494
75% del Hábitat Disponible (m ²)	8 581	7 659	7 647	8 573	9 354	8 621	7 308	6 601	6 533	7 781	8 108	9 370
Caudal Mínimo Recomendado (m ³ /s)	0.214	0.149	0.149	0.213	0.279	0.219	0.135	0.108	0.105	0.155	0.173	0.280

Tabla 21*Caudal Recomendado para el Bagre, Preservando un 75% de Hábitat*

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Natural (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Hábitat Disponible (m ²)	6 622	4 521	4 498	6 601	9 899	10 158	8 867	8 132	8 069	9 383	9 708	9 871
75% del Hábitat Disponible (m ²)	4 966	3 391	3 373	4 951	7 425	7 618	6 650	6 099	6 052	7 037	7 281	7 403
Caudal Mínimo Recomendado (m ³ /s)	0.060	0.019	0.018	0.059	0.159	0.172	0.121	0.098	0.097	0.138	0.151	0.158

Para definir el caudal ecológico como un valor único para cada mes del año, se eligió el valor mínimo más conservador, habiéndose considerado las tres especies indicadoras. Por lo tanto, el caudal ecológico más conservador está indicado en la Tabla 22.

Tabla 22*Caudales Ecológicos determinado a nivel mensual (PHABSIM)*

Mes	Caudal Mínimo Recomendado (m³/s)
Enero	0.214
Febrero	0.149
Marzo	0.149
Abril	0.213
Mayo	0.279
Junio	0.219
Julio	0.135
Agosto	0.108
Setiembre	0.105
Octubre	0.155
Noviembre	0.173
Diciembre	0.280

4.3.3. Comparación de Metodologías

En esta sección se realizará la comparación entre los métodos hidrológicos y el método de Simulación de Hábitat. Los métodos por comparar son el IFIM-Phabsim, Caudal de Referencia ANA, Caudales Medios Mensuales, Tennant Excelente y Recomendable.

La Tabla 23 muestra el resumen de caudales considerados para determinar el caudal ecológico y la Figura 32, la gráfica de los caudales ecológicos consideradas para el estudio.

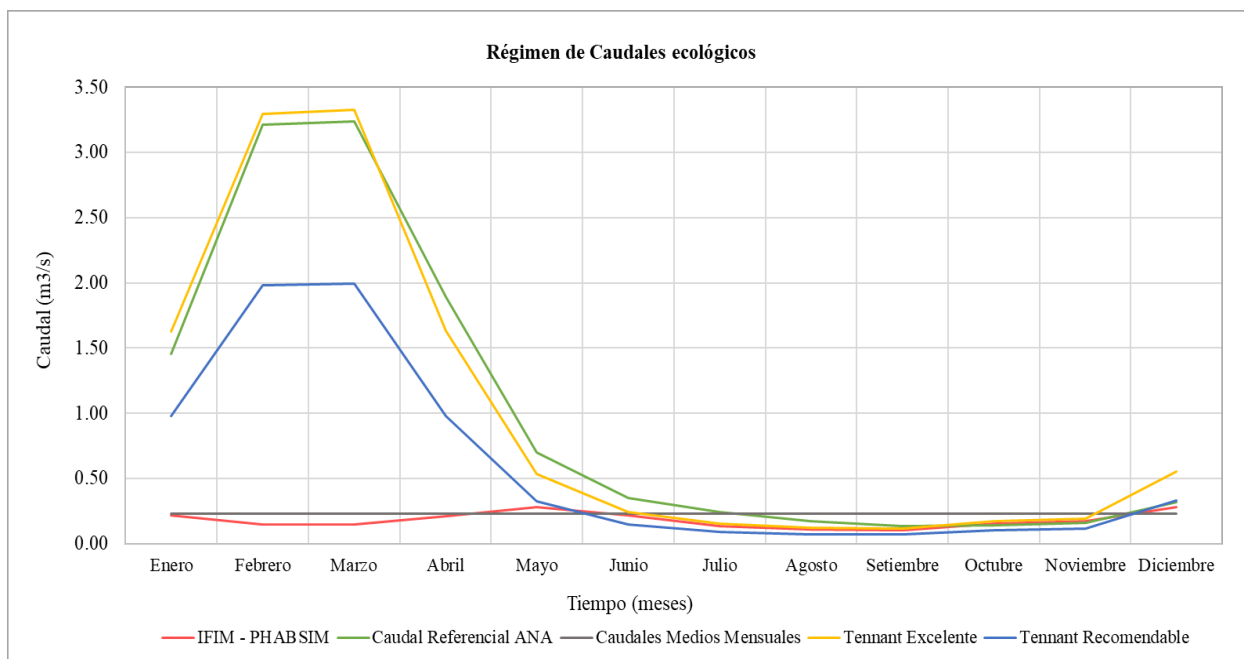
Tabla 23

Cuadro resumen de caudales ecológicos: Metodología Hidrológica y Eco-hidráulicos

Método / Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
IFIM-PHABSIM	0.214	0.149	0.149	0.213	0.279	0.219	0.135	0.108	0.105	0.155	0.173	0.280
Caudal de Referencia ANA	1.45	3.21	3.24	1.89	0.70	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
Caudales Medios Mensuales	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Tennant Excelente	1.63	3.30	3.33	1.63	0.54	0.24	0.15	0.12	0.12	0.17	0.19	0.55
Tennant Recomendable	0.98	1.98	2.00	0.98	0.32	0.14	0.09	0.07	0.07	0.10	0.12	0.33

Figura 32

Grafica del Régimen de Caudales ecológicos considerados en el estudio



Cabe recalcar que la gran diferencia de los métodos hidrológicos y Eco hidráulicos, es la de considerar el hábitat donde coexisten diversas especies, por lo cual el método IFIM al cuantificar los impactos del medio ambiente, toma en cuenta la influencia sobre el hábitat, precisando poblaciones acuáticas, y relacionándolas a los cambios del caudal. Mientras que los métodos hidrológicos se caracterizan por ser valores puntuales, o porcentajes del caudal, estos son considerados para un primer alcance o cuando no se dispone de la economía para un estudio de Simulación de hábitat, o cuando aún no se tiene la información suficiente para realizar un método Eco hidráulico.

Capítulo 5 - Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Las metodologías existentes para el cálculo del caudal ecológico se encuentran descritas en el Capítulo 2, Ítem 2.3, en el cual se presentan las metodologías hidrológicas, hidráulicas, Eco hidráulicas o de Simulación de hábitat y las Holísticas. No obstante, he de recalcar que existen más de 200 metodologías, por lo cual el apartado describe las metodologías más utilizadas y más conocidas.
- La determinación de caudales ecológicos para el tramo en estudio del río Chilloroya, bajo los enfoques hidrológicos han sido considerados bajo 5 metodologías: Caudal Referencial ANA, Caudales Medios Mensuales, New England Aquatic Base Flow (ABF), Rafael Heras y Tennant (excelente y recomendable). De los métodos enunciados se descartó los métodos New England Aquatic Base Flow (ABF) y Rafael Heras; debido a que el primero presentaba valores que duplicaban y quintuplicaban el valor medio de los caudales mensuales de la serie histórica de 55 años (1964-2018), y el método de Rafael Heras, presentaba la inconveniente de que podría solo representar como máximo un 12% del caudal medio mensual (mes de setiembre). Debido a que el caudal ecológico en un cauce o río es variable, ya que presenta épocas de estiaje y avenidas, se debe de considerar un rango relativamente amplio de métodos que calculen dicho valor; sin embargo, he de recalcar que los métodos bajo el enfoque hidrológico en su mayoría se han desarrollado bajo características o parámetros regionales que no exactamente coinciden con las del tramo estudiado, por ende estos métodos son considerados como referenciales, y por ello tienen que validarse para cada zona que sea aplicado.

La Tabla 13, muestra el resumen de los caudales ecológicos determinados bajo el enfoque hidrológico.

Tabla 16

Cuadro recopilatorio de los valores de caudal ecológico por métodos

Método	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Referencial ANA	1.45	3.21	3.24	1.89	0.70	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
Caudal Medio Mensual	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Tennant Excelente	1.63	3.30	3.33	1.63	0.54	0.24	0.15	0.12	0.12	0.17	0.19	0.55
Tennant Recomendable	0.98	1.98	2.00	0.98	0.32	0.14	0.09	0.07	0.07	0.10	0.12	0.33

- En el tramo del río Chilloroya, el caudal ecológico se determinó utilizando el software PHABSIM y aplicando la metodología Eco hidráulica o de Simulación de Hábitat. Este proceso es explicado en el Capítulo 3, en la sección 3.3, la cual describe la información requerida para registrar al modelo IFIM-PHABSIM. Este modelo necesita no solo información hidrométrica; sino también información recogida de campo: información de los transectos (secciones transversales al río), las cuales son determinadas por especialistas físicos y biológicos, ya que estas secciones deben ser representativas del tramo, incluyendo zonas de preferencias para los peces (pozas, rápidas, corrida), donde se analiza para cada tramo del transecto el sustrato, cobertura, coordenadas (x,y), velocidades, tirantes o profundidades, aforos, especies que habitan en dicho ecosistema, etc.

Una vez recogida la información, esta es procesada por los especialistas en biología, generando curvas de preferencia de hábitat para las especies consideradas sensibles o de mayor importancia económica o cultural. Dichas curvas de preferencia relacionan variables como profundidad, velocidad de corriente, índice de canal y temperatura (PHABSIM restringe su metodología a solo estos cuatro tipos de curvas).

Para determinar el caudal ecológico bajo la metodología IFIM, se ingresa los datos recolectados al programa, junto con la información respecto a las curvas de preferencia y caudales obtenidos en campo para su calibración. El proceso detallado del cálculo se encuentra en el Capítulo 4, en la sección 4.2.

Seguidamente, haciendo uso de la Curva de Idoneidad de hábitat (Caudal vs. WUA) se determinó la WUA (superficie ponderada útil) en función de los caudales medios mensuales para un periodo de 55 años (1964-2018). Finalmente, tomando como aceptable la pérdida de un 25% del Hábitat, se determinó de manera mensual el caudal que logre conservar el 75% de hábitat.

La Tabla 19 muestra los caudales ecológicos determinados bajo este enfoque Eco hidráulico usando el Software PHABSIM.

Tabla 22*Caudales Ecológicos determinado a nivel mensual (PHABSIM)*

Mes	Caudal Mínimo Recomendado (m³/s)
Enero	0.214
Febrero	0.149
Marzo	0.149
Abril	0.213
Mayo	0.279
Junio	0.219
Julio	0.135
Agosto	0.108
Setiembre	0.105
Octubre	0.155
Noviembre	0.173
Diciembre	0.280

- La comparación entre las metodologías hidrológicas y Eco hidráulicas, es resultante de que las primeras son obtenidos a partir de métodos puntuales o porcentajes del caudal. Los métodos hidrológicos no consideran las características del ecosistema dentro de su cálculo, considerados limitados debido a que su análisis solo se centra en el tratamiento de la información hidrométrica, descuidando la influencia del cauce con el ecosistema y las especies dependientes de ello. Además, los métodos hidrológicos presentan un rango amplio de caudales, para la misma información hidrométrica, ya que cada metodología ha sido desarrollada según características particulares en la zona de desarrollo, convirtiendo estos métodos en referenciales.

El enfoque Eco hidráulico al analizar una gama amplia de variables físicas y biológicas del transecto, las hacen de mayor precisión. Sin embargo, tiene como punto negativo el requerir especialistas de distintas especialidades y emplear instrumentos especializados, los cuales tienen un mayor valor monetario; además, para aplicar estos métodos es necesario que se realicen campañas de evaluación, las cuales son como mínimo dos veces al año y por temporadas (avenida y estiaje). Por ende, a pesar de que los métodos hidrológicos no son tan precisos, estos conllevan a darnos una primera impresión del caudal ecológico necesario para la evaluación de un cauce o río, y debido a que no son costosos son muy utilizados a nivel mundial.

5.2. Recomendaciones

- El uso de metodologías hidrológicas es solo de manera referencial, ya que presentan una amplia variación de valores del caudal ecológico, los cuales deben ser monitoreados para evitar que se produzca una degradación de ecosistemas.
- Para los trabajos de campo es necesario que se tengan los permisos adecuados para ingresar a la zona de estudio, debido a que muchas veces los tramos de interés no se encuentran cerca de la carretera, teniendo que pasar por distintos poblados. Los cuales, si no se presenta un permiso de acceso para la zona, será imposible llegar a realizar algún trabajo.
- Para el levantamiento de información Hidrotopográfica se recomienda llevar las EPP's adecuadas, las cuales mínimamente deben ser botas, guantes, bloqueador, repelente, cortavientos, chalecos, y en caso de trabajar en una zona con vegetación, tener cuidado al desplazarse ya que muchas veces se logran topas con espinas o plantas que irritan la piel.
- En caso de requerir una mayor precisión en la toma de datos de los transectos, estos pueden subdividirse en longitudes menores al 10% del ancho total del cauce.
- Para el registro de datos se debe de contar de preferencia con libretas y lapiceros resistentes al agua, ya que al desarrollar actividades estas se encuentran en contacto muchas veces con el agua, haciendo que se pierda información o retrasando los tiempos para el registro de transectos.

- Aunque es necesario el uso de correntómetros para realizar mediciones de velocidad más precisas en el transecto, es de preferencia que se cuente con correntómetros electromagnéticos y no solo de hélice, ya que las zonas evaluadas presentan valores muy bajos de velocidad, haciendo que los correntómetros de hélice no lleguen a medir dichas velocidades en comparación de uno electromagnético, pues estos tienen sensores que permiten el registro de velocidades más bajas.
- Al ingresar a cada transecto se debe evitar alterar en lo posible su condición, ya que el estudio consiste en representar el ecosistema lo más inalterado posible, facilitando de este modo el trabajo a los especialistas en biología.
- Se deben realizar por lo menos dos campañas por año para poder realizar un modelo más preciso, ya que estas mediciones son ingresadas al programa, permitiendo obtener un resultado más fiel a lo real.
- El ingreso de datos al PHABSIM debe ser con cuidado, debido a que el programa permite la creación de filas muy rápidamente; sin embargo, la eliminación de filas es realizado de una en una, conllevando a pérdida de tiempo para el cálculo.

Bibliografía

- Aguilimpia Dualiby, Y. del C., & Castro Méndez, C. E. (2006). *Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos*. 3, 13.
- Aguilera, G., & Pouilly, M. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. In *Acta zoológica lilloana* (Vol. 56, Issues 1–2).
- Araujo Delgado, L. F., & Sarmiento Soto, A. J. (2020). *Cálculo del caudal ecológico usando los métodos hidrológicos, hidráulicos y simulación de hábitat en la cuenca del Río Rímac* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <http://hdl.handle.net/10757/648677>
- Asamblea Nacional República del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua* (p. 23).
- Autoridad Nacional del Agua. (2009, March 31). Ley de Recursos Hídricos - Ley N° 29338. *Diario El Peruano*.
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Diagnóstico sobre los caudales ecológicos en el Perú (primera fase): Contexto nacional e internacional*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1927>
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Resolución Jefatural N°154-2016-ANA: Metodología para Determinar Caudales Ecológicos*. Diario Oficial el Peruano.
<https://www.gob.pe/institucion/ana/normas-legales/538587-r-j-154-2016-ana>
- Autoridad Nacional del Agua. (2019). *Resolución Jefatural N°267-2019-ANA: Lineamientos Generales para Determinar Caudales Ecológicos*. Diario Oficial el Peruano.
<https://www.gob.pe/institucion/ana/normas-legales/537631-rj-267-2019-ana>
- Barrera Olarte, J. A. (2018). *Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para ña cuenca del rio Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología ELOHA* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63458>
- Bovee, K. D. (1986). *Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology*. *Instream Flow Information Paper no. 21*.
- Bovee, K. D., & Milhous, R. T. (1978). *Hydraulic Simulation in Instream Flow Studies: Theory and Techniques* (Issue 5). Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Office of Biological

Services, Western Energy and Land Use Team, Cooperative Instream Flow Service Group.

- Brizga, S. O. (1998). Methods addressing flow requirements for geomorphological purposes. Chapter 2. In A. Arthington & J. Zalucki (Eds.), *Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods* (Issues 27–98).
- Brown Manrique, O., Gallardo Ballat, Y., Williams Harriote, P. W., & Torres Martínez, Y. (2016). Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 58–71. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Carrasco Sánchez, N. P. (2014). *Estimación del caudal ecológico en las vertientes anexas a la parroquia de Cangahua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de pisambilla, que garantice la sustentabilidad ambiental de la zona* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7554/6/UPS-ST001302.pdf>
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y., & Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y Universidad*, 10(2), 179–195. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/917>
- Centro de Ciencias de Fort Collins. (2012). *Software de simulación de hábitat físico (PHABSIM) para Windows*. U.S. Geological Survey - USGS. <https://www.usgs.gov/node/279289>
- Chávez Céspedes, C. F., & Lara Camarena, S. B. (2020). *Estimación comparada del caudal ecológico en el río Chancay-Lambayeque con métodos de enfoque hidrológico y eco-hidráulico* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16831>
- Chow, V. Te. (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. In *Editorial Mc. Graw Hill*. McGraw Hill. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Hidraulica+De+Canales+Abiertos#0>
- Climate Technology Centre and Network. (2018). Metodología para la determinación y evaluación de caudales ecológicos y planes de manejo de cuencas en Paraguay. Aplicación a la cuenca piloto del río Tebicuary. In *Estados del Arte. Caudales Ecologicos*. <https://www.ctc-n.org/content/21-estado-del-arte-caudales-ecol-gicos>

- Consuegra Martínez, C. S. M. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias* [Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito].
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/75?locale-attribute=en>
- Diez Hernández, J. M., & Olmeda Sanz, S. (2008). Diseño Eco-Hidrológico de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas: Evaluación de Caudales Ecológicos. *Energética*, 39, 65–76.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147020257006>
- Dyson, M., Bergkamp, G., Scanlon, J., & UICN-Oficina Regional para Mesoamérica. (2003). *Caudal, elementos esenciales de caudales ambientales*.
- Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A. (2009). Determinación de caudal ecológico mínimo del río Molloco. *Estudio de Impacto Ambiental de La Central Hidroeléctrica Molloco*.
- Empresa Nacional de Electricidad S.A. (2011). *Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. Un análisis de las tendencias actuales* (Endesa Chile (ed.); Primera Ed). Leaders S.A.
- Espinoza, C., Vargas, X., & Pardo, M. (1999). Metodología Incremental para la Asignación de Caudales Mínimos aconsejables, IFIM. In *VI Jornadas del CONAPHI-CHILE*.
- Fernández Yuste, J. A., & Martínez Santa-María, C. (2010). *Conceptos y métodos sobre el régimen de caudales ecológicos*. http://observatoriagua.uib.es/repositori/gf_caudales_conceptos.pdf
- Flachier Troya, A. L. (2016). *Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador].
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13217>
- Gallo Vélez, D. (2016). Considerations Regarding the Application of R2Cross Hydraulic. *Revista Intrópica*, 11(45), 111–126. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21676/23897864.1867>
- Hatch Asociados S.A. (2019). *Tercera Modificación del Estudio de Impacto Ambiental de la Unidad Minera Constancia. Sección 3.2.3 Hidrografía, Hidrología, Hidrogeología y Balance Hídrico*.
- Hatch Asociados S.A. (2021). *Tercera Modificación del Estudio de Impacto Ambiental de la Unidad Minera Constancia. Capítulo 3.0 Línea Base*.
- King, J., & Louw, D. (1998). Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1(2), 109–124.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1463-4988\(98\)00018-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1463-4988(98)00018-9)

King, J. M., Tharme, R., & de Villiers, M. (2008). *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology (Updated Edition)*.

https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/deltaflow/docs/exhibits/swrcb/swrcb_king2008.pdf

King, J., Tharme, R., & Brown, C. (1999). Definition and Implementation of Instream Flows. *World Commission on Dams*, 87.

Kushner, R. (2008). *2008 Stream Flow Analysis Using R2CROSS*.

Linnansaari, T., Monk, W., Baird, D., & Curry, R. (2012). Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally. *DFO Canadian Science Advisory Secretary Research Document*, 75.

https://www.researchgate.net/publication/256762075_Review_of_approaches_and_methods_to_assess_Environmental_Flows_across_Canada_and_internationally

Martínez Capel, F. (2011). Modelos de Idoneidad de Microhábitat para el estudio del Régimen Ecológico de Caudales. *Universidad Politécnica de Valencia*, 11. <https://riunet.upv.es/handle/10251/13641>

Mayo Rustarazo, M. (2000). *Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos adaptación del método IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.667>

MINAGRI. (2010). *Decreto Supremo N° 001-2010-AG.- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N°29338)*. Ministerio de Agricultura.

Ministerio de Obras Públicas. (2005). *Ley 20017. Modificatoria del Código de Aguas* (p. 32MBYB HYNJVGJN IBM,KHVGYI .¶«ÖÓ RsvdczxfwÄ). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Ministerio del Ambiente. (2012). *Decreto N 14. Reglamento para la determinación del Caudal Ecológico Mínimo* (p. 5). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053200&idParte=0>

Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Decreto 71. Modificatoria del Decreto N° 14 Que Aprueba Reglamento Para La Determinación del Caudal Ecológico Mínimo* (p. 2). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1073494&idParte=9549274&idVersion=2015-01-15>

Morales Coronel, O. F. (2017). *Evaluación de la metodología IFIM-PHABSIM para la determinación de caudales ambientales en un tramo de la Subcuenca del río Neusa* [Universidad Santo Tomas].
<http://hdl.handle.net/11634/9237>

Oyola Sánchez, T. Y. (2017). *Propuesta metodológica para estimación de caudal ecológico en fuentes superficiales* [Universidad Técnica de Machala].
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/10724>

Palau, A. (2003). *Régimen ambiental de caudales: estado del arte*. 1–8.

Palau Ibars, A. (1994). Los mal llamados caudales “ecológicos”. Bases para una propuesta de cálculo. *Revista Del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 2(Nº 28).
https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/op/28/op28_8.htm

Pang, B., Xu, Z., & Wu, W. (2012). Estimation of the ecological base flow of Wei River in Shaanxi province. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1559–1568.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.148>

Parker, G. W., Armstrong, D. S., & Richards, T. A. (2004). Comparison of methods for determining streamflow requirements for aquatic habitat protection at selected sites on the Assabet and Charles Rivers, Eastern Massachusetts, 2000-02. In *Scientific Investigations Report*.
<https://doi.org/10.3133/sir20045092>

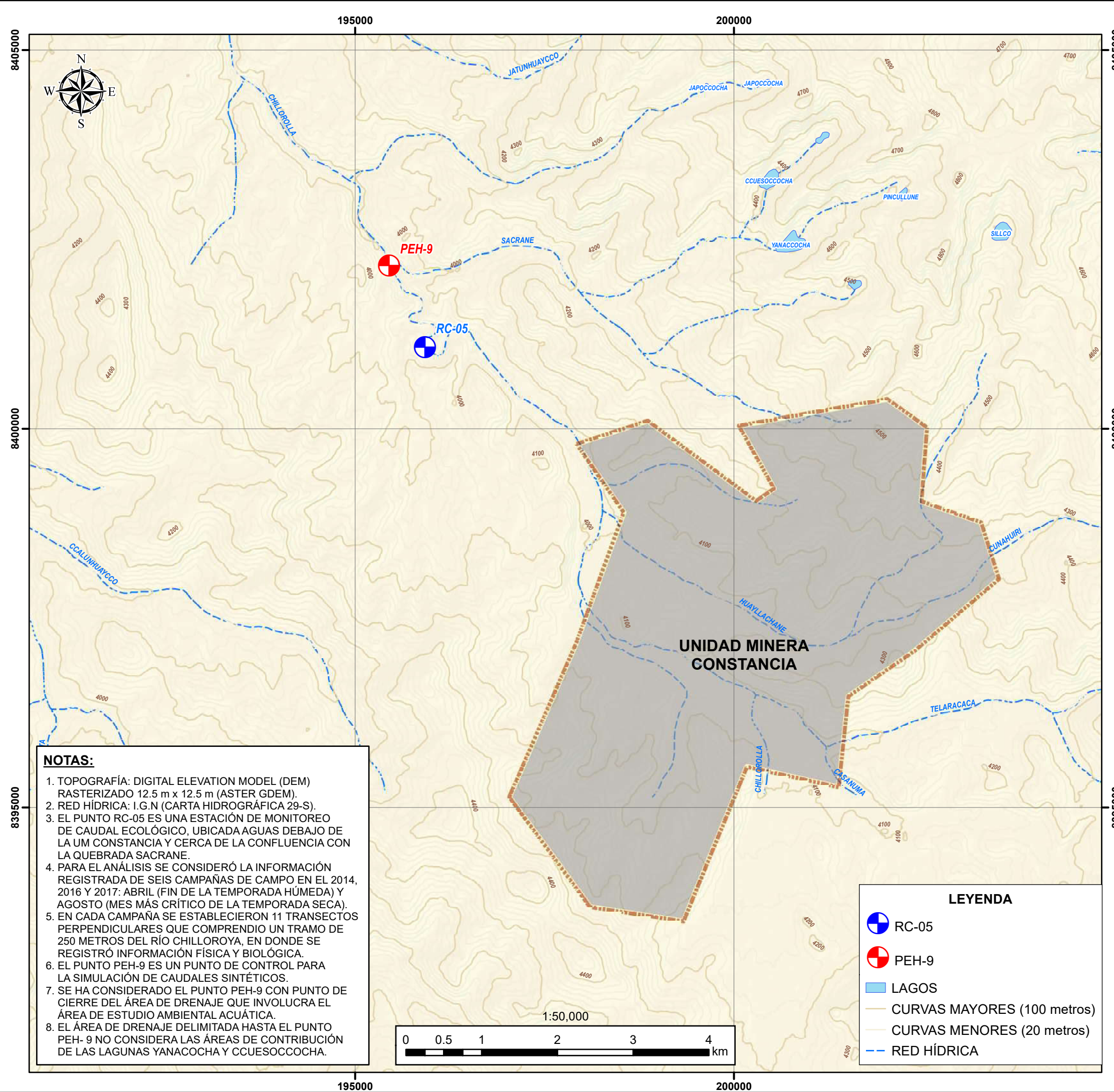
Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O’keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E., & Warner, A. (2009). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>

Registro Oficial No. 41. (2007). Ministerio del Ambiente. In *Registro Oficial. Organo del Gobierno de Ecuador* (Vol. 41, p. 79). Registro Oficial. Organo del Gobierno del Ecuador.

Reiser, D. W., Wesche, T. A., & Estes, C. (1989). Status of Instream Flow Legislation and Practices in

- North America. *Fisheries*, 14(2), 22–29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1989\)014<0022:SOIFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1577/1548-8446(1989)014<0022:SOIFLA>2.0.CO;2)
- Rodríguez, E. A., Pinilla, G., Camacho, L. A., Medina, M. P., Ramírez, A., & Bernal, E. (2008). *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados*.
- Swift, C. (1975). Estimation of stream discharges preferred by steelhead trout for spawning and rearing in western Washington. In *USGS Open-File Report 75-155*. <https://doi.org/10.3133/ofr75155>
- Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2)
- U.S. Fish and Wildlife Service. (1980). *Habitat Evaluation Procedures (HEP) - ESM 102* (Vol. 102). Department of the Interior, Fish and Wildlife Service. <https://www.fws.gov/policy/ESM102.pdf>
- Villanueva Uré, J. R., & Alata Rey, J. E. (2011). *Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/580>
- Waddle, T. (2001). PHABSIM for Windows User's Manual and Exercises. In *U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/ofr2001340>
- Ye, Z., Shen, Y., & Chen, Y. (2013). Multiple methods for calculating minimum ecological flux of the desiccated Lower Tarim River, Western China. *Ecohydrology*, 6(6), 1040–1047. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eco.1337>
- Zalucki, J., & Arthington, A. (1998). Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods. *Land and Water Resources Research and Development Corporation*, 141.

Anexos



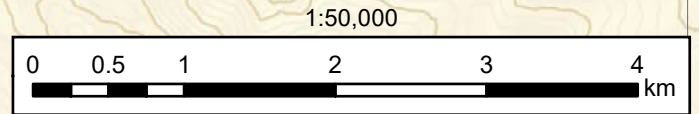
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ESTIMACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL RÍO CHILLOROYA USANDO MÉTODOS DE ENFOQUE HIDROLÓGICO Y DE SIMULACIÓN DE HÁBITAT

Departamento: CUSCO	Provincia: CHUMBIVILCAS	Distrito: VELILLE
Datum / Zona UTM / Cuadrícula: WGS 84 / 19 SUR / L	Elaborado por: CRISTIAN MARCA	Lámina: ANEXO-01
Escala: 1:50,000	Fecha: JULIO 2022	

LEYENDA

- RC-05
- PEH-9
- LAGOS
- CURVAS MAYORES (100 metros)
- CURVAS MENORES (20 metros)
- RED HÍDRICA



Anexo 2

Registro Histórico de Caudales

Estación PEH-9

Latitud: 14° 26' 10.34" Sur

Longitud: 71° 49' 28.45" Oeste

Elevación: 3873 m.s.n.m.

Departamento: Cusco

Provincia: Chumbivilcas

Distrito: Velille

N°	Año	Caudal Promedio Mensual (m ³ /s)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1964	2.73	3.81	7.24	2.56	1.23	0.66	0.28	0.19	0.14	0.14	0.30	0.47
2	1965	1.45	2.41	4.37	2.36	0.75	0.35	0.24	0.17	0.50	0.19	0.21	2.44
3	1966	3.83	10.93	4.25	1.95	0.93	0.38	0.26	0.18	0.18	0.74	0.61	1.42
4	1967	1.31	5.14	9.65	3.49	1.17	0.50	0.33	0.21	0.44	0.29	0.21	0.75
5	1968	2.69	6.19	4.89	2.91	0.95	0.44	0.32	0.19	0.18	0.16	0.32	0.36
6	1969	1.85	4.09	3.10	2.49	0.77	0.34	0.23	0.18	0.15	0.22	0.89	1.09
7	1970	4.27	7.56	4.31	2.18	0.83	0.36	0.26	0.18	0.13	0.38	0.26	2.13
8	1971	4.07	6.46	5.37	2.44	0.80	0.39	0.26	0.18	0.14	0.12	0.15	0.72
9	1972	3.25	3.70	8.30	3.22	1.15	0.47	0.34	0.20	0.19	0.21	0.48	1.37
10	1973	4.73	10.02	11.54	6.00	1.60	0.66	0.40	0.39	0.32	0.18	0.67	0.93
11	1974	3.13	7.45	7.82	3.63	1.31	0.60	0.33	0.37	0.19	0.15	0.16	0.28
12	1975	1.45	4.72	5.79	3.71	2.04	0.60	0.32	0.39	0.22	0.40	0.46	2.09
13	1976	6.50	5.13	4.90	2.32	0.81	0.38	0.26	0.36	0.35	0.17	0.18	0.60
14	1977	1.61	5.65	5.06	2.44	0.83	0.39	0.27	0.18	0.19	0.24	1.12	1.28
15	1978	6.02	4.59	3.88	2.11	0.73	0.35	0.24	0.17	0.18	0.30	0.41	0.69
16	1979	2.20	3.37	5.93	2.40	0.87	0.39	0.26	0.18	0.14	0.18	0.35	0.70
17	1980	1.45	2.96	8.05	2.45	0.86	0.41	0.27	0.21	0.26	0.17	0.20	0.58
18	1981	2.00	5.87	7.07	3.46	1.12	0.48	0.31	0.24	1.23	1.16	0.49	0.40
19	1982	1.68	6.16	5.83	2.82	1.02	0.42	0.28	0.19	0.15	1.32	0.52	0.37
20	1983	1.94	8.35	4.70	2.11	0.76	0.37	0.26	0.21	0.21	0.61	0.32	0.42
21	1984	2.50	6.36	6.36	3.61	1.29	0.50	0.31	0.21	0.16	1.02	0.25	1.60
22	1985	3.16	10.47	8.25	3.86	1.42	0.55	0.34	0.24	0.19	0.16	0.19	0.32
23	1986	2.17	3.83	9.16	6.50	1.82	0.67	0.38	0.26	0.23	0.18	0.17	2.09

Anexo 2

Registro Histórico de Caudales

Estación PEH-9

Latitud: 14° 26' 10.34" Sur

Longitud: 71° 49' 28.45" Oeste

Elevación: 3873 m.s.n.m.

Departamento: Cusco

Provincia: Chumbivilcas

Distrito: Velille

N°	Año	Caudal Promedio Mensual (m ³ /s)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24	1987	4.72	7.32	3.29	1.73	0.66	0.38	0.24	0.27	0.20	0.16	0.32	0.42
25	1988	2.06	3.54	9.23	6.50	1.61	0.65	0.39	0.25	0.18	0.29	0.62	0.94
26	1989	2.30	4.77	11.30	4.31	1.42	0.59	0.36	0.38	0.34	0.26	0.29	0.29
27	1990	1.92	4.34	5.30	2.01	0.71	0.35	0.24	0.27	0.19	0.17	0.50	2.56
28	1991	5.41	5.07	7.51	4.73	1.22	0.51	0.33	0.21	0.15	0.16	0.27	0.50
29	1992	1.50	3.29	2.42	1.37	0.52	0.27	0.21	0.15	0.13	0.14	0.28	1.15
30	1993	2.97	3.72	4.99	2.97	1.07	1.09	0.42	0.31	0.26	1.03	0.45	0.99
31	1994	4.43	11.49	9.29	4.40	1.32	0.56	0.35	0.23	0.17	0.13	0.46	0.78
32	1995	2.00	5.40	7.48	3.79	1.14	0.49	0.32	0.35	0.35	0.69	0.30	1.40
33	1996	2.99	5.99	5.01	2.15	0.75	0.37	0.26	0.22	0.19	0.15	0.28	1.07
34	1997	3.60	8.69	7.42	3.19	1.06	0.47	0.31	0.22	0.16	0.17	0.20	0.74
35	1998	3.21	4.02	3.78	3.06	0.85	0.38	0.26	0.28	0.14	0.29	0.25	0.80
36	1999	1.80	6.30	8.48	3.50	1.15	0.48	0.31	0.21	0.16	0.75	0.60	1.15
37	2000	4.78	15.09	7.46	3.25	1.08	0.49	0.33	0.21	0.16	0.18	0.17	1.13
38	2001	2.82	5.78	9.32	4.75	1.32	0.56	0.34	0.23	0.17	0.15	0.18	0.64
39	2002	1.73	13.80	10.01	5.18	1.39	0.60	0.50	0.24	0.19	0.47	0.78	1.68
40	2003	5.09	6.17	9.79	4.95	1.40	0.57	0.35	0.52	0.70	0.67	0.68	1.35
41	2004	4.41	8.43	4.45	2.03	0.73	0.37	0.25	0.17	0.16	0.39	0.25	0.86
42	2005	2.32	8.87	5.01	2.18	0.80	0.38	0.26	0.18	0.14	0.18	0.22	1.05
43	2006	4.65	5.35	9.39	5.88	2.00	0.78	0.40	0.27	0.21	0.70	0.42	1.74
44	2007	3.49	4.66	7.44	2.50	0.86	0.40	0.28	0.19	0.14	0.14	0.18	0.60
45	2008	1.99	2.97	2.78	1.43	0.54	0.28	0.20	0.15	0.12	0.49	0.31	0.83
46	2009	1.95	5.27	6.42	2.59	0.88	0.40	0.27	0.19	0.14	0.16	0.88	1.51

Anexo 2

Registro Histórico de Caudales

Estación PEH-9

Latitud: 14° 26' 10.34" Sur

Longitud: 71° 49' 28.45" Oeste

Elevación: 3873 m.s.n.m.

Departamento: Cusco

Provincia: Chumbivilcas

Distrito: Velille

N°	Año	Caudal Promedio Mensual (m ³ /s)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
47	2010	5.36	5.62	4.94	3.48	0.96	0.43	0.29	0.20	0.15	0.14	0.21	1.13
48	2011	3.81	8.78	9.82	5.31	1.44	0.59	0.37	0.24	0.24	0.18	0.67	1.17
49	2012	4.68	12.26	9.03	4.15	1.23	0.53	0.33	0.22	0.27	0.29	0.63	3.53
50	2013	6.25	9.90	6.78	2.26	0.88	0.49	0.38	0.25	0.26	0.48	0.55	2.15
51	2014	5.20	8.22	4.90	2.93	0.92	0.43	0.31	0.20	0.32	0.50	0.30	2.12
52	2015	7.21	7.31	8.28	3.40	1.15	0.49	0.32	0.23	0.16	0.14	0.15	1.94
53	2016	2.60	13.36	5.09	2.15	0.81	0.44	0.33	0.28	0.19	0.19	0.16	0.41
54	2017	2.07	3.36	6.39	4.04	1.16	0.50	0.30	0.21	0.19	0.26	0.34	0.61
55	2018	3.58	8.25	7.46	2.64	0.98	0.48	0.33	0.24	0.15	0.38	0.47	0.31
Máximo		7.21	15.09	11.54	6.50	2.04	1.09	0.50	0.52	1.23	1.32	1.12	3.53
Promedio		3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Mínimo		1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28

Fuente:

Información obtenida de la Línea Base de la UM Constanca (Hatch Asociados S.A., 2019)

Anexo 3

Método del Caudal Referencial – ANA

m	p(%)	Caudal Promedio Mensual (m ³ /s)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1.82	7.21	15.09	11.54	6.50	2.04	1.09	0.50	0.52	1.23	1.32	1.12	3.53
2	3.64	6.50	13.80	11.30	6.50	2.00	0.78	0.42	0.39	0.70	1.16	0.89	2.56
3	5.45	6.25	13.36	10.01	6.00	1.82	0.67	0.40	0.39	0.50	1.03	0.88	2.44
4	7.27	6.02	12.26	9.82	5.88	1.61	0.66	0.40	0.38	0.44	1.02	0.78	2.15
5	9.09	5.41	11.49	9.79	5.31	1.60	0.66	0.39	0.37	0.35	0.75	0.68	2.13
6	10.91	5.36	10.93	9.65	5.18	1.44	0.65	0.38	0.36	0.35	0.74	0.67	2.12
7	12.73	5.20	10.47	9.39	4.95	1.42	0.60	0.38	0.35	0.34	0.70	0.67	2.09
8	14.55	5.09	10.02	9.32	4.75	1.42	0.60	0.37	0.31	0.32	0.69	0.63	2.09
9	16.36	4.78	9.90	9.29	4.73	1.40	0.60	0.36	0.28	0.32	0.67	0.62	1.94
10	18.18	4.73	8.87	9.23	4.40	1.39	0.59	0.35	0.28	0.27	0.61	0.61	1.74
11	20.00	4.72	8.78	9.16	4.31	1.32	0.59	0.35	0.27	0.26	0.50	0.60	1.68
12	21.82	4.68	8.69	9.03	4.15	1.32	0.57	0.34	0.27	0.26	0.49	0.55	1.60
13	23.64	4.65	8.43	8.48	4.04	1.31	0.56	0.34	0.27	0.26	0.48	0.52	1.51
14	25.45	4.43	8.35	8.30	3.86	1.29	0.56	0.34	0.26	0.24	0.47	0.50	1.42
15	27.27	4.41	8.25	8.28	3.79	1.23	0.55	0.33	0.25	0.23	0.40	0.49	1.40
16	29.09	4.27	8.22	8.25	3.71	1.23	0.53	0.33	0.25	0.22	0.39	0.48	1.37
17	30.91	4.07	7.56	8.05	3.63	1.22	0.51	0.33	0.24	0.21	0.38	0.47	1.35
18	32.73	3.83	7.45	7.82	3.61	1.17	0.50	0.33	0.24	0.21	0.38	0.46	1.28
19	34.55	3.81	7.32	7.51	3.50	1.16	0.50	0.33	0.24	0.20	0.30	0.46	1.17
20	36.36	3.60	7.31	7.48	3.49	1.15	0.50	0.33	0.24	0.19	0.29	0.45	1.15
21	38.18	3.58	6.46	7.46	3.48	1.15	0.49	0.33	0.24	0.19	0.29	0.42	1.15
22	40.00	3.49	6.36	7.46	3.46	1.15	0.49	0.32	0.23	0.19	0.29	0.41	1.13
23	41.82	3.25	6.30	7.44	3.40	1.14	0.49	0.32	0.23	0.19	0.29	0.35	1.13
24	43.64	3.21	6.19	7.42	3.25	1.12	0.49	0.32	0.23	0.19	0.26	0.34	1.09

Anexo 3

Método del Caudal Referencial – ANA

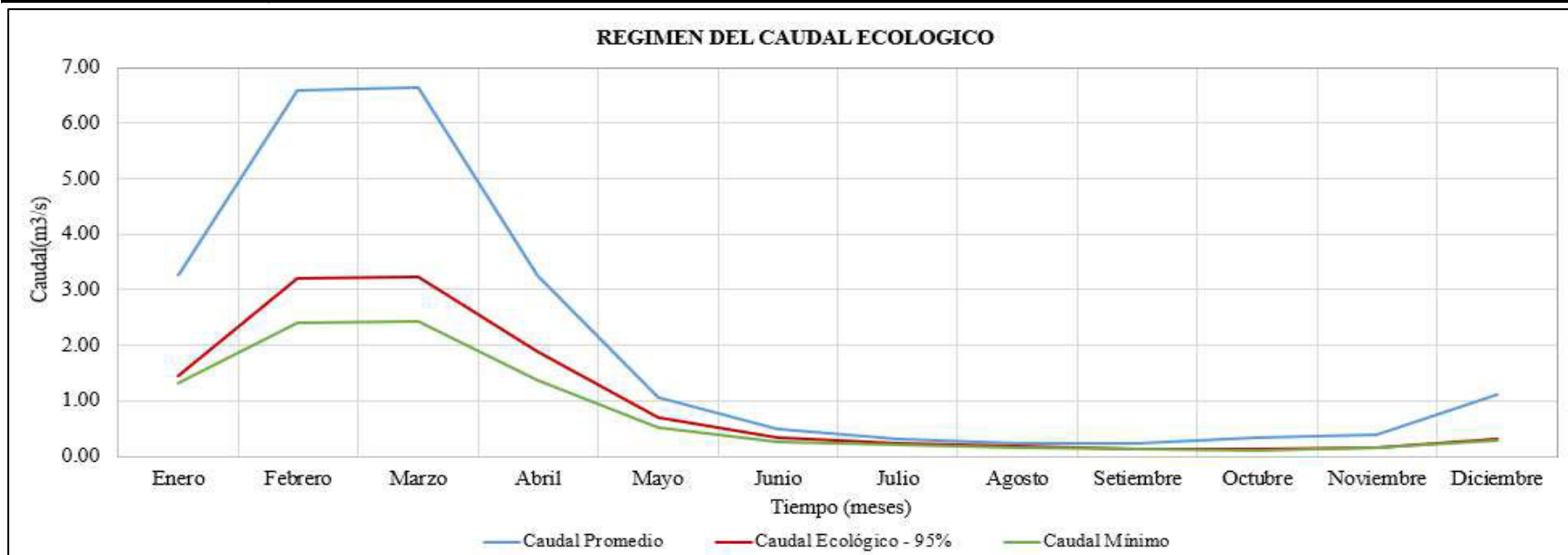
25	45.45	3.16	6.17	7.24	3.22	1.08	0.48	0.32	0.22	0.19	0.26	0.32	1.07
26	47.27	3.13	6.16	7.07	3.19	1.07	0.48	0.31	0.22	0.19	0.24	0.32	1.05
27	49.09	2.99	5.99	6.78	3.06	1.06	0.48	0.31	0.22	0.19	0.22	0.32	0.99
28	50.91	2.97	5.87	6.42	2.97	1.02	0.47	0.31	0.21	0.19	0.21	0.31	0.94
29	52.73	2.82	5.78	6.39	2.93	0.98	0.47	0.31	0.21	0.18	0.19	0.30	0.93
30	54.55	2.73	5.65	6.36	2.91	0.96	0.44	0.31	0.21	0.18	0.19	0.30	0.86
31	56.36	2.69	5.62	5.93	2.82	0.95	0.44	0.30	0.21	0.18	0.18	0.30	0.83
32	58.18	2.60	5.40	5.83	2.64	0.93	0.43	0.29	0.21	0.18	0.18	0.29	0.80
33	60.00	2.50	5.35	5.79	2.59	0.92	0.43	0.28	0.21	0.17	0.18	0.28	0.78
34	61.82	2.32	5.27	5.37	2.56	0.88	0.42	0.28	0.21	0.17	0.18	0.28	0.75
35	63.64	2.30	5.14	5.30	2.50	0.88	0.41	0.28	0.21	0.16	0.18	0.27	0.74
36	65.45	2.20	5.13	5.09	2.49	0.87	0.40	0.27	0.20	0.16	0.18	0.26	0.72
37	67.27	2.17	5.07	5.06	2.45	0.86	0.40	0.27	0.20	0.16	0.17	0.25	0.70
38	69.09	2.07	4.77	5.01	2.44	0.86	0.39	0.27	0.20	0.16	0.17	0.25	0.69
39	70.91	2.06	4.72	5.01	2.44	0.85	0.39	0.26	0.19	0.16	0.17	0.25	0.64
40	72.73	2.00	4.66	4.99	2.40	0.83	0.39	0.26	0.19	0.16	0.17	0.22	0.61
41	74.55	2.00	4.59	4.94	2.36	0.83	0.38	0.26	0.19	0.15	0.16	0.21	0.60
42	76.36	1.99	4.34	4.90	2.32	0.81	0.38	0.26	0.19	0.15	0.16	0.21	0.60
43	78.18	1.95	4.09	4.90	2.26	0.81	0.38	0.26	0.19	0.15	0.16	0.21	0.58
44	80.00	1.94	4.02	4.89	2.18	0.80	0.38	0.26	0.18	0.15	0.16	0.20	0.50
45	81.82	1.92	3.83	4.70	2.18	0.80	0.38	0.26	0.18	0.15	0.16	0.20	0.47
46	83.64	1.85	3.81	4.45	2.15	0.77	0.37	0.26	0.18	0.14	0.15	0.19	0.42
47	85.45	1.80	3.72	4.37	2.15	0.76	0.37	0.26	0.18	0.14	0.15	0.18	0.42
48	87.27	1.73	3.70	4.31	2.11	0.75	0.37	0.25	0.18	0.14	0.15	0.18	0.41
49	89.09	1.68	3.54	4.25	2.11	0.75	0.36	0.24	0.18	0.14	0.14	0.18	0.40
50	90.91	1.61	3.37	3.88	2.03	0.73	0.35	0.24	0.18	0.14	0.14	0.17	0.37

Anexo 3

Método del Caudal Referencial – ANA

51	92.73	1.50	3.36	3.78	2.01	0.73	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.17	0.36
52	94.55	1.45	3.29	3.29	1.95	0.71	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
53	96.36	1.45	2.97	3.10	1.73	0.66	0.34	0.23	0.17	0.13	0.14	0.16	0.31
54	98.18	1.45	2.96	2.78	1.43	0.54	0.28	0.21	0.15	0.13	0.13	0.15	0.29
55	100.00	1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28

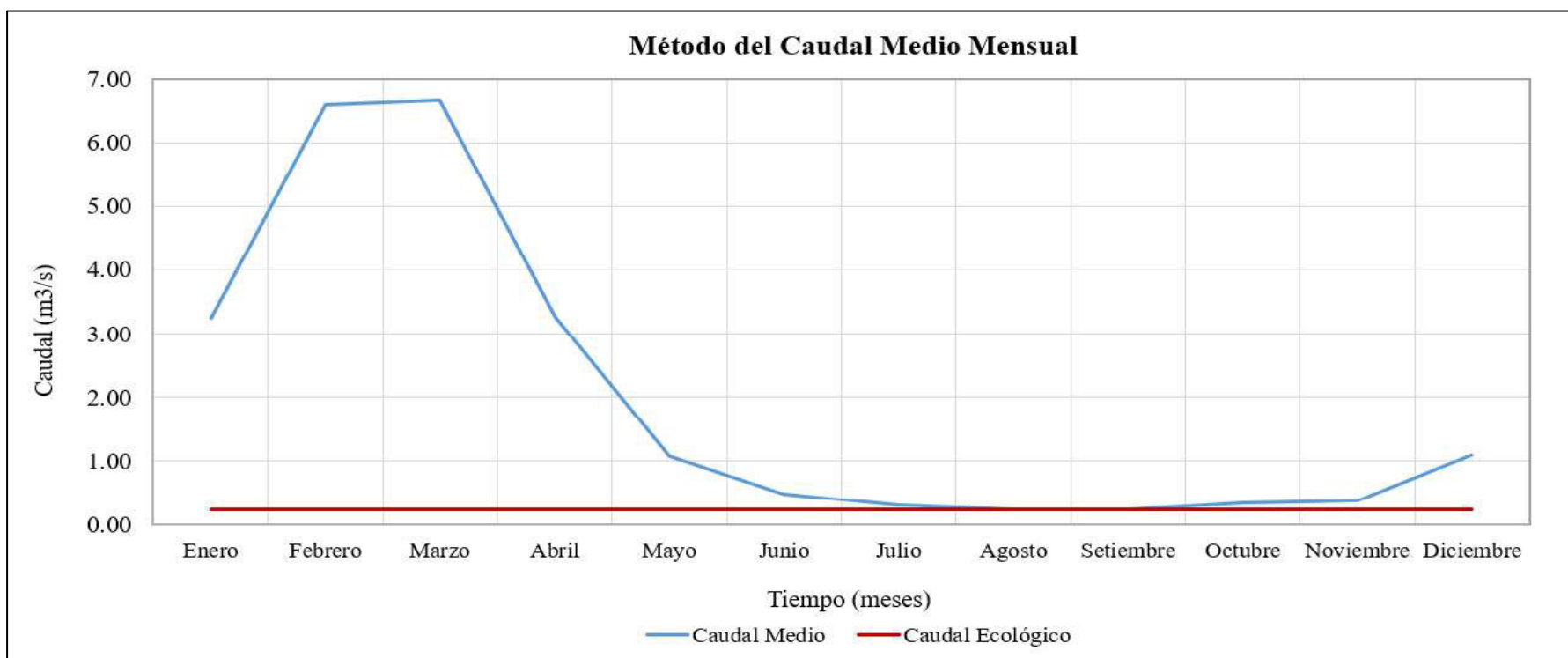
Tipo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Promedio (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Qe(95%) (m ³ /s)	1.45	3.21	3.24	1.89	0.70	0.35	0.24	0.17	0.14	0.14	0.16	0.32
Caudal Mínimo (m ³ /s)	1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28



Anexo 4

Método del Caudal Medio Mensual

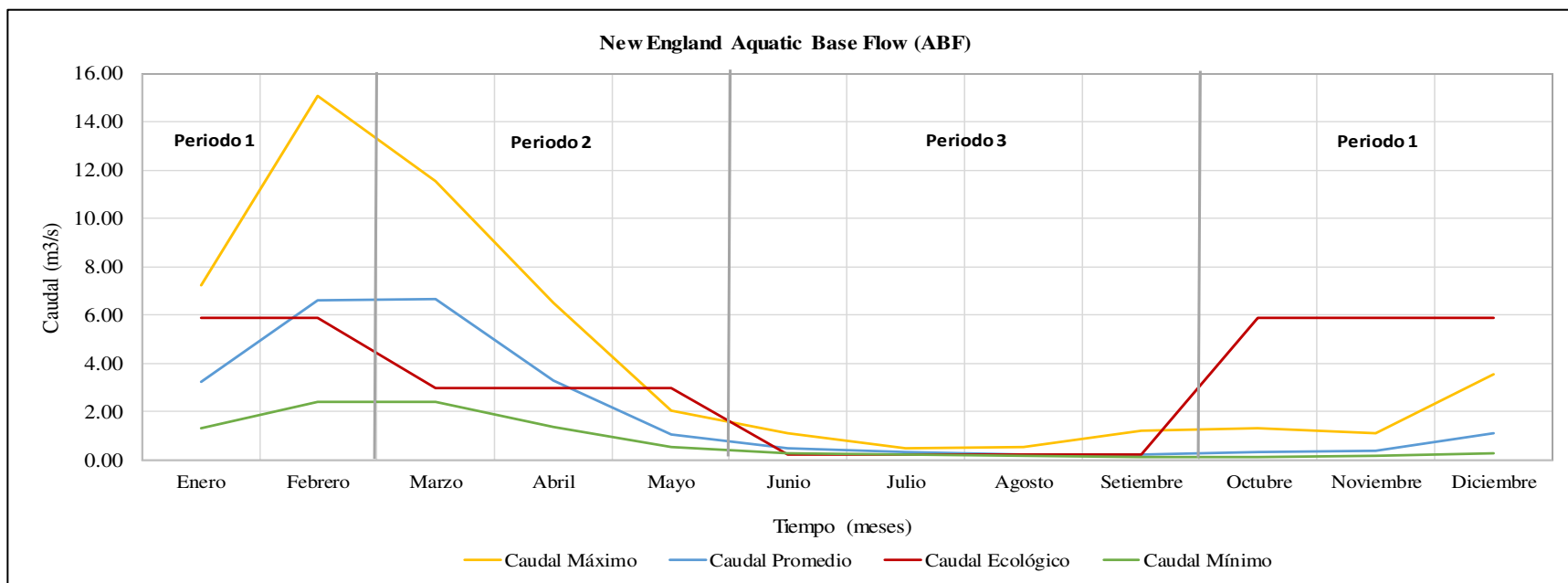
Tipo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Medio (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Caudal Ecológico (m ³ /s)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23



Anexo 5

Método New England Aquatic Base Flow (ABF)

Tipo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Mediana (m ³ /s)	2.97	5.87	6.42	2.97	1.02	0.47	0.31	0.21	0.19	0.21	0.31	0.94
Caudal Mínimo (m ³ /s)	1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28
Caudal Ecológico (m ³ /s)	5.87	5.87	2.97	2.97	2.97	0.21	0.21	0.21	0.21	5.87	5.87	5.87
Caudal Promedio (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Caudal Máximo (m ³ /s)	7.21	15.09	11.54	6.50	2.04	1.09	0.50	0.52	1.23	1.32	1.12	3.53



Anexo 6

Método de Rafael Heras

N°	Año	Caudal Promedio Mensual (m ³ /s)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1	1964	2.73	3.81	7.24	2.56	1.23	0.66	0.28	0.19	0.14	0.14	0.30	0.47	0.16
2	1965	1.45	2.41	4.37	2.36	0.75	0.35	0.24	0.17	0.50	0.19	0.21	2.44	0.30
3	1966	3.83	10.93	4.25	1.95	0.93	0.38	0.26	0.18	0.18	0.74	0.61	1.42	0.21
4	1967	1.31	5.14	9.65	3.49	1.17	0.50	0.33	0.21	0.44	0.29	0.21	0.75	0.31
5	1968	2.69	6.19	4.89	2.91	0.95	0.44	0.32	0.19	0.18	0.16	0.32	0.36	0.17
6	1969	1.85	4.09	3.10	2.49	0.77	0.34	0.23	0.18	0.15	0.22	0.89	1.09	0.18
7	1970	4.27	7.56	4.31	2.18	0.83	0.36	0.26	0.18	0.13	0.38	0.26	2.13	0.19
8	1971	4.07	6.46	5.37	2.44	0.80	0.39	0.26	0.18	0.14	0.12	0.15	0.72	0.13
9	1972	3.25	3.70	8.30	3.22	1.15	0.47	0.34	0.20	0.19	0.21	0.48	1.37	0.20
10	1973	4.73	10.02	11.54	6.00	1.60	0.66	0.40	0.39	0.32	0.18	0.67	0.93	0.29
11	1974	3.13	7.45	7.82	3.63	1.31	0.60	0.33	0.37	0.19	0.15	0.16	0.28	0.17
12	1975	1.45	4.72	5.79	3.71	2.04	0.60	0.32	0.39	0.22	0.40	0.46	2.09	0.31
13	1976	6.50	5.13	4.90	2.32	0.81	0.38	0.26	0.36	0.35	0.17	0.18	0.60	0.23
14	1977	1.61	5.65	5.06	2.44	0.83	0.39	0.27	0.18	0.19	0.24	1.12	1.28	0.20
15	1978	6.02	4.59	3.88	2.11	0.73	0.35	0.24	0.17	0.18	0.30	0.41	0.69	0.20
16	1979	2.20	3.37	5.93	2.40	0.87	0.39	0.26	0.18	0.14	0.18	0.35	0.70	0.17
17	1980	1.45	2.96	8.05	2.45	0.86	0.41	0.27	0.21	0.26	0.17	0.20	0.58	0.21
18	1981	2.00	5.87	7.07	3.46	1.12	0.48	0.31	0.24	1.23	1.16	0.49	0.40	0.34
19	1982	1.68	6.16	5.83	2.82	1.02	0.42	0.28	0.19	0.15	1.32	0.52	0.37	0.21
20	1983	1.94	8.35	4.70	2.11	0.76	0.37	0.26	0.21	0.21	0.61	0.32	0.42	0.23
21	1984	2.50	6.36	6.36	3.61	1.29	0.50	0.31	0.21	0.16	1.02	0.25	1.60	0.23
22	1985	3.16	10.47	8.25	3.86	1.42	0.55	0.34	0.24	0.19	0.16	0.19	0.32	0.18
23	1986	2.17	3.83	9.16	6.50	1.82	0.67	0.38	0.26	0.23	0.18	0.17	2.09	0.19
24	1987	4.72	7.32	3.29	1.73	0.66	0.38	0.24	0.27	0.20	0.16	0.32	0.42	0.21
25	1988	2.06	3.54	9.23	6.50	1.61	0.65	0.39	0.25	0.18	0.29	0.62	0.94	0.24
26	1989	2.30	4.77	11.30	4.31	1.42	0.59	0.36	0.38	0.34	0.26	0.29	0.29	0.28
27	1990	1.92	4.34	5.30	2.01	0.71	0.35	0.24	0.27	0.19	0.17	0.50	2.56	0.21

Anexo 6

Método de Rafael Heras

28	1991	5.41	5.07	7.51	4.73	1.22	0.51	0.33	0.21	0.15	0.16	0.27	0.50	0.18
29	1992	1.50	3.29	2.42	1.37	0.52	0.27	0.21	0.15	0.13	0.14	0.28	1.15	0.14
30	1993	2.97	3.72	4.99	2.97	1.07	1.09	0.42	0.31	0.26	1.03	0.45	0.99	0.33
31	1994	4.43	11.49	9.29	4.40	1.32	0.56	0.35	0.23	0.17	0.13	0.46	0.78	0.18
32	1995	2.00	5.40	7.48	3.79	1.14	0.49	0.32	0.35	0.35	0.69	0.30	1.40	0.34
33	1996	2.99	5.99	5.01	2.15	0.75	0.37	0.26	0.22	0.19	0.15	0.28	1.07	0.19
34	1997	3.60	8.69	7.42	3.19	1.06	0.47	0.31	0.22	0.16	0.17	0.20	0.74	0.18
35	1998	3.21	4.02	3.78	3.06	0.85	0.38	0.26	0.28	0.14	0.29	0.25	0.80	0.22
36	1999	1.80	6.30	8.48	3.50	1.15	0.48	0.31	0.21	0.16	0.75	0.60	1.15	0.23
37	2000	4.78	15.09	7.46	3.25	1.08	0.49	0.33	0.21	0.16	0.18	0.17	1.13	0.17
38	2001	2.82	5.78	9.32	4.75	1.32	0.56	0.34	0.23	0.17	0.15	0.18	0.64	0.17
39	2002	1.73	13.80	10.01	5.18	1.39	0.60	0.50	0.24	0.19	0.47	0.78	1.68	0.30
40	2003	5.09	6.17	9.79	4.95	1.40	0.57	0.35	0.52	0.70	0.67	0.68	1.35	0.48
41	2004	4.41	8.43	4.45	2.03	0.73	0.37	0.25	0.17	0.16	0.39	0.25	0.86	0.20
42	2005	2.32	8.87	5.01	2.18	0.80	0.38	0.26	0.18	0.14	0.18	0.22	1.05	0.16
43	2006	4.65	5.35	9.39	5.88	2.00	0.78	0.40	0.27	0.21	0.70	0.42	1.74	0.29
44	2007	3.49	4.66	7.44	2.50	0.86	0.40	0.28	0.19	0.14	0.14	0.18	0.60	0.16
45	2008	1.99	2.97	2.78	1.43	0.54	0.28	0.20	0.15	0.12	0.49	0.31	0.83	0.16
46	2009	1.95	5.27	6.42	2.59	0.88	0.40	0.27	0.19	0.14	0.16	0.88	1.51	0.16
47	2010	5.36	5.62	4.94	3.48	0.96	0.43	0.29	0.20	0.15	0.14	0.21	1.13	0.16
48	2011	3.81	8.78	9.82	5.31	1.44	0.59	0.37	0.24	0.24	0.18	0.67	1.17	0.22
49	2012	4.68	12.26	9.03	4.15	1.23	0.53	0.33	0.22	0.27	0.29	0.63	3.53	0.26
50	2013	6.25	9.90	6.78	2.26	0.88	0.49	0.38	0.25	0.26	0.48	0.55	2.15	0.30
51	2014	5.20	8.22	4.90	2.93	0.92	0.43	0.31	0.20	0.32	0.50	0.30	2.12	0.28
52	2015	7.21	7.31	8.28	3.40	1.15	0.49	0.32	0.23	0.16	0.14	0.15	1.94	0.15
53	2016	2.60	13.36	5.09	2.15	0.81	0.44	0.33	0.28	0.19	0.19	0.16	0.41	0.18
54	2017	2.07	3.36	6.39	4.04	1.16	0.50	0.30	0.21	0.19	0.26	0.34	0.61	0.22
55	2018	3.58	8.25	7.46	2.64	0.98	0.48	0.33	0.24	0.15	0.38	0.47	0.31	0.24


Anexo 6

Método de Rafael Heras

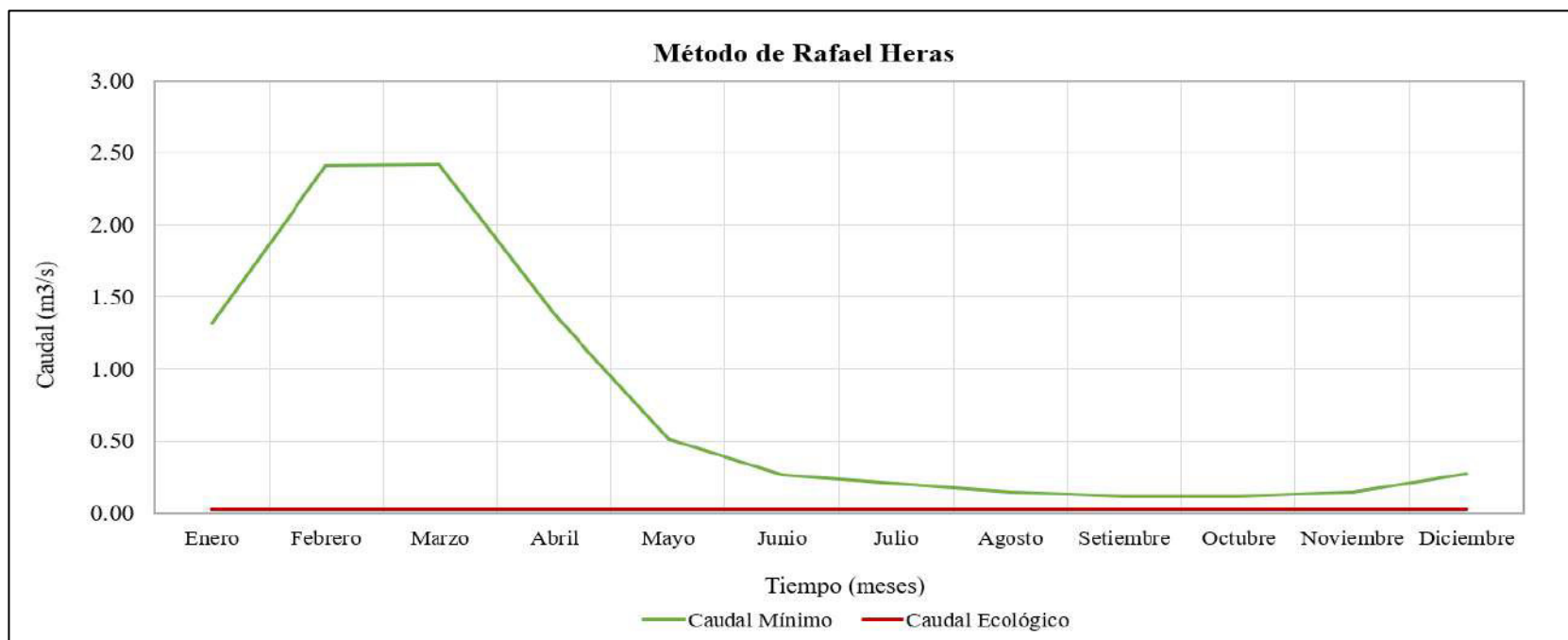
Notas:

Información obtenida de la Línea Base de la UM Constanca (Hatch Asociados S.A., 2019)

En el año 1971 se presenta el año crítico

 Valores Mínimos del Año

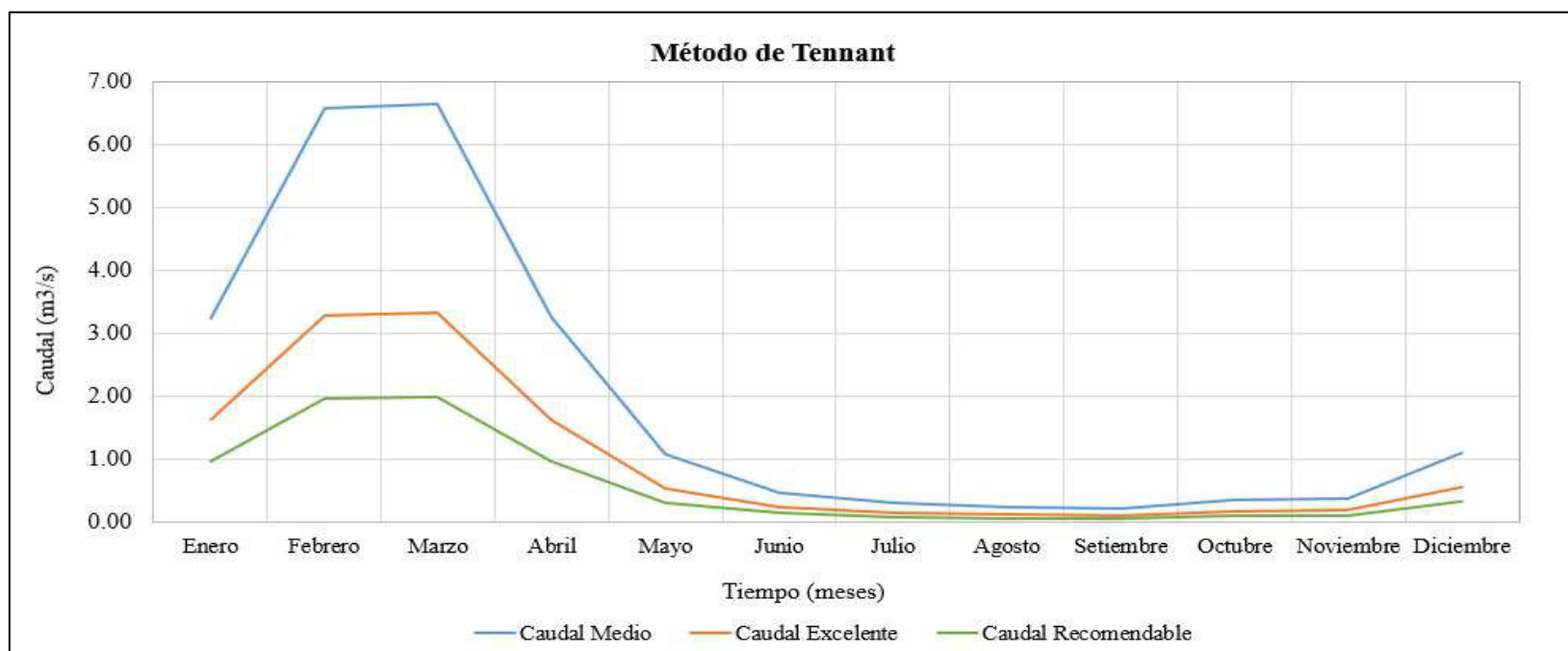
Tipo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Mínimo (m3/s)	1.31	2.41	2.42	1.37	0.52	0.27	0.20	0.15	0.12	0.12	0.15	0.28
Caudal Ecológico (m3/s)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03



Anexo 7

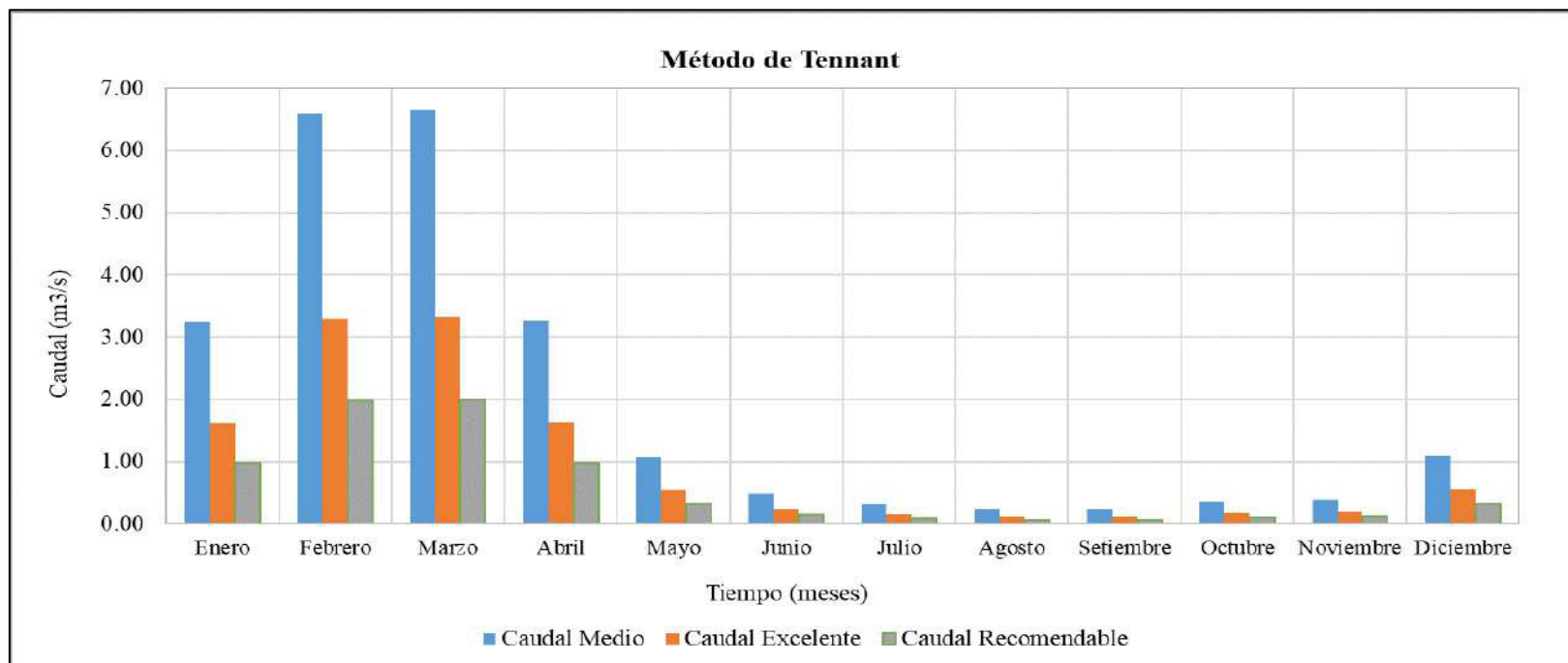
Método de Tennant

Tipo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Caudal Medio (m ³ /s)	3.25	6.59	6.66	3.27	1.07	0.48	0.31	0.24	0.23	0.35	0.39	1.10
Caudal Excelente (0.5*Q) (m ³ /s)	1.63	3.30	3.33	1.63	0.54	0.24	0.15	0.12	0.12	0.17	0.19	0.55
Caudal Recomendable (0.3*Q) (m ³ /s)	0.98	1.98	2.00	0.98	0.32	0.14	0.09	0.07	0.07	0.10	0.12	0.33



Anexo 7

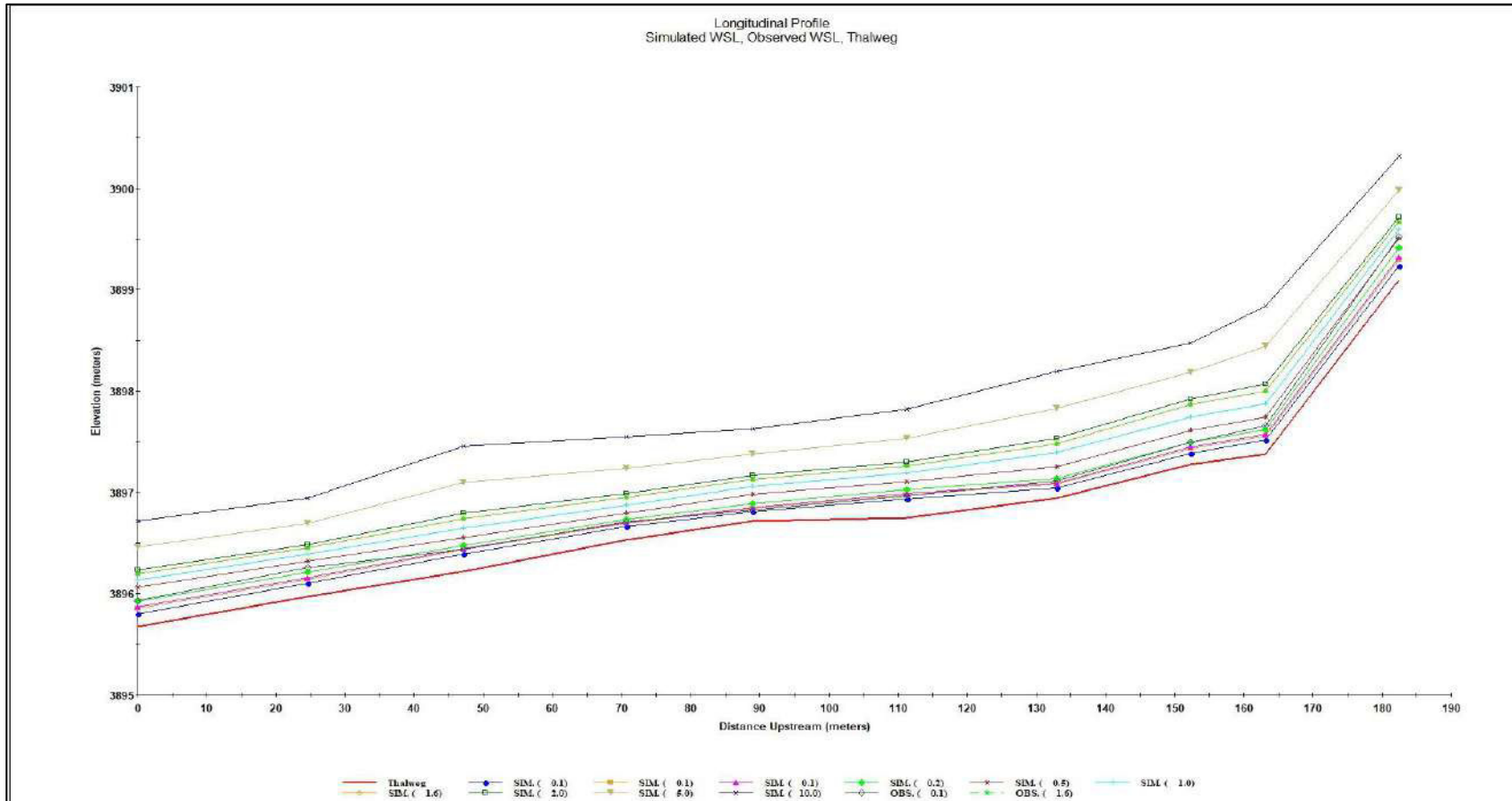
Método de Tennant



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

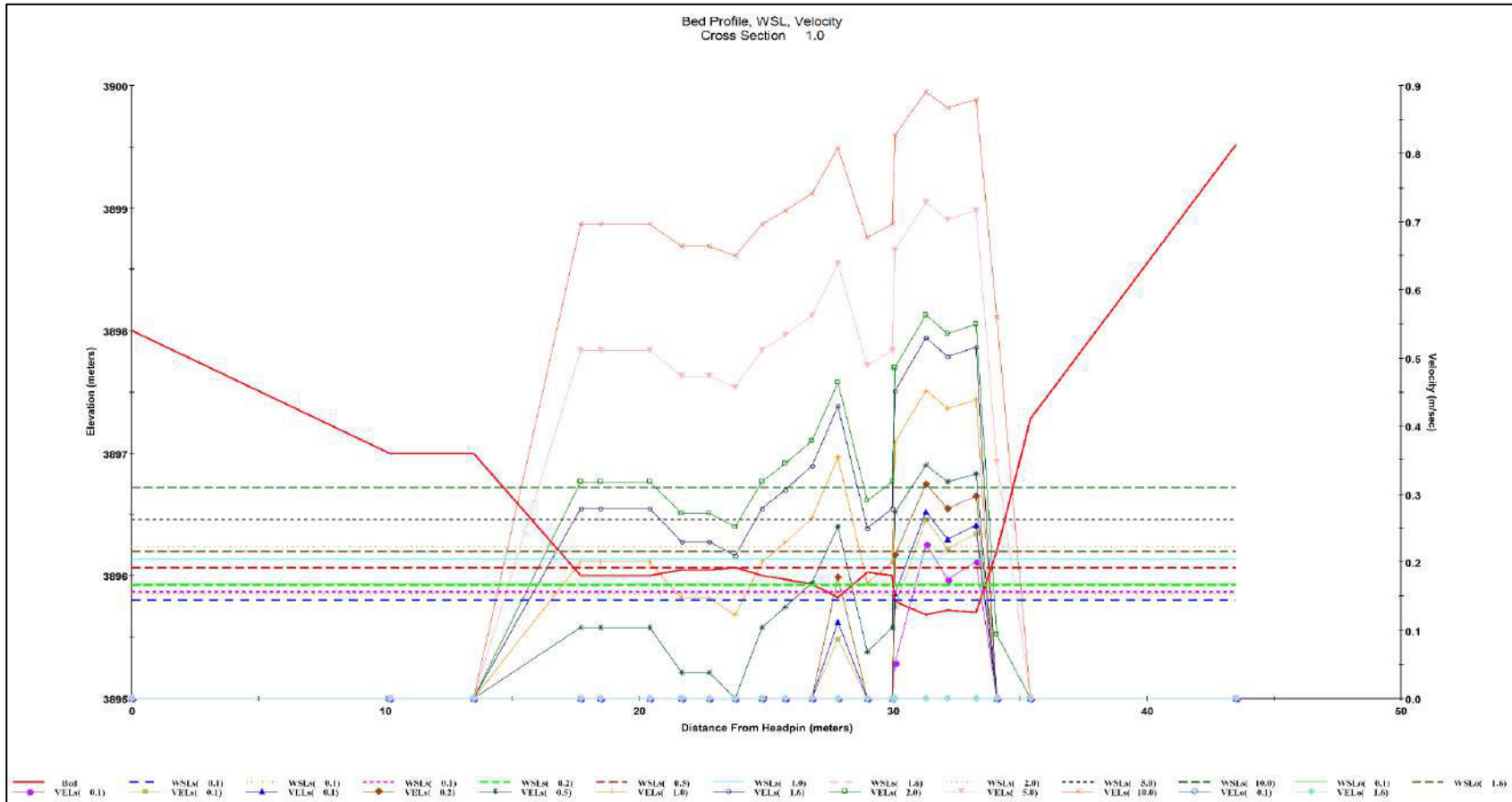
Gráfico 1: Perfil Longitudinal de los WSL Simulados, WSI Observado y Thalweg



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

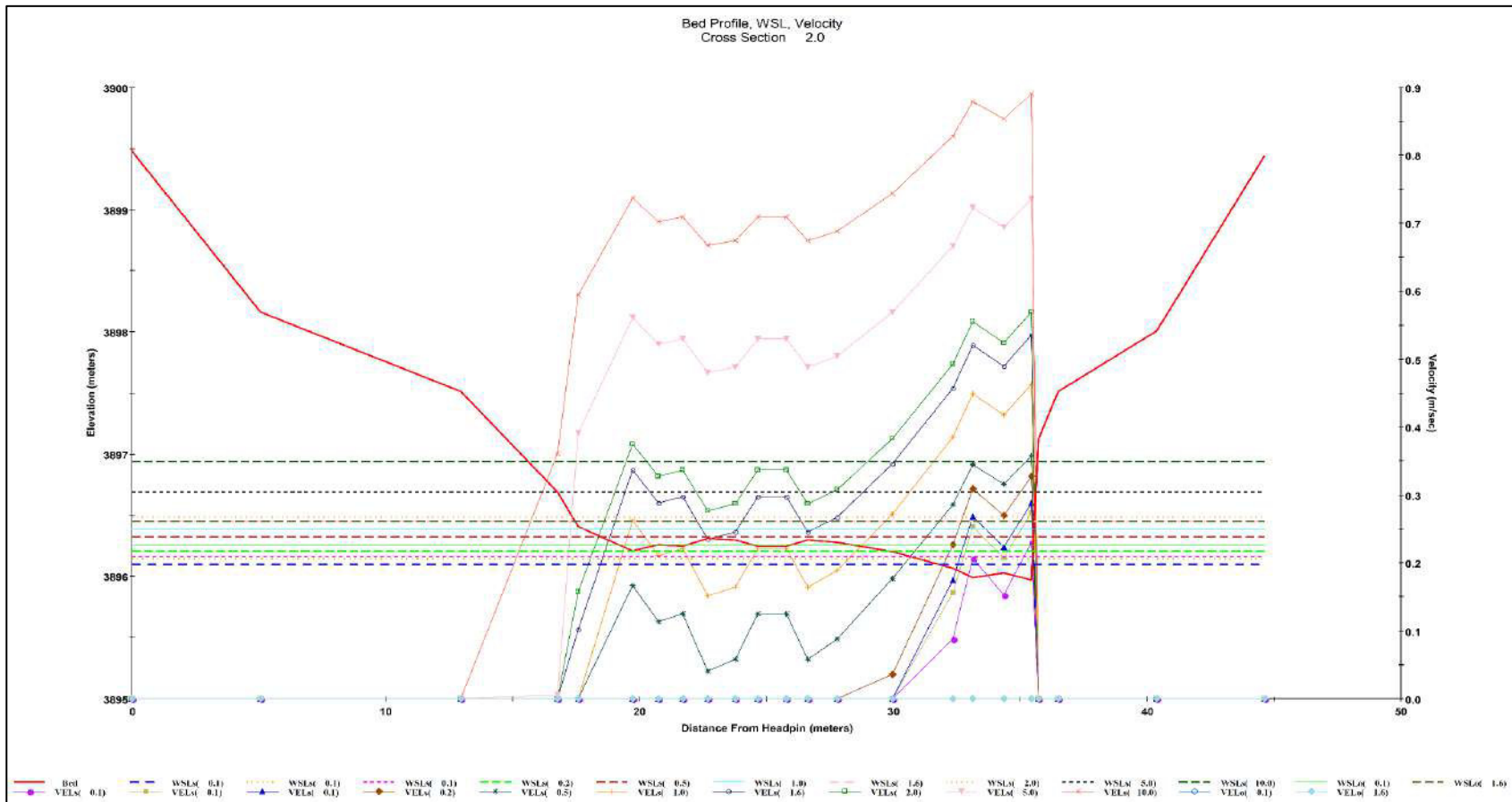
Gráfico 2: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-1 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

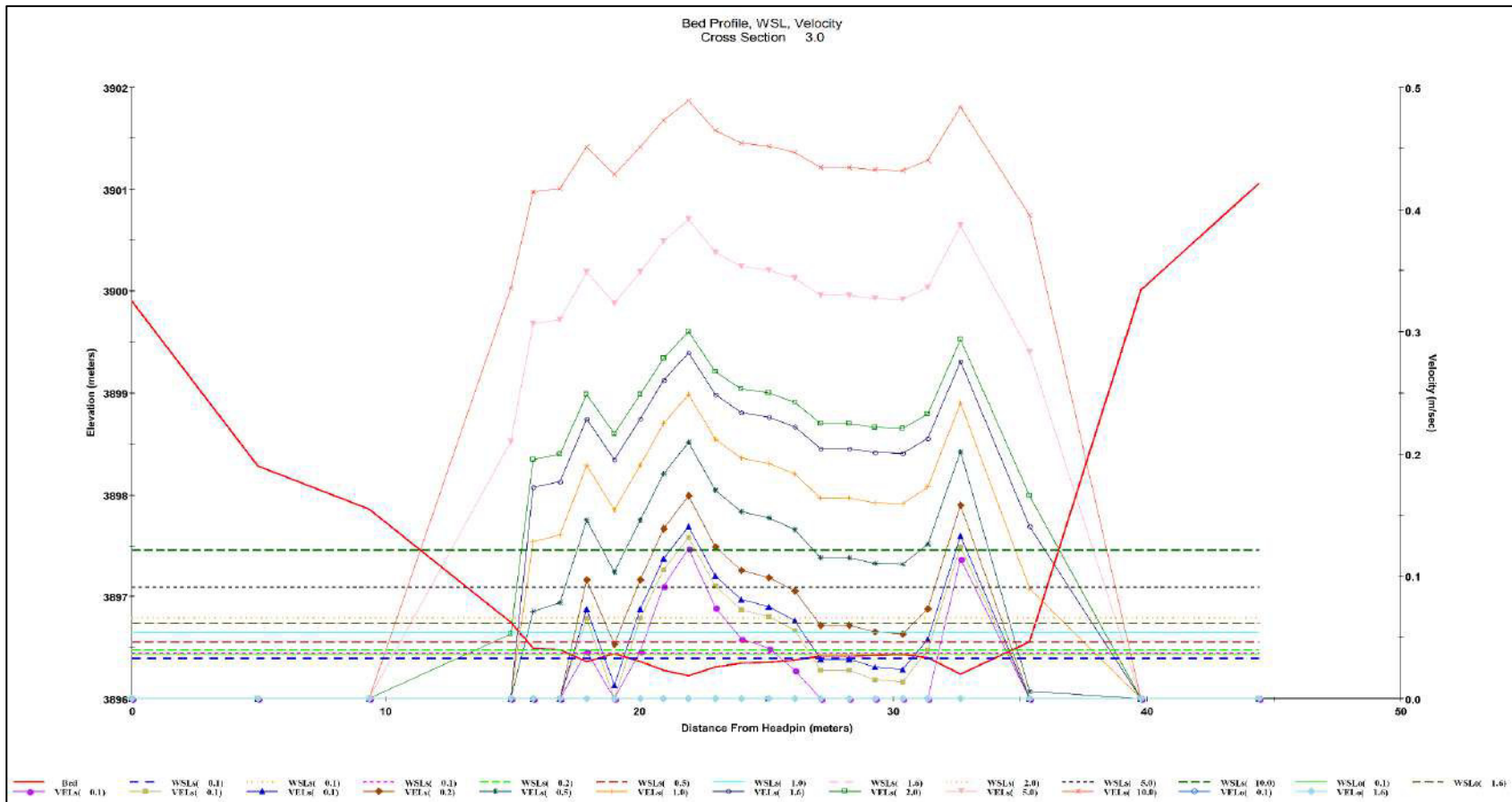
Gráfico 3: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-2 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

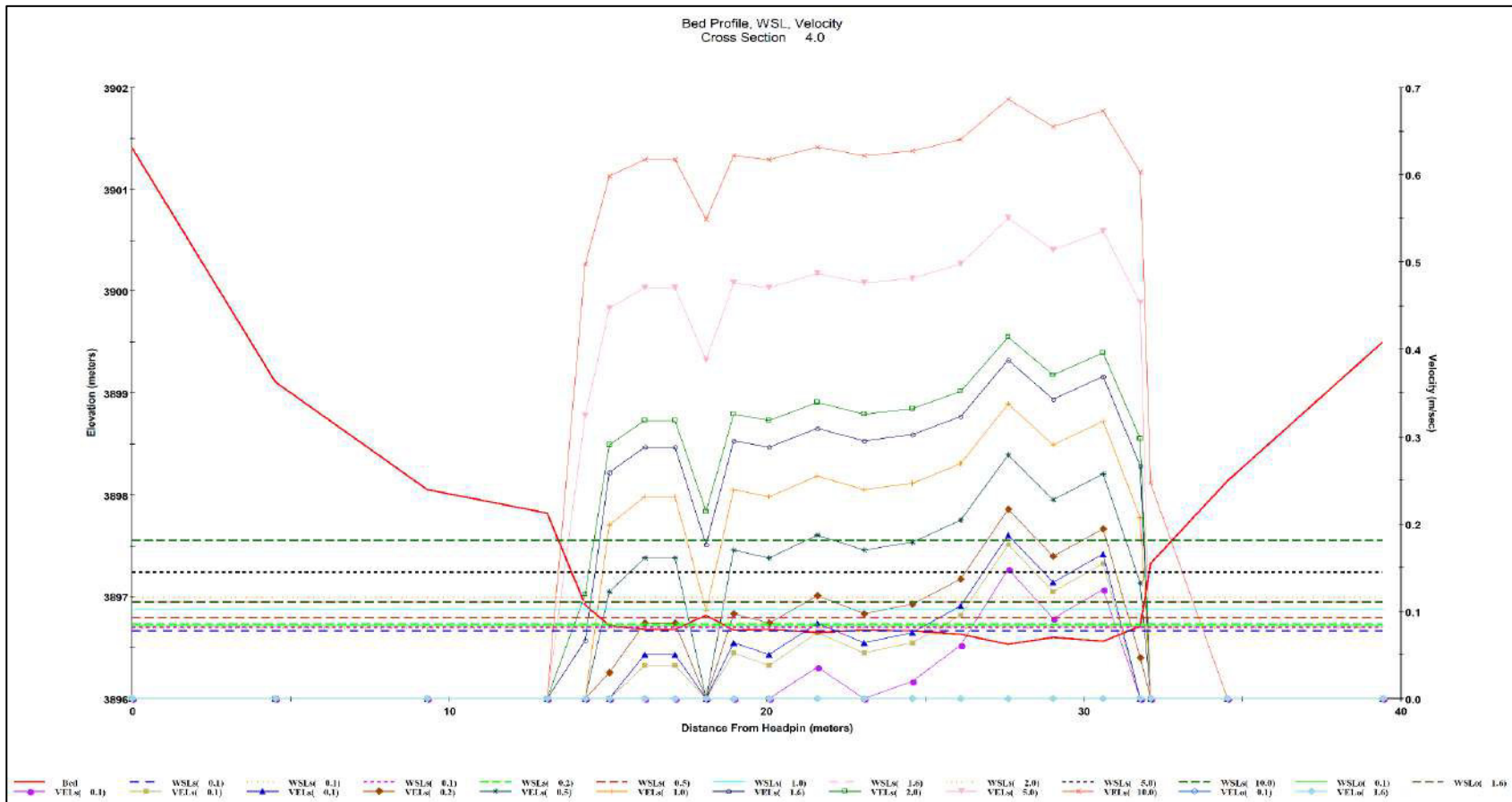
Gráfico 4: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-3 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

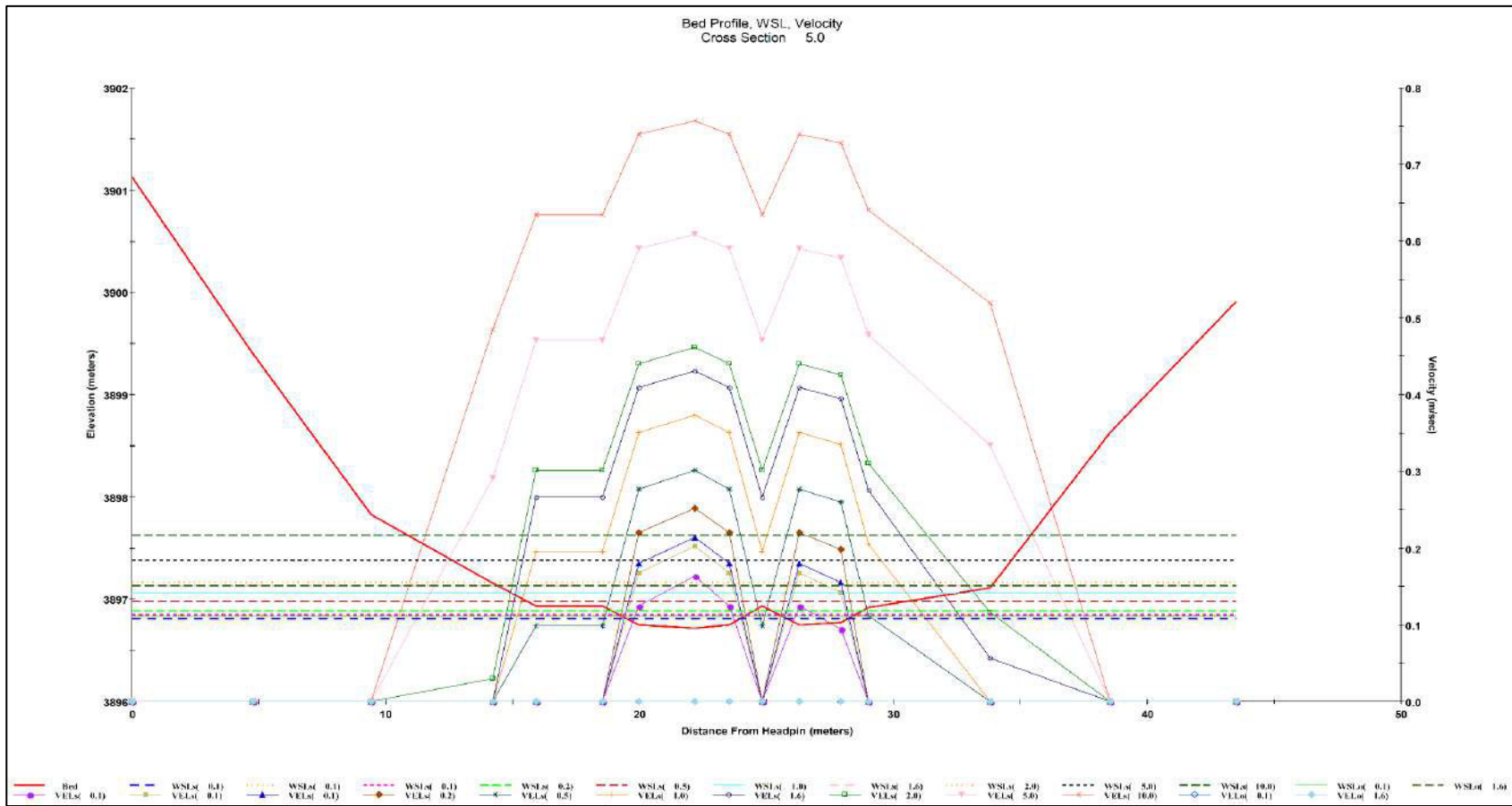
Gráfico 5: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-4 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

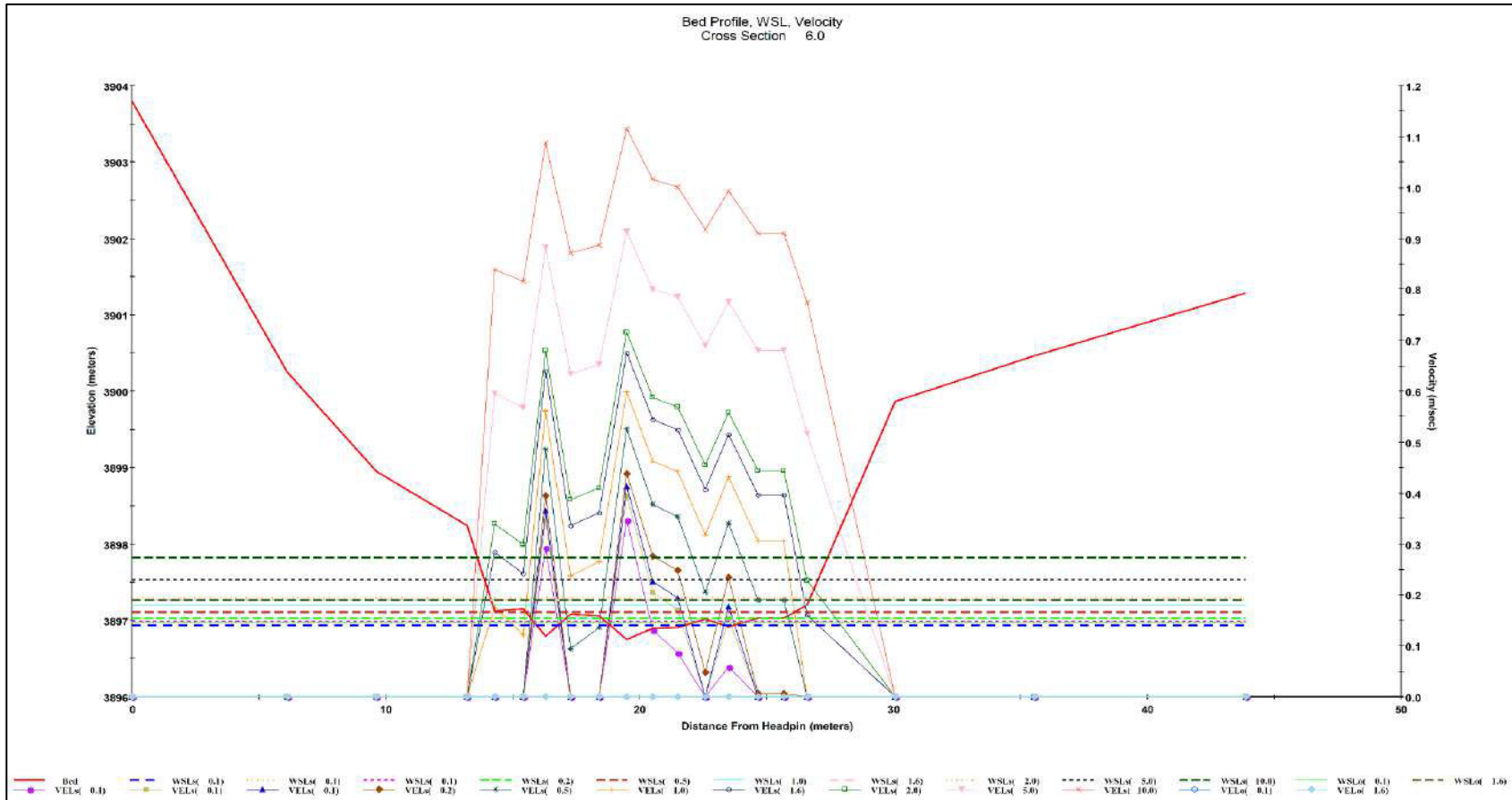
Gráfico 6: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-5 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

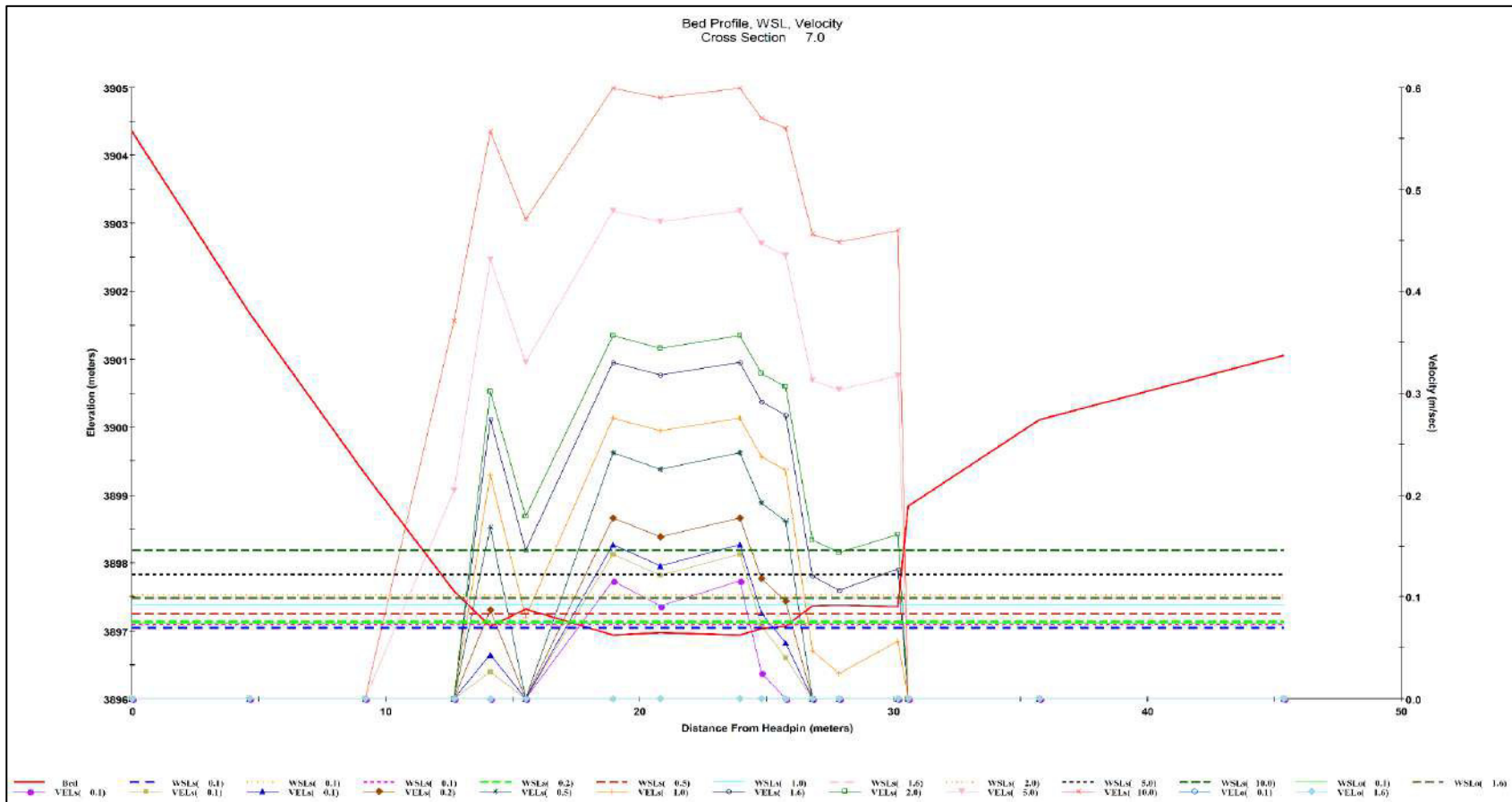
Gráfico 7: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-6 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

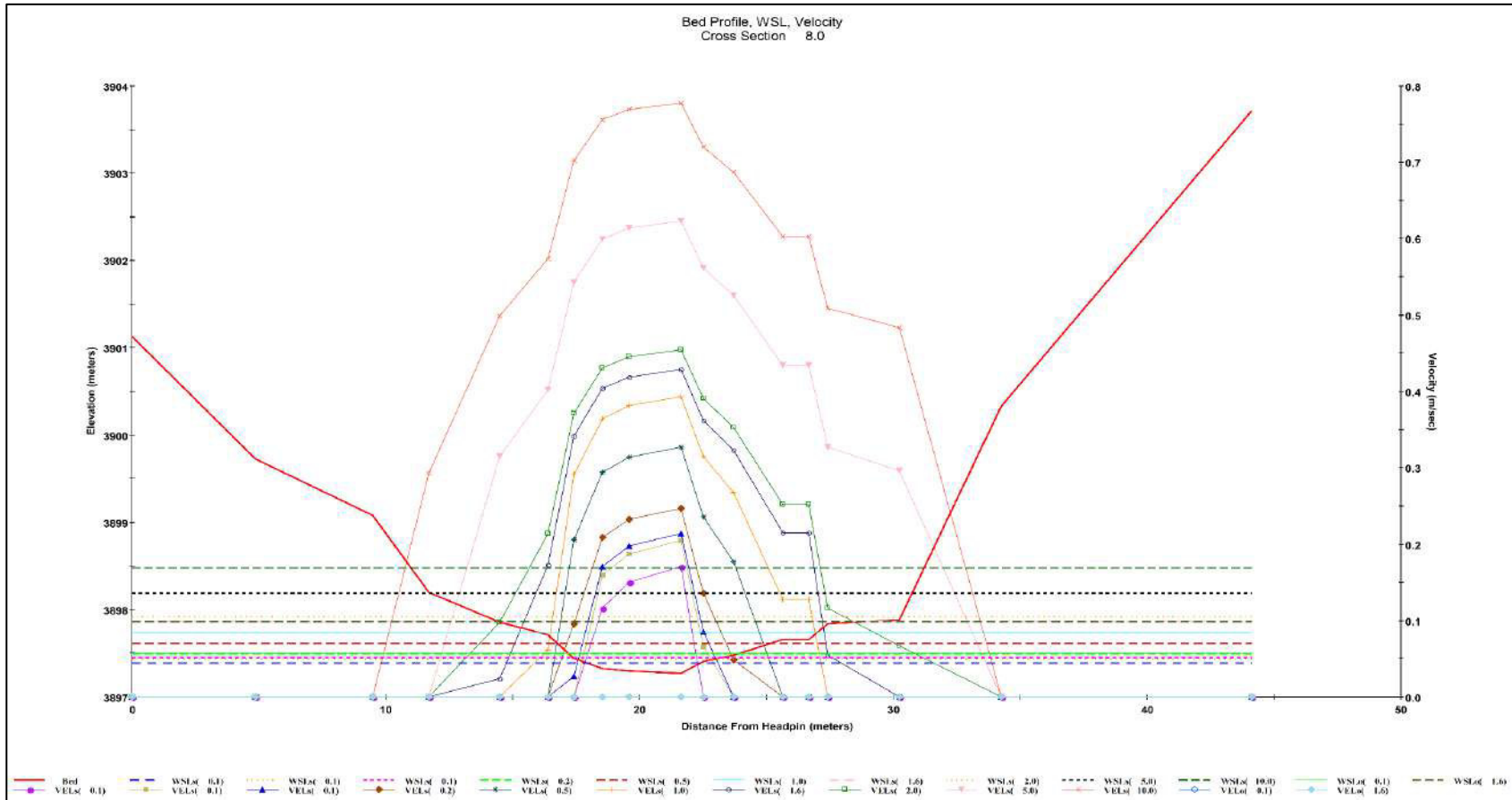
Gráfico 8: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-7 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

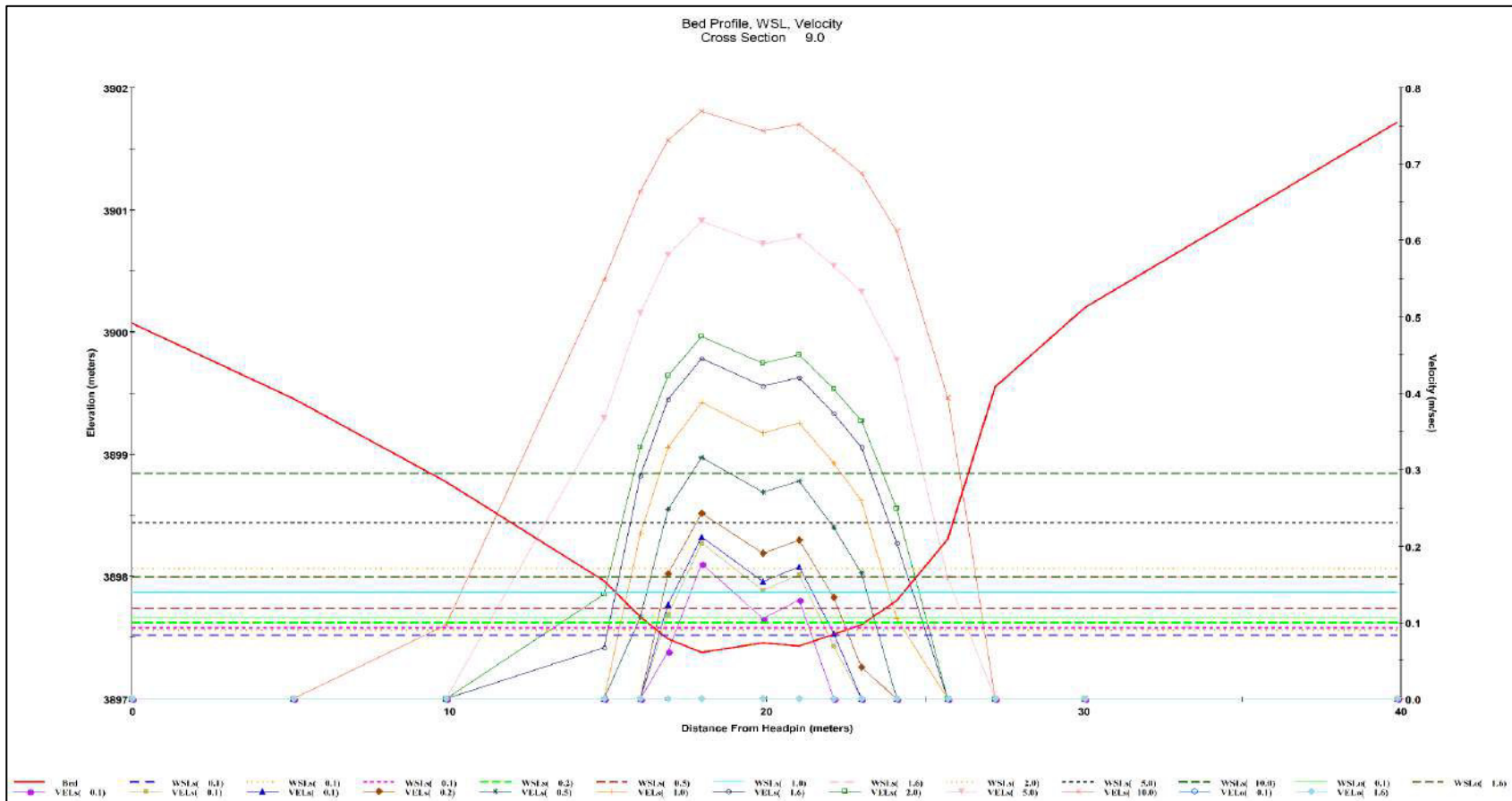
Gráfico 9: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-8 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

Gráfico 10: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-9 de la Estación RC-05



Anexo 8

Resultados del Programa PHABSIM

Gráfico 11: Perfil del Lecho de Río. WSL y Velocidad en la Sección Transversal T-10 de la Estación RC-05

