UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**Cálculo del caudal ecológico usando los métodos hidrológicos, hidráulicos y
simulación de hábitat en la cuenca del Río Rímac**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Araujo Delgado, Luis Fernando (0000-0002-8674-3045)

Sarmiento Soto, Anyelo José (0000-0002-6602-4780)

ASESOR

Ingol Blanco, Eusebio Mercedes (0000-0002-0421-399X)

Lima, 16 de enero de 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por darme la vida y estar siempre conmigo, guiándome en mi camino. A mis padres y mi hermano por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Anyelo José Sarmiento Soto.

Este trabajo de investigación está dedicada a mis padres, tíos(as), primos(as) y en especial a mi Abuela que con gran esfuerzo, amor y dedicación han hecho este sueño, realidad. Gracias por su apoyo, paciencia y dedicación incondicional a lo largo de mi vida universitaria.

Luis Fernando Araujo Delgado.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha contado con el apoyo incondicional de Dr. Eusebio Ingol Blanco, por ello queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento por su asesoramiento así también aplaudimos su dedicación en la investigación y la docencia.

RESUMEN

Esta investigación aborda el análisis, evaluación y aplicación de los métodos para determinar el caudal ecológico en la cuenca del río Rímac. Se desarrollaron de manera directa los métodos hidrológicos, hidráulicos y simulación de hábitat, y de manera general, se analizaron los otros métodos existentes.

Por un lado, el método hidrológico describe un procedimiento, realizando diversos tratamientos estadísticos de la serie de caudales naturales representativos (análisis de series temporales, caudales históricos, temperaturas mínimas y máximas, etc.) Por otro lado, para el método hidráulico se eligió un tramo crítico y se realizó una caracterización general de la zona en estudio, se desarrolló un levantamiento topográfico, en conjunto con las mediciones hidráulicas (área, profundidad, perímetro mojado, etc.) y el caudal en secciones transversales representativas, clasificadas por su sensibilidad biótica. De igual manera, con la modelación del hábitat acuático, se utiliza modelos hidráulicos unidimensionales, de profundidades y velocidades, cuyas simulaciones en las secciones transversales representativas se relacionan de una manera adecuada con los criterios de preferencia de las principales variables hidrobiológicas que determinan el hábitat para los diferentes organismos y sus estados de vida, en este caso la especie es el pejerrey de río.

Los resultados indican que, para el método hidrológico los caudales ecológicos obtenidos se adecuan a la realidad del río Rímac y cumplen la presión hídrica para diferentes puntos de la cuenca como Río Blanco, San Mateo, Santa Eulalia y Chosica. Asimismo, el método hidráulico y de simulación de hábitat aseguran un caudal ecológico óptimo aguas abajo de Chosica, siempre y cuando se reduzca las fuentes de contaminación existentes.

Palabras clave: caudal ecológico; simulación de hábitat; perímetro mojado; presión hídrica

Calculation of ecological flow using hydrological, hydraulic and habitat simulation
methods in the Rimac River basin

ABSTRACT

This research address with the analysis, evaluation and application of the methods to determine the ecological flow in the Rimac river basin. Hydrological, hydraulic and habitat simulation methods were developed directly, and in general, the other existing methods are analyzed.

On the one hand, the hydrological method describes a procedure, performing various statistical treatments of the series of representative natural flows (analysis of time series, historical flows, minimum and maximum temperatures, etc.) On the other hand, for the hydraulic method a critical section was chosen and a general characterization of the study area was carried out, a topographic survey was developed, together with the hydraulic measurements (area, depth, wet perimeter, etc.) and the flow in cross sections representative, classified by their biotic sensitivity. Similarly, with the modeling of the aquatic habitat, one-dimensional hydraulic models of depths and velocities are used, whose simulations in the representative cross-sections are related in an adequate way with the preference criteria of the main hydro-biological variables that determine the habitat for the different organisms and their states of life, in this case the species is the river silverside.

The results indicate that, for the hydrological method, the ecological flows obtained are adapted to the reality of the Rimac River and meet the water pressure for different points of the basin such as Río Blanco, San Mateo, Santa Eulalia and Chosica. Likewise, the hydraulic and habitat simulation method ensures an optimal ecological flow downstream of Chosica, as long as the existing sources of contamination are reduced.

Keywords: ecological flow; habitat simulation; wet perimeter; water pressure

TABLA DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO: GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 OBJETIVOS	3
1.5.1 Objetivo General.....	3
1.5.2 Objetivos Específicos	3
1.6 METODOLOGÍA	3
1.7. RESULTADOS ESPERADOS.....	5
2 CAPÍTULO: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	6
2.1. SITUACIÓN HÍDRICA DEL PERÚ	6
2.1.1. Principales Fuentes de Agua en el Perú.....	7
2.1.2. Gestión del Agua en el Perú	7
2.1.3. Instrumentos de Gestión de Recursos Hídricos	8
2.1.3.1. Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.....	8
2.1.3.2 Plan Nacional de Recursos Hídricos.....	9
2.2. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SUS DEFINICIONES.	10
2.3. METODOS EXISTENTES.	13
2.3.1. Métodos Hidrológicos	13
2.3.1.1. Método de Hoppe	13
2.3.1.2. Método de Tennant	14
2.3.1.3. Método del Caudal base de 7 días con Periodo de Ocurrencia de 10 años (7Q10).....	14
2.3.1.4. Método de la Curva de Excedencia	14
2.3.2. Métodos Hidráulico.	15
2.3.2.1 Método de Perímetro Mojado.	15
2.3.2.2. Método de Variación Hidráulica.	15
2.3.2.3. Método Life.	15
2.3.3. Método de Simulación de Hábitats.....	16
2.3.3.1. Método de Incremento de Caudal (IFIM).....	16
2.3.3.2. Método de Simulación Física de Hábitat (PHASBIM)	16
2.3.4. Métodos Holísticos.	16

2.3.4.1. Método de Building Block -Aproximación Bottom-up.....	17
2.3.4.2. Método de Benchmarking - Aproximación Topdown.....	17
2.3.4.3. Método de Caudal de Garantía Ambiental (EPM)	17
2.4. ESTUDIOS DESARROLLADOS EN OTROS PAISES.....	18
2.4.1. Método Ecuatoriano.....	18
2.4.2. Método Escoces.	18
2.4.3. Método Suizo.....	18
2.4.4. Método Asturiano.	19
2.4.5. Método Vasco.....	19
2.5. ESTUDIOS DESARROLLADOS EN EL PERÚ.....	19
2.6. COMPARACIÓN DE MÉTODOS.	20
2.7. MARCO LEGAL SOBRE CAUDAL ECOLÓGICO.....	22
2.7.1. Real Decreto Legislativo 1/2001 ley de aguas de España.	22
2.7.2. Reglamento de Chile para determinar el caudal ecológico mínimo.	23
2.7.3. Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.	24
2.7.3.1. Especificaciones Generales.	24
2.7.3.2. Metodologías para el cálculo de régimen de caudal ecológico.	25
2.7.4. Normativa de Perú sobre metodologías para la determinación del Caudal Ecológico.	25
2.7.4.1. Criterios Generales	26
2.7.4.2. Criterios Especiales	26
2.8. PROBLEMAS EN SU APLICACIÓN.....	28
2.8.1. España.....	28
2.8.2. Chile.....	29
2.8.3. México	30
2.8.4 Perú	30
2.9. CALIDAD DEL AGUA	31
2.9.1 Fuentes de contaminación.....	31
2.9.2 Estándares de calidad.....	34
3 CAPÍTULO: LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	38
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	38
3.1.1. Estaciones de aforo	40
3.2. DATOS DE LA CUENCA DEL RIO EN ESTUDIO	42
3.2.1. Caracterización geomorfológica de la cuenca	42

3.2.1.1 Área (A)	42
3.2.1.2 Perímetro (P).....	42
3.2.1.3 Longitud del río principal (L)	42
3.2.1.4 Ancho promedio de la cuenca (Ap)	43
3.2.1.5 Índice de compacidad (Kc)	43
3.2.1.6 Rectángulo Equivalente (RE)	44
3.2.1.7 Curva hipsométrica	44
3.2.1.8 Pendiente media de la cuenca	45
3.2.1.9 Coeficiente de torrencialidad (Ct).....	46
3.2.1.10 Tipo de corriente	46
3.2.1.11 Densidad de drenaje.....	46
3.2.1.12 Extensión media del escurrimiento superficial (E).....	47
3.2.2. Geología.....	47
3.2.3. Suelo	48
3.2.3.1 Suelo fértil	48
3.2.3.2 Suelo infértil	48
3.2.3.3 Suelos Solonchaks	48
3.2.3.4 Andosoles	48
3.2.3.5 Yermosoles	49
3.2.3.6 Xerosoles	49
3.2.4. Entorno ecológico	49
3.3. SERIES HISTÓRICAS DE CAUDALES NATURALES	50
3.3.1. Estación Chosica.....	52
3.3.2. Precipitación y Tratamiento de la Información.	53
3.3.3. Modelación Hidrológica con WEAP	55
3.3.3.1. Descripción del Software WEAP.	55
3.3.3.2. Método de lluvia escorrentía (Método humedad del suelo)	55
3.3.3.3. Uso de suelo y cobertura vegetal	59
3.3.3.4. Características del software Hydraccess.....	61
3.3.3.5. Descripción del método Vector Regional	62
3.3.3.6. Precipitación Media.	66
3.3.3.7. Factor del cultivo (Kc).....	67
3.3.3.8. Modelo hidrológico de la Cuenca del Rímac con WEAP	69
3.4. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL TRAMO DE RÍO.....	78

3.5. MEDICIONES HIDRÁULICAS	79
3.5.1. Medición de velocidad de caudal.....	79
3.6. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	81
3.7. EVALUACION DE LA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL.....	84
3.8. EVALUACION DEL ESTADO DE LAS CONDICIONES HIDROBIOLOGICAS	85
3.9. EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA	86
3.10. IDENTIFICACION DE LA IMPORTANCIA SOCIAL, ECONOMICA Y ECOLOGICA DEL ECOSISTEMA ACUATICO Y LAS PLANICIES DE INUNDACION	88
4 CAPÍTULO: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
4.1. ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS.....	89
4.1.1 Descripción Método Hidrológico	90
4.1.1.1 Métodos Hidrológicos	90
4.1.3. Método Hidráulico	100
4.1.3.1. Descripción del Método Hidráulico.....	100
4.1.3.2 Procesamiento Topográfico	101
4.1.3.3. Modelamiento HEC-RAS	104
4.1.3.4. Ecología y Vegetación	105
4.1.3.5. Definición del modelo hidráulico	105
4.1.3.6. Calibración del modelo hidráulico.....	117
4.1.3.7. Resultados de la aplicación del método hidráulico.....	120
4.1.4. METODO DE SIMULACION DE HABITAT	126
4.1.4.1 Descripción del Método Simulación de Hábitat	126
4.1.4.2. Modelo PHABSIM	126
4.1.4.3. Bases del modelo	127
4.1.4.4. Procesos de simulación	127
4.1.4.5. Selección de las secciones transversales y recolección de datos del terreno	128
4.1.4.6. Selección de la especie representativa	130
4.1.4.7. Curvas de preferencia	131
4.1.4.8. Modelación hidráulica	134
4.1.4.9. Modelación del hábitat	135
4.2. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	136
4.2.1. Método hidrológico.	136

4.2.2. Método hidráulico.....	137
4.2.3. Método Simulación de hábitat	138
4.3. DISCUSIÓN	144
4.3.1 Balance hídrico en la cuenca del Rio Rímac.	149
4.4. PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL CALCULO DE CAUDAL ECOLOGICO	153
4.5 CONDICIONES PARA EL MANTENIMIENTO DEL CAUDAL ECOLOGICO	158
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	159
5.1 CONCLUSIONES	159
5.2 RECOMENDACIONES	162
6. REFERENCIAS.	164
7. ANEXOS.	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1. Disponibilidad Hídrica por cada Vertiente. Fuente: Ministerio de Agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012).	6
Tabla II-2. Distribución de las Fuentes de agua. Fuente: Ministerio de agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012)	7
Tabla II-3. Definiciones sobre Caudal Ecológico. Fuente: Estimación del caudal ecológico en la vertiente anexa a la parroquia de cangagua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de Pisambilla que garantice la sustentabilidad de la zona 19. ...	12
Tabla II-4. Tipos de contaminantes principales (fuentes de contaminación). Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.	33
Tabla II-5. ECA-Agua según parámetros y clasificación del cuerpo de agua. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.	35
Tabla II-6. Parámetros que exceden los ECA-Agua en la cuenca del río Rímac. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.	37
Tabla III-1. Estaciones con datos históricos de caudales, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Fuente Propia.	41
Tabla III-2. Estaciones con datos históricos de caudales, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Fuente Propia.	51
Tabla III-3. Caudales Mensuales en la estación Chosica, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).	52
Tabla III-4. Data de las Estaciones de precipitaciones (mm) con datos históricos por año, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).	54
Tabla III-5. Correlación de las estaciones con el Vector Regional. Fuente Propia.	64
Tabla III-6. Completación y homogenización de datos en la estación de Santa Eulalia. Fuente Propia. *Color rojo: completados.	65
Tabla III-7. Precipitación media mensual de la subcuenca Santa Eulalia. Fuente Propia.	67
Tabla III-8. Área de cada subcuenca de la vertiente del río Rímac. Fuente propia.	68
Tabla III-9. Factor de uso consultivo Kc. Fuente: Evapotranspiración de cultivo, Estudio FAO riego y drenaje. Exercise weap, Center of research in Water Resource. Soil Texture, FAO.	69
Tabla III-10. Caudales simulados de la estación Sheque. Fuente propia.	70
Tabla III-11. Caudales simulados de la estación Río Blanco. Fuente propia.	71
Tabla III-12. Caudales simulados de la estación San Mateo. Fuente propia.	71

Tabla III-13. Valores Referenciales del criterio de Nash. Fuente: Molnar, 2011.	73
Tabla III-14. Valores Referenciales del criterio de Shultz. Fuente: Molnar, 2011.	73
Tabla III-15. Resultado de la prueba de bondad de ajuste para el modelo hidrológico mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el criterio de Schultz y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE).....	74
Tabla III-16. Parámetros de calibración del modelo lluvia escorrentía (humedad del suelo). Fuente: Juan Puigdefábregas, Estación Experimental de Zonas Aridas (CSIC) (2001), Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009), PhD. Daene McKinney, Center for Reserch in Water Resources (2005), Duque Yaguache et al. (2015).	77
Tabla IV-1. Tabla de pendientes obtenidas del levantamiento topográfico, en el Civil 3D.	102
Tabla IV-2. Tabla de resultados del tramo en estudio del río Rímac para un caudal de 4.16 m ³ /s	112
Tabla IV-3. Tabla de resultados obtenidos del software Hec-Ras de un tramo del río Rímac para un caudal de 4.33m ³ /s	117
Tabla IV-4. Tabla de Manning calibrado del software Hec-Ras, en el tramo del río Rímac.	120
Tabla IV-5. Resultados de caudal ecológico por el método de perímetro mojado y profundidad.....	125
Tabla IV-6. Métodos de caudal ecológico que se aplican a la cuenca del río Rímac...	137
Tabla IV-7. Disponibilidad hídrica al 75% de persistencia en la cuenca del río Rímac. Fuente: Autoridad Nacional del Agua.	150
Tabla IV-8. Balance hídrico de la cuenca del río Rímac (estación Chosica).	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Distribución de contaminantes por afluente. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto de Restauración del Río Rímac.	34
Figura 3-1: Cuenca del río Rímac y su río principal. Fuente propia	38
Figura 3-2: Cuenca del río Rímac y subcuencas. Fuente propia.	39
Figura 3-3: Cuenca del río Rímac, subcuencas y lagunas. Fuente: Autoridad Nacional del Agua.	40
Figura 3-4: Cuenca del río Rímac con las estaciones Hidrométricas y climatológicas. Fuente propia.	42
Figura 3-5: Curva hipsométrica de la cuenca del río Rímac. Fuente: Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú. .	45
Figura 3-6: Entorno ecológico y cobertura Vegetal en la cuenca Rímac. Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2016).....	50
Figura 3-7: Elementos hidrológicos del modelo humedad de suelo en WEAP. Fuente: SEI (Stockholm Environment Institute).	56
Figura 3-8: Uso de suelo en la cuenca del río Rímac. Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2015).	60
Figura 3-9: Vector regional ajustada por correlación para tratamiento de la información. Fuente propia.	63
Figura 3-10: Suma de índices anuales del Vector y de las Estaciones. Fuente propia.....	64
Figura 3-11: Subcuenca Santa Eulalia y estaciones de la cuenca en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente propia.....	66
Figura 3-12: Cuenca Rímac distribuidas por subcuenca. Fuente propia.	68
Figura 3-13: Cuenca Rímac modelada en el software WEAP. Fuente propia.	70
Figura 3-14: Cuenca Rímac modelada en el software WEAP. Fuente propia.	75
Figura 3-15: Gráfico de caudales de entrada, caudal simulado y caudal observado VS Tiempo.....	76
Figura 3-16: Tramo del Río en estudio en el mapa distrital. Fuente: Google Maps	78
Figura 3-17: Tramo del Río en estudio imagen satelital. Fuente: Google Earth	81
Figura 3-18: Secciones del terreno y curvas de nivel en civil 3D. Fuente propia.	83
Figura 4-1: Sección típico del río en el tramo de estudio. Fuente propia.....	102
Figura 4-2: Tramo en estudio con la relación de pendientes. Fuente propia.....	103
Figura 4-3: Cuenca del río Rímac con zonas contaminadas. Fuente: Digesa.....	104

Figura 4-4: Gráfica de modelación para el tramo de río en estudio, caudal de 4.166 m ³ /s. Fuente propia	107
Figura 4-5: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+020 a un caudal de 4.16 m ³ /s.	107
Figura 4-6: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+500 a un caudal de 4.16 m ³ /s.	108
Figura 4-7: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+000 a un caudal de 4.16 m ³ /s.	108
Figura 4-8: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+500 a un caudal de 4.16 m ³ /s.	109
Figura 4-9: Gráfica del río Rímac modelación en Hec-Ras para una caudal 4.33 m ³ /s. Fuente propia.	112
Figura 4-10: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+020 a un caudal de 4.33 m ³ /s.	113
Figura 4-11: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+500 a un caudal de 4.33 m ³ /s.	114
Figura 4-12: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+000 a un caudal de 4.33 m ³ /s.	114
Figura 4-13: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+500 a un caudal de 4.33 m ³ /s.	115
Figura 4-14: Representación gráfica de la sección trasversal por cada tramo mediante el cálculo de un tirante promedio.	118
Figura 4-15: Gráfica de caudal por cada perímetro mojado en la progresiva 0+500	121
Figura 4-16: Gráfica de cada caudal por cada profundidad en la progresiva 0+500.....	122
Figura 4-17: Gráfica de cada caudal por cada perímetro mojado en la progresiva 0+1000.	123
Figura 4-18: Gráfica de cada caudal por cada profundidad progresiva 0+1000.	123
Figura 4-19: Gráfica del perímetro mojado por cada caudal progresiva 1+500.....	124
Figura 4-20: Gráfica de cada tirante representado por cada caudal hallado progresiva 1+500.	125
Figura 4-21: Sección transversal en la progresiva 1+400 en el tramo de estudio, del método hidráulico y simulación de hábitat. Fuente propia.....	129

Figura 4-22: Sección transversal en la progresiva 1+420 en el tramo de estudio, del método hidráulico y simulación de hábitat. Fuente Propia.	130
Figura 4-23: Especie representativa de la zona de estudio. A: <i>Basilichthys microlepidotus</i> (Pejerrey). Fuente: Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco -Chile. (2012)	130
Figura 4-24: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características de velocidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).	131
Figura 4-25: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características profundidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).	132
Figura 4-26: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características de sustrato. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).....	132
Figura 4-27: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de velocidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).	133
Figura 4-28: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de profundidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).	133
Figura 4-29: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de sustrato. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).	134
Figura 4-30: Imagen de la cuenca del río Rímac con cada caudal ecológico calculado en la zona de estudio.	136
Figura 4-31: Gráfica del HPU (WUA por sus siglas en inglés) vs caudal para el pejerrey en la etapa juvenil.....	139
Figura 4-32: Gráfica del HPU (WUA por sus siglas en inglés) vs caudal para el pejerrey en la etapa adulto.....	140
Figura 4-33: Gráfica de la superficie libre observados y simulados, de acuerdo con los caudales del modelo.....	142
Figura 4-34: Gráfica de la distribución de velocidades por caudal, en la sección representativa. Fuente propia.....	143
Figura 4-35: Gráfica de la sección trasversal por donde transcurre los caudales, en la sección representativa. Fuente propia.....	143
Figura 4-36: Imagen del esquema hidráulico de la cuenca del río Rímac.....	151
Figura 4-37: Comparación de ofertas y demandas hídricas Cuenca del río Rímac - Estación Chosica.	152

Figura 4-38: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Hidrológico. Fuente Propia.	155
Figura 4-39: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Hidráulico. Fuente Propia.	156
Figura 4-40: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Simulación de Hábitat. Fuente Propia.	157

1 CAPÍTULO: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La creciente presión sobre los recursos hídricos, debida a un consumo muchas veces por encima del recurso disponible, ha provocado problemas de escasez de agua de diversa intensidad a lo largo del mundo. De igual manera, este incremento en el consumo de agua ha generado fuertes alteraciones en el régimen de los ríos, impactando negativamente en los ecosistemas fluviales y comprometiendo la sostenibilidad del recurso hídrico¹. Conjuntamente con la contaminación de residuos orgánicos que es un punto primordial para la degradación ambiental de flora, fauna y vida acuática. Esto motivó un interés en la búsqueda de un equilibrio entre las demandas de volúmenes de agua y sus requerimientos ambientales, siendo este un aspecto muy importante para alcanzar una adecuada optimización de los recursos hídricos; y de esta manera, conseguir un buen estado ecológico. Es aquí donde nace un término importante para la conservación del ecosistema, denominado como caudal ecológico; el cual según el Environmental Flows Network “es la cantidad, calidad y régimen o estacionalidad de flujos requeridos para sostener los ecosistemas dulceacuícolas y estuarios, así como los servicios que provee, bajo escenarios de competencia por los usos del agua”². En cuanto a su análisis se ha realizado diversas metodologías en diferentes partes del mundo ajustándose a las limitaciones geomorfológicas e hidrológicas del ambiente.

Por un lado, el último reporte emitido por la Autoridad Nacional del Agua establece ciertas metodologías y criterios para el cálculo de caudales ecológicos, esta norma tiene un ámbito de aplicación a nivel nacional y de obligación cumplimiento para aquellos proyectos de inversión que intervienen en el uso del agua, estableciendo como un caudal ecológico mínimo de 95% de persistencia del caudal promedio de dicha fuente hídrica.

Por otro lado, en nuestro país ya ha sido establecida la aplicación de una metodología para el cálculo de caudales ecológicos, según la ley 29338 de recursos hídricos, pero de una manera general. Sin embargo, se puede establecer los métodos ya estudiados en

¹ A. Chávez-Jiménez y D. González-Zeas. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. Revista Iberoamericana del Agua. Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid.

² Global Environmental Flows Network. (2000). Recuperado. (<http://www.eflownet.org/viewinfo.cfm?linkcategoryid=18&linkid=85&siteid=2&FuseAction=display>)

diferentes países y tratar de adaptarlos según las características ambientales, geomorfológicas, climáticas que representan cada río del Perú. En este sentido, el presente proyecto de investigación intenta desarrollar y aplicar tres métodos para calcular el caudal ecológico en el río Rímac, en función del uso del recurso, la calidad de afluentes e información hidrométrica y meteorológica.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Si bien la Autoridad Nacional del agua ha establecido ciertos criterios para determinar una caudal ecológico referencial (ANA, 2016), actualmente en el Perú no existe un método específico definido para calcular el Caudal Ecológico en los ríos, siendo este de gran importancia para mantener y conservar los ecosistemas localizados en el cauce de los ríos. Así también, en la ANA (Autoridad Nacional del Agua) y el Ministerio del Ambiente, organismos encargados de establecer los caudales de agua necesarios que deben circular por los diversos cursos de los ríos, recientemente han propuesto una metodología estandarizada que incluye procedimientos para determinar el caudal ecológico.³ El problema con los métodos existentes es la poca información que se tiene en nuestro país para su correcta aplicación y para determinar cuál de ellos se debe utilizar. En el caso particular del Río Rímac, podemos observar un problema de alta contaminación en sus aguas debido a factores como las vertientes de aguas residuales y la basura acumulada. Esto afecta a los ecosistemas que podemos encontrar en su cauce y también a las personas que habitan cerca de las riveras de este río. Bajo este análisis surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué tipos de métodos existen para estimar el Caudal Ecológico (Q_e)?, ¿Qué metodologías pueden aplicarse y adaptarse para estimar el Q_e en la cuenca del Río Rímac?, ¿Qué procedimientos se abordan para estudiar el Q_e con las metodologías existentes?

1.3 JUSTIFICACIÓN.

Entre los usos múltiples del agua se resaltan el de consumo humano, pesca, hidroeléctricas, turismo, relacionado al paisaje, entre otros. Se destaca el uso por parte de la Biota Acuática, al considerarse como hábitat natural de especies fluviales, flora y fauna,

³ Ministerio de Agricultura y Riego, y Autoridad Nacional del Agua (2015) Lineamientos para la elaboración de estudios de Caudal Ecológico con fines de otorgamiento de derecho de uso de agua. Perú.

buscando la protección de los ecosistemas acuáticos.⁴ Por lo tanto es necesario incluir una metodología adecuada para evaluar el caudal ecológico y de esta manera pretender resguardar los diversos valores ambientales de los ríos mediante la regulación del volumen de agua en los cauces. Por otra parte, el aumento poblacional, así como el desarrollo industrial hace que el agua sea cada día más escasa, el primero por no contar con una planificación del uso adecuado del agua según la demanda poblacional, y el segundo por los vertimientos industriales que se depositan en los márgenes de los ríos sin ningún tratamiento, degradando la vida acuática.

1.4 HIPÓTESIS

Los métodos existentes para determinar el caudal ecológico pueden aplicarse y adaptarse a las condiciones de la cuenca del río Rímac que ayuden a estimar los requerimientos ambientales.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

- Evaluar y aplicar métodos para determinar el caudal ecológico en la cuenca del río Rímac.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Revisar y evaluar los métodos para el cálculo del caudal ecológico y su potencial aplicación en el Perú.
- Desarrollar y aplicar métodos hidrológicos, hidráulicos y simulación de hábitat para calcular el caudal ecológico en el Río Rímac.
- Proponer una metodología para el cálculo del caudal ecológico en el Río Rímac.

1.6 METODOLOGÍA

Hoy en día, no existe un método ideal para calcular el caudal ecológico de manera estándar. Sin embargo, existen una serie de métodos que se aplican en diversas partes del mundo que dependen de la información en la zona de estudio como las características morfológicas, biológicas y hábitats, tanto de flora y fauna, que ayudan a respaldar un

⁴ Mónica Lucía Izquierdo Santacruz. (2014). régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. (pp77-95).OMS

caudal ecológico con una aproximación que se asemeje más a la realidad. Entre los más destacados están los métodos hidrológicos divididos en: método de la curva de excedencia, método de Tennant, método de rango de variabilidad, método de diagnóstico y tratamiento de ecosistemas, etc. Los métodos hidráulicos clasificados en: método del perímetro mojado, método de indicadores de alteración hidrológica, método de variación hidráulica entre otros. Método de simulación de hábitats representados en Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), Método de Simulación Física de Hábitat, etc. y por último el método Holístico clasificados en Método de Building Block - Aproximación Bottom-up, Benchmarking - Aproximación Topdown, método de bloques de construcción (BBM), entre otros. Recalcando que cada parámetro utilizado por cada método debe cumplir con las características de la zona de estudio.

De manera específica el cálculo de caudal ecológico del río Rímac se desarrollará con 3 metodologías: métodos hidrológicos, métodos hidráulicos y método de simulación de hábitat. El primer método desarrolla el cálculo a partir de datos hidrológicos tratados de distintas formas (caudales promedios, caudales medios, análisis de series temporales, etc.). Basados generalmente en índices hidrológicos (% de caudal promedio) o comportamiento de registros históricos como datos de caudales diarios, mensuales, medias, etc.⁵ Para el caso de la zona de estudio del río Rímac se recolectará los datos de las diferentes estaciones hidrométricas con el fin de obtener caudales en los lugares más importantes del afluente. Del mismo modo con las estaciones meteorológicas para obtener información de las precipitaciones, humedad relativa, evaporación, temperatura, etc. para determinar el caudal. El segundo método, el Hidráulico, se inicia con la recolección de información topográfica de un tramo seleccionado del Río Rímac (Campo), asimismo, se empleará el uso del software Civil 3D para proyectar la topografía del terreno a estudiar. Luego se tomará datos sobre las características hidráulicas del Río, como la velocidad del flujo, perímetro mojado y tirante hidráulico. Posteriormente, se realizará la simulación hidráulica del tramo del río, para ello se empleará el uso del software Hec-Ras 4.1, este programa permite modelar un flujo permanente unidimensional, cálculos de flujos no estacionarios en una o dos dimensiones y cálculos de transporte de sedimentos.⁶ Y

⁵ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI.

⁶ Hydrologic Engineering Center's (CEIWR-HEC) River Analysis System (HEC-RAS) website. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (09 de abril del 2016)

finalmente se determinará el Caudal Ecológico. El tercer método, Simulación de hábitat se basa en la IFIM (Instream Flow Incremental Methodology en español “Metodología Incremental de Flujo”) el cual se desarrolla, primero con la recolección de información sobre la planificación y gestión de recursos hídricos a nivel nacional y en la zona de estudio. Segundo, se debe realizar una simulación de caudales por medio de los datos y la ingeniería hidráulica. Tercero, se tomó información sobre los requerimientos ecológicos para el transcurso de un caudal mínimo que satisfaga con las necesidades de los ecosistemas acuáticos y terrestres en el transcurso del río. Finalmente, con los parámetros anteriores y la utilización del software PHABSIM obtenemos una relación directa entre caudal, cantidad y calidad de hábitat para una determinada especie.⁷ Por otro lado, se desarrolla de manera más general el procedimiento para la aplicación del método Holístico, debido a la complejidad porque se requiere una mayor cantidad de información y tiempo de varios años para desarrollarse, este se aplica específicamente para proyectos con estudio de impacto ambiental detallado o semidetallado. En este último método, se realizan procedimientos que analizan los Caudales Ecológicos de manera independiente cada aspecto relacionado al estudio de impacto ambiental. En primer lugar, se analizan los aspectos abióticos como la geomorfología, calidad de agua, características hidrológicas e hidráulicas, etc. En segundo lugar, se encuentran los estudios ecológicos como las comunidades naturales, las especies acuáticas, las especies vegetales, entre otros. En tercer lugar, están los aspectos perceptuales, como son los paisajes alrededor del curso del río. En cuarto lugar, se encuentran los análisis socioeconómicos y culturales. Finalmente, los aspectos a estudiar deben realizarse con un equipo de expertos en cada uno de ellos y así también, se debe contar con la información más detallada posible para, a partir de su análisis en conjunto, estimar el Caudal Ecológico.⁸

1.7. RESULTADOS ESPERADOS

Se obtiene un reporte con información detallada sobre todas las definiciones de Caudal Ecológico, los métodos más utilizados y eficientes en el mundo para calcularlo, y

⁷ LÓPEZ, Emilio (2015) Evaluación del hábitat acuático PHABSIM bi-dimensional para el establecimiento de un nuevo régimen de caudal ecológico en el río Inglares (Álava). Revista Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vol. 41 pp 229-244.

⁸ CARDOSO LANDA, Guillermo (2014) Evolución y perspectivas del gasto ecológico utilizando metodologías holísticas. xxiii Congreso Nacional de Hidráulica. México.

establecer las diferencias que hay entre ellos. Asimismo, este documento contiene la aplicación de tres de estos métodos, el Hidrológico, el Hidráulico y el de Simulación de Hábitat para calcular el caudal ecológico. Y se buscará la validación para su uso en la cuenca del Río Rímac. Por último, se obtiene un reporte indicando los pasos de la metodología que se debe seguir para la estimación del caudal ecológico, incluyendo el método Holístico.

2 CAPÍTULO: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. SITUACIÓN HÍDRICA DEL PERÚ

El Perú cuenta con 159 cuencas hidrográficas por las que escurren 1'768,172 millones de metros cúbicos (MMC) al año, el cual le otorga el privilegio de ubicarse entre los 20 países más ricos de agua en el mundo. Nuestro país cuenta con tres vertientes hidrográficas: la del Atlántico (ocupando el 74.6% del territorio nacional con 84 cuencas, genera 97.26% de los recursos hídricos), la vertiente del Pacífico (ocupando el 21.8% del territorio nacional con 62 cuencas, genera 2.18% de los recursos hídricos) y la vertiente del Titicaca (ocupando el 3.6% del territorio nacional con 13 cuencas, genera 0.56% de los recursos hídricos).⁹ En la Tabla II-1 se presenta la disponibilidad hídrica por cada vertiente. Asimismo, el Perú cuenta con 34 cuencas transfronterizas con los países que lo limitan como Ecuador, Colombia, Brasil, Bolivia y Chile; con un mayor número en la vertiente de Atlántico, también llamado Amazonas.

Vertiente Hidrográfica	Disponibilidad Hídrica					Distribución Hídrica por Población
	Aguas Superficiales		Aguas Subterráneas (MMC)	Total		(m³/hab/año)
	(MMC)	(%)		(MMC)	(%)	
Pacífico	35,632	2,02	2,849	38,481	2,18	2,067*
Amazonas	1'719,814	97,42	Sin datos	1'719,814	97,26	198,121*
Titicaca	9,877	0,56	Sin datos	9,877	0,56	10,735*
TOTAL	1'765,323	100,00	2,849	1'768,172	100,00	62,655

(*) Sobre umbral de desarrollo como promedio a nivel de vertientes.

Tabla II-1. Disponibilidad Hídrica por cada Vertiente. Fuente: Ministerio de Agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012).

⁹ Ministerio de Agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012) Política y Estrategia Nacional de Recurso Hídricos. Perú.

2.1.1. Principales Fuentes de Agua en el Perú

Dentro de las principales fuentes que hay en nuestro país se encuentran los glaciares, lagos y lagunas, ríos y acuíferos. La Tabla II-2 presenta la distribución de cada tipo de fuente según la vertiente en las que se encuentran.

El mayor uso de agua superficial está destinada a la actividad agrícola el cual representa el 87,7% de la demanda, la poblacional representa el 9,9%, la actividad minera el 1,5% y el sector industrial el 0,9%. En Lima Metropolitana, el consumo total de agua potable fue de 472,377 miles de metros cúbicos para el año 2012, y el sector que más lo consume es el doméstico con el 75.15% del total.¹⁰

Tipo de Fuente	Número
Glaciares	3,044 glaciares que cubren 2041 km² <ul style="list-style-type: none">▪ Pacífico: 1,129 glaciares (878 km²)▪ Amazonas : 1,824 glaciares (1113 km²)▪ Titicaca : 91 glaciares (50 km²)
Lagos y lagunas	12,201 <ul style="list-style-type: none">▪ 3,896 Pacífico▪ 7,441 Amazonas▪ 841 Titicaca▪ 23 en cuencas cerradas
Ríos	1,007
Acuíferos	Vertiente del Pacífico: 2,700 Hm³ (reserva explotable). Vertientes del Atlántico y Titicaca no están determinados.

Tabla II-2. Distribución de las Fuentes de agua. Fuente: Ministerio de agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012)

2.1.2. Gestión del Agua en el Perú

Según la Ley de Recurso Hídricos (Ley N° 29338) en el Capítulo II artículo 14, “La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Es responsable del funcionamiento de dicho sistema en el marco de lo establecido en la Ley.” Bajo el enfoque

¹⁰ INEI (2014) Perú: Anuario de estadísticas Ambientales 2013.

de planificación y gestión territorial, la ANA ha determinado 14 Autoridades Administrativas del Agua (AAA) a nivel nacional. Las que a su vez comprenden 72 Administraciones Locales de Agua (ALA) logrando una cobertura total a las 159 cuencas del país.

2.1.3. Instrumentos de Gestión de Recursos Hídricos

2.1.3.1. Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos

Por lo general, las políticas y estrategias de Estado sobre los recursos hídricos parten de asumir responsablemente el compromiso de cuidar el agua como patrimonio de la nación y como derecho fundamental de la persona para su consumo, y desarrollo de las actuales y futuras generaciones. Partiendo de la premisa de que el agua es del Estado, se establecen los derechos y las condiciones de uso, así como también de una gestión eficiente. Para desarrollar una eficiente y equitativa gestión de los recursos hídricos, se hace indispensable la realización de acuerdos basados en estudios. Como ciudadanos peruanos, nos corresponde respetar estos acuerdos y llevar a cabo un seguimiento de su implementación, es decir, velar y asegurar su efectivo cumplimiento. Asimismo, tiene mucha importancia contar con los recursos y fortalecer la institucionalidad de los organismos encargados. Considerando la necesidad de establecer un documento que plasmará la necesidad y los lineamientos de una gestión integrada del agua para el beneficio de toda la nación peruana, se elaboró y aprobó la Política de Estado sobre los Recursos Hídricos, también conocida como Política 33, el 14 de agosto de 2012.¹¹

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA): “A la fecha, el Perú cuenta con 34 políticas de Estado agrupadas en cuatro grandes objetivos: (i) Democracia y Estado de derecho; (ii) Equidad y justicia social; (iii) Competitividad del país; y (iv) Estado eficiente, transparente y descentralizado. Por ejemplo, lo correspondiente a recursos hídricos y ordenamiento territorial se encuentran en el cuarto grupo. Todas las autoridades e instituciones nacionales, regionales y locales deben respetar y contribuir al cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos que se describirá a continuación:

• Gestión integrada del agua

¹¹ Autoridad Nacional del Agua (2015) Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Perú.

- ✓ Prioridades en consumo humano y seguridad alimentaria en cantidad, calidad y oportunidad.
 - ✓ Participación que respete temas ambientales y promueva el desarrollo.
 - ✓ Equilibrio del ciclo hidrológico y de la calidad de los cuerpos de agua.
 - ✓ Gestión por cuencas articuladas a las de ordenamiento territorial.
 - ✓ Gestión integrada en cuencas transfronterizas.
- **Cultura de agua**
 - ✓ Participación de los actores en las cuencas, sensibilización y gobernanza.
 - ✓ Investigación y conservación respetando la tecnología y las organizaciones ancestrales.
 - **Inversiones, financiamiento e infraestructura hidráulica**
 - ✓ Promoción de la inversión pública y privada asociada a la visión de cuenca y territorio
 - ✓ Captación y disponibilidad de agua para promover inversiones en uso y reúso.
 - **Control de riesgos y fiscalización de sus usos y vertimientos**
 - ✓ Sostenibilidad del reúso y reciclaje del agua residual cuidando ecosistemas y salud.
 - ✓ Control de riesgos y desastres, fiscalización de usos y vertimientos.
 - **Información y soporte técnico multisectorial**
 - ✓ Transparencia y acceso a la información en oferta y demanda, calidad, etc.
 - **Institucionalidad**
 - ✓ Desarrollar un ente rector autónomo, administrativo, económico y funcional especializado y desconcentrado.
 - ✓ Priorizar la prevención y gestión de controversias sobre el agua y temas asociados. Resolver las controversias.
 - ✓ Impulsar la investigación, el desarrollo y la innovación generando sinergias (Academia – Estado – Empresas).”

2.1.3.2 Plan Nacional de Recursos Hídricos

Es el instrumento de planificación de gestión de los recursos hídricos del Perú que contiene toda la información relevante necesaria para alcanzar los objetivos y aplicar las

medidas de interés nacional establecidas en la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.¹²

La Ley de Recursos Hídricos fija el objetivo y los contenidos del Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), por lo tanto, según la Ley 29338:

-Artículo 97.- Objetivo de la planificación de la gestión del agua. “Equilibrar y armonizar la oferta y demanda de agua, protegiendo su calidad y cantidad, propiciando su utilización eficiente y contribuyendo con el desarrollo local, regional y nacional”.

-Artículo 100.- “El Plan Nacional de Recursos Hídricos contiene la programación de proyectos y actividades, estableciendo sus costos, fuentes de financiamiento, criterios de recuperación de inversiones, entidades responsables y otra información relevante relacionada con la política nacional de gestión de recursos hídricos”.

Por consiguiente, el Plan Nacional de Recursos Hídricos tiene por objetivo determinar las medidas que permitan resolver los problemas del agua en el Perú, establecer los costos y las fuentes de financiación, programación de proyectos, asegurando la calidad y cantidad de agua necesaria, usada de manera eficiente para lograr contribuir a un desarrollo local, regional y nacional.

2.2. EL CAUDAL ECOLÓGICO Y SUS DEFINICIONES.

El caudal ecológico es un término que abarca la sustentabilidad del recurso hídrico, y el equilibrio entre la vegetación y la fauna. Actualmente la definición del caudal ecológico es muy discutida por varios autores, puesto que tiene varias denominaciones tales como: Caudal ambiental, Caudal de mantenimiento, Caudal mínimo, Caudal de compensación, Caudal de acondicionamiento, entre otros.¹³

A pesar de la diversidad de definiciones que se tiene sobre este termino, cada uno de ellos se establece bajo la preservación de los ecosistemas, en zonas donde se puedan ver

¹² Ministerio de Agricultura y Riego, y Autoridad Nacional del Agua (2012) Plan Nacional de Recurso Hídricos, Resumen ejecutivo. Perú.

¹³ Nadia Paulina Castro. (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. (Tesis Doctoral). Quito. Universidad Politécnica Salesiana.

afectadas las condiciones de vida y hábitats de especies. A continuación, se presenta algunas definiciones de caudal ecológico.

“El caudal ecológico considera la variación del régimen natural, de manera integral al medio biótico y abiótico, a los aspectos económicos y a la sociedad como parte importante en la conservación de los ríos”. Así mismo se define al caudal ecológico como: “la cantidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para mantener el hábitat del río y su entorno en buenas condiciones, considerando las necesidades de las poblaciones humanas, animales y vegetales”.¹⁴ En la Tabla II-3 se presenta de las diferentes definiciones que se denominan al caudal ecológico.

¹⁴ Nadia Paulina Castro. (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. (Tesis Doctoral). Quito. Universidad Politécnica Salesiana.

DENOMINACION	CONCEPTO
Caudal Ecológico Mínimo	Caudal que limita la utilización del recurso en épocas de sequía, preservando las condiciones en el entorno del afluente, sin generar una solución ecológica real. Su determinación se realiza de forma empírica. (Rodriguez,et al, 2007.pag 11.).King.Brown, Research and applications, 2003, pags.620-621).
Caudal Ecológico	El caudal ecológico puede definirse como el flujo de agua mínima necesaria para preservar los valores ecológicos del cauce, tales como hábitats naturales de vegetación y fauna, las funciones de dilución de contaminantes, su uso antrópico entre otras materias. (Endesa Chile,2012, pag 24)
Caudal de Mantenimiento	Porcentaje pequeño ineludible de flujo de agua, con el cual se mantiene la estabilidad de las características físicas y ecosistematicas del caudal del rio, esta estabilidad permite al medio ambiente preservarlo en su mayor biodiversidad. (Aprima,2000,pag 407)
Caudal Ambiental	Se define al caudal ambiental como la cantidad de caudal que se toma del rio con el fin de minimizar la degradación de las riberas y por ende su flora y fauna, (Dyson Berkamp,Scalon,2003,pag 3)
Caudal de Acondicionamiento	El caudal de acondicionamiento es un caudal que se determina adicionalmente a un caudal ecológico establecido, puesto que pueden presentarse circunstancias que requieren un caudal que pueda mantener las características del rio. Estas características no dependerán precisamente de una conservación en cuanto a ecosistemas, sino también a condiciones abióticas o de entretenimiento. (Alcázar 2007,pag 32)

Tabla II-3. Definiciones sobre Caudal Ecológico. Fuente: Estimación del caudal ecológico en la vertiente anexa a la parroquia de Cangagua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de Pisambilla que garantice la sustentabilidad de la zona 19.

De acuerdo con estas definiciones se establece que el término más importante y en común para definir el caudal ecológico, es la conservación del ecosistema, el cual se propone definiendo como la cantidad de volumen de agua necesaria para preservar los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad, disminuyendo los cambios de hábitats que se originan en su entorno.

2.3. METODOS EXISTENTES.

Hoy en día se reportó la existencia de más de 200 métodos de evaluación de los caudales ambientales o ecológicos usados en 44 países del mundo. Esa abundancia de métodos corresponde, en su gran mayoría, a la adaptación de algunas metodologías principales, las cuales pueden ser clasificadas en cuatro grupos que son hidrológicos, hidráulicos, holísticos y simulación de hábitats, que se diferencian principalmente según dos tipos de criterios: la integración de parámetros físicos (hidrológicos o hidráulicos) o físicos y biológicos¹⁵.

2.3.1. Métodos Hidrológicos

Esta metodología considera que el caudal ecológico se determina a partir de antecedentes hidrológicos registrados como son los caudales promedios, mensuales, diarios, análisis de series temporales, etc. el cual se desarrolla de manera sencilla y rápida para calcular el caudal ecológico, los métodos desarrollados dentro de este enfoque son:

2.3.1.1. Método de Hoppe

Expresa la relación entre la curva de duración de caudales y el escenario eco sistemático favorable en el área de estudio. Para aplicar este método se debe considerar tres percentiles importantes a partir de las condiciones necesarias en el ecosistema, como son Q17%, Q40%, Q80%.¹⁶ Estos percentiles reflejan diferentes estadios de vida para la especie como es el caso de desove, crecimiento y reproducción respectivamente.¹⁷

¹⁵ Aguilera, Gastón y Marc Pouilly. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. Revista Acta zoológica lilloana. Vol. 56 N° 1-2.

¹⁶ Nadia Paulina Carrasco Sánchez. (2014). Estimación del caudal ecológico en las vertientes anexas a la parroquia de Cangagua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de Pisambilla que garantice la sustentabilidad ambiental de la zona. Quito. Univ. Politécnica Salesiana.

¹⁷ Nadia Paulina Carrasco Sánchez. (2014). Estimación del caudal ecológico en las vertientes anexas a la parroquia de Cangagua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de Pisambilla que garantice la sustentabilidad ambiental de la zona. Quito. Univ. Politécnica Salesiana.

2.3.1.2. Método de Tennant

La metodología surge a partir de investigaciones de campo, en las cuales se encontraron las dependencias directas del hábitat de una especie determinada con la morfología del cauce. Este método proporciona de una manera rápida y económica, una primera aproximación en la determinación de los caudales ecológicos, los cuales deberán ir siendo afinados tomando en cuenta el comportamiento de la flora, fauna y topografía del lugar.¹⁸ Y de acuerdo con estos estudios, determinar un caudal representativo al 10%, 20% y 60% del caudal promedio anual clasificando como bueno, excelente y óptimo respectivamente.

2.3.1.3. Método del Caudal base de 7 días con Periodo de Ocurrencia de 10 años (7Q10)

Este método entrega el valor de un caudal mínimo estadístico, que corresponde al valor que en promedio de cada diez años (10), será igual o menor que el caudal medio (Q) en cualquier evento de siete días (7), de sequía consecutivas (7Q10). También existen otras aproximaciones similares, utilizando la estadística hidrológica que describe las condiciones de sequía como el “7Q2” y “10Q5”. El método supone que, a valores menores, se puede generar un estrés ecológico, ya que la falta de agua produce una sobrecarga de tensión que se ve reflejada en el ecosistema, por la aparición de anomalías y anormalidades que impiden el normal desarrollo y funcionamiento de las comunidades biológicas que ahí viven.¹⁹

2.3.1.4. Método de la Curva de Excedencia

Consiste en la construcción de una curva a partir de datos de caudales diarios, mensuales o anuales, donde se presenta la relación entre los rangos de caudal con el porcentaje de tiempo en que cada rango de caudal es igualado o excedido. Este método permite, por ejemplo, determinar el caudal medio diario que es excedido durante 330 o 345 días de un año (Q330 o Q345), que corresponden respectivamente, al 90% y 95% del tiempo (respecto a 365 días).²⁰

¹⁸ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI.

¹⁹ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.12-14). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.

²⁰ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.12-14). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.

2.3.2. Métodos Hidráulico.

El caudal ecológico se deriva de la relación de los parámetros hidráulicos del perímetro mojado y el caudal circulante. Estos métodos, generalmente, se apoyan en estudios de una zona transversal de un río, para así vincular el volumen de la descarga con la profundidad de los cauces, perímetro mojado y velocidad. Dentro de este enfoque podemos encontrar métodos como:

2.3.2.1 Método de Perímetro Mojado.

Este es uno de los más conocidos y comúnmente utilizado en Estados Unidos de Norteamérica. En él, se asume que la integridad del hábitat está directamente relacionada con el área húmeda. Consiste, básicamente, en la construcción de curvas que muestran la relación entre el caudal con el perímetro mojado. A partir de ellas, puede observarse que, hasta un cierto volumen de agua, el perímetro crece rápidamente a medida que aumenta la descarga, pero sobrepasado este volumen, el perímetro se mantiene casi constante. Generalmente, el flujo recomendado es aquel cerca de este punto de inflexión, pues se presume es el nivel óptimo para el desove de peces o para la producción de invertebrados bentónicos.²¹

2.3.2.2. Método de Variación Hidráulica.

Utilizan cambios en variables hidráulicas, como perímetro mojado para definir el caudal ecológico. De tal manera que los ríos anchos poco profundos tienden a ser más sensibles a cambios en el caudal en su perímetro húmedo que los ríos angostos y profundos.²²

2.3.2.3. Método Life.

El índice invertebrado lotico para la evaluación de caudales (life) está basado en el monitoreo continuo de macro-invertebrados a lo largo del río y caudal antes de la obra. Para esto se elaboró un índice de sensibilidad percibida a la velocidad del agua, mediante la asignación de un puntaje de 1 a 6 y de acuerdo a la abundancia de invertebrados (especies o familias).²³

²¹ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.12-14). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.

²² Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI.

²³ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI.

2.3.3. Método de Simulación de Hábitats.

Las especies de peces están mejor acopladas a ciertas particularidades hidráulicas, estructurales y geomorfológicas. Al conocer cómo se relaciona el caudal a estas características, se logra estimar el caudal necesario para mantener los diferentes tipos de peces.

2.3.3.1. Método de Incremento de Caudal (IFIM)

Integra modelos hidráulicos con parámetros de calidad del agua, sedimentos, estabilidad de los cauces, temperatura y otras variables que afectan a los peces. El IFIM contiene un modelo que relaciona el caudal con los datos de hábitat (Physical Habitat Simulation System - PHABSIM). El modelo construye índices que exponen el grado de adaptación de las especies objetivo, a diferentes valores de velocidad, profundidad y características geomorfológicas específicas del río.²⁴

2.3.3.2. Método de Simulación Física de Hábitat (PHASBIM)

Los modelos biológicos están basados en la ecología de organismos indicadores (macro invertebrados acuáticos, peces). Se desarrollan a partir de datos ecológicos que pueden tener un valor local, (adaptación de los modelos para cada caso) o regional (un modelo por cada región).

Evalúa sobre un tramo de río y por un rango de caudal, la calidad del hábitat relacionando las estimaciones de condiciones físicas del hábitat y el valor ecológico de esas condiciones para los organismos.²⁵

2.3.4. Métodos Holísticos.

Estos métodos asumen que, si son identificadas las características esenciales del flujo hídrico que pueden generar un impacto ecológico y son incorporadas dentro de un régimen de flujo modificado, entonces la biota y la integridad funcional del ecosistema serán mantenidas. Su principio básico es similar al de los métodos hidrológicos secuenciales, pero más que un método es un procedimiento donde el caudal se deduce

²⁴ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.14-16). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.

²⁵ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI

buscando una solución consensuada a partir de un análisis independiente de la magnitud y distribución de caudal que necesitan los componentes del ecosistema fluvial.²⁶

Los métodos desarrollados dentro de este enfoque son:

2.3.4.1. Método de Building Block -Aproximación Bottom-up

Se realiza sobre la base de grupos de trabajos multidisciplinarios, tomando en cuenta trabajos de investigación ya realizados, modelos para entender la respuesta caudal-características hidráulicas y juicios de expertos. Se determinan y describen en términos de duración y magnitud los flujos que se recomendarán. Las descripciones de cada uno de los componentes del flujo son consideradas como los building block, conformando los “Requerimientos de Caudal” para una cuenca o río (Instream Flow Requirements - IFR). Se denomina de tipo Bottom- Up, ya que el caudal recomendado es estimado a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos.²⁷

2.3.4.2. Método de Benchmarking - Aproximación Topdown

Se basa en principios similares al método Building Block. A diferencia del mismo, el caudal es determinado desde un flujo máximo aceptable, hacia valores menores (aproximación Top-Down). Con la información disponible, modelos conceptuales y juicio de experto, se identifican indicadores hidrológicos que son considerados ecológicamente relevantes. Con estos indicadores, son caracterizados cauces escogidos dentro de un río como benchmark o de referencia. En estos cauces de referencia no existe necesariamente un caudal natural (puede estar regulado), pero cumplen con los variados niveles de caudal que se requieren en la cuenca.²⁸

2.3.4.3. Método de Caudal de Garantía Ambiental (EPM)

Método aplicado por las EPM donde mediante 7 pasos se definen los límites mínimos de caudal ecológico, que pueden ser tolerados por un curso de agua contemplando aspectos físicos, químicos, bióticos, sociales y aspectos estéticos como: la definición del caudal ambiental, determinación de los caudales de recuperación, determinación de los caudales

²⁶ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI

²⁷ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.16-17). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.

²⁸ Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.16-17). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile

de recuperación, determinación del caudal adicional, determinación de requerimientos excepcionales, presupuesto de agua.²⁹

2.4. ESTUDIOS DESARROLLADOS EN OTROS PAISES.

Para encontrar un método que determine el caudal ecológico, muchos países evaluaron condiciones acordes a las características ambientales de hábitat animal, vegetal, volumen de caudales de un río, entre otras. Cada uno conservando su justificación particular al momento de sustentar su metodología. Es así que en varios países utilizan los métodos que ya fueron establecidos, y tratan de adaptarlos al régimen ambiental de su propia región. De esta manera se desarrollaron los siguientes métodos.

2.4.1. Método Ecuatoriano.

Este método consiste en tomar 5% del caudal medio anual de los últimos 10 años, este método es muy usado por varios países de América latina.

En este método se reconoce que la variación hidrológica juega un papel importante en la estructura de la diversidad biótica, además de controlar las condiciones de hábitat dentro del canal, llanuras de inundación y humedales.

2.4.2. Método Escoces.

Consiste en tomar el 20% del caudal medio mensual de 3 meses críticos consecutivos, es usado también por varios países de América latina. Este método considera la importancia del factor ecológico, como la conservación de las especies de la zona, a fin de preservar el ecosistema

2.4.3. Método Suizo.

La legislación suiza se basa en un método que utiliza unas formulas empíricas para la cuantificación del caudal mínimo, pero con unas premisas de carácter cualitativo a saber:

- El caudal mínimo debe permitir el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales contando con los vertidos de aguas utilizadas y los existentes.

²⁹ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI

- Se deben mantener los niveles de los acuíferos subterráneos de manera que no se vean perjudicados ni la vegetación ni los usos de agua potable.

2.4.4. Método Asturiano.

La normativa asturiana establece tres niveles de protección de los cauces basando el cálculo del caudal mínimo en el método suizo. El caudal mínimo se calcula a partir del Qps (caudal que es superado 347 días al año) obtenido mediante la fórmula aceptada por la legislación suiza antes mencionada.

Para el nivel de protección, el caudal ecológico mínimo será el mayor de los valores obtenidos de las siguientes formulas:³⁰

- $Q_{eco}=50 \text{ l/s}$
- $Q_{eco}=0.35 \times Q_{ps}$
- $Q_{eco}=15 \times Q_{ps} / (\ln Q_{ps})^2$
- $Q_{eco}=0.25 \times Q_{ps} + 75 \text{ l/s}$

2.4.5. Método Vasco.

El método se basa en el mantenimiento de la diversidad ecológica. La diversidad se mide por el número de taxones de la comunidad de invertebrados, pero a pesar de este componente biológico, básicamente es un método matemático.³¹

2.5. ESTUDIOS DESARROLADOS EN EL PERÚ.

En el Perú, el caudal ecológico ha sido determinado, en su mayoría, para proyectos como centrales hidroeléctricas (energéticos), usando el método hidrológico basado en un porcentaje del caudal promedio anual histórico, constante en el tiempo. Por ejemplo, en la Central Hidroeléctrica Mocollo (Caylloma-Arequipa) diseñada para aprovechar los recursos hídricos de la cuenca del río Mocollo y parte del río Palca a través de un canal y generar hasta 302 MW (megavatio), el caudal ecológico en el río Mocollo ha sido determinando usando dos métodos: el 10 % del caudal medio anual, y el 20% del caudal

³⁰ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y Propuesta de una Metodología para la Determinación del Caudal Ecológico en Centrales Hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI

³¹ Nadia Paulina Carrasco Sánchez. (2014). Estimación del caudal ecológico en las vertientes anexas a la parroquia de Cangagua sujetas a la intervención del proyecto de riego en la comunidad de Pisambilla que garantice la sustentabilidad ambiental de la zona. Quito. Univ. Politécnica Salesiana

medio mensual de 03 meses críticos consecutivos (método de Heras o Escocés). Otros ejemplos, donde también se estimó el Caudal Ecológico con métodos hidrológicos, incluyen a la Central Hidroeléctrica de Quitaracsa proyectada para aprovechar los recursos hídricos del río Quitaracsa (Ancash-Huaylas) para generar 112 MW de potencia, también la Central Hidroeléctrica Yanacoto en la cuenca del río Rímac y Santa Eulalia, y la Central Hidroeléctrica el Platanal en la cuenca del Río Cañete, en el departamento de Lima. Y en las centrales Hidroeléctrica Chimay y Curibamba en el departamento de Junín, en las que el Caudal Ecológico ha sido determinado usando el método hidrológico.

Existen muy pocos estudios con aplicación de metodologías con un enfoque altamente ecológicos. La aplicación de simulación de hábitat ha sido desarrollada en el Río Santa para determinar el caudal ecológico en un tramo de río que fue alterado por la construcción de la Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato; para tal efecto, se utilizó el método de simulación de hábitat “Riverine Habitat Simulation Software” (RHABSIM).

³² Por otro lado, se ha realizado la aplicación del método holístico en el “Estudio de Impacto Ambiental de la Represa de Angostura y de Gestión Ambiental a Nivel Definitivo”, elaborado por CESEL S.A., para calcular el Caudal Ecológico involucrado en este proyecto ubicado en el departamento de Arequipa, dentro de la cuenca alta del Río Apurímac, y fue aprobado por el órgano ambiental competente Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios del Ministerio de Agricultura.³³

2.6. COMPARACIÓN DE MÉTODOS.

Dentro de las diferentes metodologías para estimar Caudales Ecológicos podemos observar algunos aciertos y limitaciones que conlleva utilizar cada una de ellas. A continuación, se menciona algunas ventajas y desventajas por cada método:

Método Hidrológico

Ventajas

- Gran variedad de datos acerca de series históricas anuales, mensuales y diarias, de caudales y precipitaciones.
- Se puede determinar utilizando pocos parámetros, únicamente hidrológicos.
- Se puede determinar en menor cantidad de tiempo respecto a otros métodos.

³² Ministerio de Agricultura y Riego, y Autoridad Nacional del Agua (2015) Lineamientos para la elaboración de estudios de Caudal Ecológico con fines de otorgamiento de derecho de uso de agua. Perú.

³³ L. del Castillo, C. Llerena (2012). Análisis del marco legal e institucional sobre los caudales ecológicos/ambientales en el Perú. UICN, Quito, Ecuador. 57 pp.

-Se puede realizar en grandes tramos de ríos.

Desventajas

-Resultados de baja confiabilidad debido a los pocos parámetros que se utilizan.

-No considera de ninguna manera las variables ecológicas como biología acuática, flora, entre otros.

Método Hidráulico

Ventajas

-Datos más cualitativos ya que se obtiene de las características de la sección de río, en campo.

-Resultados de confiabilidad media o alta.

-Consideración media de variables ecológicas como biología acuática, flora, entre otros.

Desventajas

-Solo se realiza en pequeños tramos de ríos, por ende, las características hidráulicas del río deben ser similar a lo largo de su curso.

-Se asume que una variable hidráulica puede representar adecuadamente las necesidades de caudal de las especies de un río.

Método de Simulación de Hábitats

Ventajas

-Resultados de confiabilidad media o alta, acopla variables hidráulicas y biológicas.

-Consideración alta de variables ecológicas como biología acuática, flora, entre otros.

-Permite predecir y simular los cambios de cierto hábitat con respecto al caudal de flujo.³⁴

Desventajas

-Es muy exigente en cuanto a la información tanto hidráulico como de la especie.

-Mayor tiempo para calcular debido a su complejidad e información detallada.

Método Holístico

Ventajas

-Resultados de confiabilidad alta, acopla todas las variables involucradas hidrológicas, hidráulicas, biológicas, socioeconómicas y paisajísticas.

-Recomendable para situaciones de conflictividad social y ambiental.

-Consideración alta de variables ecológicas como biología acuática, flora, entre otros.

³⁴ Villanueva Ure, Justo Reynaldo. (2011). Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI.

Desventajas

- Se necesita profesionales especialistas en cada parámetro involucrado para estimar el Caudal Ecológico adecuado.
- Asimismo se requiere de mucha más información o datos para poder aplicarse.
- Es el método más complejo e implica mayor tiempo de estudio que los anteriores.

Se puede llegar a la conclusión, que el método Hidrológico puede determinar en menor cantidad de tiempo el Caudal Ecológico con respecto a los otros métodos, utilizando únicamente parámetros hidrológicos como las series históricas. Sin embargo, también es el que presenta la confiabilidad de resultados más baja que el resto. El método Hidráulico presenta mayor confiabilidad de resultados que el método Hidrológico, debido a que los datos son tomados en campo como la sección del río, asimismo, considera algunas variables ecológicas como vida acuática, lechos y sedimentos. Por otro lado, los métodos Simulación de Hábitats y Holísticos se caracterizan porque ambos tienen una consideración muy alta tanto por las características hidráulicas como por las variables ecológicas como biología acuática, flora, entre otros. Los métodos Holísticos se diferencian por abarcar todas las variables involucradas, es por ello, que se utiliza en situaciones de conflictividad social y ambiental; mientras que los métodos de Simulación de Hábitats se caracterizan por utilizar herramientas de simulación como el PHABSIM y RHABSIM. Sin embargo, los inconvenientes que presentan estos dos últimos métodos son la información especializada que se requiere y el tiempo es mucho mayor para desarrollarlos, en el caso de los Holísticos varios años.

2.7. MARCO LEGAL SOBRE CAUDAL ECOLÓGICO.

2.7.1. Real Decreto Legislativo 1/2001 ley de aguas de España.

El objetivo de esta ley en España es el uso adecuado de la gestión de los recursos hídricos y el establecimiento de normas básicas, para la protección de aguas superficiales, subterráneas y de todo recurso renovable que forma parte del dominio del estado, cuyo objetivo principal es establecer una planificación hidrológica, el cual se deberá sustentar cualquier acción que altere los recursos naturales que están dentro del dominio público hidráulico del estado.³⁵

³⁵ Ministerio de Medio Ambiente BOE (2013). Legislación consolidada Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.2013.

Según la ley de aguas, La asignación y reserva de recursos para usos y demandas actuales y futuros, así como para la conservación y recuperación del medio natural, se determinará de acuerdo a un caudal ecológico bajo ciertos regímenes de estudios específicos para cada tramo de río, teniendo en cuenta la dinámica de los ecosistemas y las condiciones mínimas de su biocenosis. Conjuntamente con la participación de las comunidades en la toma de decisiones.

El marco legal para la toma de decisión está regido bajo una planificación hidrológica, en el cual se establece un orden en el uso sostenible del agua y la conservación medioambiental Implantando un orden en la sobreexplotación del agua orientando uso correcto de abastecimiento hacia las comunidades, actividades económicas como centrales hidroeléctricas y regadíos.

Asimismo, los organismos de cuenca es la encargada de la elaboración de los planes hidrológicos de las cuencas intercomunitarias e intracomunitarias como autoridad especializada, descentralizada y participada para la planificación y gestión del agua.³⁶

2.7.2. Reglamento de Chile para determinar el caudal ecológico mínimo.

El decreto presente sustenta ciertos criterios para establecer el caudal ecológico mínimo los cuales están sujetos bajo un caudal medio mensual del 20% de la cuenca con límite máximo de 20% de caudal medio anual. No obstante, se debe tener en cuenta los datos estadísticos de caudales registrados durante los últimos 25 años. Sin embargo, en el caso de no contar con esta data se debe de optar por el método hidrológico más adecuado para desarrollar un informe óptimo.

Esta ley de bases generales del medio ambiente hace mención que el uso y explotación de los recursos naturales renovables se verificará asegurando su capacidad de reconstrucción de la diversidad biológica asociada a ellos, lo cual es una de las finalidades del caudal ecológico. Por otra parte, se plantea que el uso o aprovechamiento de los recursos naturales, exigirá, la presentación de planes de manejo a fin de asegurar la conservación de dichos recursos, teniendo en cuenta consideraciones como la mantención de los caudales de estas aguas.³⁷

³⁶ Ministerio de Medio Ambiente BOE (2013). Legislación consolidada Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.2013.

³⁷ Ministerio del Medio Ambiente (2012). Reglamento para determinar caudal ecológico mínimo.

Rescatando que lo más importante para la conservación del ecosistema y el cauce natural de los ríos es que se respete el uso adecuado del recurso hídrico, cumpliendo la conservación del ecosistema de acuerdo a un caudal ecológico óptimo que beneficie tanto a la comunidad como al hábitat natural.

2.7.3. Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

La norma mexicana establece el procedimiento y especificaciones técnicas para determinar el régimen de caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua en sus cuencas hidrológicas. Esta norma aplica a todos aquellos que realicen estudios para solicitar asignaciones, construir infraestructura, realizar trasvases entre cuencas, similares a Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

Según el Capítulo 5 de la Norma Mexicana, estas son las Especificaciones para la estimación de caudales ecológicos:

2.7.3.1. Especificaciones Generales.

Las metodologías que se describen en esta norma se han considerado como de requerimiento técnico mínimo y no excluye la aplicación de metodologías complementarias o alternas más precisas, cuando la información o los recursos disponibles así lo permitan, en cuyo caso la Comisión Nacional del Agua determinará cuáles son los resultados que prevalecen atendiendo al nivel de detalle de los estudios realizados y considerando los intereses de los usuarios determinará los resultados finales. Asimismo, la determinación del régimen de caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua en cuencas hidrológicas, se podrán subdividir en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, acuíferos asociados, localización de los diferentes usuarios e información disponible.

El criterio para evaluar el caudal ecológico es que éste deberá determinarse tomando como base el objetivo ambiental identificado mediante los objetivos establecidos por el estudio a realizarse, ya sea en corrientes superficiales, en cuerpos receptores de diversa

índole, o como parte de la descarga natural de un acuífero, que deberá conservarse para proteger las condiciones ambientales y en equilibrio ecológico del sistema.³⁸

2.7.3.2. Metodologías para el cálculo de régimen de caudal ecológico.

Para la determinación del régimen de caudal ecológico, cualquier metodología será válida si: i) permite entender el significado ecológico de cada componente del régimen hidrológico natural y genera propuestas para su conservación o restablecimiento total o parcial, desde el punto de vista funcional; ii) las propuestas consideran el intervalo natural de variabilidad hidrológica, tanto en las condiciones ordinarias como el régimen de perturbaciones; y iii) reconoce que un ecosistema acuático modifica sus atributos como respuesta al aumento de los niveles de estrés, y por lo tanto, permiten ajustar las propuestas de caudales ecológicos a los objetivos ambientales o de conservación del río.³⁹

Es decir, se podrá realizar cualquier método que se describe en la misma Norma Mexicana como los hidrológicos, hidrobiológicos y holísticos, siempre y cuando se cumpla con el marco legal correspondiente al punto anterior descrito.

2.7.4. Normativa de Perú sobre metodologías para la determinación del Caudal Ecológico.

La norma correspondiente a nuestro país tiene como objetivo establecer las metodologías y criterios aplicables para la determinación de los caudales ecológicos, cumpliendo con las disposiciones establecidas por la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos. Esta norma es de aplicación a nivel nacional y su cumplimiento es, tanto, por todas las personas naturales como jurídicas, que realizan estudios relacionados con la disponibilidad hídrica o instrumentos de gestión ambiental para el desarrollo de proyectos de inversión que involucre o comprometan los recursos hídricos.⁴⁰

Según el Artículo 4, para el ejercicio de derechos de uso de agua:

³⁸ Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (2012) Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrológicas.

³⁹ Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (2012) Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrológicas.

⁴⁰ Autoridad Nacional del Agua (2016). Resolución Jefatural N°98-2016-ANA: Metodologías para la determinación del Caudal Ecológico.

4.1 La determinación de caudales ecológicos no afecta el ejercicio de los derechos de uso de agua otorgados con anterioridad a la entrada en vigencia de esta resolución.

4.2 En caso de déficit hídrico los caudales ecológicos tendrán preferencia sobre los usos productivos; el uso poblacional tendrá prioridad sobre el caudal ecológico.

2.7.4.1. Criterios Generales

Los criterios generales para determinar los caudales ecológicos son los siguientes:

-El caudal ecológico mínimo será equivalente al caudal determinado al 95% de persistencia en el punto de interés de la fuente natural de agua.

-El estudio de determinación de caudales ecológicos se realiza utilizando información estadística de los últimos 20 años (series históricas). A falta de información, esta será generada utilizando el modelamiento hidrológico y estocástico.

Los criterios señalados anteriormente no resultan de aplicación en cualquiera de los siguientes casos:

- 1) Si se amenaza la supervivencia de determinadas especies hidrobiológicas clave para el desarrollo de actividades preexistentes cuya conservación se pretende mantener.
- 2) Los cursos de las aguas se encuentran dentro de zonas protegidas o de amortiguamiento.
- 3) En los casos que los proyectos de infraestructura ocasionen impactos irreversibles en el régimen hidrológico.

2.7.4.2. Criterios Especiales

Para estos casos la norma presenta los siguientes criterios especiales para determinar los caudales ecológicos, este se determinará en base a un estudio que tendrá el siguiente contenido como mínimo:

- a) Objetivos: ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos que se propone alcanzar con el caudal ecológico.
- b) Descripción del río: se evaluará el río, aguas arriba y aguas abajo del proyecto, por secciones detallando los diversos procesos involucrados. Dentro de este acápite se tendrá los siguientes estudios:

- b.1 Definición de tramos y secciones del río.
- b.2 Evaluación de régimen hidrológico y la hidráulica del río.
- b.3 Evaluación de la geomorfología fluvial.
- b.4 Evaluación del estado de las condiciones hidrobiológicas
- b.5 Evaluación de la calidad del agua.
- b.6 Identificación de la importancia social, económica y ecológica del ecosistema acuático y de las planicies de inundación.

c) Descripción de la infraestructura hidráulica del proyecto: infraestructura emplazada en los cuerpos de agua y sus bienes asociados.

d) Estimación del Caudal Ecológico: Se aplicarán métodos holísticos o de simulación de hábitat que permitan integrar todas las evaluaciones realizadas previamente y alcanzar los objetivos específicos establecidos.

e) Reglas de Operación: sobre la infraestructura para permitir proveer del caudal ecológico estimado.

f) Programa de Monitoreo: permitirá conocer si se están alcanzando las metas planteadas para los objetivos definidos.

g) Plan de Manejo Adaptativo: acciones a implementar en caso los indicadores muestren que no se estén alcanzando los objetivos de conservación planteados.

En resumen, para la aplicación de los lineamientos sobre la estimación de Caudal Ecológico para el Perú, se pueden realizar métodos hidrológicos en general en todas las cuencas nacionales. Sin embargo, si se requiere un mayor estudio sobre el comportamiento de determinadas especies hidrobiológicas, el curso de agua que se encuentra en una zona protegida o en el caso de funcionamiento de un proyecto de infraestructura que ocasione un impacto social y ambiental, se debe aplicar criterios especiales que involucren realizar métodos más detallados como metodologías de simulación de hábitat y holísticos.

2.8. PROBLEMAS EN SU APLICACIÓN.

2.8.1. España

El agua es un bien escaso en muchas zonas de España donde existe una importante presión humana sobre el medio hídrico debido a la utilización de este recurso. El objetivo de establecer un caudal ecológico es lograr la compatibilidad de los usos del agua con la preservación y mejora del medio ambiente. Ello requiere de una planificación y gestión eficaces para asegurar el suministro a todos los usuarios y evitar la degradación de los ecosistemas fluviales.

Para la determinación del plan hidrológico de caudales ecológicos se obtuvo en base a ciertos parámetros ambientales que se presentan en la zona. Sin embargo, para obtener un caudal óptimo se debe tener en consideración algunos cuestionamientos.

- Los caudales naturales en estiaje son similares e incluso en años de sequía inferiores a las cifras que habitualmente se contemplan al evaluar las exigencias de caudal mínimo medioambiental. Esta circunstancia motivaría que su aplicación generalizada dejaría sin agua durante periodos más o menos largos de tiempo a todos los aprovechamientos situados en ríos sin regulación. Entre éstos se englobarían la mayoría de los abastecimientos urbanos e industriales.
- La aplicación de caudales medioambientales a los embalses de regulación existentes conlleva una importante pérdida de los recursos regulados disponibles para los otros usos, que en muchos embalses conllevaría la aparición de situaciones de déficit en el balance respecto a las necesidades que se prevé satisfacer.
- Un último problema, metodológico, pero no menos importante, es la dificultad de definir, con una mínima garantía técnica, el caudal que es necesario desde un punto de vista medioambiental. Los procedimientos técnicos de cálculo exigen una recogida de datos y una aplicación de medios de simulación que si bien son utilizables al estudiar una determinada infraestructura no es abordable a corto plazo su realización en todos los cauces en que se plantean actualmente problemas⁴¹.

⁴¹ Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural Marino, Gobierno de España (2011). Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. España.

2.8.2. Chile

El concepto de caudal ecológico se ha introducido a nivel mundial por diferentes países, como una manera de contrarrestar los cambios de ecosistemas que ocurren en los ríos y su entorno biótico. Por tal motivo se ha llevado a cabo el uso de este concepto como una manera eficaz de solución frente a este problema.

Dentro de los estudios que se realizaron para determinar el caudal ecológico en los ríos de Chile se plantearon interrogantes como ¿cuál es el flujo necesario para mantener una calidad de agua óptima?, ¿el caudal mínimo para periodos de sequías?, ¿un caudal óptimo para mantener relaciones intersistémicas? En base a estas preguntas se propuso ciertos criterios para la evaluación de los diferentes métodos que se aplican en el mundo.

1. Estimar un régimen hidrológico expresado en magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de cambio.
2. Estimar un régimen hidrológico en función de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas.
3. Determinar un flujo tal que se mantengan ciertas relaciones intersistémicas
4. Estimar un flujo que asegure una cierta calidad de las aguas.

Frente a estos criterios se evaluaron si los métodos se pueden aplicar a diferentes ecosistemas, que parámetros se requieren por cada método, el costo y la cantidad de profesionales requeridos en las diferentes áreas para determinar el método adecuado. Llegando a la conclusión que se debe tomar en cuenta las relaciones intersistémicas (relación entre los sistemas acuáticos y terrestres), pues de esta depende la variación del clima y preservación de flora y fauna, el cual establece un límite en el volumen de agua que debe circular por el cauce natural para la conservación de la vegetación y la sobrevivencia de especies acuáticas, pues se ha estudiado que hay especies sensibles a cambios bruscos de régimen de caudal que requieren de cierto volumen de agua para el desove y sobrevivencia, a esto se suma la entrada de materia orgánica al cauce pues es la

fuerza de ingreso de carbono más importante, favoreciendo a la abundancia y procreación de detritívoros.⁴²

2.8.3. México

La normativa mexicana sobre la determinación de caudal ecológico aborda muy bien los temas a tratar, en sí es una norma muy completa con respecto a otras existentes.

Un problema representativo, que se encuentra sobre la aplicación de las metodologías para calcular el caudal ecológico en las cuencas hidrográficas de México, es la determinación de este caudal en caso el régimen hidrológico ha sido alterado por la presencia de alguna infraestructura, tales como grandes represas e hidroeléctricas. Aunque la normativa de México trata sobre este tema, la información y la manera de abordarlo es muy poca, solo se menciona la utilización del método hidrológico analizando diferentes parámetros adicionales para estos casos especiales, como una serie mínima de 20 años con información completa sobre cada régimen hidrológico y datos sobre años húmedos, medios, secos, y muy secos; sin embargo, para el caso donde se encuentren infraestructuras se podrían realizar otras formas de estudio que involucren los otros métodos con el fin de obtener un caudal ecológico que sirva de beneficio tanto para los intereses de las personas involucradas, como para la conservación ambiental que rige sobre un determinado cauce.⁴³

2.8.4 Perú

La normativa peruana sobre la determinación de caudal ecológico presenta diversos problemas que no se tratan con mayor profundidad para su correcta aplicación.

En primer lugar, no especifica la realización de la clasificación y estudios de las cuencas nacionales con respecto a la importancia ecológica, presión de uso, estado de conservación deseado, objetivo ambiental, entre otros. En segundo lugar, las metodologías hidrológicas no engloban la problemática sobre la supervivencia de determinadas especies acuáticas como flora y fauna, y zonas protegidas de conservación

⁴² Jamett Gabriela. (2006) Evaluación del concepto caudal ecológico como medida para la conservación de ecosistemas lóticos. (tesis doctoral). Chile: Univ. De Chile.

⁴³ Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (2012) Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrológicas.

ambiental. Por último, el problema sobre infraestructuras que ocasionen impactos en el régimen hidrológico, a diferencia de la normativa mexicana, la norma peruana menciona que se debe realizar las metodologías de simulación de hábitat y holísticos, y no la metodología hidrológica; asimismo, se necesita mayor información de cómo abordar esta problemática de manera más detallada.⁴⁴

2.9. CALIDAD DEL AGUA

La contaminación del agua del río generalmente se divide en dos categorías: contaminación de fuentes puntuales y contaminación de fuentes no puntuales. La contaminación de fuentes puntuales es causada por contaminantes que provienen constantemente de un lugar conocido, tales como aguas servidas domésticas y aguas residuales industriales. La carga contaminante no es afectada por las lluvias. La contaminación de fuentes no puntuales es causada por contaminantes que son liberados junto con la escorrentía superficial, sobre todo cuando llueve. Se incluye el polvo y los residuos urbanos, fertilizantes y pesticidas agrícolas, suelo, estiércol, residuos animales y vegetales, y la deposición de contaminantes atmosféricos. Ambas deben ser controladas de manera apropiada para controlar en forma eficaz la calidad del agua en la cuenca del río. Sin embargo, la contaminación de fuentes no puntuales es más difícil de manejar debido a la liberación intermitente de contaminantes.

En particular, en la cuenca del río Rímac la mayor parte de las precipitaciones en la parte alta, aguas arriba (altura entre 3000 a 4000 m.s.n.m.) por lo que los efectos de las fuentes de contaminación no puntuales en las áreas en el centro de la ciudad a la mitad del río y en la zona aguas abajo son considerados ligeros. En consecuencia, se va centrar principalmente en las fuentes de contaminación puntuales, que son las principales fuentes de contaminación del río Rímac.

2.9.1 Fuentes de contaminación

Las fuentes de contaminación del agua del río Rímac se pueden dividir en gran medida en cuatro: aguas servidas municipales, aguas residuales de fábricas, aguas residuales de minas y residuos sólidos. Estos se pueden dividir en más elementos como se puede observar en la Tabla II-4. El número de fuentes de contaminación en la cuenca del río

⁴⁴ Autoridad Nacional del Agua (2016). Resolución Jefatural N°98-2016-ANA: Metodologías para la determinación del Caudal Ecológico.

Rímac asciende a 1185 (según estudio de ANA, 2011-2013), en la cual el 22% se ubica en el área aguas arriba, un 28% en el área central y un 50% en el área aguas abajo. En cuanto a los tipos de fuentes de contaminación, el número de fuentes relacionadas con aguas residuales municipales es el más alto con un 62%, seguido la fuente de contaminación de residuos sólidos con 27%.⁴⁵

En cuanto a las fuentes de contaminación en cada uno de los afluentes y sub-cuencas, el número más alto se concentra en el área aguas abajo a lo largo de la corriente principal del río Rímac con 50%, seguido por el río Huaycoloro como afluente con 18%. El estado de los contaminantes por afluente se puede apreciar en la Figura 2-1.

⁴⁵ Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.

ELEMENTO	CONTAMINANTE	DESCRIPCION
Aguas residuales municipales	Aguas servidas (aguas servidas domésticas)	Aguas servidas procedentes de hogares que no están conectados a una red de alcantarillado
	Efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales	Efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales manejadas por los gobiernos locales
	Tuberías de drenaje	Descargas ilegales a través de tuberías de drenaje al río
	Aguas residuales de lavado	Aguas residuales de lavado
Aguas residuales de fábricas	Aguas residuales de fábricas	Aguas residuales de fábricas provenientes de actividades industriales
	Aguas residuales agrícolas e industriales	Aguas residuales agrícolas e industriales de actividades de producción agrícola y carnicerías
	Aguas residuales industriales	Lixiviados acompañados del suministro de agua de riego
Aguas residuales de minas	Aguas residuales de minas	Lixiviados de minas en operación
	Aguas residuales de minas agotadas	Lixiviados de minas sin funcionamiento
	Residuos mineros	Contaminación causada por residuos mineros de minas sin funcionamiento
	Residuos mineros	Contaminación causada por residuos mineros de minas agotadas
Residuos sólidos	Residuos municipales	Residuos de hogares
	Residuos de construcción	Residuos de obras de construcción
	Residuos Industriales	Residuos de fábricas
	Residuos orgánicos	Residuos orgánicos

Tabla II-4. Tipos de contaminantes principales (fuentes de contaminación). Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.

Figura 2-1 Distribución de contaminantes por afluente. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto de Restauración del Río Rímac.

2.9.2 Estándares de calidad

Durante el monitoreo de la cuenca del río Rímac se analizaron los parámetros según las categorías. Desde la naciente hasta la captación de agua potable de SEDAPAL, las aguas del río Rímac, según la R.J N° 202-2010-ANA, ha sido clasificada como Categoría 1-A2: “Poblacional y Recreacional”-Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional; y aguas debajo desde La Atarjea hasta la desembocadura en el mar, se clasifica como Categoría 3: “Riego de vegetales y bebidas de animales”-Parámetros para riego de vegetales de tallo bajo y tallo alto. Asimismo, para la evaluación de la calidad de agua de la laguna Ticticocha y laguna Canchis se utilizará la Categoría 4: “Conservación del Ambiente Acuático” para Laguna y Lagos. Los criterios tomados en cuenta para la evaluación de la calidad del agua han sido los valores de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las categorías anteriormente mencionadas. La evaluación se realiza mediante la comparación de los resultados obtenidos de los análisis realizados del laboratorio acreditado, con el valor de la categoría del ECA-Agua. Estos estándares de calidad se presentan en la Tabla II-5 según los respectivos parámetros y categorías.⁴⁶

⁴⁶ Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.

PARAMETROS	UNIDAD	ECA Cat.1 A2 "Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional"	ECA Cat.4 "Conservación del ambiente acuático"	ECA Cat.3 "Riego de vegetales y bebida de animales"
PARAMETROS FISICOS				
Sólidos totales suspendidos	mg/L	---	<=25	---
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBOs	mg/L	5	<5	<=15
Demanda Química de Oxígeno DQO	mg/L	20	---	40
Aceites y grasas	mg/L	1	Ausencia de película visible	1
PARAMETROS INORGANICOS				
Cianuro WAD	mg/L			0.1
Cianuro libre	mg/L	0.022	0.022	---
Sulfuros	mg/L	---	---	0.05
Sulfatos	mg/L	---	---	300(riego) 500(bebida)
Clorofila	ug/L	---	10	
Nutrientes				
Nitrógeno amoniacal	mg/L	2	<0.02	---
Nitrógeno total	mg/L	---	1.6	---
Nitratos	mg/L	10	5	10(riego) 50(bebida)
Fosforo total	mg/L	0.15		---
Fosfatos	mg/L	---	0.4	1(riego)
PARAMETROS MICROBIOLOGICOS				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	2000	1000	1000
Escherichia Coli	NMP/100mL	0	---	100
METALES				
Cromo Hexavalente	mg/L	0.05	0.05	0.1(riego) 1(bebida)
Corridas de metales (Al, As, Ba, B, Be, Cd, Cr, Cu, Co, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Ag, Zn, Hg)	mg/L	variable	variable	variable

Tabla II-5. ECA-Agua según parámetros y clasificación del cuerpo de agua. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.

El estado de la calidad de los cuerpos de agua en la cuenca del río Rímac, en base al resultado del monitoreo realizado en setiembre 2015, se describe:

En la zona alta de la cuenca se observa concentraciones en exceso al ECA de Antimonio, Arsénico, Manganeseo, que son parámetros asociados a la naturaleza geoquímica de la cuenca y a los vertimientos de aguas residuales, pasivos mineros, desmontes de minas y relaveras ubicadas en su ámbito.

En la zona media de la cuenca (en los puntos de monitoreo RRima-8 y RRima-9) destaca la presencia de arsénico y aluminio, asimismo, los Coliformes Termotolerantes y Escherichia Coli, debido a los vertimientos de aguas residuales domésticas (tuberías que desembocan en el cauce del río) y el arsénico con mayor probabilidad se deba a las aguas residuales industriales. Cabe precisar que en esta zona, el más afectado por exceso de parámetros que no cumplen el ECA-agua, fue la quebrada Huaycoloro, donde se observó que las concentraciones de los parámetros de DBO5, DQO, N-amoniaco, Fósforo, Aluminio, Arsénico, Hierro, Manganeseo, Plomo, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli, exceden con amplitud los ECAs, esto por parte a que en su largo recorrido recibe la descarga de los vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas, así como residuos sólidos procedentes de chancherías y de construcción, esta quebrada es un tributario importante de río Rímac, por lo cual constituye una fuente considerable de contaminación.

Finalmente, en la zona baja de la cuenca (en los puntos de monitoreo RRimac10, RRimac11, RRimac12 y RRimac13) se tiene que los Coliformes Termotolerantes y Escherichia Coli exceden de manera considerable los ECA-Agua. Este elevado número del parámetro microbiológico se debe a la gran cantidad de vertimiento de aguas residuales domésticas (tuberías conectadas al cauce del río) y botaderos de residuos sólidos ubicados en la ribera del cuerpo natural de agua. Además, en estos puntos también se tiene altas concentraciones de fósforo, aluminio, arsénico, DBO, DQO, cobre, hierro y Manganeseo. Estos resultados se pueden apreciar en la Tabla II-6, donde tenemos los parámetros donde los ECA-Agua han sido excedidos según cada punto de control.⁴⁷

⁴⁷ Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.

CUERPO RECEPTOR	CODIGO	DESCRIPCION	CATEGORIA	PARAMETROS QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AGUA: ECA-AGUA (D.S. N° 002-2008-MINAM)	ZONA
Quebrada Antarranra	QAnta-1	Vertimiento de VolcanCompañía Minera-UM Ticio	1 A2	Antimonio, Arsénico, Cadmio, Manganese,	Alta
Laguna Ticticocha	LTict-1	Laguna Ticticocha, salida de la laguna, Carretera Central Km 127	4	---	Alta
Quebrada Chinchán	RChin-1	Quebrada Chinchán (MI), aguas abajo del puente Ferrocarril, Carretera Central Km 119.5	1 A2	Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-1	Río Rímac(MI), aguas abajo del vertimiento de Minera Los Quenuales S.A.	1 A2	Cianuro Was, N-Amoniacal, Antimonio, Manganese, Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-2	Río Rímac(MI), 220m aguas abajo del vertimiento de Compañía Minera Casapalca	1 A2	Cianuro Was, Antimonio, Manganese, Escherichia Coli	Alta
Río Blanco	RBlanc-1	Estación Meteorológica de SENAMHI	1 A2	Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-3	Río Rímac (MD), puente Anchi II, Carretera Central Km 100, antes de la unión con río Blanco.	1 A2	Antimonio, Manganese, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Alta
Río Aruri	RArur-1	Río Aruri(MI), 25m aguas debajo de puente de madera artesanal y 20m de la descarga de bocamina Pilcomayo	1 A2	Cadmio y Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-4	Río Rímac(MD), 100m aguas abajo del vertimiento de Nyrtar Coricancha, antes de la unión con río Aruri	1 A2	Arsénico, Cadmio, Escherichia Coli	Alta
Río Aruri	RArur-2	Río Aruri(MI), 50m antes de la confluencia con el río Rímac(ingreso por EDEGEL).	1 A2	Arsenico y Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-5	Río Rímac (MD), aguas arriba de la unión con el río Mayo(Puente Tambo de Viso), Carretera	1 A2	DQO, Arsenico y Boro	Alta
Río Mayo	Rmayo-1	Río Mayo(MI), 50m antes de la confluencia con el río Rímac	1 A2	Aluminio, Cadmio y Manganese	Alta
Río Rímac	RRima-6	Río Rímac(MI), 100m aguas abajo del puente Surco, Carretera Central Km66.	1 A2	Arsénico, Boro, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-7	Río Rímac(MD), 100m aguas arriba del puente Ricardo Palma, Carretera Central Km 38(cancha de grass sintético de la municipalidad)	1 A2	Arsénico, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Alta
Canchis	LCanc-1	Laguna Canchis, salida de la laguna	4	pH, Cadmio, Cobre, Plomo y Zinc	Alta
Quebrada Collique	QColl-1	Quebrada Collique(MD), antes de la confluencia con el río Pallca	1 A2	Aluminio	Alta
Río Santa Eulalia	Rsant-1	Río Santa Eulalia(MD), 120m antes de la confluencia con el río Rímac.	1 A2	Aluminio, Arsénico, Hierro y Escherichia Coli	Alta
Río Rímac	RRima-8	Morón, Carretera Central Km 23.	1 A2	Escherichia Coli	Media
Río Rímac	RRima-9	Río Rímac(MD), Bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable "Huachipa"	1 A2	Arsenico y Escherichia Coli	Media
Quebrada Huaycoloro	Qhuay-1	Quebrada Huaycoloro(MD), 40m antes de la confluencia con el río Rímac	1 A2	Conductividad, DB05, DQO, N-Amoniacal, Fosforo, Aluminio, Arsénico, Hierro, Manganese, Plomo, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Media
Río Rímac	RRima-11	Río Rímac(MD), Bocatoma 2, Planta de tratamiento de agua potable "La Atarjea"	1 A2	Fosforo, Aluminio, Arsénico, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Baja
Río Rímac	RRima-10	Río Rímac(MD), Bocatoma 1, Planta de tratamiento de agua potable "La Atarjea"	1 A2	DQO, Fosforo, Aluminio, Arsénico, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Baja
Río Rímac	RRima-12	Río Rímac(MI), 200m aguas abajo del puente Universitaria, Av. Morales Duares(parque)	3	Manganese, Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Baja
Río Rímac	RRima-13	Río Rímac(MD), 20m aguas arriba del puente Nestor Gambeta	3	Coliformes termotolerantes y Escherichia Coli	Baja

Tabla II-6. Parámetros que exceden los ECA-Agua en la cuenca del río Rímac. Fuente: Plan Maestro para el Proyecto Restauración del Río Rímac.

3 CAPÍTULO: LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El río Rímac, el más importante del departamento de Lima, nace en las alturas de Ticlio discurrendo por las provincias de Lima y Huarochirí con dirección noreste - suroeste y cuenta con una longitud de 140 Km aproximadamente. Sus afluentes principales son las quebradas El Carmen y Huaycoloro, y los ríos Chinchán, Blanco, Aruri, Parac y Santa Eulalia. En la Figura 3-1 se muestra la cuenca del Rímac, el río principal y sus afluentes.

Figura 3-1: Cuenca del río Rímac y su río principal. Fuente propia

La cuenca del Río Rímac se encuentra en la latitud sur desde $11^{\circ}36' 52''$ hasta $12^{\circ}05' 47''$ y en la latitud oeste desde $76^{\circ} 11' 05''$ hasta $77^{\circ}04' 36''$. Además, cuenta con un área de captación de 3,503.95 km². Esta cuenca está conformada por 9 subcuencas: Bajo Rímac con un área de 441 km², Jicamarca con un área de 492 km², Medio Bajo Rímac con un área de 268 km², Santa Eulalia con un área de 1,077 km², Medio Rímac con un área de 634 km², Medio Alto Rímac con un área de 56 km², Parac con un área de 130 km², Rímac con un área de 170 km² y, finalmente, Alto Rímac con un área de 236 km². En la Figura 3-2 se muestra las subcuencas que conforman la cuenca del Río Rímac.

Figura 3-2: Cuenca del río Rímac y subcuencas. Fuente propia.

El río Rímac se origina en una zona alta y helada a 5,100 metros sobre el nivel del mar, y pasa por los departamentos de Lima y Junín, en términos de distritos administrativos. El río está formado por el río Santa Eulalia y el río San Mateo cuyas pendientes medias de lecho son 4,94% y 6,33%, respectivamente. Los dos ríos se encuentran en Chosica, y la pendiente después que se encuentran es 1,7%.

La estación seca en la cuenca del río Rímac ocurre de junio a noviembre, época durante la cual el caudal del río es muy bajo y se forma a medida que la nieve en la parte alta se derrite, además de la presión hídrica debido a la generación de energía.

Existen 15 lagos aguas arriba del río Santa Eulalia que aseguran el caudal del río Rímac y su capacidad de almacenamiento es de 77 millones de m³ (MMC). Además, la represa Yuracmayo con una capacidad de 48.3 MMC se ubica aguas arriba del río Blanco, por ende, aguas arriba del río Rímac. En la cuenca del río Rímac existen siete centrales hidroeléctricas (Matucana, Huinco, Callahuanca, Moyopamapa, Huampaní, Yanango y

Chimay)⁴⁸ que en épocas de estiaje muchas veces toman todo el caudal que pasa por el río dejando ciertos tramos secos.

Figura 3-3: Cuenca del río Rímac, subcuencas y lagunas. Fuente: Autoridad Nacional del Agua.

3.1.1. Estaciones de aforo

Las estaciones de aforo, que se encuentran ubicadas en la cuenca del río Rímac son administradas por EDEGEL y SENAMHI-Lima, y por ser una cuenca de gran importancia se instalaron estaciones de etapas independientes.

Existen más de 20 estaciones de aforo en la cuenca del río Rímac y solo 9 estaciones, incluyendo el túnel trasandino (Milloc), Sheque, Chosica, entre otros se encuentran datos históricos de caudales. En la Tabla III-1 se muestra las estaciones en donde se tiene información sobre escorrentía y sus respectivas coordenadas.

⁴⁸ Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.

ESTACION	DEPARTAMENTO	LONGITUD	LATITUD
MILLOC	LIMA	76° 21'1	11° 34'1
SHEQUE	LIMA	76° 29'55.3	11° 39'29.5
RIO BLANCO	LIMA	76° 15'33	11° 44'5.3
SAN MATEO	LIMA	76° 18'4.6	11° 45'37.6
CHOSICA	LIMA	76° 41'23.8	11° 55'48.5
YANACOTO	LIMA	76 42' 1"	11 55' 1"
PUENTE LOS ANGELES	LIMA	76 45' 1"	11 58' 1"
PUENTE HUACHIPA	LIMA	76°53'41.4"	12°00'46.9"
DESEMBOCADURA L-1	LIMA	76° 54'1	12° 15'1

Tabla III-1. Estaciones con datos históricos de caudales, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Fuente Propia.

Asimismo, en la Figura. 3-4 se muestra la ubicación de las estaciones en la cuenca en estudio, según sus coordenadas en el Sistema de Información Geográfica (SIG).

Figura 3-4: Cuenca del río Rímac con las estaciones Hidrométricas y climatológicas.
Fuente propia.

3.2. DATOS DE LA CUENCA DEL RIO EN ESTUDIO

3.2.1. Caracterización geomorfológica de la cuenca

La cuenca del río Rímac cuenta con una superficie de 3503.95 km², de la cual el 65.7%, (2302.1 km²) corresponden a la cuenca húmeda contando a partir de los 2500 msnm. El río Rímac se forma por la confluencia de los ríos Santa Eulalia y San Mateo (que también se llama Rímac); esta confluencia se forma cerca de la localidad de Chosica. El perímetro de la cuenca del río Rímac es 419.5 km y la longitud del río principal es de 127.02 km. Los principales factores de forma son: Área de la cuenca (A), perímetro de la cuenca (P), longitud del río principal (L), ancho promedio de la cuenca (Ap.), índice de compacidad (Kc) y rectángulo equivalente (RE). Según el relieve, los principales parámetros de son: Curva hipsométrica, pendiente media de la cuenca (Sm) y el Coeficiente de torrencialidad (Ct). Por otro lado, los factores más importantes de la red hidrográfica son: Tipo de corriente, densidad de drenaje (Dd) y la extensión media del escurrimiento superficial.⁴⁹

3.2.1.1 Área (A)

La magnitud del área se ha obtenido con el uso del programa ARC GIS 10.5, mediante la base de datos del Inventario de cuencas y estaciones hidrometeorológicas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). El área de la cuenca del río Rímac es 3503.9 km².

3.2.1.2 Perímetro (P)

La longitud que recorre el perímetro de la cuenca del río Rímac es de 419.5 km.

3.2.1.3 Longitud del río principal (L)

Es la longitud de mayor recorrido que realiza el río, desde la parte alta o cabecera de la cuenca, siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades, hasta que llegue a un punto fijo de interés, este puede ser una desembocadura o estación de aforo. La longitud del río principal de la cuenca del río Rímac es de 127.02 km, hasta su desembocadura.

⁴⁹ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

3.2.1.4 Ancho promedio de la cuenca (A_p)

Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud del río principal, cuya expresión es la siguiente:

$$A_p = \frac{A}{L}$$

Donde:

A_p = Ancho promedio de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

L = Longitud del cauce principal (km).

El ancho promedio de la cuenca del río Rímac es 27.58 km.

3.2.1.5 Índice de compacidad (K_c)

Es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro, describe la geometría de la cuenca, cuando son redondeadas posee el coeficiente mínimo igual a 1 y tiene mayor tendencia a las crecientes; cuando se aleja de la unidad, presenta una forma más irregular con relación al círculo, es decir, alargadas. La siguiente expresión nos permite calcular el índice de compacidad:

$$K_c = 0.282 \left[\frac{P}{\sqrt{A}} \right]$$

Donde:

P = perímetro de la cuenca (km).

A = área de la cuenca (km²).

Cuando el $K_c = 1$ el tiempo de concentración es menor, la cuenca es redondeada y mayor tendencia a crecientes, y $K_c = 2$ el tiempo de concentración es mayor, la cuenca tiene forma alargada y menor tendencia a crecientes. El coeficiente de compacidad de la cuenca del río Rímac es de 2.00, esto indica que la cuenca posee una forma alargada, debiendo estar menos expuesta a las crecientes que una cuenca de forma circular.⁵⁰

⁵⁰ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

3.2.1.6 Rectángulo Equivalente (RE)

Es la representación geométrica de una cuenca delimitado como un rectángulo que tenga la misma área de esta. La longitud de sus lados está dado por:

$$RE = 0.25 * P \pm \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A}$$

Donde:

RE = Longitud de sus lados del rectángulo equivalente (mayor y menor) en km.

P = Perímetro de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

La longitud mayor y menor de la cuenca del río Rímac: 191.45 km y 18.30 km.

3.2.1.7 Curva hipsométrica

Es utilizada para representar gráficamente cotas de terreno en función de las superficies que encierran. Si se ubica en el punto más alto de la cuenca y se calcula a partir de cada curva de nivel, las áreas acumuladas por encima de ellas, se puede construir la curva hipsométrica (Martínez et al, 1996). En general, tanto las alturas como las superficies son definidas en términos porcentuales. Se define como curva hipsométrica a la representación gráfica de las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes.⁵¹ Las curvas hipsométricas para la cuenca del río Rímac se muestran en la Figura 3-5.

⁵¹ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

Figura 3-5: Curva hipsométrica de la cuenca del río Rímac. Fuente: Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

3.2.1.8 Pendiente media de la cuenca

Este factor de relieve es resaltante debido a su relación con el comportamiento hidráulico de drenaje de la cuenca, y tiene una importancia directa con la magnitud de las crecidas. Para su estimación se emplea el parámetro de forma del “Rectángulo Equivalente”.

$$Sm = \frac{H}{Lm}$$

Donde:

Sm = Pendiente media de la cuenca.

H = Desnivel total (cota en la parte más alta-cota en la parte más baja), en km.

Lm = Lado mayor del rectángulo equivalente (km).

Por lo tanto, la cuenca del río Rímac tiene una pendiente media de 0.00293 m/m.

3.2.1.9 Coeficiente de torrencialidad (Ct)

Este factor indica la relación entre el número de ríos de cursos de primer orden con el área de la cuenca como se muestra en la siguiente fórmula:

$$Ct = \frac{N^{\circ}R1}{A}$$

Donde:

Nº R1 = Número de ríos de primer orden.

A = Área de la cuenca (km²).

En la cuenca del río Rímac existen 120 ríos de primer orden, por ende, el coeficiente de torrencialidad es de 0.03.⁵²

3.2.1.10 Tipo de corriente

Para clasificar el tipo de corriente en el río se toma en cuenta la permanencia del flujo en el cauce del río.

En la cuenca del río Rímac, el cauce contiene agua de manera permanente, por ende, es de tipo perenne.

3.2.1.11 Densidad de drenaje

Este parámetro representa la longitud (kilómetros) del curso del río que existe, por cada unidad de superficie. La expresión que la define es la siguiente:

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje (km/km²).

LT = Longitud total de ríos de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km²).

⁵² Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

Según Monsalve S, G. (1999) para valores hasta 0.5 km/km², se considera cuencas con drenaje pobre y para valores hasta 3.5 km/km², se estima como cuencas excepcionalmente bien drenadas.

Para la cuenca del río Rímac la densidad de drenaje es de 0.66 km/km², esto indica que tendría drenaje regular y propenso, de manera moderada, a las crecientes.

3.2.1.12 Extensión media del escurrimiento superficial (E)

Este parámetro se puede definir como la distancia promedio en una línea recta, en la cual, agua de la precipitación tendría que recorrer para llegar al lecho de un curso de agua. El valor se determina con la siguiente relación:

$$E = \frac{A}{Lt}$$

Donde:

A = Área de la cuenca (km²).

LT = Longitud total de ríos de la cuenca (km).

Por lo tanto, en la cuenca del río Rímac, la extensión media del escurrimiento superficial es de 1.51 km²/km.⁵³

3.2.2. Geología

La geología de la cuenca del río Rímac comprende diversos estratos de roca, incluyendo rocas volcánicas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas. La estructura de fallas se desarrolló hacia los Andes. Con la subducción de la Placa de Nazca al oeste del Océano Pacífico, se añadieron sedimentos, rocas volcánicas y rocas plutónicas al bloque amazónico este para crear la orogenia (conjunto de montañas) andina que crece hacia el oeste. Al este de la Cordillera de los Andes, se desarrolló una banda de lechos de roca Precámbricos y Paleozoicos, incluyendo rocas cristalinas y rocas sedimentarias, en dirección noroeste.⁵⁴

⁵³ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

⁵⁴ Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.

3.2.3. Suelo

La capacidad de infiltración del suelo varía en función de sus características. La precipitación efectiva, que es contribución de la precipitación total a la escorrentía directa varía en función de la capacidad de infiltración. Por lo tanto, la identificación de las características del suelo en la cuenca es importante para analizar la escorrentía de las lluvias. El suelo en la cuenca del río Rímac está compuesto de suelo expuesto, Solonchaks (suelos salinos) y depósitos aluviales. Mientras que, en el desierto costero, el suelo se compone principalmente de arena, y una capa delgada de suelo de mala calidad en la ladera de las montañas de los Andes.

Principalmente, el suelo en la cuenca del río Rímac se compone de suelo fértil, suelo infértil, suelos Solonchaks, Andosoles, Yermosoles y Xerosoles.

3.2.3.1 Suelo fértil

Contiene materia orgánica y humedad se distribuye en un área de riego árida con topografía plana. El suelo seco compuesto por una capa delgada de diversos materiales en la superficie se genera en desfiladeros y áreas llanas. Algunos contienen sales.

3.2.3.2 Suelo infértil

La mayor parte de los suelos con partículas finas es creada por el viento en las zonas secas. Está compuesto principalmente por arena de color marrón oscuro. Este suelo presenta potencial agrícola si se mejora su calidad.⁵⁵

3.2.3.3 Suelos Solonchaks

La mayor parte del suelo son depósitos marinos. Se distribuye dentro de 100 cm debajo de la superficie, y se caracteriza por una alta conductividad eléctrica.

3.2.3.4 Andosoles

Formado por ceniza volcánica y escoria volcánica, es ligeramente ácido y distribuido en la zona desértica cerca de San Mateo.

⁵⁵ Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.

3.2.3.5 Yermosoles

Este suelo es calcáreo, ya que contiene calcio y posee baja conductividad eléctrica. Se distribuye en gran medida en una pendiente empinada.

3.2.3.6 Xerosoles

Este suelo contiene un poco de calcio, y se distribuye en gran medida en una altura que fluctúa entre 2100m y 2600m. Es favorable al entorno ecológico y adecuado para diversas actividades agrícolas.

3.2.4. Entorno ecológico

El entorno ecológico en la cuenca del río Rímac incluye selva montañosa, desierto subtropical, desierto seco (zona de colinas, tierras bajas, y áreas montañosas), zona seca subtropical, pastos, desierto tropical, zona húmeda tropical, tierras altas tropicales y tundra.⁵⁶ En la figura 3-6 se aprecia la diversidad del entorno ecológico y la cobertura vegetal presente en la cuenca.

⁵⁶ Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.

Figura 3-6: Entorno ecológico y cobertura Vegetal en la cuenca Rímac. Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2016)

3.3. SERIES HISTÓRICAS DE CAUDALES NATURALES

Dentro de los parámetros que se requieren para calcular los caudales ecológicos por métodos hidrológicos, se encuentran los datos históricos de los caudales, en este caso son datos diarios. Sin embargo, de todas las estaciones dentro de la cuenca, únicamente la estación Chosica tiene los datos históricos completos sin saltarse etapas, a diferencia de las otras estaciones.

En la Tabla III-2, se muestra los años donde se encuentra datos históricos por cada estación. En la cuenca del río Rímac, se tiene registro de caudales en las estaciones: Chosica, Desembocadura L-1, Milloc, Puente Huachipa, Puente Los Angeles, Río Blanco, San Mateo, Sheque y Yanacoto. Solo la estación Chosica cuenta con un registro completo hasta finales del año 2013. Para aplicar los métodos hidrológicos se necesita registros mínimos de 20 años; por ende, se requiere completar los caudales en las otras estaciones, según los datos que se dispongan.

Como los datos de series históricas, en la mayoría de las estaciones, son pocos se realizó un modelo hidrológico de la cuenca del río Rímac, donde se completó los caudales faltantes en las estaciones de Río Blanco, San Mateo y Sheque. Estas son las más representativas ya que pertenecen a las subcuencas más importantes que conforman la cuenca del río Rímac, al margen derecho la subcuenca Santa Eulalia (estación Sheque), y al margen izquierdo las subcuencas medio alto Rímac (estación río blanco) y medio Rímac (estación San Mateo). Cabe señalar que, en la parte alta de estas subcuencas, son zonas principales donde se tiene registros de caudales naturales, los cuales nos interesa para realizar la comparación entre los caudales simulados y los observados (registro de caudales naturales). Finalmente se completa la serie de caudales de manera homogénea; en las principales estaciones de estudio (estación Chosica, Sheque, San Mateo y Río Blanco), para los métodos hidrológicos, hasta el año 2014.

año	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941		2010
Est.chosica																								
año	1968	1969																						
Est.desembocadura																								
año	1969	1970	1971				1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
Est.milloc																								
año	1960	1961	1962																					
Est.p.huachipa																								
año	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954					2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008						
Est.p.angeles																								
año	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988			
Est.blanco																								
año	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989		
Est.san mateo																								
año	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970																	
Est.sheque																								
año	1955	1956	1957	1958	1959	1960																		
Est.yanacoto																								

Tabla III-2. Estaciones con datos históricos de caudales, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Fuente Propia.

3.3.1. Estación Chosica

La Estación de Chosica se encuentra en la latitud sur $11^{\circ} 56'$ y la longitud oeste $76^{\circ} 41'$, y a una altura de 870m sobre el nivel del mar. Pertenece al Perú (País), Lima (Región), Lima (Provincia), Chaclacayo (Distrito) en términos de división administrativa, y existen datos de la esorrentía disponibles para el período 1920 a 2014 (94 años en total).

Como se ha venido mencionando anteriormente esta estación es la más completa a lo que se refiere a datos de series históricas de caudales, la cual, resulta ser la más importante, ya que en ella discurre los caudales que vienen tanto por el lado de Santa Eulalia como por el lado que viene de San Mateo y Río Blanco. Son en conjunto estas estaciones representativas (Rio Blanco y Sheque) donde se hará la verificación de los caudales obtenidos empleando el modelo hidrológico. Así podremos completar los datos faltantes y finalmente cumplir con el objetivo de calcular el caudal ecológico por los métodos hidrológicos.

En la Tabla III-3, se presenta los caudales mensuales, datos brindados por la Autoridad Nacional del Agua.

Tabla III--3.Caudales Mensuales en la estación Chosica, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

3.3.2. Precipitación y Tratamiento de la Información.

El 72.52% de las precipitaciones anuales en la cuenca del Río Rímac ocurren en temporada de lluvias, desde diciembre a marzo, aunque el 7.15% y el 20.33% ocurren en el periodo de estiaje (desde mayo a septiembre) y en temporada de transición (en abril, octubre y noviembre), respectivamente. La información pluviométrica disponible corresponde a una red de veintisiete (27) estaciones meteorológicas para el estudio de la precipitación, de los cuales diecinueve (19) estaciones están ubicadas dentro de la cuenca Rímac y ocho (8) estaciones en las cuencas vecinas.⁵⁷ Entre ellas, el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) tiene, instaladas y con funcionalidad, una red de 17 estaciones meteorológicas e hidrológicas entre automáticas y convencionales, en la cuenca Media Alta. Todas las estaciones automáticas registran y transmiten por el medio del satélite gratuito GOES 13, cada hora. De las siete (7) estaciones que tiene equipamiento automático, tres (03) de ellas también poseen un instrumental convencional y se realizan observaciones que se transmiten mediante el sistema de comunicación modem celular, Voz y Data.

Las estaciones convencionales, ya sea climatológica o pluviométrica, tienen datos más antiguos, pero tienen cierta discontinuidad y solo se tiene información en determinadas horas del día. La propiedad del predio en la mayoría de las estaciones le pertenece al observador, esto indica la poca disponibilidad de lugares donde se pueda instalar nuevas estaciones. Si bien el acceso no es muy difícil, el efecto de la creciente urbanización viene trayendo consecuencias para las estaciones.⁵⁸

Actualmente, se tiene la precipitación media mensual en 16 estaciones pluviométricas en operación en la cuenca del río Rímac, estas se muestran en la Tabla III-4.

⁵⁷ Autoridad Nacional del Agua (2010) Evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca del río Rímac. Perú.

⁵⁸ Chira, Jorge (2016) Mejora de red de monitoreo para la prevención de peligros hidrometeorológicos en la cuenca del Río Rímac. Perú. (Tesis maestría). UNI.

Nro.	Estación	Cuenca	Precipitaciones
1	Aeropuerto Internacional	Chillón	1989-1994
2	Arahuay	Chillón	1980-2014
3	Autisha	Rímac	1980-2014
4	Campo de Marte	Rímac	1996-2014
5	Canchacalla	Rímac	1987-2014
6	Carampoma	Rímac	1965-2014
7	Casapalca	Rímac	1987-2014
8	Chalilla	Lurín	1969-1984
9	Chosica	Rímac	1989-2014
10	Cieneguilla	Lurín	1971-1975
11	Hipolito Unanue	Rímac	1968-1990
12	La Cantuta	Rímac	1994-1996
13	Lachaqui	Chillón	1965-2014
14	Laguna Pirhua	Rímac	1969-1980
15	Matucana	Rímac	1964-2014
16	Milloc	Rímac	1986-2014
17	Mina Colqui	Rímac	1968-1994
18	Nana	Rímac	1989-2014
19	Pariacancha	Chillón	1968-2014
20	Rímac	Rímac	1971-1979
21	Río Blanco	Rímac	1985-2009
22	San José de Parac	Rímac	1980-2014
23	Santa Clara	Rímac	1972-1976
24	Santa Eulalia	Rímac	1963-2014
25	Santiago de Tuna	Lurín	1965-2014
26	Von Humboldt	Rímac	1964/66- 67/80-99/10- 14

Tabla III-4. Data de las Estaciones de precipitaciones (mm) con datos históricos por año, información brindadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

3.3.3. Modelación Hidrológica con WEAP

En el caso de las estaciones que se encuentren con pocos datos históricos y con saltos de varios años, como las estaciones Sheque, Río Blanco y San Mateo; se realizará un modelo hidrológico utilizando el software WEAP para la generación y completación de datos de caudales.

3.3.3.1. Descripción del Software WEAP.

La interfaz gráfica usada por WEAP permite generar un esquema de estudio basándose en diferentes parámetros como información climatológica, precipitación, coeficientes de cultivo, usos del suelo, etc. que nos ayudan a modelar los registros históricos de caudales.

Las principales características de WEAP son:

- Enfoque Integrado: Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
- Procesos de Participación: Una estructura transparente que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.
- Balance de Agua: Base de datos que mantiene la información de demanda y oferta de agua para realizar balances de masa
- Basado en Simulación: Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento y descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos, para variados escenarios hidrológicos y de políticas operacionales.
- Escenarios de políticas de uso de agua: Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo de agua, y toma en cuenta múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.⁵⁹

3.3.3.2. Método de lluvia escorrentía (Método humedad del suelo)

El método de lluvia escurrimiento (método de la humedad del suelo) ha sido desarrollado para proporcionar una manera simple pero realista, la modelación de los procesos hidrológicos con una representación semi-física. Este modelo ha sido desarrollado con el objetivo de representar la variabilidad espacial en suelos, vegetación y datos atmosféricos

⁵⁹ SEI (Stockholm Environment Institute) (2015), Tutorial WEAP Water Evaluation and Planning System. Suecia.

en los balances de agua y energía, su estado y flujos al interior de un sistema. Todo ello en base de la topografía local y la transitividad o capacidad del suelo, un proceso generalmente ignorado por muchos esquemas de transferencia suelo- vegetación- atmosfera (Famiglietti & Wood, 1994a, 1994b; Peters- Lidard et al., 1997; Pauwels & Wood, 1999a, 1999b).⁶⁰

El modelo básicamente toma en cuenta dos estanques donde se realiza el balance hídrico para cada uso de suelo, en los cuales se considera precipitación, escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (Centro de Cambio Global, 2009).

Adicionalmente, son necesarios los datos de caudales en estaciones de medición para comparar con resultados del modelo y se realizar la calibración. La representación gráfica de la base conceptual del modelo se observa en la figura 3-7, donde el balance se realiza entre los estanques que representan la zona de raíces y zona profunda. Asimismo, se muestra las variables involucrados para el método de humedad del suelo.

Figura 3-7: Elementos hidrológicos del modelo humedad de suelo en WEAP. Fuente: SEI (Stockholm Environment Institute).

⁶⁰ Loaiza Juan, Pauwels Valentijn (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales, Caso de estudio para vertientes de alta montaña. Revista Gestión y Ambiente Vol. 14 N°3 pp. 23-22. Colombia.

Los parámetros de suelo para el modelo hidrológico son:

- **Kc**: Coeficiente de cultivo, que es relativo a la clase de suelo en la cuenca o subcuencas.
- **SWC**: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona Radicular.
- **DWC**: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda. Este se da como un valor único para la cuenca y no varía según la clase de suelo. Se ignora si el sitio de demanda tiene un flujo de retorno a un nodo de agua subterránea.
- **RRF**: Factor de resistencia a la escorrentía. Se utiliza para controlar la respuesta a la escorrentía superficial, guarda relación con los factores de índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (rango de 0.1 a10) y varía según el tipo de suelo.
- **RZC**: Conductividad en la zona radicular. Puede variar de acuerdo con el tipo de suelo.
- **DC**: Conductividad en la zona profunda. Controla la transmisión del flujo base. Este se da como un valor único para la cuenca. A medida que este parámetro aumente, el flujo base también aumentará.
- **PFD**: Dirección preferencial del flujo. Se utiliza para dividir el flujo que sale de la zona de raíces (balde superior) entre el flujo que sale de la zona profunda (balde inferior) o el agua subterránea.
- **Z1**: Contenido de humedad del suelo en la zona de raíces. Es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total del balde superior. Es un valor inicial para comenzar la simulación.
- **Z2**: Contenido de humedad del suelo en la zona profunda. Es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total del balde inferior. Es un valor inicial para comenzar la simulación.⁶¹

Las ecuaciones de balance de masas para cada estanque se presentan a continuación, en el estanque superior (Bucket 1):

⁶¹ SEI (Stockholm Environment Institute) (2015). Manual WEAP Water Evaluation and Planning System. Suecia.

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)Z_{1,j}^2 - f_j k_s Z_{1,j}^2 - (1 - f_j)K_s Z_{1,j}^2$$

Donde:

-1er término: Cambio en humedad del suelo (almacenamiento de agua en zona raíces)

-2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)

-3er término: Evapotranspiración

-4to factor: Escorrentía superficial

-5to término: Flujo intermedio

-6to factor: Percolación

La ecuación para el método de humedad del suelo en el estanque inferior (Bucket 2), es la siguiente:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d Z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s Z_{2,j}^2$$

Donde:

-1er término: Cambio en humedad del suelo (almacenamiento de agua en zona profunda)

-2do término: Flujo base

-3er término: Percolación⁶²

Estas ecuaciones son empíricas y describen la dinámica de flujo, por el método de humedad del suelo, que acontece en los estanques, los mismos que conceptualizan los componentes de superficial, subsuperficial y percolación profunda del ciclo hidrológico.⁶³

⁶² SEI (Stockholm Environment Institute) (2015). Manual WEAP Water Evaluation and Planning System. Suecia.

⁶³ Duque Luis, Vázquez Raúl (2015) Modelación de la oferta hídrica en una cuenta de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe. Vol. 7 - N° 1 - Mar. 2015. pp. 63- 76.

3.3.3.3. Uso de suelo y cobertura vegetal

El uso mayor de suelos, en la cuenca del río Rímac, predominan los suelos de protección y de pastoreo limitado. Los suelos con aptitud para cultivos en limpio representan una pequeña parte de los suelos de la cuenca, confinados a lo que queda del valle Rímac, San Mateo y Santa Eulalia.

El uso del suelo en la cuenca se puede agrupar en las siguientes categorías:

- **Cuenca Baja:** conformado por el elevado proceso de urbanización como parte de la expansión del área metropolitana de Lima, aquí destacan los múltiples usos incluyendo el habitacional, industrial, comercial y de servicios. La presencia de industrias metalúrgicas, agroindustrial y papelera es notable en la zona.⁶⁴ El proceso de desarrollo a lo largo del río Rímac es muy intensivo, creando ligas funcionales entre los diferentes poblados y con una fusión de actividades a lo largo de la cuenca baja.
- **Cuenca Media:** presenta un desarrollo fraccionado debido a las condiciones topográficas, aunque prevalece el aumento de actividades a lo largo de la Carretera Central y el cauce del río Rímac. La confluencia del río Rímac (San Mateo) y el río Santa Eulalia, marca el inicio de actividades menos intensivas y más dispersas espacialmente, producto de las condiciones geomorfológicas y las limitaciones espaciales predominantes de esta zona. En la cuenca media se localizan actividades industriales con impactos severos en la calidad del agua del río Rímac, debido a sus vertimientos sin tratamiento. En la subcuenca del río Santa Eulalia, la ubicación de los distintos usos responde a la localización y al trayecto de la carretera principal y los caminos vecinos.
- **Cuenca Alta:** A lo largo del río Rímac, en la parte alta, el desarrollo ha girado históricamente en torno a la actividad minera. Gran parte de los poblados tienen su origen en la instalación de plantas concentradoras de minerales ubicadas al borde de la carretera central y/o en los márgenes del río Rímac. En cuenca, parte alta y zona oriental, se encuentra la subcuenca del río Blanco, la cual presenta condiciones muy estables desde el punto de vista ambiental. En la cuenca alta (subcuenca del río Santa Eulalia), se

⁶⁴ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

identifican áreas extensas de pastos altoandinos, con algunos centros de población que forman unidades económicas basadas en actividades de tipo pecuario.⁶⁵

En la figura 3-8, se presenta la distribución del uso de suelos en toda la cuenca del río Rímac.

Figura 3-8: Uso de suelo en la cuenca del río Rímac. Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2015).

Por otro lado, la cobertura vegetal está constituida exclusivamente por gramíneas de tipo forrajero. Se puede observar que en el rango altitudinal entre 0 - 1,000 msnm, son áreas áridas o desiertas con pocas especies de Tillandsias, que viven de la humedad atmosférica. Entre los 1,000 y 2,000 msnm, se considera una zona semiárida con especies tales como el molle (*Schinus molle*), la “tara” (*Caesalpinia tinctoria*) y varias especies de cactus. En el rango de 2,000 a 4,000 msnm se observa algunos arbustos y vegetación de pastos naturales estacionales; entre los 4,000 y 5,000 msnm los pastos naturales son permanentes. El área de estudio de la cuenca del río Rímac abarca 3503,95 km² aproximadamente, extensión que ha sido intervenida de manera intensiva por

⁶⁵ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

considerables actividades de aprovechamiento y explotación, causando mucho deterioro, como son los procesos erosivos, contaminación del agua y otros.⁶⁶

Estos parámetros (uso de suelo y cobertura vegetal) nos brinda información sobre el comportamiento, las características primordiales y la conformación de los suelos, el cual se va a utilizar al momento de realizar el método de humedad del suelo. Junto con el factor de cultivo (kc), son factores predominantes para representar dentro del modelo hidrológico a realizar, tanto en la zona de raíces como en zona profunda del suelo.

3.3.3.4. Características del software Hydraccess

Hydraccess es un software completo, homogéneo y manejable por el usuario, que permite importar y guardar varios tipos de datos hidrológicos en una base de datos de formato Microsoft Access 2000.

Hydraccess hace un uso extenso de las posibilidades de automatización de Microsoft Office. Este software proporciona numerosas posibilidades de visualizar los datos, en gráficos simples o comparativos, que es posible desfilas libremente bajo Microsoft Excel gracias a una pequeña macro incluida con el software. Así se puede visualizar los datos al intervalo de tiempo que conviene a la variabilidad de los datos. Asimismo, este software tiene mucha utilidad para el procesamiento de datos, desde microcuencas hasta grandes ríos.

Unas de las funciones avanzadas con las que cuenta este programa son:

- Método del **vector regional** de índices pluviométricos, adaptado a la evaluación de lluvias mensuales o anuales.
- Cálculo de la **lluvia promedio sobre una cuenca** (método de Thiessen, inverso del cuadrado de la distancia o Kriging, produciendo mapas de contornos a colores).

⁶⁶ Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

3.3.3.5. Descripción del método Vector Regional

El Vector Regional es, ante todo, un método de análisis de datos (y accesoriamente de reconstitución de datos faltantes), elaborado en el ORSTOM-IRD en los años setenta, con el objeto de homogenizar los datos pluviométricos.

El método del Vector Regional consiste en elaborar, a partir del conjunto de la información disponible, una especie de estación ficticia que sea representativa de toda la zona de estudio. Para cada estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice que será superior a 1 cuando el año es excedentario, e inferior a 1 cuando el año es deficitario.⁶⁷ A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional, ya que toma en cuenta la información de una región que se supone es climáticamente homogénea. Este método también puede aplicarse a datos mensuales, tratando separadamente cada uno de los meses del año como si se tratara de un valor anual. Una vez elaborado el Vector Regional, el análisis de los datos es enormemente facilitado, ya que se puede:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación por curvas de dobles acumuladas con los índices del Vector Regional, lo que ayuda a poner de relieve problemas de calidad eventuales sobre una estación.
- Comparar gráficamente y correlacionar los datos de una estación con los índices del Vector Regional.⁶⁸

Para la cuenca del río Rímac se realizó la completación y homogenización de los datos, utilizando el vector regional para tratamiento de la información y así trabajar con las estaciones que tienen mayor correlación con el vector; y estas son: Autisha, Canchacalla, Carampoma, Casapalca, Matucana, Milloc, Rio Blanco, San Jose de Parac, Santa Eulalia y Sheque. En la figura 3-9 se muestra la gráfica del método Vector Regional ajustada por correlación con las estaciones a considerar en el modelo hidrológico. Finalmente, con la data obtenida y tratada, se calculará la precipitación media, la cual, se ingresará al modelo hidrológico, en el software WEAP.

⁶⁷ IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) (2002), Manual de uso del Software Hydracces. Francia.

⁶⁸ IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) (2002), Manual de uso del Software Hydracces. Francia.

Figura 3-9: Vector regional ajustada por correlación para tratamiento de la información. Fuente propia.

Para verificar la homogenización de los datos resultantes respecto al vector se realiza la gráfica acumulativa de los índices del vector y de las estaciones. Según el manual de uso del Hydracces, mientras las tendencias sean lineales y de forma creciente demuestran mayor ajuste entre la data de precipitación; así también, se puede observar los valores de correlación entre las estaciones y el vector (considerando una buena correlación mayores a 0.6).⁶⁹ En la figura. 3-10 se presenta el gráfico de índices del vector regional con los datos ya tratados por correlación en el mes de enero, así se trabaja para todos los meses restantes.

⁶⁹ IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) (2002), Manual de uso del Software Hydracces. Francia.

Figura 3-10: Suma de índices anuales del Vector y de las Estaciones. Fuente propia.

ESTACIONES	CORREL. /VECTOR
CANCHACALLA	0.854
AUTISHA	0.816
CARAMPOMA	0.796
CASAPALCA	0.662
MATUCANA	0.703
MILLOC	0.670
RIO BLANCO	0.795
SAN JOSE DE PARAC	0.747
SANTA EULALIA	0.921
SHEQUE	0.812

Tabla III-5. Correlación de las estaciones con el Vector Regional. Fuente Propia.

En la tabla III-6, se presenta los datos de precipitación mensual después de completar y homogenizar, en la estación de Santa Eulalia. De la misma manera, se completó el resto de las estaciones para luego calcular las precipitaciones medias.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1975	16.3	80.2	78.8	2.6	1.3	0	0	0	0.5	0.9	27.6	44.7
1976	33.3	204.5	43.3	3.4	0.1	0	0	0	0.1	0	0.1	14.3
1977	30	78	28.1	5.4	1.1	0	0	0	0.2	0.4	15.1	7.8
1978	22.3	28.5	33	1.4	0	0	0	0	0.2	0	1.8	7.4
1979	8.3	49.5	61.2	0.4	0	0	0	0	0.1	0.7	1	8
1980	20.2	0.3	35.1	7.3	0.8	0	0	0	0.3	17.9	5.9	1.1
1981	36.6	69.8	103.8	23.3	0.1	0.4	0.1	5.1	3.2	11	13.9	25.4
1982	42.1	50.3	6	20.9	0.4	0	0.3	2	0	10.3	10.1	0.5
1983	12.7	40.9	96.4	16.9	0	0	0	0	0.6	1	1.8	20.2
1984	39.9	138.4	35.1	19	1.9	0	0	0	0	4.1	18.7	31.4
1985	2.3	27.2	6.2	14.7	0	0	0	0	0.2	2.7	0	7.7
1986	21.9	30.5	47	13.3	7.6	0	0	0	4.8	0	0	14
1987	35.5	29.1	48.1	19.2	5.4	0	0	0	0	0	5.1	11.3
1988	46.6	34.3	36.6	5.9	1	0	0	0	0	1.7	0.9	21.9
1989	49.9	143.6	61.2	4.4	0	0	0	0	0	6.1	0	2.4
1990	26.8	5.1	20	1.6	0	0	0	0	0	4.4	16.5	44.1
1991	4.5	15.6	96.1	0	0	0	0	0	0	9.7	9.9	4.2
1992	1	1.7	8.8	0	0	0	0	0	0	2.8	0.9	1.4
1993	48.5	75.3	72.8	14.7	1.3	0	0	0	2.9	10.8	16	19
1994	63.6	39.1	36.9	9.2	2.7	0	0	0	4.2	3.3	6.6	16
1995	25.5	24.5	49	9.3	3.9	0	0	0	2.8	6.9	14.9	26.4
1996	55.3	66.7	86.8	12.2	0.7	0	0	0	0.6	2	0.2	7.7
1997	15.8	32.7	6.7	0.2	0.1	0	0	0.4	7.5	6.4	14.5	54.8
1998	113.2	158.3	136.3	7.9	0	0	0	0	0.7	1.1	5.9	16.8
1999	89.7	187	63.5	21.9	0.4	0	0	0.1	1.9	10.9	2.6	20.2
2000	57.7	95.3	54	4.8	1.3	0	0	0	1.1	9.1	2.3	24.3
2001	49.4	80	120	15.8	0	0	0	0	2.1	2.2	12.5	0.1
2002	10.6	48.7	41.5	29.3	1.2	0	0	0	1.1	4.7	10.1	2.7
2003	36.6	39.7	58	8.6	0	0	0	0	0	0.2	5.4	75.5
2004	13.8	51.7	37.8	13	0	0	0	0	1.3	4.9	5.3	38
2005	41.9	38.4	53.5	4	0	0	0	0	0	1.7	0.6	42.6
2006	50.7	105.9	86.3	25.5	0	0	0	0	2.7	1.3	4.3	30.4
2007	31.6	43.6	87.1	41.7	0	0	0	0	0	1.3	0	0
2008	72.8	120.8	63.8	1.3	0	0	0	0	0	0	13	15.9
2009	85.9	112.8	75.8	24.5	0	0	0	0	0	8.5	15.3	8.5
2010	3.7	53.8	18.5	9.6	0	0	0	0	0	0.8	2.7	35.7
2011	48.8	59.3	52.8	29.8	0.4	0	0	0	0.3	0.9	21	35.9
2012	24.1	83.9	57.4	76	1.1	0	0	0	1.1	4.2	10.8	21.6
2013	20.3	93.8	62.2	9	3.9	0	0	0	0.2	2.5	6.2	30.8
2014	43.1	51.5	63.4	15.4	0.7	0	0	0	0.9	2.56	7.6	25.15

Tabla III-6. Completación y homogenización de datos en la estación de Santa Eulalia.

Fuente Propia. *Color rojo: precipitación de datos completados.

3.3.3.6. Precipitación Media.

En general, la altura de precipitación que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Para muchos problemas hidrológicos se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar a la altura de precipitación diaria, mensual, anual, media mensual, media anual.⁷⁰ En este caso se empleará la media mensual, las cuales son necesarias para aplicar los métodos hidrológicos para el cálculo del caudal ecológico.

Existen varios métodos para calcular la precipitación media como el método aritmético, Thiessen, Inversa de la Distancia, Kriging, entre otros. Para este caso se utilizará el método de Kriging, ya que se calcula con los centroides de cada subcuenca. Con la aplicación del programa Hydracces se calculó la precipitación media por el método de Kriging. En la Figura 3-11, se observa la subcuenca de Santa Eulalia y las estaciones con las cuales se calculará la precipitación media; de igual manera se calcula para las otras subcuencas.

Figura 3-11: Subcuenca Santa Eulalia y estaciones de la cuenca en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente propia.

⁷⁰ Máximo Villón (2002). Hidrología. Edit. Taller de Publicaciones del Instituto tecnológico de Costa Rica.

Tabla III-7. Precipitación media mensual de la subcuenca Santa Eulalia. Fuente Propia.

3.3.3.7. Factor del cultivo (K_c).

La necesidad de agua de un cultivo se refiere a la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración. Para el caso de la vertiente del río Rímac se establecerá la cobertura vegetal de cada subcuenca que se determina en la figura 3-12, y se obtendrá el K_c correspondiente a cada cultivo presente en dicha área de cuenca, este se halló en base a la investigación “Reforestación con fines de mejora ambiental de los pisos altitudinales comprendidos entre los 1000 a 5000 m.s.n.m en la cuenca del Rímac, dentro del acápite Características de las Zonas de Vida en el área de estudio de la Cuenca del río Rimac”.⁷¹ En función a los cultivos, áreas de influencia, homogeneidad de las plantas se llegó a la conclusión que en la mayoría de las subcuencas de la parte alta se tiene los siguientes cultivos: gigantón, grama salada, huanarpo, junco, mito, totota, carrizo, caña, pájaro bobo y otros. Estos se cargan al modelo WEAP, según las áreas de influencia por cada subcuenca a estudiar. En la Tabla III-9 se muestra los coeficientes de cultivo (K_c) de mayor influencia en las subcuencas del Rímac.

⁷¹ Cáceres Mayorga, N.E.; Castro Ortiz, L.M et al. (2000). Reforestación con fines de mejora ambiental de los pisos altitudinales comprendidos entre los 1000 y 5000 m.s.n.m. de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú. Tesis (Ing. Forestal, Ing. Agronoma, Ing. Meteorólogo).

Figura 3-12: Cuenca Rímac distribuidas por subcuena. Fuente propia.

NOMB_UH_N6	NOMB_UH_N7	NOMB_UH_N8	AREA_KM2
Rimac	Medio Bajo Rimac		267.6005
Rimac	Bajo Rimac		441.0314
Rimac	Parac		130.4345
Rimac	Jicamarca		492.3139
Rimac	Medio Rimac		633.7149
Rimac	Alto Rimac		235.7487
Rimac	Medio Alto Rimac		55.9288
Rimac	Rimac		169.8126
Rimac	Santa Eulalia		1077.3687

Tabla III-8. Área de cada subcuena de la vertiente del río Rímac. Fuente propia.

<i>Planta/Cultivo</i>	<i>Kc</i>	<i>Capacidad de agua del suelo (mm)</i>
Giganton	0.95	700
Gramma Salada (Pasto turf-grass)	0.95	700
Huanarpo (Sorgo)	0.7	800
Junco	1.2	800
Mito	1.2	800
Totora	1.2	800
Carrizo	1.2	700
Caña	1	500
Pajaro bobo (Huerto de nogal)	1.1	500
otros	1	1000

Tabla III-9. Factor de uso consultivo Kc. Fuente: Evapotranspiracion de cultivo, Estudio FAO riego y drenaje. Excercise weap, Center of reserach in Water Resource. Soil Texture, FAO.

3.3.3.8. Modelo hidrológico de la Cuenca del Rímac con WEAP

Para la utilización del Software WEAP en la Cuenca del Rímac, se adoptó un modelo donde la cuenca principal es dividida en subcuencas, las que a su vez tienen características propias de suelo y datos climáticos que permiten representar de mejor manera la variabilidad de cada una. Por lo tanto, se empleará los datos de entrada descritos como la precipitación media, precipitación efectiva, evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo (Kc), capacidad de agua del suelo, área de influencia por subcuenca y demás datos climáticos requeridos como temperatura, humedad, viento, latitud, punto de congelamiento, nubosidad y cantidad inicial de nieve (en este caso la variable no es relevante); finalmente corremos el modelo como se muestra en la figura 3-13. Los resultados obtenidos se presentan en los siguientes hidrogramas de caudales. Para la calibración del modelo se utiliza los parámetros del suelo donde hay escasez de información y se trabaja con ciertos rangos en función a las características predominantes en la cuenca de estudio, como el factor de resistencia a la escorrentía, conductividad en la zona de raíces, conductividad profunda, dirección preferencial del flujo, contenido de humedad en la primera capa (Z1) y contenido de humedad en la capa profunda (Z2). Los valores tomados en cuenta se presentan en el subcapítulo siguiente Evaluación del Modelo Hidrológico.

Figura 3-13: Cuenca Rímac modelada en el software WEAP. Fuente propia.
SHEQUE

ESTACION SHEQUE

Tabla III-10. Caudales simulados de la estación Sheque. Fuente propia.

ESTACION RIO BLANCO

Tabla III-11. Caudales simulados de la estación Río Blanco. Fuente propia.

ESTACION SAN MATEO

Tabla III-12. Caudales simulados de la estación San Mateo. Fuente propia.

3.3.3.9. Evaluación del Modelo Hidrológico

En general, los modelos hidrológicos presentan mucha incertidumbre a causa de las diferentes fuentes de error que se presentan al realizar este procedimiento, algunos de ellos, como los datos de ingreso de las diferentes variables hidrometeorológicas que se consideran en el modelo. Por ello, debe evaluarse los caudales simulados con la serie de datos de caudales observados. Para evaluar la bondad del modelo, un enfoque de prueba - error es utilizado, cuyos resultados son evaluados con la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), el criterio de Schultz (D) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Estos criterios estadísticos son de los más usados y conocidos en hidrología.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

Este coeficiente mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$. El coeficiente de eficiencia se ha seleccionado porque es adimensional y es fácil de interpretar.⁷² La ecuación que rige este criterio se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

- Q_{sim} : Caudal simulado
- Q : Caudal observado
- $\bar{Q}$: Caudal promedio observado

Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla:

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno

⁷² Trucios Caciano, R.; Martínez Rodríguez, J.G et al. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Río Sextin en Durango, México. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, vol. VI núm. 1, 2007, pp. 91-101. Universidad Autónoma Chapingo Durango, México.

0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Tabla III-13. Valores Referenciales del criterio de Nash. Fuente: Molnar, 2011.

Criterio de Schultz (D):

El criterio de Schultz representa la desviación de los caudales simulados respecto de los observados. Se calcula como:

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Donde:

- Q_{sim} : Caudal simulado
- Q : Caudal observado
- Q_{max} : Caudal máximo observado en el período de estudio
- n : Número de datos en el período de estudio

El uso de este criterio es recomendado para análisis de eventos de alta resolución temporal. Y los valores para evaluar la calibración son los siguientes:

D	Ajuste
0-3	Muy bueno
3-10	Bueno
10-18	Suficiente
>18	Insuficiente

Tabla III-14. Valores Referenciales del criterio de Shultz. Fuente: Molnar, 2011.

Raíz del Erro Cuadrático Medio (RMSE):

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores de caudales simulados respecto a los observados. Se formula como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}}$$

Donde:

- Q_{sim} : Caudal simulado
- Q : Caudal observado
- n : Número de datos en el período de estudio

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores mayores indican un menor ajuste.

Resultados de la Calibración del modelo:

Debido a la poca disponibilidad de datos hidrológicos e hidrométricos, los cuales muestran caudales alterados por la infraestructura hidráulica presente en la cuenca, el proceso de calibración se realizó para las estaciones Rio Blanco y Sheque, utilizando caudales naturales para su comparación. Se ha considerado un período total de aproximadamente 20 años, de acuerdo con la cantidad de años de caudal observado en dichas estaciones. El cuadro siguiente muestra los resultados estadísticos:

Estación	Periodo	Coefficiente de Nash (Adimensional)	Criterio de Schultz (Adimensional)	RMSE (m ³ /s)
Rio Blanco	1980-2006	0.80	3.71	1.23
Sheque	1980-2006	0.75	3.02	2.48

Tabla III-15. Resultado de la prueba de bondad de ajuste para el modelo hidrológico mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el criterio de Schultz y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) del caudal (m³/s).

En los siguientes gráficos se puede observar los hidrogramas, tanto del caudal simulado como el observado en las estaciones de Rio Blanco y Sheque, así como también la comparación de caudales promedios mensuales después de la calibración.

Figura 3-14: Cuenca Rímac modelada en el software WEAP. Fuente propia.
SHEQUE

Figura 3-15: Gráfico de caudales de entrada, caudal simulado y caudal observado VS Tiempo.

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta a la serie de datos observados. Este proceso puede realizarse de varias formas, el método más utilizado y usualmente

recomendado es el de Prueba y error, el cual implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. La calibración de modelos se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste.⁷³ En este caso, según el coeficiente de Nash, el criterio de Schultz y la Raíz del error cuadrático Medio; se puede llegar a la conclusión que contamos con una bondad de ajuste muy bueno para los valores referenciales obtenidos luego de la evaluación del modelamiento hidrológico. También se puede observar que, en promedio el caudal simulado es ligeramente menor que el observado, entre los meses de abril y agosto. Por ende, se calculará un caudal ecológico constante por los métodos hidrológicos, con los caudales naturales completados en el modelo; con el fin de complementar los volúmenes de agua que aportan los embalses aguas arriba para las diferentes demandas de los recursos hídricos presentes en la cuenca del río Rímac.

El modelo calibrado es utilizado para generar y completar los caudales faltantes en las distintas estaciones de control en la zona de estudio. Los rangos y calibración de los parámetros para el modelo humedad del suelo, se observan en la siguiente tabla.

PARAMETROS	RANGO	SUBCUENCA MEDIO Y ALTO RIMAC	SUBCUENCA SANTA EULALIA
CAPACIDAD DE AGUA PROFUNDA (mm)	1000 - 3000	2000	2000
FACTOR DE RESISTENCIA A LA ESCORRENTIA	0.8 - 4	2.13	1.35
CONDUCTIVIDAD DE ZONA DE RAICES (mm/mes)	10 - 500	55.46	110
CONDUCTIVIDAD PROFUNDA (mm/mes)	10 - 150	60	90
DIRECCION PREFERENCIAL DE FLUJO	0 - 1	0.23	0.11
Z1(%)	0 - 100	40	40
Z2(%)	0 - 100	20.59	25

Tabla III-16. Parámetros de calibración del modelo lluvia escorrentía (humedad del suelo). Fuente: Juan Puigdefábregas, Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC) (2001), Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009), PhD.

⁷³ Cabrera Juan (2012) Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.

Daene McKinney, Center for Reserch in Water Resources (2005), Duque Yaguache et al. (2015).

3.4. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL TRAMO DE RÍO

Para calcular el caudal ecológico por el método hidráulico se determinó los tramos más críticos con respecto al tema ambiental, y más accesibles para realizar el levantamiento topográfico. El tramo estudiado en este trabajo de investigación consta de una distancia de 2.5 km en la parte media baja de la vertiente del Río Rímac, este tramo se encuentra al lado de la autopista Ramiro Prialé perteneciente al distrito de Lurigancho cerca del límite distrital con Ate Vitarte. En las figuras 3-16 y 3-17 se puede apreciar el tramo a estudiar.

Figura 3-16: Tramo del Río en estudio en el mapa distrital. Fuente: Google Maps

3.5. MEDICIONES HIDRÁULICAS

El método hidráulico utilizado para calcular el caudal ecológico es el del perímetro mojado. Este método hidráulico se inicia con la recolección de información topográfica de un tramo seleccionado del Río Rímac (Campo), a continuación, se emplea el uso del software Civil 3D para proyectar la topografía del terreno a estudiar. Luego se recopiló datos sobre las características hidráulicas del Río, como la velocidad del flujo, área de la sección transversal, perímetro mojado y tirante hidráulico. Posteriormente, se realizó la simulación hidráulica del tramo del Río, para ello, el modelo Hec-Ras 4.1. fue utilizado. Con este modelamiento podemos calcular el caudal en función a los parámetros anteriormente mencionados, junto con las características que se deben tener en cuenta para preservar los ecosistemas acuáticos.

3.5.1. Medición de velocidad de caudal.

Para determinar la velocidad del flujo se empleará la fórmula de Manning. Para tal efecto, se define el radio hidráulico, el perímetro mojado, la rugosidad del tramo de río que produce un efecto retardante en el flujo. Asimismo, se determinó la pendiente del río mediante un levantamiento topográfico.

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Donde:

n: coeficiente de rugosidad de Manning

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente (m/m)

Otra alternativa a emplear es mediante el uso de un correntómetro, el cual se estima empíricamente.

$$V = an + b$$

Donde:

V: velocidad de corriente.

n: número de revoluciones por segundo del molinete

a y b: constantes de relación se obtienen a partir de observaciones.

Procedimiento.

- Determinar la longitud de la superficie libre del agua.
- Dividir la sección en 10 tramos de igual longitud.
- Medir las profundidades del agua en cada extremidad de los tramos de la sección.
- Seleccionar los puntos de medición de la velocidad, según la velocidad del agua.
- Si $Y \leq 0.6\text{m}$ se supone que la velocidad media, en esa vertical, se encuentra a 0.6m del tirante, medida a partir del fondo del río.
- Si $Y > 0.6\text{m}$ se supone que la velocidad media, en esa vertical es equivalente a la media aritmética de las velocidades medias a 0.80 y 0.20 de la altura de agua de la vertical.
- Para cada sección se determinará la velocidad media la que se multiplicará por el área.⁷⁴

Para este caso en particular, se hallará la velocidad con el primer método mencionado por cada sección de tramo del río, considerando su comportamiento como la de un canal natural trapezoidal. Utilizando la ecuación de Manning, despejada y expresada para hallar la velocidad se procede a realizar los cálculos.

$$V = \frac{R_h^{2/3} \cdot \sqrt{S_e}}{n}$$

Algunos parámetros a tener en cuenta son los siguientes: el talud del río (z), el ancho de solera (b), y el tirante hidráulico (y).

En este caso, por el material el cual pasaba el cauce del río como piedras, tierras y algunos bancos con pastos, se consideró el coeficiente “n” de Manning respectivo.

⁷⁴ Ven Te Chow.(1986).Hidráulica de los canales abiertos. edit. Diana México

<u>Material del canal</u>	<u>n</u>
<i>Canal revestido con concreto (0.013-0.015)</i>	0.014
<i>Excavado en tierra (recto y uniforme) limpio</i>	0.022
<i>Excavado en tierra (recto y uniforme), grava</i>	0.025
<i>Con fondo de tierra y costados de piedra partida</i>	0.030
<i>Con fondo pedregoso y bancos con pastos</i>	0.035
<i>Canal revestido con mampostería (piedra partida cementada)</i>	0.025

Por lo tanto, se utilizará, $n = 0.035$ en todos los tramos, este se podría ajustar en función del modelo.

3.6. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Un levantamiento topográfico es una reproducción del relieve de cualquier superficie y los elementos que lo conforman, se reflejara básicamente en curvas de niveles definiendo sus alturas por medio de cotas a partir de un punto determinado llamado VM o punto 0, normalmente existe ya una predeterminación con respecto a la cartografía nacional basado en cuadrantes definidos por su ubicación con respecto al norte. En el caso del río Rímac se realizó un levantamiento de 2.5km que está delimitado entre el puente Huachipa y 1km aguas arriba donde finaliza el río Huaycoloro, que se mostrará en la figura. 3-17 siguiente. Se consideró este tramo ya que es una zona crítica por la contaminación, donde se descarga los afluentes del Huaycoloro hacia las aguas del río Rímac y, también, porque aguas más abajo ingresan a la planta de tratamiento la Atarjea.

Figura 3-17: Tramo del Río en estudio imagen satelital. Fuente: Google Earth

Fotos del río en estudio. Fuente Propia.

Resultados esperados

Se esperan los siguientes resultados finales del siguiente levantamiento.

- ✓ Contar con información topográfica a detalle para el diseño de obras en el Río Rímac
- ✓ Contar con planos con curvas de nivel cada 0.50 m., a una escala 1:1000, con las dimensiones, alineamiento, y seccionamiento
- ✓ Contar con todas las planillas de coordenadas UTM (X, Y, Z) referidas al Datum WGS 84.

La planilla de coordenadas correspondientes al levantamiento topográfico se encuentran en el Capítulo 8 (ANEXOS).

Figura 3-18: Secciones del terreno y curvas de nivel en civil 3D. Fuente propia.

3.7. EVALUACION DE LA GEOMORFOLOGIA FLUVIAL

La característica geomorfológica de la cuenca está caracterizada por la presencia de un valle con una sección transversal estrecha, con un relieve muy agreste. Las marcadas variaciones de pendiente se relacionan con los cambios en las condiciones geológicas y tectónicas que generan una morfología muy dinámica que se va modificando rápidamente, sobre todo a lo largo del curso principal y en el cauce de los torrentes activos que afluyen en la zona media y baja de la cuenca (ríos tributarios tales como Santa Eulalia, San Mateo y quebradas que se activan en los meses de verano en la costa de Lima, tal como la quebrada de Huaycoloro).⁷⁵

El río Rímac abastece de agua superficial y subterránea a la población de Lima. Su cono de deyección del río Rímac, tiene una extensión, a lo largo del borde litoral, de 30 km desde el extremo SE de los pantanos de Villa hasta el extremo norte de San Martín de Porres, y 20 km desde los acantilados de Miraflores hasta Vitarte. El cono de deyección está formado por un suelo permeable fluvial del Cuaternario antiguo. El río Rímac y sus afluentes, de la parte alta al cono de deyección, han erosionado rocas sedimentarias de lutitas y volcánicos del Paleógeno-Neógeno con erosión de calizas del Cretáceo medio a superior. A menor cota desde Corcona, en Chosica, hasta Vitarte (ubicación del tramo analizado), afloran intrusivos, en su mayoría de composición intermedia del Cretáceo superior, en una distancia de 30 km. Por su parte, la geodinámica externa del río Rímac da lugar a aluviones (huaicos), desprendimientos de rocas, deslizamientos y asentamientos que afectan a las obras viales y a las poblaciones. La cuenca del río Rímac de las zonas altas, sobre los 2 200 msnm de altura hasta los 4 820 msnm (Ticlio), se puede considerar como la zona «A» de lavado. Las aguas lavan el suelo de los flancos de los valles y la llevan al río. A esto se suma la presencia de agua de lluvia. Todo ese material es depositado a las cotas menor entre los 2200 a 1800 msnm de altura entre Tambo de Viso hasta San Jerónimo de Surco, lo cual destroza las poblaciones ubicadas a lo largo de las terrazas fluviales, terrazas aluviales y terrazas fluvio-aluviales. Este mismo fenómeno se produce en los ríos tributarios del Rímac, como el Santa Eulalia y el Huaycoloro. Lo mismo sucede en las diferentes quebradas como en el Pedregal, cerca de Chosica.

⁷⁵ Aliaga Rojas, Elmer Oliver (2005). Programa de Monitoreo del Río Rímac en la cuenca Media y Baja. (Tesis). UNI.

Gracias al aporte de agua del río Rímac, los once millones de habitantes de Lima pueden satisfacer sus necesidades de abastecimiento. Lo interesante es que alimenta de agua subterránea a todo el suelo del referido cono. La capital ha incrementado su población con la ubicación de viviendas en los bordes de los cerros de rocas intrusivas y rocas sedimentarias compactas, el conjunto de estas viviendas forma una serie de asentamientos humanos que se abastecen de agua por efecto del bombeo de aguas subterráneas, que luego son almacenadas en tanques de almacenamiento a mayor cota de los asentamientos humanos.⁷⁶

3.8. EVALUACION DEL ESTADO DE LAS CONDICIONES HIDROBIOLOGICAS

Normalmente los ríos constituyen un lugar de desarrollo de vida, tanto de especies acuáticas como de especies vegetales en ambos márgenes del lecho. Pero, la intervención del hombre, a través de sus diversas actividades, conlleva a la utilización del agua, incluso la sobre explotación del recurso hídrico ha creado ciertos conflictos de uso, impactando de manera negativa sobre el entorno, generando perjudiciales desequilibrios. Por otro lado, el alto grado de ocupación de las tierras que soporta el área de estudio, tiene como consecuencia un entorno de baja calidad ambiental, quedando pocos espacios de valor para su diversidad biológica.

Su historia avanza en el tiempo, hasta mediados del siglo XX, cuando por la contaminación y la caída del caudal del río desaparecieron.” En el río Rímac como en cualquier otro río de la costa sur y central habitaban camarones. Hay bibliografía que indica que allí había pescadores, había peces, camarones, pejerreyes y seguramente que habría algún tipo de nutrias. Hoy en día ninguno de esos peces existe debido a la contaminación y a la detracción en los caudales en muchas partes del río. Si vas por el río vas a encontrar zonas que son totalmente secas porque se está derivando agua para las centrales hidroeléctricas y eso afecta a la flora y la fauna. La parte baja desde la Atarjea hasta el mar está muy contaminada y ahí no hay posibilidades de vida”, comenta Juan Ocloa, biólogo especialista en calidad de recursos hídricos del ANA.

⁷⁶ Tumialán de la Cruz, Pedro (2016). Rasgos Geológicos del Río Rímac, Abastecimiento de Agua en su Cono de Deyección. Perfiles de Ingeniería, 12(12), 19-26.

La biodiversidad, flora y fauna que anidaba en sus aguas y daba color al cauce del río, casi se ha extinguido. Con excepción de las pocas truchas que habitan en las alturas de San Mateo, y renacuajos y caracoles en las partes media baja, el resto de los animales son solo parte del recuerdo.⁷⁷

Actualmente existe el proyecto “Recuperación de las riberas del río Rímac” que se inició a fines del año 1996, en el sector comprendido entre la Bocatoma de La Atarjea y el Puente Huachipa (tramo donde se aplicará los métodos para estimar el caudal ecológico). Este proyecto consiste en erradicar chancherías, botaderos de basura y de desmonte; reforestar ambas márgenes del río Rímac, e inclusive en la margen derecha (carretera central), se ha instalado 12 miradores peatonales y 4 miradores vehiculares diseñados con una arquitectura paisajística que permitirán disfrutar de la belleza natural del río y brindará áreas de esparcimiento a la población aledaña y visitante. Se han venido recuperando alrededor de 84,8 ha de terrenos ubicados en la margen izquierda del río Rímac y 21,0 ha de terrenos ubicados en la margen derecha; asimismo, se han reforestando 13 ha de la margen derecha del río Rímac, utilizándose 15 980 plantones y en la margen izquierda se han reforestado 9,8 ha, utilizándose 11 000 plantones, de especies como el molle serrano, el huaranhuay, la fourcroya, la retama, la tara, el sauce, el palo verde y el eucalipto, que contribuyen a la protección del cauce del río Rímac y con la conservación de la diversidad biológica existente. En los islotes ribereños se aprecia una avifauna compuesta por bandadas de gaviotas de plumaje color blanco y dorso ceniciento que se alimentan de pequeños peces característicos como el bagre y el pejerrey. La garza, ave de color blanco, y pequeñas aves conocidas como “Santa Rositas” visitan el río en pequeñas bandadas; también se observa en el río al “Guardacaballo” ave de color negro y larga cola. Otra ave visitante menos popular es el “Gallinazo”, ave de rapiña que aún se mantiene en el área.⁷⁸

3.9. EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

Los criterios tomados en cuenta para la evaluación de la calidad del agua, han sido los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de la Categoría 1-A2: “Poblacional y Recreacional”-Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento

⁷⁷ Hanguk Yun (2015). El río que se quedó sin vida. Revista Ideele, 249.

⁷⁸ Alcántara, Ramón y Orbegoso Marilez (SEDAPAL) (1998). Reserva Ecológica del Río Rímac. Perú

convencional; y aguas debajo desde La Atarjea hasta la desembocadura en el mar, Categoría 3: “Riego de vegetales y bebidas de animales”-Parámetros para riego de vegetales de tallo bajo y tallo alto, y la Categoría 4: “Conservación del Ambiente Acuático” para Laguna y Lagos. La evaluación se realiza mediante la comparación de los resultados obtenidos de los análisis del laboratorio acreditado (NSF ENVIROLAB S.A.C) con el valor de la categoría del ECA-Agua, centrándonos en el tramo de estudio que se encuentra entre el puente Huachipa y 1km aguas arriba donde finaliza el río Huaycoloro, así mismo se evaluó aguas arriba y aguas debajo de este tramo. Estos se ubican en el área central de la cuenca específicamente en los puntos de monitoreo RRima-7 (Río Rímac, 100m aguas arriba del puente Ricardo Palma, Carretera Central Km 38), RRima-8 (Río Rímac, 80m aguas abajo del puente Morón, Carretera Central Km 23), RRima-9 (Río Rímac, Bocatoma de la planta de tratamiento de agua potable "Huachipa") y RRima-10 (Río Rímac, Bocatoma 1, Planta de tratamiento de agua potable "La Atarjea"). Esta evaluación se tomó como referencia del informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac, presentado por la Autoridad Nacional del Agua el 2016.

En el punto de monitoreo RRima-7, según los parámetros evaluados se tiene que la concentración de arsénico (As) es 0.014mg/L, lo cual supera ligeramente al valor del ECA-Agua (0.01mg/L), esto debido a las aguas residuales industriales. Los resultados correspondientes al análisis microbiológico indican que la concentración de coliformes termotolerantes y *Escherichia Coli* excede considerablemente al valor del ECA-Agua, esto debido a los vertimientos de aguas residuales domésticas (tuberías conectadas al cauce del río). De igual manera ocurre en el punto de monitoreo RRima-8, adicionalmente a los parámetros ya mencionados, en este punto la concentración de aluminio es ligeramente superior por 0.2 veces el valor del ECA-Agua.⁷⁹

En el punto de monitoreo RRima-9, la concentración de arsénico (As) es 0.014mg/L siendo superior en 0.4 veces el valor del ECA-Agua (0.01mg/L). Mientras que el resultado del análisis microbiológico, la concentración de *Escherichia Coli* (1300 NMP/100ml) excede el valor del ECA-Agua (0 NMP/100ml). Por último, en el punto de monitoreo RRima-10 la concentración de fosforo, aluminio y arsénico superan los límites

⁷⁹ Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.

establecidos en el ECA-Agua; así como también los Coliformes Termotemporales y *Escherichia Coli* a consecuencia de los vertimientos de aguas residuales domésticas y botaderos de residuos sólidos.⁸⁰

3.10. IDENTIFICACION DE LA IMPORTANCIA SOCIAL, ECONOMICA Y ECOLOGICA DEL ECOSISTEMA ACUATICO Y LAS PLANICIES DE INUNDACION

La importancia de mantener un ecosistema acuático abarca desde la calidad del agua hasta los aspectos paisajísticos sobre el río. Se puede destacar beneficios en los aspectos sociales, económicos, ambientales y educativos; esto centrado en la parte media y baja de la cuenca del río Rímac que es donde se está planteando el plan de recuperación de la reserva ecológica y donde se aplicará la estimación del caudal ecológico.

En los aspectos sociales se puede resaltar una mejor calidad en el agua en el transcurso de este tramo del río en estudio y el agua que llega a las plantas de potabilización mejoraría el nivel de protección de la salud en la población, esto gracias a que el río contaría con poca concentración de materia orgánica y partículas minerales; mejoraría el abastecimiento de agua potable en la población. También favorecería como un lugar turístico, ocio y para practicar actividades o deportes al aire libre dentro de parte de la cuenca del río Rímac (parte media y baja de la cuenca). Los precios en la zona se revalorizan debido a la recuperación del interés ambiental.

En los aspectos económicos, se puede destacar una mejor calidad en el agua que llega a la planta de tratamiento de La Atarjea reduciendo así sus costos de operación y purificación, ya que se requiere menos productos químicos para la potabilización de estas aguas. Los ingresos de SEDAPAL se incrementarían debido a que la compañía cuenta con mayor volumen de recursos hídricos y menor tiempo para tratarla y distribuir a la población. Se reintroduciría la pesca y el comercio relaciona con los ecosistemas acuáticos que pueden vivir como parte del plan de recuperación de la Reserva Ecológica del río Rímac.

Finalmente, en los aspectos ambientales se puede mencionar beneficios significativos como la recuperación del río Rímac y su entorno ecológico, reforestación en ambos

⁸⁰ Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.

márgenes del río, reintegración y conservación de la flora, y fauna. Disminuir significativamente la contaminación del agua superficial y subterránea del río Rímac, tan importante porque abastece de agua a cerca del 80% de la población limeña. Así como también en el aspecto educativo contribuye en tomar conciencia por parte de la comunidad sobre lo importante que es conservar y proteger el río Rímac, la calidad de sus aguas, el entorno ecológico y sus beneficios a la población.

4 CAPÍTULO: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. ESTIMACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS.

Tomando como referencia los métodos explicados en el capítulo 2, y teniendo en cuenta lo importante de la conservación de un caudal ecológico adecuado para las especies acuáticas que puedan conservar las aguas del río Rímac; se aplicaron los métodos hidrológicos según la información de caudales que se tenga a disposición en cada zona y el método hidráulico, en el tramo de río escogido en el capítulo anterior.

Por un lado, en el caso de los métodos hidrológicos para Chosica se utilizó el método de Tennant, Curva Permanencia, Hoppe y 7Q10. En las subcuencas ubicadas aguas arriba de Chosica, como Santa Eulalia (Sheque), Medio Rímac (San Mateo) y Medio Alto Rímac (Rio Blanco), se utilizarán los mismos métodos anteriormente mencionados excepto el método 7Q10, ya que no se cuenta con información de caudales diarios suficientes para la aplicación de este.

Por otro lado, con lo que respecta al método hidráulico se empleó el uso del software Hec-Ras 4.0 para simular el caudal que transcurre por el tramo en estudio, que consta de una longitud de 2.5 km. En el cual, se obtuvo el caudal ecológico en función de velocidades y tirantes adecuados para que los ecosistemas acuáticos puedan subsistir, conservarse y preservarse.

Por último, se empleará el método de simulación de hábitat a través de PHABSIM para calcular el caudal ecológico, en el tramo estudiado, con los parámetros hidráulicos e hidrobiológicos de la especie representativa a modelar.

Finalmente, se evaluó y analizó los resultados obtenidos de caudal ecológico en diferentes aspectos ambientales e ingenieriles.

4.1.1 Descripción Método Hidrológico

Para el cálculo de caudales ecológicos por los métodos hidrológicos se emplea un registro histórico por años de datos de caudales diarios, mensuales, medias, etc. Que favorecen a mantener constante el bienestar ecológico en relación con las especies presentes en dicho hábitat. Asimismo, esta metodología emplea cálculos estadísticos rápidos y simples, así como también sus costos para la evaluación son bajos. Sin Embargo, a largo plazo estos costos de evaluación pueden ser altos pues estos métodos no involucran una relación del caudal con la conservación del ecosistema lotico y el caudal ecológico obtenido no se considera parcialmente apto para casos en donde se debe comerciar el uso del agua. Asimismo, para el caso del río Rímac se localizó que muchas de las estaciones presentes a lo largo del río Rímac presentaban datos faltantes por el cual para esta investigación se procedió a realizar una completación de datos mediante una simulación de caudales observados extraídos en campo y los parámetros ambientales como precipitaciones, humedad de suelo, factor de cultivo, capacidad de almacenamiento de agua, escorrentía, temperatura, etc. Que ayudo a obtener una información más completa favoreciendo el cálculo del caudal ecológico por los diferentes métodos existentes.

4.1.1.1 Métodos Hidrológicos

Estación Chosica

Método de Tennant

Qprom.anual=	29.88	m³/s
--------------	-------	------

Para el caso de la Estación Chosica el caudal ecológico resultante evaluado al 60% es de 17.93 m³/s; sin embargo, este caudal ecológico, según el método de Tennant, es demasiado alto. Por lo tanto, de acuerdo con las condiciones actuales del río aguas abajo de la estación Chosica se propone que el caudal ecológico debería ser el 10% del caudal anual que corresponde a un caudal ecológico promedio mensual de 2.98 m³/s, bajo este método hidrológico. Puesto que, según informes de SEDAPAL y del ANA se realizará un plan de restauración del río Rímac comprendido entre Puente Huascar y Puente Huampani, el cual se ejecutará proyectos turísticos recreacionales tales como jardines botánicos, aviarios, lagunas. etc el cual genera una gran demanda del uso del agua, por esta razón aguas abajo de la estación Chosica se está optando por un caudal ecológico del 10% del caudal promedio anual.

En forma similar, se propone que, aguas abajo de la Atarjea, debería existir al menos un caudal ecológico mínimo que es igual al 10% del caudal promedio anual, no obstante, se debería tener un mejor control respecto a las aguas residuales y residuos sólidos que se acumulan en esta parte del río.

Método de Curva Permanencia

Qeco95%=	18.23	m ³ /s
----------	-------	-------------------

Este caudal ecológico al 95% de excedencia, según el método Curva de Permanencia también es demasiado alto, aunque este sea un método que puede ser utilizado en el Perú, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Generalmente las persistencias altas como 95% son para garantizar la demanda poblacional y agrícola. Por lo tanto, ajustando a estos requerimientos se tomará un 20% de este caudal hallado, lo que representa un flujo de 3.65 m³/s. Siendo este resultado, el caudal ecológico óptimo para la estación Chosica. Como ya se mencionó existe un plan de restauración de la cuenca del río Rímac y para garantizar la demanda poblacional se está seleccionando un caudal ecológico que cumpla con estas demandas.

Método de Hoppe

Basándose en la curva de permanencia y la relación de los diferentes estadios de vida de la especie el método de Hoppe toma en cuenta los siguientes percentiles 17%, 40% y 80%. para la etapa de vida de reproducción, crecimiento y desove respectivamente. La desventaja de este método es que solo se realizó estudios en ríos de climas fríos especialmente para truchas.

Q17eco=	38.4	m ³ /s
Q40eco=	30.32	m ³ /s
Q80eco=	21.2	m ³ /s

En este caso no se considera el caudal ecológico por este método ya que son muy altos para cumplir con la presión hídrica requerida y la oferta de agua del río. Estos caudales ecológicos, en general por el método de Hoppe, son altos y no se cumplirían ni siquiera un porcentaje del tiempo que plantea este método, debido a la situación de presión hídrica mencionada anteriormente.

Método 7Q10

Se calcula analizando los 7 días más críticos de 10 años de las épocas más secas. En este caso el año 1955 fue el que tenía los días con menores caudales.

AÑO	MES	DIA	CAUDAL(m ³ /s)
1955	11	1	11
1955	11	2	9
1955	11	3	11
1955	11	4	11
1955	11	5	11
1955	11	6	11
1955	11	7	9.5
Q _{ECOLOGICO}			10.29

Este método solo se aplicó a la estación Chosica debido a que es la única estación que cuenta con datos de caudales completos diarios, obteniendo caudales muy altos, llegando a la conclusión que complica su aplicación para ríos del Perú, pues no garantiza un caudal ecológico que se adapte a la presión hídrica.

Estación Sheque

Método de Tennant

Qprom.anual=	6.881	m³/s
--------------	-------	------

Para este caso el Método de Tennant se ajusta al caudal ecológico en un 20% dada la magnitud del caudal promedio anual, llegando a la conclusión según la clasificación de Tennant como un caudal ecológico óptimo. Por lo general en el Método de Tennant el caudal ecológico representado al 60% del caudal promedio anual es un resultado relevante, y en el caso de obtener valores de caudales demasiado altos, se puede ajustar en un intervalo de 10% a 20% como es el caso la estación Sheque y la estación Chosica, obteniendo un caudal de 1.376 m³/s considerando aceptable para las condiciones de demanda hídrica que se presenta en dicha zona, ya que el mínimo permisible debe ser 10% del caudal promedio anual.

Método de Curva Permanencia

Qeco95%=	4.149	m³/s
----------	-------	------

Este caudal ecológico al 95% de excedencia, según el método Curva de Permanencia es relativamente alto. Por lo tanto, ajustando a los requerimientos presentes en esta zona se tomará un 60% de este caudal hallado obteniendo un caudal de 2.489 m³/s. siendo este resultado el idóneo debido a la presencia de estructuras hidráulicas y embalses que se ubican en esta zona, el cual requiere una demanda de agua aceptable para el funcionamiento correcto de estas estructuras.

Método de Hoppe

Basándose en la curva de permanencia en los percentiles 17%, 40% y 80%. Se obtuvieron caudales ecológicos según la tabla siguiente:

Q17eco=	8.710	m ³ /s
Q40eco=	7.062	m ³ /s
Q80eco=	5.090	m ³ /s

En este caso no se considera el caudal ecológico por este método ya que, en general, son un poco altos para cumplir con la presión hídrica requerida y la oferta de agua del río.

Estación Río Blanco

Método de Tennant

Qprom.anual=	3.076	m ³ /s
--------------	-------	-------------------

Para este caso el Método de Tennant se ajusta al caudal ecológico en un 20% dada la magnitud del caudal promedio anual, llegando a la conclusión según la clasificación de

Tennant como un caudal ecológico óptimo $Q=0.62 \text{ m}^3/\text{s}$. Pues según el sistema hidráulico del río Rímac se tiene registros de grandes obras hidráulicas como tomas, centrales hidroeléctricas, embalses y para garantizar un flujo permanente del caudal ecológico se opta por elegir un caudal ecológico del 20% del promedio anual.

Método de Curva Permanencia

Qeco95%=	1.241	m ³ /s
----------	-------	-------------------

Este caudal al 95% de excedencia, representa un caudal ecológico óptimo para el sector ubicado en la estación Río Blanco. Este caudal sí puede ser representativo debido a la cantidad de agua que pasa, el cual puede abastecer el caudal ecológico.

Método de Hoppe

Basándose en la curva de permanencia en los percentiles 17%, 40% y 80%.

Q17eco=	4.272	m ³ /s
Q40eco=	3.253	m ³ /s
Q80eco=	2.253	m ³ /s

En este caso, sí se considera este método, óptimo en el percentil 80 considerado para el desove de las especies acuáticas en el río. ($Q = 2.25 \text{ m}^3/\text{s}$).

Estación San Mateo

Método de Tennant

Qprom.anual=	3.835	m ³ /s
--------------	-------	-------------------

En el caso de la estación San mateo el caudal promedio anual nos arroja un valor de $3.835 \text{ m}^3/\text{s}$ siendo este valor un poco alto para la demanda de agua de uso poblacional se toma en consideración un valor de del 60% del caudal promedio anual obteniendo como resultado $2.30 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo un valor óptimo para salvaguardar el desarrollo de especies acuáticas garantizando un caudal circulante constante.

Método de Curva Permanencia

Qeco95%=	1.553	m³/s
----------	-------	------

Este caudal al 95% de excedencia, representa un caudal ecológico óptimo para el sector ubicado en la estación San Mateo. Este caudal sí puede ser representativo debido a la cantidad de agua que pasa, el cual puede abastecer de manera regular el caudal ecológico.

Método de Hoppe

Basándose en la curva de permanencia en los percentiles 17%, 40% y 80%.

Q17eco=	5.117	m³/s
Q40eco=	4.158	m³/s
Q80eco=	2.957	m³/s

En este caso, sí se considera este método, óptimo en el percentil 80 considerado para el desove de las especies acuáticas en el río.

De todos los métodos hidrológicos aplicados a la cuenca del río Rímac se estima un grado de relevancia importante para el cálculo de caudales ecológicos al tratamiento estadístico de percentil 20% como es el caso de la estación Chosica, Sheque y Río Blanco; de esta manera se garantiza un flujo de agua permanente a lo largo de todo el año, garantizando un buen ecosistema y que cumpla con la demanda hídrica (poblacional, agricultura, turística y recreacional) asimismo el método de Tennant usando el 60% del caudal promedio anual es muy alto para las condiciones del río Rímac, por ello, se recomienda otras derivadas del método como el 20% del caudal promedio anual. Y aguas de bajo de Chosica un caudal con la derivada mínima por el método de Tennant que corresponde al 10% del caudal promedio anual. Sin embargo, estos resultados obtenidos son relativamente bajos debido a la presencia de obras hidráulicas, centrales hidroeléctricas y centros turísticos, así como los parques naturales que debido a la gran demanda de agua que requieren reducen el caudal ecológico y se toman valores que garanticen el flujo regular del río Rímac respetando el marco conceptual de cada método. Específicamente predomina que los métodos de curva de permanencia y tennant son ideados para garantizar la preservación de las especies piscícolas en tanto el método 7Q10 no toma en cuenta ningún criterio ecológico.

4.1.3. Método Hidráulico

4.1.3.1. Descripción del Método Hidráulico

Para el método hidráulico se considera variables hidráulicas y parámetros ambientales como la profundidad, velocidad de caudal y las secciones transversales a lo largo del tramo. En este estudio se analiza el comportamiento que tiene la especie con su hábitat estableciendo una relación más precisa entre la flora, las variables hidráulicas y los caudales. Para la presente investigación se realizó un aforo de caudales en tres tramos críticos presentes con una longitud total de 2.5Km en el cual se analizó la diversidad biótica presente en base a documentación registrada en años anteriores, en donde resalta la existencia de especies acuáticas como pejerrey de río, caracoles, cangrejos, etc. Asimismo, en dicho tramo se detectó la mayor fuente de contaminación debido a la confluencia de tres cauces como son el río San Mateo, Santa Eulalia y quebradas provenientes del río Huaycoloro que a través de sus aguas trasladan residuos tóxicos producto de la minería ilegal y residuos sólidos provenientes de la intervención humana degradando de esta manera la biodiversidad en este tramo del Río Rímac. Para el caso del

cálculo del caudal ecológico se utilizó una modelación con el programa Hec-Ras, el cual requiere una serie de características topográficas, tirantes, profundidad, coeficientes de rugosidad y caudales aforados, para luego ser calibrados mediante ajustes en el coeficiente de rugosidad hasta obtener un error menor al 10%, el cual representa un valor aceptable para este tipo de modelación alcanzando una gráfica representativa de caudal (Q) vs perímetro mojado (WP) y caudal vs Profundidad (M) encontrando un punto de inflexión representativo en dicha gráfica el cual se estime que a una variación del caudal el perímetro mojado y la profundidad mantengan un régimen más constante, determinado así el caudal ecológico óptimo para dicho tramo.

4.1.3.2 Procesamiento Topográfico

En base al levantamiento topográfico se procedió a trazar las secciones en todo el tramo del río. Una vez delimitada la zona de estudio, se procedió a calcular sus características morfológicas (parámetros geométricos, en este caso pendiente al inicio y al final del tramo del río), obteniendo valores de 1.4% en agua abajo del río y 1.9% aguas arriba. En la figura 4-1 se muestra una sección típica del río y en la figura 4-2 se muestra el tramo en estudio con la relación de pendientes. Para este método se realizó un estudio descriptivo del tramo con una longitud aproximada de 2.5 km. El cual, en dicho tramo se logró identificar zonas con alto grado de contaminación proveniente del sector industrial, minero y poblacional siendo este el tramo más crítico para la restauración de especies acuáticas y que según estudios anteriores se tiene documentación registrada de que anteriormente existió vida acuática y que debido al alto índice de contaminación se registró un gran deterioro de flora y fauna del ecosistema.

Figura 4-1: Sección típico del río en el tramo de estudio. Fuente propia.

Slopes Table				
Number	Minimum Slope	Maximum Slope	Area	Color
1	0.16%	2.37%	170206.95	Red
2	2.37%	6.25%	169561.66	Yellow
3	6.25%	47.29%	72112.13	Cyan
4	47.29%	311701.55%	18383.72	Purple

Tabla IV-1. Tabla de pendientes obtenidas del levantamiento topográfico, en el Civil 3D.

Figura 4-2: Tramo en estudio con la relación de pendientes. Fuente propia.

Figura 4-3: Cuenca del río Rímac con zonas contaminadas. Fuente: Digesa.

4.1.3.3. Modelamiento HEC-RAS

Descripción Software HEC-RAS

El software Hec-Ras, clasificado con sus primeras siglas, hidrology-engineering-center y RAS de system-analysis-river, es un sistema de análisis de ríos y canales el cual proporciona la modelación hidráulica, en régimen permanente y no permanente. El programa hec-ras muestra una facilidad para la generación de perfiles hidráulicas, así como también, las mediciones hidráulicas definidas en varias componentes como el estudio de régimen crítico, subcrítico, supercrítico o mixtas, el modelamiento de ríos permite simular predicción de áreas de inundación y mitigación del mismo, en un río o conjunto de ríos, para diferentes periodos de retorno. Asimismo, permite la determinación de las variables hidráulicas para el diseño de estructuras hidráulicas en los ríos como,

puentes, alcantarillas, cunetas, etc. Y delimitación de la altura optima en el diseño de una carretera, que puede ser afectada por las máximas avenidas de un río.⁸¹

4.1.3.4. Ecología y Vegetación

El área estudiada pertenece, casi en su totalidad, al piso ecológico identificado como desierto desecado - Subtropical (dd-S), con variaciones de temperaturas medias entre 13 y 20°C, la vegetación natural es escasa, y se desarrolla sólo a lo largo de los cauces naturales (quebradas) en la parte baja de la cuenca en donde hay escasez de agua, y están constituidas por diversos arbustos, mientras que en la parte media y alta de la cuenca se desarrollan algunas especies gramíneas que sirven de forraje para los animales. Los cultivos alimenticios presentes en dicho tramo como parte de la demanda de la agricultura se encontraron cultivos como el choclo y sembríos de hortalizas como la lechuga, albahaca entre otros.⁸²

4.1.3.5. Definición del modelo hidráulico

Para definir el modelo se necesita efectuar una caracterización morfológica e hidráulica del mismo. La caracterización morfológica parte de la definición geométrica realizada en CIVIL 3D, la cual se exporta directamente a HEC-RAS, con lo que las secciones quedan perfectamente colocadas y georreferenciadas. Una vez importadas las secciones transversales, se procede a determinar en cada una los Bank Points, el caudal que transcurre de acuerdo con la vegetación y vida acuática presente.

La caracterización hidráulica se efectúa tomando como datos los valores de caudales para distintos tipos de vegetación y vida acuática que se requiere mantener, juntamente con los valores de Manning presentes, tanto en el lecho principal como en los bancos laterales.

⁸¹ Nania Leonardo y Emilio Molero (2007). Manual Básico de Hec-Ras 3.1

⁸² Armando Romero, Enrique Guadalupe y Wilfredo Blas (2010) Estimado de descargas máximas en la microcuenca de Huaycoloro (Huachipa – Lima). Lima, Perú.

Cálculo de los parámetros hidráulicos con un caudal de 4.166 m³/s:

Figura 4-4: Gráfica de modelación para el tramo de río en estudio, caudal de 4.166 m³/s.
Fuente propia

Sección Transversal

A 20 m:

Figura 4-5: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+020 a un caudal de 4.16 m3/s.

A 500 m:

	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m ²)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	4.16	7.69	52.17	100.00	0.15	0.54	6.65	3.59

Figura 4-6: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+500 a un caudal de 4.16 m³/s.

A 1000 m:

	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m ²)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	4.16	3.75	19.44	100.00	0.19	1.11	25.52	28.29

Figura 4-7: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+000 a un caudal de 4.16 m³/s.

A 1500 m:

	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m³/s)	(m²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m²)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	4.16	3.55	25.48	100.00	0.14	1.17	31.89	37.40

Figura 4-8: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+500 a un caudal de 4.16 m³/s.

Mediante la siguiente tabla se muestra las variables hidráulicas simuladas por cada progresiva dado un caudal proporcionado para este caso de 4.16 m³/s obteniendo como resultado las velocidades de caudales y perímetros simulados para luego realizar la calibración con los tirantes reales obtenidos en campo.

Tabla de datos

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
eje	2060	PF 1	4.16	1058.45	1058.89	1058.73	1058.90	0.005385	0.47	8.79	56.04	0.38
eje	2040	PF 1	4.16	1058.32	1058.60	1058.60	1058.66	0.039507	1.12	3.72	29.16	1.00
eje	2020	PF 1	4.16	1057.62	1057.81	1057.88	1058.03	0.205366	2.09	1.99	21.10	2.17
eje	2000	PF 1	4.16	1057.17	1057.39	1057.39	1057.45	0.040655	1.06	3.94	34.40	1.00
eje	1980	PF 1	4.16	1056.73	1057.06	1056.98	1057.09	0.009767	0.72	5.75	30.33	0.53
eje	1960	PF 1	4.16	1056.51	1056.93		1056.95	0.004731	0.56	7.48	34.00	0.38
eje	1940	PF 1	4.16	1056.48	1056.73	1056.71	1056.76	0.030691	0.78	5.31	58.65	0.83
eje	1920	PF 1	4.16	1055.99	1056.36		1056.38	0.013006	0.55	7.56	74.55	0.55
eje	1900	PF 1	4.16	1055.51	1055.94	1055.93	1055.97	0.036974	0.79	5.29	66.86	0.89
eje	1880	PF 1	4.16	1055.02	1055.61		1055.62	0.009651	0.50	8.39	77.32	0.48
eje	1860	PF 1	4.16	1054.86	1055.40		1055.41	0.012371	0.52	7.93	80.92	0.54
eje	1840	PF 1	4.16	1054.73	1055.18	1055.13	1055.19	0.010108	0.48	8.61	85.38	0.49
eje	1820	PF 1	4.16	1054.49	1054.88	1054.81	1054.90	0.023167	0.64	6.49	78.50	0.71
eje	1800	PF 1	4.16	1053.84	1054.23	1054.23	1054.33	0.033845	1.37	3.04	15.57	0.99
eje	1780	PF 1	4.16	1053.26	1053.67	1053.65	1053.75	0.024860	1.22	3.41	16.48	0.86
eje	1760	PF 1	4.16	1052.68	1053.07	1053.07	1053.16	0.034488	1.38	3.02	15.50	1.00
eje	1740	PF 1	4.16	1052.21	1052.69	1052.59	1052.73	0.010315	0.88	4.71	19.11	0.57
eje	1720	PF 1	4.16	1052.02	1052.52		1052.55	0.007438	0.77	5.42	21.19	0.48
eje	1700	PF 1	4.16	1051.84	1052.25		1052.32	0.021755	1.13	3.68	18.03	0.80
eje	1680	PF 1	4.16	1051.55	1051.87	1051.82	1051.92	0.018263	1.00	4.18	21.87	0.73
eje	1660	PF 1	4.16	1051.08	1051.32	1051.32	1051.39	0.039808	1.10	3.77	30.40	1.00
eje	1640	PF 1	4.16	1050.62	1050.95	1050.88	1050.98	0.010222	0.68	6.13	36.93	0.53
eje	1620	PF 1	4.16	1050.42	1050.75		1050.77	0.010610	0.68	6.16	38.45	0.54
eje	1600	PF 1	4.16	1050.22	1050.52		1050.55	0.012973	0.71	5.84	39.08	0.59
eje	1580	PF 1	4.16	1050.01	1050.29		1050.31	0.010718	0.65	6.41	42.79	0.54
eje	1560	PF 1	4.16	1049.80	1050.08		1050.10	0.011253	0.61	6.80	51.33	0.54
eje	1540	PF 1	4.16	1049.59	1049.86		1049.88	0.009569	0.62	6.67	43.36	0.51
eje	1520	PF 1	4.16	1049.38	1049.63		1049.66	0.014250	0.76	5.45	35.28	0.62
eje	1500	PF 1	4.16	1049.00	1049.25		1049.29	0.024117	0.86	4.81	38.26	0.78
eje	1480	PF 1	4.16	1048.52	1048.84		1048.87	0.017261	0.77	5.38	39.43	0.67
eje	1460	PF 1	4.16	1048.05	1048.38	1048.35	1048.43	0.028321	1.03	4.05	28.02	0.86
eje	1440	PF 1	4.16	1047.54	1047.86	1047.83	1047.91	0.023886	1.06	3.93	22.86	0.82
eje	1420	PF 1	4.16	1046.99	1047.24	1047.24	1047.32	0.037295	1.22	3.41	22.46	1.00
eje	1400	PF 1	4.16	1046.50	1046.85	1046.78	1046.88	0.011893	0.84	4.93	23.90	0.59
eje	1380	PF 1	4.16	1046.27	1046.67		1046.70	0.007210	0.74	5.65	23.11	0.48
eje	1360	PF 1	4.16	1045.95	1046.62		1046.63	0.001595	0.44	9.55	27.63	0.24

eje	1340	PF 1	4.16	1046.29	1046.53		1046.56	0.021381	0.78	5.35	45.63	0.73
eje	1320	PF 1	4.16	1045.83	1046.06	1046.04	1046.10	0.025745	0.88	4.72	38.40	0.80
eje	1300	PF 1	4.16	1045.38	1045.62		1045.66	0.018768	0.84	4.92	33.68	0.71
eje	1280	PF 1	4.16	1044.92	1045.17	1045.15	1045.22	0.025685	1.00	4.16	28.02	0.83
eje	1260	PF 1	4.16	1044.34	1044.74	1044.71	1044.78	0.020072	0.91	4.58	29.49	0.73
eje	1240	PF 1	4.16	1044.14	1044.45	1044.39	1044.47	0.011386	0.66	6.34	43.45	0.55
eje	1220	PF 1	4.16	1043.93	1044.20	1044.15	1044.22	0.012896	0.64	6.48	50.43	0.57
eje	1200	PF 1	4.16	1043.50	1043.73	1043.73	1043.80	0.038174	1.15	3.61	26.46	0.99
eje	1180	PF 1	4.16	1043.00	1043.42	1043.30	1043.44	0.004939	0.56	7.42	34.54	0.39
eje	1160	PF 1	4.16	1042.80	1043.20	1043.16	1043.26	0.019748	1.07	3.90	19.49	0.76
eje	1140	PF 1	4.16	1042.07	1042.63	1042.63	1042.76	0.032163	1.60	2.60	10.05	1.00
eje	1120	PF 1	4.16	1040.96	1041.40	1041.50	1041.71	0.095833	2.46	1.69	7.72	1.68
eje	1100	PF 1	4.16	1040.13	1041.39	1040.66	1041.39	0.000403	0.35	11.82	16.31	0.13
eje	1080	PF 1	4.16	1039.29	1041.39		1041.39	0.000067	0.19	22.45	20.79	0.06
eje	1060	PF 1	4.16	1040.81	1041.31		1041.38	0.017445	1.16	3.58	14.24	0.74
eje	1040	PF 1	4.16	1040.55	1041.08		1041.12	0.008961	0.89	4.68	16.93	0.54
eje	1020	PF 1	4.16	1040.44	1040.90		1040.93	0.009513	0.81	5.11	22.03	0.54
eje	1000	PF 1	4.16	1040.22	1040.61		1040.67	0.019720	1.06	3.92	19.62	0.76
eje	980	PF 1	4.16	1039.90	1040.30		1040.33	0.014257	0.71	5.85	42.05	0.61
eje	960	PF 1	4.16	1039.57	1040.05		1040.07	0.011459	0.62	6.67	49.41	0.54
eje	940	PF 1	4.16	1039.25	1039.83		1039.86	0.009711	0.70	5.92	32.30	0.52
eje	920	PF 1	4.16	1039.29	1039.53	1039.51	1039.57	0.024146	0.84	4.98	41.86	0.77
eje	900	PF 1	4.16	1038.83	1039.08		1039.11	0.021133	0.81	5.12	40.50	0.73
eje	880	PF 1	4.16	1038.51	1038.76		1038.78	0.013216	0.67	6.19	45.85	0.58
eje	860	PF 1	4.16	1038.21	1038.46	1038.42	1038.48	0.016571	0.71	5.82	46.60	0.65
eje	840	PF 1	4.16	1037.68	1037.94	1037.94	1038.00	0.037842	1.08	3.87	31.13	0.97
eje	820	PF 1	4.16	1036.98	1037.25	1037.24	1037.30	0.033067	1.00	4.16	33.87	0.91
eje	800	PF 1	4.16	1036.28	1036.50	1036.50	1036.55	0.042248	1.00	4.17	40.86	1.00
eje	780	PF 1	4.16	1036.02	1036.28	1036.13	1036.28	0.001776	0.34	12.22	55.64	0.23
eje	760	PF 1	4.16	1035.98	1036.23		1036.24	0.003276	0.40	10.48	60.06	0.30
eje	740	PF 1	4.16	1035.86	1036.07		1036.10	0.017820	0.74	5.65	45.79	0.67
eje	720	PF 1	4.16	1035.58	1035.88		1035.90	0.006303	0.58	7.12	37.34	0.43
eje	700	PF 1	4.16	1035.36	1035.80		1035.81	0.003002	0.46	9.06	39.13	0.30
eje	680	PF 1	4.16	1035.35	1035.71		1035.72	0.006601	0.57	7.24	40.32	0.43
eje	660	PF 1	4.16	1035.18	1035.41	1035.41	1035.46	0.035098	1.01	4.12	34.40	0.93

eje	640	PF 1	4.16	1034.76	1035.05		1035.08	0.011913	0.67	6.23	43.13	0.56
eje	620	PF 1	4.16	1034.51	1034.83		1034.85	0.010853	0.68	6.11	38.34	0.54
eje	600	PF 1	4.16	1034.26	1034.58		1034.61	0.014239	0.78	5.33	33.32	0.62
eje	580	PF 1	4.16	1034.03	1034.31	1034.26	1034.34	0.013841	0.74	5.64	37.70	0.61
eje	560	PF 1	4.16	1033.77	1033.86	1033.85	1033.90	0.039235	0.80	5.21	67.56	0.92
eje	540	PF 1	4.16	1033.32	1033.49		1033.51	0.011846	0.57	7.33	64.47	0.54
eje	520	PF 1	4.16	1032.94	1033.16		1033.19	0.022856	0.85	4.91	38.70	0.76
eje	500	PF 1	4.16	1032.75	1032.97		1032.99	0.005616	0.49	8.54	53.97	0.39
eje	480	PF 1	4.16	1032.61	1032.74	1032.73	1032.77	0.033310	0.72	5.75	76.36	0.84
eje	460	PF 1	4.16	1031.68	1031.86	1031.86	1031.92	0.056092	1.06	3.93	43.69	1.12
eje	440	PF 1	4.16	1030.68	1031.34	1030.93	1031.34	0.000524	0.27	15.25	38.79	0.14
eje	420	PF 1	4.16	1030.55	1031.33		1031.33	0.000536	0.28	14.85	36.90	0.14
eje	400	PF 1	4.16	1030.80	1031.29		1031.31	0.004798	0.61	6.80	27.16	0.39
eje	380	PF 1	4.16	1030.86	1031.07	1031.05	1031.11	0.028705	0.87	4.78	43.03	0.83
eje	360	PF 1	4.16	1030.32	1030.55		1030.59	0.023706	0.91	4.59	33.59	0.78
eje	340	PF 1	4.16	1029.79	1030.10		1030.14	0.021121	0.94	4.44	28.41	0.76
eje	320	PF 1	4.16	1029.46	1029.74		1029.78	0.016438	0.82	5.09	33.16	0.67
eje	300	PF 1	4.16	1029.12	1029.41		1029.44	0.017001	0.82	5.10	34.14	0.67
eje	280	PF 1	4.16	1028.74	1029.10	1029.04	1029.14	0.014188	0.80	5.21	31.46	0.60
eje	260	PF 1	4.16	1028.32	1028.62	1028.62	1028.69	0.037255	1.20	3.45	23.22	1.03
eje	240	PF 1	4.16	1027.90	1028.32	1028.16	1028.33	0.003185	0.47	8.85	38.60	0.31
eje	220	PF 1	4.16	1027.87	1028.26		1028.27	0.003426	0.43	9.57	49.50	0.32
eje	200	PF 1	4.16	1027.82	1028.15		1028.17	0.007516	0.61	6.86	38.82	0.46
eje	180	PF 1	4.16	1027.67	1027.89		1027.93	0.021756	0.82	5.08	40.60	0.74
eje	160	PF 1	4.16	1027.21	1027.61		1027.63	0.010550	0.60	6.94	51.52	0.52
eje	140	PF 1	4.16	1027.17	1027.43		1027.44	0.008118	0.50	8.38	67.90	0.45
eje	120	PF 1	4.16	1026.94	1027.19	1027.15	1027.21	0.016792	0.70	5.96	49.86	0.64
eje	100	PF 1	4.16	1026.53	1026.71	1026.69	1026.75	0.032121	0.90	4.64	43.41	0.88
eje	80	PF 1	4.16	1026.09	1026.30		1026.32	0.015358	0.63	6.65	61.45	0.61
eje	60	PF 1	4.16	1025.80	1026.01		1026.03	0.013636	0.66	6.33	49.56	0.59
eje	40	PF 1	4.16	1025.54	1025.79		1025.81	0.009045	0.63	6.61	40.69	0.50
eje	20	PF 1	4.16	1025.28	1025.56	1025.50	1025.59	0.014003	0.80	5.21	31.13	0.62

Tabla IV-2. Tabla de resultados del tramo en estudio del río Rímac para un caudal de $4.16 \text{ m}^3/\text{s}$

Cálculo de los parámetros hidráulicos con un caudal de $4.33 \text{ m}^3/\text{s}$:

Figura 4-9: Gráfica del río Rímac modelación en Hec-Ras para una caudal $4.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Fuente propia.

Sección Transversal

A 20 m:

Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
	(m)	(m)	(m3/s)	(m2)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m2)	(N/m s)
1 Chan	0.00	227.00	4.33	4.46	28.99	100.00	0.15	0.97	21.13	20.51

Figura 4-10: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+020 a un caudal de 4.33 m3/s.

A 500 m:

Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
	(m)	(m)	(m3/s)	(m2)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m2)	(N/m s)
1 Chan	0.00	227.00	4.33	7.86	52.53	100.00	0.15	0.55	6.86	3.78

Figura 4-11: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 0+500 a un caudal de 4.33 m3/s.

A 1000 m:

	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m3/s)	(m2)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m2)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	4.33	3.77	19.47	100.00	0.19	1.15	27.44	31.54

Figura 4-12: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+000 a un caudal de 4.33 m3/s.

A 1500 m:

	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m3/s)	(m2)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m2)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	4.33	3.80	26.37	100.00	0.14	1.14	29.67	33.77

Figura 4-13: Gráfica de la sección transversal en la Prog: 1+500 a un caudal de 4.33 m³/s.

Mediante la siguiente tabla se muestra las variables hidráulicas simuladas por cada progresiva dado un caudal proporcionado para este caso de 4.33 m³/s obteniendo como resultado las velocidades de caudales y perímetros simulados para luego realizar la calibración con los tirantes reales obtenidos en campo.

Tabla de datos

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
eje	2060	PF 1	4.33	1058.60	1058.78	1058.71	1058.79	0.002413	0.38	11.30	79.13	0.32
eje	2040	PF 1	4.33	1058.32	1058.60	1058.60	1058.67	0.023424	1.15	3.76	27.85	1.00
eje	2020	PF 1	4.33	1057.62	1057.84	1057.88	1057.97	0.054644	1.55	2.79	24.91	1.48
eje	2000	PF 1	4.33	1057.17	1057.40	1057.40	1057.46	0.024450	1.06	4.07	34.96	1.00
eje	1980	PF 1	4.33	1056.73	1056.91	1056.98	1057.14	0.113906	2.13	2.03	19.55	2.11
eje	1960	PF 1	4.33	1056.51	1056.89	1056.80	1056.92	0.004980	0.69	6.27	31.20	0.49
eje	1940	PF 1	4.33	1056.48	1056.68	1056.68	1056.72	0.035345	0.88	4.95	75.18	1.09
eje	1920	PF 1	4.33	1055.99	1056.31	1056.28	1056.33	0.011460	0.55	7.92	104.58	0.63
eje	1900	PF 1	4.33	1055.51	1055.92	1055.92	1055.95	0.034973	0.76	5.70	106.23	1.05
eje	1880	PF 1	4.33	1055.02	1055.58	1055.51	1055.59	0.006718	0.47	9.14	100.23	0.50
eje	1860	PF 1	4.33	1054.86	1055.37		1055.39	0.017167	0.58	7.49	123.25	0.75
eje	1840	PF 1	4.33	1054.73	1055.16	1055.08	1055.17	0.007597	0.45	9.58	123.74	0.52
eje	1820	PF 1	4.33	1054.49	1054.81	1054.81	1054.91	0.029329	1.36	3.19	21.69	1.13
eje	1800	PF 1	4.33	1053.84	1054.22	1054.24	1054.34	0.027438	1.54	2.81	14.96	1.14
eje	1780	PF 1	4.33	1053.26	1053.63	1053.65	1053.76	0.030212	1.60	2.70	14.68	1.19
eje	1760	PF 1	4.33	1052.68	1053.05	1053.07	1053.18	0.027565	1.55	2.80	14.94	1.14
eje	1740	PF 1	4.33	1052.21	1052.65	1052.59	1052.71	0.010651	1.09	3.98	17.56	0.73
eje	1720	PF 1	4.33	1052.02	1052.49		1052.53	0.006976	0.91	4.75	19.93	0.60
eje	1700	PF 1	4.33	1051.84	1052.23	1052.22	1052.32	0.018855	1.31	3.31	17.11	0.95
eje	1680	PF 1	4.33	1051.55	1051.83	1051.83	1051.91	0.021630	1.28	3.37	19.94	1.00
eje	1660	PF 1	4.33	1051.08	1051.31	1051.33	1051.39	0.031721	1.24	3.51	29.30	1.14
eje	1640	PF 1	4.33	1050.62	1050.92	1050.88	1050.96	0.010736	0.84	5.14	33.82	0.69
eje	1620	PF 1	4.33	1050.42	1050.73		1050.76	0.009176	0.78	5.54	36.31	0.64
eje	1600	PF 1	4.33	1050.22	1050.49		1050.54	0.014511	0.91	4.78	35.35	0.79
eje	1580	PF 1	4.33	1050.01	1050.27		1050.30	0.009658	0.76	5.71	40.61	0.65
eje	1560	PF 1	4.33	1049.80	1050.05		1050.08	0.013037	0.81	5.34	43.02	0.74
eje	1540	PF 1	4.33	1049.59	1049.85		1049.87	0.008952	0.73	5.91	41.89	0.62
eje	1520	PF 1	4.33	1049.38	1049.60		1049.65	0.015481	0.97	4.47	31.34	0.82
eje	1500	PF 1	4.33	1049.00	1049.23	1049.22	1049.29	0.020971	1.14	3.80	26.30	0.96
eje	1480	PF 1	4.33	1048.52	1048.78	1048.78	1048.86	0.022493	1.25	3.46	21.84	1.00
eje	1460	PF 1	4.33	1048.05	1048.36	1048.37	1048.43	0.020667	1.23	3.51	21.29	0.97
eje	1440	PF 1	4.33	1047.54	1047.82	1047.84	1047.92	0.031505	1.43	3.03	20.16	1.18
eje	1420	PF 1	4.33	1046.99	1047.23	1047.24	1047.32	0.028586	1.34	3.24	22.18	1.12
eje	1400	PF 1	4.33	1046.50	1046.74	1046.78	1046.88	0.053704	1.67	2.59	20.49	1.50
eje	1380	PF 1	4.33	1046.27	1046.63	1046.56	1046.68	0.007285	0.90	4.84	21.70	0.60
eje	1360	PF 1	4.33	1045.95	1046.61		1046.62	0.001201	0.48	9.06	26.92	0.26

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
eje	1340	PF 1	4.33	1046.29	1046.51	1046.50	1046.55	0.020988	0.94	4.59	42.29	0.91
eje	1320	PF 1	4.33	1045.83	1046.04	1046.04	1046.10	0.024648	1.04	4.16	37.10	0.99
eje	1300	PF 1	4.33	1045.38	1045.55	1045.59	1045.67	0.063863	1.56	2.78	27.63	1.57
eje	1280	PF 1	4.33	1044.92	1045.16	1045.16	1045.23	0.023515	1.18	3.68	26.49	1.01
eje	1260	PF 1	4.33	1044.34	1044.60	1044.57	1044.62	0.010786	0.70	6.17	53.68	0.66
eje	1240	PF 1	4.33	1044.14	1044.41	1044.37	1044.43	0.008095	0.62	6.95	58.14	0.58
eje	1220	PF 1	4.33	1043.93	1044.16		1044.20	0.016202	0.86	5.02	43.40	0.81
eje	1200	PF 1	4.33	1043.50	1043.73	1043.73	1043.80	0.023036	1.16	3.72	26.79	1.00
eje	1180	PF 1	4.33	1043.00	1043.40	1043.29	1043.42	0.004252	0.65	6.70	32.82	0.46
eje	1160	PF 1	4.33	1042.80	1043.16	1043.16	1043.26	0.021667	1.35	3.21	17.69	1.01
eje	1140	PF 1	4.33	1042.07	1042.60	1042.65	1042.78	0.026071	1.88	2.31	8.70	1.16
eje	1120	PF 1	4.33	1040.96	1041.36	1041.51	1041.84	0.099627	3.04	1.42	7.08	2.17
eje	1100	PF 1	4.33	1040.13	1041.38	1040.67	1041.39	0.000268	0.37	11.76	16.27	0.14
eje	1080	PF 1	4.33	1039.29	1041.39		1041.39	0.000044	0.19	22.39	20.76	0.06
eje	1060	PF 1	4.33	1040.81	1041.26	1041.26	1041.37	0.020079	1.49	2.90	12.81	1.00
eje	1040	PF 1	4.33	1040.55	1041.04	1040.96	1041.10	0.008622	1.07	4.05	15.76	0.67
eje	1020	PF 1	4.33	1040.44	1040.86		1040.91	0.010584	1.02	4.23	20.46	0.72
eje	1000	PF 1	4.33	1040.22	1040.60	1040.57	1040.67	0.014461	1.15	3.77	19.37	0.83
eje	980	PF 1	4.33	1039.90	1040.20	1040.20	1040.24	0.032515	0.86	5.04	73.84	1.05
eje	960	PF 1	4.33	1039.55	1039.87	1039.72	1039.88	0.001090	0.34	12.80	59.51	0.23
eje	940	PF 1	4.33	1039.25	1039.78		1039.83	0.008903	0.96	4.51	21.06	0.66
eje	920	PF 1	4.33	1039.29	1039.52	1039.51	1039.57	0.021149	0.97	4.48	39.90	0.92
eje	900	PF 1	4.33	1038.83	1039.05	1039.05	1039.11	0.024884	1.05	4.11	36.30	1.00
eje	880	PF 1	4.33	1038.51	1038.75	1038.71	1038.78	0.010424	0.75	5.79	44.58	0.66
eje	860	PF 1	4.33	1038.21	1038.42	1038.42	1038.47	0.023123	1.01	4.30	38.54	0.96
eje	840	PF 1	4.33	1037.68	1037.94	1037.94	1038.00	0.023788	1.10	3.93	31.41	0.99
eje	820	PF 1	4.33	1036.98	1037.21	1037.24	1037.32	0.050529	1.51	2.88	25.34	1.43
eje	800	PF 1	4.33	1036.28	1036.50	1036.51	1036.56	0.028729	1.05	4.11	40.57	1.06
eje	780	PF 1	4.33	1036.02	1036.25	1036.13	1036.26	0.001632	0.39	10.97	54.67	0.28
eje	760	PF 1	4.33	1035.98	1036.21		1036.22	0.003167	0.47	9.21	58.25	0.38
eje	740	PF 1	4.33	1035.86	1036.05	1036.03	1036.09	0.018925	0.91	4.78	43.21	0.87
eje	720	PF 1	4.33	1035.58	1035.85		1035.87	0.006951	0.73	5.90	34.43	0.57
eje	700	PF 1	4.33	1035.36	1035.77		1035.79	0.002734	0.54	8.01	36.83	0.37
eje	680	PF 1	4.33	1035.35	1035.68		1035.70	0.006938	0.71	6.06	36.90	0.56
eje	660	PF 1	4.33	1035.18	1035.41	1035.41	1035.47	0.024188	1.07	4.04	34.09	0.99
eje	640	PF 1	4.33	1034.76	1034.92	1035.00	1035.20	0.193558	2.32	1.87	23.62	2.63

eje	620	PF 1	4.33	1034.51	1034.81	1034.76	1034.84	0.010727	0.83	5.22	35.12	0.69
eje	600	PF 1	4.33	1034.26	1034.56	1034.53	1034.60	0.012851	0.92	4.72	31.38	0.75
eje	580	PF 1	4.33	1034.03	1034.28	1034.26	1034.33	0.015916	0.94	4.60	34.54	0.82
eje	560	PF 1	4.33	1033.77	1033.86	1033.86	1033.90	0.030625	0.88	4.93	67.07	1.03
eje	540	PF 1	4.33	1033.32	1033.48	1033.44	1033.50	0.010604	0.66	6.58	62.10	0.65
eje	520	PF 1	4.33	1032.94	1033.14	1033.14	1033.19	0.024573	1.06	4.08	35.46	1.00
eje	500	PF 1	4.33	1032.75	1032.96	1032.89	1032.98	0.004677	0.55	7.86	52.53	0.45
eje	480	PF 1	4.33	1032.61	1032.73	1032.73	1032.77	0.036079	0.89	4.89	74.15	1.10
eje	460	PF 1	4.33	1031.68	1031.85	1031.87	1031.93	0.049001	1.23	3.53	41.39	1.34
eje	440	PF 1	4.33	1030.68	1031.31	1030.93	1031.31	0.000419	0.31	14.16	37.47	0.16
eje	420	PF 1	4.33	1030.55	1031.30		1031.31	0.000419	0.31	13.90	35.72	0.16
eje	400	PF 1	4.33	1030.80	1031.26		1031.28	0.004147	0.71	6.09	25.33	0.46
eje	380	PF 1	4.33	1030.86	1031.06	1031.06	1031.11	0.024343	0.98	4.40	42.40	0.98
eje	360	PF 1	4.33	1030.32	1030.52	1030.52	1030.59	0.027754	1.16	3.74	31.26	1.07
eje	340	PF 1	4.33	1029.79	1030.01	1030.07	1030.19	0.076367	1.85	2.34	20.62	1.75
eje	320	PF 1	4.33	1029.46	1029.71	1029.70	1029.77	0.019939	1.06	4.08	30.28	0.92
eje	300	PF 1	4.33	1029.12	1029.40		1029.44	0.013922	0.92	4.69	32.67	0.78
eje	280	PF 1	4.33	1028.74	1029.06	1029.05	1029.12	0.019419	1.11	3.89	26.28	0.92
eje	260	PF 1	4.33	1028.32	1028.62	1028.62	1028.70	0.023277	1.23	3.52	23.43	1.01
eje	240	PF 1	4.33	1027.90	1028.29	1028.17	1028.31	0.003014	0.56	7.76	36.62	0.39
eje	220	PF 1	4.33	1027.87	1028.23		1028.25	0.003172	0.52	8.40	46.38	0.39
eje	200	PF 1	4.33	1027.82	1028.13		1028.16	0.006544	0.70	6.17	36.82	0.55
eje	180	PF 1	4.33	1027.67	1027.87	1027.87	1027.92	0.024482	1.07	4.06	34.89	1.00
eje	160	PF 1	4.33	1027.21	1027.58	1027.51	1027.61	0.010534	0.77	5.65	42.23	0.67
eje	140	PF 1	4.33	1027.17	1027.41		1027.43	0.007549	0.59	7.40	64.56	0.55
eje	120	PF 1	4.33	1026.94	1027.17	1027.15	1027.21	0.018152	0.89	4.87	43.77	0.85
eje	100	PF 1	4.33	1026.53	1026.70	1026.70	1026.75	0.030141	1.06	4.08	41.32	1.08
eje	80	PF 1	4.33	1026.09	1026.28	1026.26	1026.31	0.014772	0.74	5.84	59.07	0.75
eje	60	PF 1	4.33	1025.80	1025.99		1026.02	0.014334	0.80	5.42	47.97	0.76
eje	40	PF 1	4.33	1025.54	1025.77		1025.79	0.008789	0.75	5.77	38.87	0.62
eje	20	PF 1	4.33	1025.28	1025.53	1025.50	1025.58	0.014001	0.97	4.46	28.98	0.79

Tabla IV-3. Tabla de resultados obtenidos del software Hec-Ras de un tramo del río Rímac para un caudal de $4.33\text{m}^3/\text{s}$.

4.1.3.6. Calibración del modelo hidráulico

Una vez creado el modelo, se calibra con dos objetivos: determinar el régimen de cálculo y las condiciones de contorno a usar, con el fin de reproducir las características de flujo bajo condiciones históricas de velocidades y tirantes.

Para tal condición se definió las condiciones de fronteras aguas abajo, así como las condiciones de frontera aguas arriba, para tal efecto se realizó un aforo de caudales en diferentes días pasando hacer simulados bajo un flujo permanente.

Tomando como condiciones de contorno en cada caso la pendiente del último tramo de río y del primero respectivamente, concluyendo que el régimen debe ser mixto, seguidamente se efectuará un análisis del comportamiento del modelo en función de las condiciones de contorno definidas.

Se realizaron ajustes al número de Manning para calibrar el modelo con el aforo respectivo del caudal en el tramo inicial, intermedio y final del tramo en estudio. Para la validación se obtuvo las velocidades de caudales.

Para la toma de los siguientes datos se usó como instrumento principal un correntómetro wáter FP111 calibrado, el cual ayudo a calcular las velocidades medias conjuntamente midiendo los tirantes para obtener los caudales en tres tramos diferentes del área en estudio. Asimismo; una vez dividido el área estudiada en tres tramos equidistantes representados como tramos críticos por la excesiva acumulación de residuos contaminantes, cuyas progresivas son 0+000 a 0+500; 1+000 a 1+500 y 1+500 a 2+200 se procede a importar los caudales aforados, con el propósito de obtener un tirante promedio de cada uno de los tramos divididas. y de esta manera obtener una sección representativa de cada tramo.

Figura 4-14: Representación gráfica de la sección trasversal por cada tramo mediante el cálculo de un tirante promedio.

Fecha de aforo 21/10/2016

velocidad (vm)	2.8	m/s
tirante (hm)	0.3	m
caudal (q)	22.96	m ³ /s

Plan: Plan 04 eje de rio eje RS: 1760 Profile: PF 1											
Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power	
	(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m ²)	(N/m s)	
1 Chan	0.00	227.00	22.96	9.10	28.52	100.00	0.32	2.52	112.03	282.79	

$$error = \frac{(0.3 - 0.32)}{0.32} = -0.0625 \approx -6.25\%$$

Fecha de aforo 24/10/2016

velocidad (vm)	2.52	m/s
tirante (hm)	0.32	m
caudal (q)	23.12	m ³ /s

Plan: Plan 04 eje de río eje RS: 1140 Profile: PF 1											
	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m ²)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	23.12	10.42	33.83	100.00	0.31	2.22	87.48	194.01

$$error = \frac{(0.32 - 0.31)}{0.31} = 0.0322 \approx 3.22\%$$

Fecha de aforo 28/10/2016

velocidad (vm)	2.78	m/s
tirante (hm)	0.3	m
caudal (q)	19.65	m ³ /s

Plan: Plan 04 eje de río eje RS: 1540 Profile: PF 1											
	Pos	Left Sta	Right Sta	Flow	Area	W.P.	Percent	Hydr	Velocity	Shear	Power
		(m)	(m)	(m ³ /s)	(m ²)	(m)	Conv	Depth(m)	(m/s)	(N/m ²)	(N/m s)
1	Chan	0.00	227.00	19.65	17.06	60.12	100.00	0.28	2.40	24.25	27.93

$$error = \frac{(0.3 - 0.28)}{0.28} = 0.0714 \approx 7.14\%$$

Una vez obtenido los datos tomados del campo y de la simulación en Hec-Ras, se realizó la evaluación entre los tirantes de campo y los tirantes hallados a través del software Hec-Ras. Se obtuvo una variación de error, el cual se calibra ajustando el número de Manning correspondiente. En este caso se modificó de 0.035 a 0.0450, para los bancos laterales y 0.035 para la parte central, obteniendo tirantes semejantes al aforado en campo. Esto garantiza la buena calibración del modelo, para determinar el caudal ecológico por el método hidráulico. Como se puede observar en el tramo inicial el porcentaje de error obtenido es negativo, lo que indica que los resultados que el tirante hidraulico obtenido del modelo, en comparacion con el tirante obtenido de campo, es un valor relativamente

mayor. Por consiguiente; se puede deducir que para el tramo inicial la calibración presenta un resultado un nivel de tirante registrado en exceso con un porcentaje de error de -6.25%. Sin embargo, para el tramo intermedio y el tramo final los resultados del modelo están por debajo del aforado con valores de 3.22% y 7.14% respectivamente. Por lo tanto, los valores resultantes del modelo son ligeramente menores a lo observado en campo, concluyendo para todos los tramos con una calibración acertada, pues los porcentajes de error están dentro de los parámetros permitidos con una fijación de error que oscila entre el 10% como valores aceptables.

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	2060	n	0.045	0.035	0.045
2	2040	n	0.045	0.035	0.045
3	2020	n	0.045	0.035	0.045
4	2000	n	0.045	0.035	0.045
5	1980	n	0.045	0.035	0.045
6	1960	n	0.045	0.035	0.045
7	1940	n	0.045	0.035	0.045
8	1920	n	0.045	0.035	0.045
9	1900	n	0.045	0.035	0.045
10	1880	n	0.045	0.035	0.045
11	1860	n	0.045	0.035	0.045
12	1840	n	0.045	0.035	0.045
13	1820	n	0.045	0.035	0.045
14	1800	n	0.045	0.035	0.045
15	1780	n	0.045	0.035	0.045
16	1760	n	0.045	0.035	0.045
17	1740	n	0.045	0.035	0.045
18	1720	n	0.045	0.035	0.045

Tabla IV-4. Tabla de Manning calibrado del software Hec-Ras, en el tramo del río Rímac.

4.1.3.7. Resultados de la aplicación del método hidráulico

Este método consiste en graficar los caudales tanto, con el perímetro mojado de la sección y sus respectivos tirantes. Se presenta los resultados de caudales simulados por el Hec-Ras, para la evaluación del método hidráulico:

Progresiva 0+500:

Q(m ³ /s)	W.P(m)	Profundidad(m)
1	41.22	0.08
3	48.37	0.12
5	54.06	0.16
7	56.55	0.17
9	58.73	0.19
11	62.99	0.21
13	65.18	0.22
15	67.5	0.23
17	69.69	0.25
19	71.57	0.26
21	73.06	0.26
23	74.97	0.27
25	76.48	0.28
27	77.97	0.29
29	80.05	0.3
35	83.49	0.32
40	86.49	0.33
45	88.91	0.34
50	91.92	0.36

Figura 4-15: Gráfica de caudal por cada perímetro mojado en la progresiva 0+500

Figura 4-16: Gráfica de cada caudal por cada profundidad en la progresiva 0+500

Progresiva 0+1000:

Q(m³/s)	W.P(m)	Profundidad(m)
1	12.04	0.11
3	18	0.17
5	19.66	0.22
7	60.91	0.11
9	95.08	0.11
11	100.86	0.11
13	110.2	0.12
15	115.49	0.12
17	121.55	0.13
19	123.78	0.14
21	124.77	0.14
23	126.29	0.16
25	127.15	0.165
27	127.28	0.16
29	128.93	0.17
35	131.15	0.19
40	134.29	0.21
45	135.96	0.23
50	136.82	0.25

Figura 4-17: Gráfica de cada caudal por cada perímetro mojado en la progresiva 0+1000.

Figura 4-18: Gráfica de cada caudal por cada profundidad progresiva 0+1000.

Progresiva 1+500:

Q(m3/s)	W.P(m)	Profundidad(m)
1	15.17	0.08
3	22.6	0.12
5	37.05	0.13
7	55.08	0.14
9	61.15	0.15
11	67.59	0.17
13	72	0.18

15	76.53	0.19
17	80.11	0.2
19	83.63	0.2
21	86.85	0.21
23	89.84	0.22
25	93.22	0.23
27	95.55	0.23
29	98.53	0.24
35	105.9	0.25
40	111.45	0.27
45	118.66	0.28
50	125.73	0.28

Figura 4-19: Gráfica del perímetro mojado por cada caudal progresiva 1+500.

Figura 4-20: Gráfica de cada tirante representado por cada caudal hallado progresiva 1+500.

De acuerdo con las gráficas mostradas se determina los puntos de inflexión para determinar el caudal ecológico en los tres tramos analizados obteniendo como resultado los caudales que se muestran a continuación.

PROGRESIVA	CAUDAL ECOLÓGICO POR P. MOJADO (m³/s)	CAUDAL ECOLÓGICO POR PROFUNDIDAD (m³/s)
0+500	4.9	5
0+1000	4.7	4.9
1+500	5	5
Q_{eco} (Prom.)	4.83	4.96

Tabla IV-5. Resultados de caudal ecológico por el método de perímetro mojado y profundidad.

En conclusión, el caudal ecológico óptimo por el método hidráulico es 4.89 m³/s, en promedio con ambos métodos; se considera como el más adecuado debido a que las

curvas de los puntos de inflexión más representativas corresponden a los parámetros de caudal vs perímetro mojado. Asimismo, garantiza la supervivencia de especies como sapos, caracoles, renacuajos que aún están presentes en la parte baja del río Rímac, estimando un tirante mínimo para estas especies de 17 cm.

4.1.4. METODO DE SIMULACION DE HABITAT

4.1.4.1 Descripción del Método Simulación de Hábitat

Para la estimación de caudales ecológicos mediante simulación de hábitat se establece una relación más precisa entre la especie acuática y los parámetros ambientales e hidráulicos. Esta información es representada bajo curvas de preferencia, representando la relación que existe entre los diferentes estadios de fauna acuática y los diferentes regímenes de caudales presentes en el río Rímac. Para esto se requiere que se integre datos hidrológicos, biológicos e hidráulicos. Asimismo, se modelará los datos relacionados con los cambios de caudal en relación con la variable hidráulica, velocidad, composición de sustrato y secciones de sustrato. Esto con ayuda de la metodología PHABSIM el cual recauda datos de las diferentes secciones geométricas más representativas del tramo obteniendo una relación entre el caudal circulante en un tramo del río y el hábitat físico para varios niveles de vida acuática y de esta manera los resultados obtenidos se usen para obtener el caudal ecológico óptimo⁸³

4.1.4.2. Modelo PHABSIM

La metodología PHABSIM es uno de los métodos más utilizados mundialmente, la misma que integra la evaluación hidrológica, hidráulica e hidrobiológica; para tal efecto, la relación de la especie acuática y su hábitat juntamente con la cantidad y calidad de agua circulante son estudiados. El modelo PHABSIM tiene dos elementos sobresalientes, el primero busca interpretar la relación del hábitat con el caudal que circula y el segundo la necesidad que tiene la especie respecto a su hábitat, obteniendo de esta manera una representación física de un tramo de río con ayuda de la simulación de hábitat, en el cual se represente un caudal óptimo y se busque el cumplimiento del principio de sostenibilidad implantadas por la ley de recursos Hídricos Ley N° 29338 el cual esclarece en su artículo III Principio de sostenibilidad, El Estado promueve y controla el

⁸³ Juan Manuel Hernandez (2010) Determinacion de caudales Ecologicos Metodologia Ifim.

aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, como parte del ecosistema donde se encuentran. El uso y gestión sostenible del agua implica la integración equilibrada de los aspectos socioculturales, ambientales y económicos en el desarrollo nacional, así como la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones.⁸⁴ Es preciso mencionar que la aplicación de este modelo conlleva tiempo superior a un año para medir distintas características estacionales; sin embargo, en este estudio se presenta este método como una aplicación general, tomando información secundaria de especies representativas dentro de la zona de estudio, en la cuenca del río Rímac.

4.1.4.3. Bases del modelo

El modelo convencional del hábitat fluvial en la metodología IFIM se desarrolla en su componente principal, el programa PHABSIM (Physical Habitat Simulation System), que reúne varios modelos hidráulicos unidimensionales, de profundidades y velocidades, cuyas simulaciones en las secciones transversales representativas se relacionan de una manera adecuada con los criterios de preferencia de las principales variables hidrobiológicas. Estas determinan el hábitat para los diferentes organismos y sus estados de vida, con el objetivo de generar las combinaciones funcionales entre el caudal y un Índice de Idoneidad Relativa del Hábitat en el tramo estudiado. Normalmente el programa utiliza como Índice de Hábitat la "Superficie Ponderada Útil" ("Weighted Usable Area"), que consiste en una idoneidad conjunta ponderada por el área de cada núcleo de simulación.⁸⁵

4.1.4.4. Procesos de simulación

Una vez establecidos todos los parámetros físicos y ambientales como el régimen físico del río, la vegetación, topografía y la elección de una especie con preferencias de hábitat que se adecuen al tramo en estudio, se procede a realizar los cálculos con caudales que varían de acuerdo con el hábitat físico de cada tramo. El proceso de simulación se realiza en la suposición de que la calidad de las aguas sea adecuada para la especie considerada; ya que el modelo sólo relaciona la habitabilidad con el caudal circulante, sin considerar

⁸⁴ Autoridad Nacional Del Agua (2010) Ley de recursos Hídricos N°29338.Lima-Peru

⁸⁵ Moscoso Reátegui, Sergio Beck (2012). Modelamiento del Caudal Ecológico con el Método IFIM-PHABSIM para el Río Salcca. (Tesis doctoral) UNI.

posibles variaciones en los parámetros químicos de las aguas. Puesto que, el modelo no simula cambios en la calidad de las aguas. La simulación hidráulica para la determinación de caudales ecológicos puede definirse como la descripción de los cambios que se producen en la distribución de profundidades y velocidades en la sección transversal, en función del caudal circulante. Se trata de describir las características físicas del cauce en términos matemáticos. Las características hidráulicas de un río se generan como consecuencia del régimen de caudales; en un determinado instante, la velocidad, la profundidad de las aguas y la sección mojada dependerán de la cantidad de agua, es decir, del caudal proporcionado⁸⁶.

4.1.4.5. Selección de las secciones transversales y recolección de datos del terreno

La modelación en PHABSIM fue llevada a cabo teniendo en cuenta 2 secciones transversales representativas del tramo en estudio, cuenca media baja del Rímac, como se presentan en las figuras.4-20 y 4-21, que corresponde a las secciones de las progresivas 1+400 y 1+420 respectivamente, es decir, un tramo de una longitud total de 20m entre sección. Además, cabe mencionar que, se utilizó datos recolectados del estudio realizado con el método hidráulico y la recolección de información en campo (como velocidades de flujo o tipo de material de fondo, etc.).

⁸⁶ Ing. Martin Mayo Rustarazo (2000). Determinación de régimen de caudales ecológicos mínimos.

Figura 4-21: Sección transversal en la progresiva 1+400 en el tramo de estudio, del método hidráulico y simulación de hábitat. Fuente propia

Figura 4-22: Sección transversal en la progresiva 1+420 en el tramo de estudio, del método hidráulico y simulación de hábitat. Fuente Propia.

4.1.4.6. Selección de la especie representativa

Entre la fauna de agua dulce citada para la cuenca del río Rímac se tiene a la trucha común en la parte alta; mientras se tiene referencias que el pejerrey de río y el bagre, son especies representativas que habitan en escasa cantidad en la parte media y baja de la cuenca.⁸⁷

Para la obtención de resultados idóneo a través de la modelación de hábitat, es necesario hacer recolección de información sobre la preferencia de hábitat de la especie a evaluar durante sus etapas de vida. En Perú, se cuenta con pocos estudios y trabajos de campo sobre las especies de peces que existen en los ríos, e información de tipo hidrobiológica, para llevar a cabo el cálculo de caudal ecológico por medio de la modelación de hábitat (PHABSIM). Por ello, se aplicará el modelamiento a una especie representativa en la zona de estudio *Basilichthys microlepidotus* (Pejerrey), tomando como información base lo presentado en el estudio llevado a cabo por M. Pouilly, G. Aguilera (2012) “Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco – Chile, mediante la simulación del hábitat físico del pejerrey *Basilichthys microlepidotus* y el camarón de río *Cryphiops caementarius*”, donde se elaboraron curvas de idoneidad de hábitat para el pejerrey de río en la cuenca Huasco (Chile), esta especie es común en los ríos de América del Sur y la cuenca de Chile tiene características similares con la cuenca del río Rímac. Las etapas de vida de los que se recolectó información fueron: Juvenil (5-10 cm) y Adulto (10-15 cm), para parámetros de velocidad media, profundidad e índice de canal.

Figura 4-23: Especie representativa de la zona de estudio. A: *Basilichthys microlepidotus* (Pejerrey). Fuente: Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco -Chile. (2012)

⁸⁷ Hanguk yun(2015) El rio que se quedó sin vida.Revista,240

4.1.4.7. Curvas de preferencia

Las curvas de idoneidad que utiliza el Phabsim están basados en un comportamiento que tiene la especie respecto a su hábitat físico en la diferentes etapas de su desarrollo, para la construcción de estas curvas se recolecta datos biológicos, ecosistémicas y algunas exigencias que presentan las especies en cuanto a su entorno bentónico y la relación que muestra está, frente a los parámetros hidráulicos como velocidad, profundidad e índice de canal obteniendo como resultado curvas en los diferentes estadios de vida de la especie, el cual para esta investigación se ha tomado un estudio realizado en Chile en la cuenca del rio Huasco por M. Pouilly, G. Aguilera (2012) “Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales, mediante la simulación del hábitat físico para la especie del pejerrey, pues existe semejanza de parámetros ambientales como clima, temperatura, suelo y flora y fauna presente en ambos ríos.

Figura 4-24: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características de velocidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

Figura 4-25: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características profundidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

Figura 4-26: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa adulta por características de sustrato. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

Figura 4-27: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de velocidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

Figura 4-28: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de profundidad. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

Figura 4-29: Gráfica de las curvas de preferencia de hábitat del pejerrey en etapa juvenil por características de sustrato. Fuente: M. Pouilly, G. Aguilera (2012).

4.1.4.8. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se compone de dos fases: el cálculo del nivel de agua en una sección transversal determinada y el cálculo de la velocidad en la misma sección. Para llevar a cabo la modelación de la lámina de agua y la velocidad, el programa genera esta simulación por medio de cualquiera de los tres programas principales con los que cuenta: STGQ (Stage-Discharge), que efectúa un ajuste de regresión de mínimos cuadrados entre el nivel de superficie libre y el caudal; MANSQ, que utiliza la ecuación de Manning para régimen permanente y uniforme; y WSP, utilizado para predecir cómo un perfil longitudinal cambia con los caudales simulados.⁸⁸

Se realizaron modelaciones usando los programas MANSQ y STGQ para todas las secciones representativas, las cuales son las metodologías más usadas en PHABSIM.

Teniendo en cuenta que, PHABSIM requiere inicialmente de unos datos de calibración de caudal, lámina de agua y de velocidad, estos valores se tomaron de las mediciones en

⁸⁸ USGS, PHABSIM for Windows, U.S. Geological Survey, 2001.

campo realizados para el método hidráulico y del programa computacional HEC-RAS usando la misma topografía de la zona.

4.1.4.9. Modelación del hábitat

El modelamiento de las características de idoneidad de hábitat se representa mediante curvas, estas curvas de preferencia o sostenibilidad que utiliza el modelo PHABSIM están enfocadas a la determinación de las preferencias de la especie en cuanto a: (1) velocidad media, (2) profundidad e (3) índice de canal.

PHABSIM agrupa tres modelos de simulación del microhábitat, que abarcan la mayoría de los casos que se podrían presentar y que al mismo tiempo aplican los criterios de idoneidad según preferencia del análisis, y estos modelos son HABTAE, HABTAM y HABEF.

En cuanto a la modelación de hábitat, solo se tuvo en cuenta la metodología HABTAE, diseñada para describir el comportamiento de organismos móviles, bajo un caudal constante o con variaciones graduales de caudal y velocidad. Presenta en su cálculo final, el microhábitat como: Superficie Ponderada útil (SPU), Superficie del Lecho Ponderada Útil (SLPU) y Volumen Ponderado Útil (VPU). Estos cálculos se basan empleando el método de la velocidad media de celda, el cual realiza el programa para el análisis de la sección y la fauna representativa, como herramienta principal según el caso que se le asigne, para las curvas de preferencia de la especie. Mientras que el HABTAM simula la condición en la cual las especies simuladas pueden migrar de forma lateral dentro de una sección transversal con el fin de poder usar el SPU cuando se presentan cambios de caudal y HABEF calcula el hábitat considerando las condiciones en dos corrientes y/o en dos etapas de vida o especies, por lo que estos últimos modelos no corresponden al objeto del presente estudio.⁸⁹

Este procedimiento evalúa cada celda en la que es dividida la sección transversal, asignando valores entre 0 y 1 para cada uno de los parámetros de hábitat considerados (profundidad, velocidad, sustrato y cobertura, y/o temperatura), los valores cercanos a la

⁸⁹ Preciado Palencia, Angélica Lisbeth (2017). Uso de las curvas de preferencia del macroinvertebrado Chironomidae, alimento base de la especie *Eremophilus Mutisii*, con el fin de evaluar la aplicabilidad de la metodología IFIM en el cálculo de los caudales ambientales para el Río Sisga en el departamento de Cundinamarca. Colombia.

unidad indica si es adecuado para la especie considerada. El procedimiento devuelve resultados para diferentes valores del caudal, obteniendo índices del área utilizable, denominados Superficie ponderada útil (SPU o WUA, Weighted Usable Área).

4.2. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1. Método hidrológico.

Debido al alcance del estudio que constituye una primera aproximación de caudal ecológico, para la determinación de los caudales ecológicos se adoptará el promedio medido por el método de Tennant, pues cumple con la condición de demanda hídrica tanto en lo económico, social y ambiental. En la figura 4-15 se observa un esquema de la cuenca del río Rímac con cada caudal ecológico calculado.

Figura 4-30: Imagen de la cuenca del río Rímac con cada caudal ecológico calculado en la zona de estudio.

Asimismo, en la tabla IV-6 se muestra el promedio de estos caudales ecológicos por cada método desarrollado en la cuenca del río Rímac.

Con respecto al método 7Q10 y Hoppe podemos observar que no todos los indicadores de demanda de recursos hídricos satisfacen la normatividad del Perú, pues se puede apreciar en los resultados que son valores muy altos, caso contrario es lo que sucede con

el método de Tennant y curva de permanencia que si cumple con la demanda agua por parte de la población y se conserva la vida acuática existente.

Método	Caudal Ecológico (m ³ /s)	¿Se aplica en el Perú?	Observaciones
7Q10	10.28	no	Caudal Ecológico elevado
Hoope	11.37	no	Caudal Ecológico elevado
Tennant	3.56	si	Caudal Ecológico óptimo
Curva de Permanencia	2.65	si	Caudal Ecológico óptimo

Tabla IV-6. Métodos de caudal ecológico que se aplican a la cuenca del río Rímac.

Para el caso de la planta de tratamiento de la Atarjea se recomienda que al menos, aguas abajo de la Atarjea, debería existir un caudal ecológico mínimo que corresponde al 10% del caudal promedio anual aplicado con el método de Tennant, pues de esta manera se cumple con las exigencias de demanda de agua y conservación de vida acuática, en este caso el desove de especies marinas, asimismo, se debería tener un mejor control respecto a los residuos que se acumulan en esta parte del río.

En el caso de la estación de Chosica este caudal ecológico según el método Curva de Permanencia también es relativamente alto, aunque este sea un método que puede ser utilizado en el Perú, según la Autoridad Nacional del Agua.

4.2.2. Método hidráulico

Cada especie presente en un hábitat determinado tiene una forma singular de relacionarse con su ecosistema y presenta relaciones fisiológicas que le permiten ocupar diferentes tipos de adaptaciones a lo largo de su vida. Las diferentes variables hidráulicas son importantes para cada especie, sin embargo, velocidad del agua es la variable predominante de estos hábitats y es la que explica las pautas de supervivencias de estas especies. Una mejor propuesta de los hábitats preferidos y necesarios para cada especie significará mejores condiciones de conservación y mejores garantías de vida, puesto que

se estaría garantizando la protección de los hábitats adecuados para el cuidado o restauración de poblaciones en amenaza. De acuerdo a los resultados obtenidos por el software hec-ras en cada tramo de estudio, se estaría garantizando la sobrevivencia de especies encontradas en dicha zona como es el caso de renacuajos, sapos y caracoles que hasta el día de hoy subsisten, pues el tirante para la conservación de estas especies está clasificada para la reproducción y prefiere masas de agua poco profundas (5-15 cm) en el caso de renacuajos y caracoles estables, con un hidroperiodo prolongado y vegetación acuática; garantizando de esta manera que el método del perímetro mojado se adapta al ecosistema presentado en el tramo estudio, ya que los resultados obtenidos en el software proporcionan caudales ecológicos de $4.89 \text{ m}^3/\text{s}$ y profundidades de 17 cm garantizando la conservación de estas especies.

4.2.3. Método Simulación de hábitat

El tramo estudiado para la simulación de hábitat es un tramo recto con una anchura de aproximadamente 30 m, presenta remansos poco puntuales. Sus aguas son poco profundas con alturas entre 40 a 60 cm, cuenta con una granulometría de piedras conformada por canto rodados de medianas y grandes dimensiones cubiertas de vegetación y matorrales presentes en el banco derecho del río. Para el caso de la especie seleccionada se optó por el pejerrey, pues de acuerdo con numerosos documentos de archivos, hay referencias de lagunas existentes hasta principios del siglo XX en todos los valles costeros, en la cual se destaca las lagunas pesqueras circundantes formándose principalmente por aguas dulces subterráneas cuya principal composición es que carecen de carbonato de sodio, favoreciendo la vida acuática. Por tal albergaban camarones, bagres, pejerrey en la zona baja y truchas en la parte más altitudinal del río Rímac. Teniendo en cuenta estas condiciones presentes en el Río Rímac se realizó, como primera aproximación, la construcción de la simulación de hábitat físico y de esta manera determinar un caudal ecológico óptimo para salvaguardar las diferentes etapas de vida del pejerrey, y sus características de preferencias de hábitat. Se simuló el caudal óptimo para el pejerrey de río en sus estados de juvenil y adulto; en el tramo de estudio correspondiente. Se analizó la preferencia de la especie de acuerdo con las variables hidráulicas de velocidad, profundidad e índice de canal (sustrato).

De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelamiento PHABSIM, determinamos el caudal ecológico para el pejerrey de río, en las curvas de superficie ponderada útil en

los caudales de simulación mediante un punto de inflexión. Para el caso de pejerrey juvenil se muestra un pandeo entre HPU/Q entre los valores de 4 a 4.5 m³/s, como se observa en la figura.4-30. Sin embargo, para la especie adulta lo valores de caudales oscilan entre 4.5 a 4.8 m³/s, como se muestra en la figura.4-31, siendo un poco más altos esto debido a que en la etapa juvenil no cuentan con la misma capacidad de nadar que en la etapa adulta. Comparándose de manera similar con los resultados de puntos de inflexión en la superficie ponderada útil presentes en el estudio de caudal ambiental de la cuenca del río Huasco en Chile. (M. Pouilly y G. Aguilera,2012), donde se analiza la misma especie representativa.

Figura 4-31: Gráfica del HPU (WUA por sus siglas en inglés) vs caudal para el pejerrey en la etapa juvenil.

Figura 4-32: Gráfica del HPU (WUA por sus siglas en inglés) vs caudal para el pejerrey en la etapa adulto.

Cada especie en desarrollo tiene intereses diferentes y manifiestan resultados según su propósito, que en la práctica muchas veces se contraponen. La mejor solución frente a ello es la que satisface los objetivos de todo un colectivo en cuanto a su desarrollo como especie, su valoración económica y su viabilidad. Por tal razón, se evaluó el efecto que puede generar esta especie en dos etapas más importantes de su desarrollo como es la etapa juvenil y la etapa adulta, y de esta manera mantener un crecimiento favorable.

Algunos investigadores como Beecher (1985) recomienda seleccionar un caudal ecológico que produzca el mayor valor de WUA-Q de todos los estadios de vida de la especie. Sin embargo, Conder (1982) prefiere elegir el menor caudal establecido entre las variabilidades que se presentan en la curva, en sus diferentes estados de desarrollo. De acuerdo con estos estudios, estos procedimientos son justificados cuando el objetivo sea conservar un estadio específico de evolución de la especie para, de esta manera, desarrollar su potencial piscícola. No obstante, cuando el objetivo sea mantener un estado aceptable de la especie bajo caudales reducidos, los resultados (enfoques anteriores) no son los recomendables pues ellos serían mayores a los caudales naturales. Por

consiguiente, para este estudio se estableció como prioridad la conservación de la especie tanto en la etapa juvenil como adulta, determinando un caudal óptimo entre los dos estadios de vida del pejerrey de río.⁹⁰ En esta investigación, se está considerando un caudal óptimo entre 4 a 4.8 m³/s dentro de un rango de simulación designado, como se aprecia en los gráficos resultantes.

Validación del modelo

Del resultado que obtenemos dentro del programa WSL (Water Surface Elevation) se puede validar los datos con los valores de superficie libre observados y simulados, respecto a los caudales modelados, se debe dar un comportamiento razonable. El manual de usuario del PHABSIM determina que para la validez a la modelación WSL es necesario que los gráficos generados no cuenten con inconsistencias como que haya caídas en la elevación mientras que la distancia aguas arriba aumenta. Esto nos indicaría que alguna va en sentido contrario al flujo. De acuerdo con esta descripción los resultados obtenidos son consistentes como se muestra en la figura siguiente, por lo tanto, esto nos permite seguir con el modelamiento.

⁹⁰ Díez Hernández, Juan (2002). Determinación de Caudal Ecológico Metodología IFIM-PHABSIM. España.

Figura 4-33: Gráfica de la superficie libre observados y simulados, de acuerdo con los caudales del modelo.

Por otro lado, para validar el modelo también es necesario verificar las velocidades mediante el software por medio de caudales proporcionados, para ello se examina la relación que tiene las velocidades simuladas y las velocidades observadas en los tramos evaluados y evidenciar el (VAF).

$$VAF = \frac{Q_{solicitado \text{ para simular}}}{Q_{calculado \text{ a partir de las simulaciones de velocidad}}}$$

De acuerdo a ello se obtiene un gráfico en donde se represente que a mayores caudales se deben generar mayores velocidades, de lo contrario sería un comportamiento absurdo en donde a un caudal mayor genere velocidades menores. Asimismo, en la figura.4-19 se muestra el comportamiento correcto de velocidades en donde se observa claramente de manera creciente las velocidades en el cual se resalta que los mayores caudales se presentan en el medio y lado derecho del lecho del río esto debido a que la profundidad es mayor y de igual forma se observa que las velocidades más bajas predominan en la ribera izquierda del río obteniendo como resultado una simulación coherente.

Figura 4-34: Gráfica de la distribución de velocidades por caudal, en la sección representativa. Fuente propia.

Figura 4-35: Gráfica de la sección transversal por donde transcurre los caudales, en la sección representativa. Fuente propia.

4.3. DISCUSIÓN

En esta sección se realiza una comparación de los métodos y enfoques empleados en esta investigación, con estudios realizados en otros países. El primero del Río Chambas (Cuba) y el segundo del Río Quindío (Colombia).

Se encontró bibliografía donde se desarrolló una investigación en el río Chambas de la provincia Ciego de Ávila que se encuentra en el país de Cuba, esta investigación tenía como objetivo determinar el caudal ecológico mediante cinco metodologías: Curva de Permanencia de Caudales, Rafael Heras, Tennant, Franquet y Perímetro Mojado. Se analizó una serie de 21 años de gastos medios mensuales en el periodo comprendido de 1976 al 1986, obtenidos de la estación hidrométrica Puente Circuito Norte.⁹¹ A diferencia con el estudio realizado en el Río Rímac, donde las series con las que se cuenta información abarca una variabilidad de periodos según cada estación (en total 9), estas presentan pocos datos excepto por la estación Chosica que tiene una serie de 90 años de gastos medios mensuales comprendidos de 1920 al 2010. En este sentido, para el caso del estudio del Río Chambas, el periodo de tiempo en los cuales se tiene data de caudales medios mensuales es poco suficiente con respecto al año actual, debido a que se registra una diferencia de 30 años donde las variables hidrológicas puedan haber tenido un cambio significativo.

En el caso de los métodos utilizados para estimar el caudal ecológico, el método de curva Permanencia, que emplean en el estudio del Río Chambas, se realiza con persistencia al 90%, y el 5% de ese resultado se toma como valor del caudal ecológico. Esto para ajustar el resultado al caudal promedio mínimo del río. En el caso del río Rímac, se calculó este método con una persistencia al 95%, y particularmente en la estación Chosica, el 20% de ese resultado se ajusta al caudal ecológico, ya que este resulta muy alto para las condiciones actuales del río aguas abajo de Chosica. Por otro lado, el método de Tennant considerado para el estudio del Río Chambas resultó ser poco apropiado para aplicarlo en ese lugar debido a que los valores de caudales ecológicos estaban por debajo del caudal promedio mínimo del río; caso contrario al método de Tennant aplicado al Río Rímac donde un caudal óptimo para la conservación de las especies se regía al 10% de la media

⁹¹ Brown, Gallardo, Williams & Torres (2015). Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila, Univ. De Cuba. revista scielo.pp (58-71).

anual según este método.

Con respecto al método hidráulico, en ambos casos se utilizó el método del Perímetro mojado, llegando a la conclusión que es un caudal ecológico adecuado para estos 2 ríos (Chambas y Rímac).

En conclusión, según el estudio realizado para determinar el caudal ecológico del Río Chambas de la provincia Ciego de Ávila (Brown, Oscar; et.all, 2015) que, de los métodos evaluados, el de la Curva de Permanencia, el de Rafael Heras y del Perímetro Mojado resultaron los más apropiados para la estimación del caudal ecológico en las condiciones del régimen fluvial del río Chambas, el cual para nuestro caso compartimos que el método Curva Permanencia y Perímetro Mojado son apropiados para la determinación del caudal ecológico en el río Rímac, sin embargo, el método de mayor relevancia es el de simulación de hábitat por su grado de tratamiento de información tanto hidráulica como del ecosistema a estudiar.

Otro estudio relevante detallado sobre caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos es el de la UMC Río Quindío (Lozano, Grabriel; et all 2012) perteneciente al país de Colombia. En este caso se utilizó el modelamiento hidrológico WEAP, para generar la escorrentía simulada y a partir de ello aplicar los diferentes métodos para calcular el caudal ecológico. Con lo que respecta al modelo WEAP, en esta investigación se realizó los tres métodos que utiliza este software para simular procesos hidrológicos, estos son: Método solo de riego (FAO), Método lluvia escorrentía (FAO) y Método lluvia escorrentía (Método de humedad del suelo). Los autores al analizar estos tres modelos según la disponibilidad de información, simulación de escorrentía y complejidad; llegan a la conclusión que el método que se adecúa más a la zona de estudio es el Método de humedad de suelo. En el caso de la cuenca del Rímac también se optó por realizar el Método de lluvia escorrentía (humedad del suelo) a través del modelamiento WEAP, llegando a la conclusión que se realizó un correcto análisis, en función a lo requerido para realizar este modelo hidrológico.

En el caso de la aplicación de los métodos para estimar el caudal ecológico en el estudio del Río Quindío lo clasifican en tres escalas temporales: escala anual, mensual y consideraciones temporales especiales. Y para cada una de estas escalas de tiempo

aplicaron una determinada metodología adecuada a sus respectivos requerimientos.⁹² En este estudio también se realizó métodos para estas escalas temporales (anual, mensual y consideraciones especiales), la diferencia es que solo se aplicó un método por cada una de ellas, y en el Río Quindío se aplicó entre seis y nueve métodos por cada escala temporal obteniendo mayor cantidad de resultados para su análisis.

Finalmente, los autores mencionan que el Método del Q95 o también llamado el Método Curva Permanencia es el que recomiendan en su estudio, a una escala mensual multianual que representa de mejor manera el régimen hidrológico de su cuenca. De la misma manera se puede observar que coinciden respecto a que la utilización de este método es uno de los más adecuados para determinar el caudal ecológico de la cuenca del Río Rímac.

El método de Tennant es utilizado en diferentes investigaciones como es el caso de “Calculation and analysis of the instream ecological flow for the irtysh river”, que es uno de los ríos más importantes en Asia central ubicado entre Rusia y China, en el cual se aplicó estos tres métodos, este último supone un porcentaje de flujo medio que es constante y garantice el nivel de protección del ecosistema. Según esta investigación, los resultados obtenidos muestran algunas deficiencias con el método de tennant pues el caudal ecológico obtenido dejaba escaso recursos agua para uso poblacional, pues en épocas de sequía los caudales están por debajo del flujo permitido llegando a la conclusión que este método limita su aplicación de acuerdo con la ubicación, condiciones climáticas y demandas de agua presentes.

Por otro lado, se estimaron caudales ecológicos de investigaciones en otros países realizando estudios con el método de simulación de hábitat, como es el caso del río Animas en el estado de colorado, Estados Unidos; el cual evaluó el impacto y supervivencia que tiene la trucha marrón, estableciendo una relación de dicha especie con su hábitat, recalando que en el río Animas las aguas presentes son muy poco profundas para ofrecer un hábitat y afecta negativamente la probabilidad de supervivencia de truchas adultas, a esto se suma que en muchas áreas de la cuenca existe la contaminación del agua y los sedimentos vertidos por las poblaciones aledañas. Para dicho estudio se realizó una exhaustiva investigación sobre la especie y su entorno ecológico, llegando a la

⁹² Lozano, Monsalve & García (2012). Estimación de Caudales Ecológicos mediante Métodos Hidrológicos e Hidráulicos en la cuenca del Río Quindío. Proyecto de investigación Univ. De Quindío.

conclusión que su hábitat varía estacionalmente de acuerdo al clima presente, en cuanto al área de estudio realizaron una muestra de catorce secciones para caracterizar el hábitat físico, de acuerdo a esto se obtuvieron velocidades aceptables para el hábitat aproximadamente de 0.75 m/s; sin embargo, los criterios de hábitat de la trucha para el invierno no son los mismos en cuanto al resto del año, pues los criterios de velocidad en invierno requieren de una menor velocidad que en el resto del año de acuerdo a ello se registraron un caudal ecológico de 3.67 m³/s.⁹³ En cuanto a la investigación realizada en el río Rímac, donde la especie en estudio fue el pejerrey en etapa juvenil y adulto, el resultado obtenido para el caudal ecológico es de 4.8 m/s³, siendo este resultado un valor razonable teniendo en cuenta las similitudes de problemáticas y demandas de agua a las que se encuentran ambos ríos y la restauración de vida acuática a tratar, pues se tiene referencias bibliográficas que anteriormente, en el río Rímac y río Animas existió vida acuática, y que debido a la transición del tiempo en conjunto con la intervención humana, este hábitat se fue deteriorando al punto que se hizo extinto la fauna acuática de estos ríos. En términos de velocidad y profundidad el pejerrey tiene preferencias más elevadas que la trucha. Para el caudal ecológico determinado, según la idoneidad de las características de la especie modelada, se determinó una velocidad de 1.70 m/s; mientras que la profundidad alcanzó los 0.5 m, que puede llegar hasta los 4 m donde se adapta el pejerrey.⁹⁴ Por tal razón, el método de simulación de hábitat es el método idóneo para el cálculo de caudal ecológico, pues tiene un sustento más directo entre la especie y su comunidad bentónica y de esta manera obtener un caudal ecológico que refleje un valor más real. Asimismo, el método hidráulico muestra un factor importante pues cuenta con una información de calidad tanto geométrica como condiciones de hábitat y límites de frontera que reflejan un entorno ecológico que refleje un caudal ambiental realista del hábitat.

No obstante, además del estudio realizado mediante la especie de pejerrey de río, también ha existido casos en donde se ha realizado investigación del caudal ambiental con seres vivos como es el caso de los macro invertebrados tradicionalmente se han utilizado especies de peces como objetivo para la estimación de los regímenes de caudales

⁹³ Milhous, Robert (2007). Application of physical habitat simulation in the evaluation of physical habitat suitability. Integrated investigations of environmental effects of historical mining in the Animas River watershed, San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 165. Vol.2 (E21),877-888.

⁹⁴ M. Pouilly, G. Aguilera (2012) Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco. Chile.

ecológicos bajo la metodología IFIM (simulación de hábitat), y su aplicación se ha basado en la utilización de una sola especie. Sin embargo, es claro que este enfoque no es el más apropiado para muchos ecosistemas fluviales mientras se tenga una mayor diversidad de especies.

Aunque en el comienzo del desarrollo de la metodología IFIM se prestó igual atención al uso de peces y macro invertebrados acuáticos como organismos objetivo, la dificultad percibida en la utilización de estos últimos llevó a la conclusión que el caudal suficiente para las especies de peces también lo era para los macro invertebrados bentónicos. Sin embargo, las investigaciones alrededor de los macro invertebrados bentónicos han aumentado y nuevos argumentos recomiendan utilizarlos para la estimación de caudales ecológicos bajo la metodología de simulación de hábitat.

Los macro invertebrados bénticos son un importante componente de los ecosistemas acuáticos, no sólo brindan valiosa información acerca de la calidad del agua de un área, sino que también son importantes componentes de las redes tróficas acuáticas, especialmente para peces (Gore et al. 2001). Los macro invertebrados son menos móviles que los peces, más sensibles a cambios del caudal o a caudales bajos y tienen rangos de tolerancia más estrechos (Gore & Judy 1981). Es por ello que analizar y determinar un caudal ecológico por el método de simulación de hábitat utilizando como especie representativa los macro invertebrados, resulta más favorable para la restauración de ecosistemas acuáticos.

Un cierto cambio en el hábitat para los peces puede producir un cambio mayor en el hábitat para los macro invertebrados (Gore et al. 2001). La importancia de los macro invertebrados en los ecosistemas acuáticos muestra que estos organismos deberían ser considerados en los análisis de caudales ecológicos con base en su distribución, curvas de preferencias hidráulicas e inclusión de estos modelos en las decisiones de manejo y gestión hídrica (Gore et al. 2001)⁹⁵.

⁹⁵ Cardona Duque, William (2012) Curvas de idoneidad de hábitat para macro invertebrados bentónicos: una herramienta para la estimación de caudales ambientales. Colombia

4.3.1 Balance hídrico en la cuenca del Río Rímac.

Aspectos Generales.

El balance hídrico es el análisis entre la demanda y oferta que se le puede dar al uso del agua, de esta manera se ha realizado un estudio con referencia a la estación hidrométrica de Chosica, en el cual se ha desarrollado los usos actuales del agua.

A nivel nacional se determinó que la cuenca del río Rímac es una de las más demandadas en cuanto a su uso múltiple ya sea agrícola, energético, minero, industrial y propiamente de uso poblacional, pues se sabe principalmente que el aporte primordial está destinado a cerca 9 millones de habitantes de esta manera sostener sus necesidades básicas.

La ecuación hídrica que emplearse en el punto de estudio es el siguiente:

$$\text{Balance Hidrico} = Q - D$$

Donde:

Q= caudal en el río

D= demanda hídrica

La disponibilidad hídrica medida en dicho punto vendría ser la oferta hídrica en situación natural. Por lo que se sabe que este valor ya influye la precipitación, evapotranspiración, infiltración, aportes subterráneos (manantes y otras), etc.; por esta razón se utilizara la ecuación abreviada ya antes mencionada.

Oferta hídrica

El agua disponible en una cuenca de río, para satisfacer las necesidades de los distintos usuarios del sistema de recursos hídricos, está clasificada en 5 tipos:

- Agua superficial de escurrimiento natural, proveniente de la cuenca del río Rímac
- Agua superficial de régimen regulado, proveniente de las lagunas embalsadas en la cuenca del río Rímac.
- Agua superficial de escurrimiento natural, derivado de la cuenca del río Mantaro.
- Agua superficial de régimen regulado, proveniente de las lagunas embalsadas en la cuenca del río Mantaro.

- Agua subterránea, extraída mediante bombeo de los pozos ubicados en el valle del Rímac.

De estudios ya realizados se obtuvo la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Rímac con un análisis de persistencia 75% de caudales medios mensuales siguiendo los 5 tipos de disponibilidad hídrica ya antes mencionada.⁹⁶

Cuenca/ Subcuenca	Estación	Persistencia	Mes												Total Anual
			Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Río Rímac	Chosica	75%	28.52	30.59	33.27	34.16	45.69	68.92	96.41	124.68	76.49	44.41	31.54	27.80	642.48
Río Santa Eulalia	Sheque	75%	5.54	5.78	7.23	7.46	11.73	20.25	28.43	32.54	21.51	12.03	7.52	7.10	167.12
Río Rímac	Tamboraque	75%	14.65	14.44	16.77	17.81	24.11	30.69	41.01	45.96	32.53	23.81	18.79	16.18	296.74
Alto Río Rímac	-	75%	2.73	2.93	3.19	3.27	4.34	6.56	9.19	11.89	7.28	4.23	3.01	2.65	61.27
Quebrada Párac	-	75%	2.73	2.93	3.19	3.27	4.34	6.56	9.19	11.89	7.28	4.23	3.01	2.65	61.27
Túnel Trasandino	Túnel Trasandino	Promedio	14.65	12.39	12.59	12.16	11.06	9.19	8.47	10.55	10.03	10.90	13.43	14.03	139.45

Tabla IV-7. Disponibilidad hídrica al 75% de persistencia en la cuenca del río Rímac.
Fuente: Autoridad Nacional del Agua.

Demanda hídrica.

La demanda hídrica para cuenca del río Rímac fue estimada para distintos tipos de uso:

- Uso agrícola
- Uso de demanda poblacional
- Uso minero
- Uso industrial
- Uso hidroeléctrico⁹⁷

⁹⁶Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

⁹⁷Autoridad Nacional del Agua (2010) Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú.

Figura 4-36: Imagen del esquema hidráulico de la cuenca del río Rímac.

En la tabla IV-8. Se presenta el balance hídrico de la cuenca del río Rímac en la estación Chosica, los valores de descarga presentados están en Volumen de agua mensualizada en hm3. En ese caso el caudal ecológico estimado es 3.65 m3/s o 9.46 hm3.

DESCRIPCION		Volumen de agua mensualizada en hm3												Total
		Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	
Oferta hídrica	Caudal al 75% de persistencia Río Rímac	28.52	30.59	33.27	34.16	45.69	68.92	96.41	124.68	76.49	44.41	31.54	27.8	642.48
	Caudal medio mensual túnel trasandino	14.65	12.39	12.59	12.16	11.06	9.19	8.47	10.55	10.03	10.9	13.43	14.03	139.45
	Aguas Subterráneas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total	43.17	42.98	45.86	46.32	56.75	78.11	104.88	135.23	86.52	55.31	44.97	41.83	781.93
Demanda hídrica	Uso Agrícola	6.08	6.88	7.42	7.8	9.1	12.26	12.62	12.59	11.34	8.38	5.68	5	105.15
	Uso Poblacional	42.59	41.21	42.59	41.21	42.59	42.59	38.47	42.59	41.21	42.59	41.21	42.59	501.44
	Uso Minero	2.33	2.26	2.33	2.26	2.33	2.33	2.11	2.33	2.26	2.33	2.26	2.33	27.46
	Caudal ecológico	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	113.52
	Otros usos(industrial)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.95
	Total	60.54	59.89	61.88	60.81	63.56	66.72	62.73	67.05	64.35	62.84	58.69	59.46	748.52
Demanda atendida		43.17	42.98	45.86	46.32	56.75	66.72	62.73	67.05	64.35	55.31	44.97	41.83	748.52
		71.31%	71.76%	74.11%	76.17%	89.29%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	88.02%	76.62%	70.35%	100.00%
Superávit (+)		-	-	-	-	-	11.39	42.15	68.18	22.17	-	-	-	33.41
		-	-	-	-	-	14.58%	40.19%	50.42%	25.62%	-	-	-	4.27%
Déficit (-)		-17.37	-16.91	-16.02	-14.49	-6.81	-	-	-	-	-7.53	-13.72	-17.63	-
		40.24%	39.34%	34.93%	31.28%	12.00%	-	-	-	-	13.61%	30.51%	42.15%	-

Tabla IV-8. Balance hídrico de la cuenca del río Rímac (estación Chosica).

Figura 4-37: Comparación de ofertas y demandas hídricas Cuenca del río Rímac - Estación Chosica.

Como se muestra en la figura anterior se observa un déficit de caudales entre los meses de agosto hasta diciembre y los meses de mayo a julio demostrándose que el caudal ecológico en estos meses no se cumpliría. La solución frente a este problema es implementar medidas estructurales y no estructurales que ayuden a reducir el déficit,

asimismo, debe implementarse una verdadera gestión integrada de recursos hídricos, en el cual se involucren los distintos usuarios de la cuenca.

Actualmente existen proyectos de trasvase que aporta más oferta de agua, como son: Marca I, Marca III y Marca IV, los cuales están en funcionamiento. Asimismo, están ejecutándose el proyecto Marca II, que entrará en funcionamiento en el año 2020, el proyecto Marca V y el Túnel Gratón, que proyecta el trasvase de aguas para el año 2030; todo ello para satisfacer las demandas de agua (dentro del cual se incluye el caudal ecológico) actuales y futuras de la cuenca del río Rímac.

4.4. PROPUESTA METODOLOGICA PARA EL CALCULO DE CAUDAL ECOLOGICO

Para el método hidrológico una de las principales características es la información recolectada y su fácil aplicación, pues requiere de pocos datos. Y se invierten escasos recursos económicos. Asimismo, este método es aplicable a diferentes tipos ríos sin tomar en consideración la geomorfología del río presente en dichos tramos, pues solo toma en consideración aforos de caudales de estaciones a lo largo del tramo en estudio y obtener el caudal ecológico mediante cálculos estadísticos.

En el caso de los métodos hidráulicos, es aplicable en secciones donde el caudal es crítico o el hábitat presente es limitante para las especies acuáticas. Asimismo, una vez calculado el caudal ecológico su aplicación es rápida ya que presenta parámetros definidos. La obtención de dicho caudal ecológico se deduce de la relación entre parámetros hidráulicos como el tirante perímetro mojado juntamente con el vínculo que tiene la ecología presente en el tramo como la flora y fauna.

Para el método de Simulación de Hábitat, la recolección de información es la que toma más tiempo, asimismo implica desarrollar una simulación tanto para caudal (parámetros de velocidad, profundidad y sustrato, de secciones transversales) como para las especies existentes (curvas de preferencia de hábitat). de esta manera mediante una simulación de estos parámetros el caudal se deduce de una relación directa de hábitat físico y la relación que muestra con el caudal circulante en dichos tramos.

En el caso del método holístico, generalmente abarca los métodos anteriores introduciendo parámetros relacionados como el socio cultural presente en la zona de

estudio. En definitiva, es un análisis completo con estudios desarrollados a lo largo de varios años y en todas las especialidades involucradas con el análisis del caudal ecológico.

Finalmente, se llega a la conclusión que, en general y de manera esquemática, estos son los pasos que seguir para el desarrollo de los métodos hidrológicos, hidráulicos y de Simulación de Hábitat.

Para el caso del método hidrológico, el cálculo del caudal ecológico se obtiene de una recolección de caudales diarios, mensuales, etc de todas las estaciones presentes en dicha zona de estudio y, de manera estadística, empleando los diversos métodos que existen a nivel mundial, se logra obtener el caudal ecológico. No obstante, para dicho cálculo se debe tener en cuenta una información confiable y amplia para el caso de los caudales con una base de datos no menor a 20 años y de esta manera obtener caudales ambientales óptimos. Por otro lado, el método hidráulico establece una relación entre las secciones transversales del río, parámetros ambientales como el perímetro mojado, tirante, velocidades, cobertura vegetal etc. Evaluando de esta manera los diferentes caudales que producen cambios en la disposición del cauce, la calidad del agua y la relación con el hábitat para de esta manera obtener una sensibilidad ecológica aceptable que relacione confiablemente el hábitat de la especie con el caudal ecológico. Asimismo, el método de simulación es una composición conjunta de variables hidráulico y biológicos en el cual se define una especie en particular y de esta manera simular los cambios de hábitat de los ríos debido a la variación de caudal en diferentes estadios de vida de dicha especie, pues se debe tener en cuenta información de datos biológicos, hidráulicos e hidrobiológicos conjuntamente utilizando variables geométricas como la profundidad, velocidad, vegetación presente, de igual forma se debe tomar en cuenta el ciclo de vida de la especie analizar como la reproducción, desove, crecimiento y alimentación todo esto reflejado mediante curvas de idoneidad que faciliten de esta manera el cálculo de caudal ambiental.

De igual forma una propuesta metodológica se presenta a continuación en donde se detalla los pasos a seguir para el cálculo de caudales ambientales.

Figura 4-38: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Hidrológico. Fuente Propia.

Figura 4-39: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Hidráulico.
Fuente Propia.

Figura 4-40: Mapa conceptual para calcular Caudal ecológico por el Método Simulación de Hábitat. Fuente Propia.

4.5 CONDICIONES PARA EL MANTENIMIENTO DEL CAUDAL ECOLOGICO

Para el mantenimiento del caudal ecológico se debe tener en cuenta una variedad de condiciones, necesarias para la conservación de los ecosistemas de flora y fauna en el cauce del río. Algunas de estas son:

Primero, para que se cumpla las necesidades hidrobiológicas de los ecosistemas es fundamental la calidad de agua del río, por ello se deben respetar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los límites máximos permisibles (LMP) con respecto a los parámetros físicos, parámetros químicos inorgánicos, nutrientes, parámetros microbiológicos, parámetros orgánicos, metales y metaloides. Siempre y cuando se reduzcan o eliminen los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, residuos sólidos, contaminación por los desechos mineros, entre otros; se podrá mantener una mejor calidad del agua del río, contribuyendo con las condiciones requeridas por los ecosistemas acuáticos.⁹⁸

Segundo, se debe fijar el cauce del río, sin alterarlo de una manera artificial, para una mejor conducción del recurso hídrico y no variar las características geomorfológicas del cauce, lo cual puede implicar un cambio en el hábitat de las especies, sea la flora o la fauna representativa.

Tercero, asegurar el flujo, la velocidad y profundidad del caudal necesario para el mantenimiento, conservación y preservación de los ecosistemas acuáticos en el río; utilizando la metodología necesaria que indica la normativa peruana para la determinación del caudal ecológico, en caso se proyecte realizar alguna obra hidráulica que altere los parámetros ya mencionados.

Por último, se debe realizar un monitoreo constante de las aguas superficiales, acuíferos y ecosistemas con el fin de mantener las condiciones necesarias del caudal ecológico, así como también, concientizar e informar a la población sobre todo lo involucrado con el mantenimiento de estos ecosistemas y la importancia que tiene preservar la calidad del agua en los ríos.

⁹⁸ Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

Revisar y evaluar los métodos para el cálculo del Caudal Ecológico, y su potencial aplicación en el Perú.

- Los métodos hidrológicos son los más utilizados en el Perú porque se puede estimar de manera sencilla y rápida, utilizando pocos parámetros; sin embargo, la escasez de estos significaría estimar el caudal ecológico con mayor complejidad que otros métodos.
- El método hidráulico es un procedimiento importante que puede desarrollarse en el Perú, no obstante, está limitado para ríos poco caudalosos y solo se realiza por tramos, que generalmente no garantizan un comportamiento igual a lo largo de todo el cauce del río.
- Los métodos de Simulación de Hábitat y Holísticos se pueden aplicar en el Perú, incluso ya se han realizado; estos toman mayor relevancia cuando se requiere un mayor control sobre el caudal ecológico, incluyendo aspectos más allá de la ingeniería en sí, tales como ecología, sociología, cultura, paisajes entre otros.
- Hay poca información sobre normativas para estimar el caudal ecológico en caso haya obras de infraestructuras, tales como presas e hidroeléctricas, así como también la escasez de datos sobre los ecosistemas y sus condiciones de hábitat idóneas en el río; resultando realizar un mayor análisis.
- La simulación hidráulica que se realizó mediante el software PHABSIM, facilita un mejor panorama acerca de la relacionan que existe entre el hábitat y la especie en estudio, obteniendo un resultado más confiable y preciso con relación al caudal ecológico.

Desarrollar y aplicar métodos hidrológicos, hidráulicos y simulación de hábitat, para calcular el Caudal Ecológico en el Río Rímac.

- Evaluando la aplicación de los métodos hidrológicos, se concluye que el método de Hoppe no puede ser aplicado para estimar el caudal ecológico en el Río Rímac debido a los resultados altos que no pueden asegurarse en ningún momento del

año, pues se debe tener en cuenta la demanda hídrica de la población y la demanda para producción de energía hidroeléctrica.

- En forma similar, el Método 7Q10 (método hidrológico), en el caso del Río Rímac no se puede aplicar, ya que solo se cuenta con información histórica y diaria de una sola estación (Chosica). Asimismo, su resultado es mayor que el promedio de los otros métodos como Tennant y Curva Permanencia.
- Según la estimación de Caudal Ecológico por el método Hidráulico de Perímetro Mojado, se concluye que el resultado obtenido para el tramo de río estudiado es relevante y representativo.
- Siguiendo rigurosamente los pasos de la metodología del PHABSIM es necesario tener en cuenta la especie en estudio, en este caso el pejerrey de río, y como ésta afecta según sus características (económicamente, turística) para el bienestar del ecosistema y del humano.
- De acuerdo con los resultados obtenidos el método hidrológico muestra una tendencia de caudales ecológicos altos como son el método de Hoppe con un valor de 11.37 m³/s, 7Q10 con un valor de 10.28 m³/s. Sin embargo, debido a la demanda hídrica presente en la población se optó por utilizar el método de tennant con un valor de 3.56 m³/s y el de curva de permanencia de 2.65 m³/s como métodos representativos del método hidrológico. Asimismo, el método hidráulico estima un caudal ecológico por profundidad de 4.96 m³/s y por perímetro mojado un valor de 4.83 m³/s, siendo el promedio el caudal ecológico característico del método hidráulico. Finalmente, el método de simulación de hábitat tiene como antelación la conservación de especies en diferentes etapas de vida. Por consiguiente, se seleccionó un rango de caudal óptimo entre 4.0 m³/s y 4.8 m³/s como valores para la preservación de la vida acuática del pejerrey de río.
- El método holístico se analiza de manera general; por lo tanto, no está incluido dentro de la evaluación y aplicación para la cuenca del río Rímac debido a su complejidad, ya que requiere mayor cantidad de tiempo e información para desarrollarse, este se aplica principalmente para un EIA detallado.
- Los métodos se validaron de manera específica cada uno, en la modelación hidrológica se evaluaron, con resultados muy buenos, mediante el coeficiente de Nash, criterio de Schultz y RMSE; asimismo, para el método hidráulico se validó

mediante el aforo de caudales en campo, obteniendo una confiabilidad de error menor al 10%. Finalmente, para el método de simulación de hábitat (PHABSIM) se validó mediante la elevación constante de superficie de agua y la velocidad, que son directamente proporcionales con el caudal.

- De los métodos evaluados y aplicados, el de la Curva de Permanencia, el de Tennat, del Perímetro Mojado y PHABSIM (simulación física de hábitat) resultaron los más apropiados para la estimación del caudal ecológico en las condiciones del régimen fluvial del río Rímac.

Proponer una metodología para el cálculo del caudal ecológico en el río Rímac.

- Según la aplicación de los métodos, en caso de tener insuficiente data o poco fiable, incluso para realizar el modelamiento hidrológico, se deberían aplicar los métodos hidráulicos o de Simulación de hábitat.
- El proceso de analizar la contaminación en los ríos debería integrarse a la metodología de calcular el caudal ecológico, ya que este es una de las mayores influencias de la no conservación de las especies (flora y fauna) en los ríos.
- Como una alternativa que relacione el hábitat con el caudal se podría calcular el caudal ecológico por el método hidráulico que satisface preservar el ecosistema y hábitats de flora y fauna, ante la demanda creciente del recurso hídrico. Dividiendo la cuenca en tramos representativos de acuerdo a sus afluentes, así como los tramos más sensibles donde se detalle la existencia de especies bióticas.
- Para el estudio de la vegetación, se realiza un estudio de campo y se ordena por comunidades la flora presente. Identificando la vegetación amenazada y que se extienden hasta las márgenes de los ríos, y de esta manera interpretar los resultados del hábitat ante distintos regímenes de caudales de río.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Para el cálculo de caudal ecológico, la cuenca hidrográfica en estudio debe contar con información disponible y data confiable, pues para cada método se debe tener en cuenta toda la información hidrométrica necesaria para facilitar los cálculos. Como preferencia sería ubicar subcuencas o microcuencas para realizar mediciones de caudales, cobertura vegetal y aspectos sociales-culturales que estén de acuerdo a la demanda hídrica y necesidad ambiental, en base a dicha información con un registro mínimo de 20 años de datos de caudales registrados.
2. El monitoreo de los caudales recolectados del Río Rímac requiere de una cuidadosa evaluación pues, se ha detectado, que en algunos años no se registró data de caudales.
3. Se debe tener cuenta las infraestructuras hidráulicas presentes como diques y centrales hidroeléctricas pues estas informaciones de caudales son alteradas y el método de simulación de caudales por WEAP, recomienda caudales naturalizados.
4. Para el caso del método hidráulico es primordial realizar estudios sobre la contaminación del río, pues de esta manera se estaría garantizando la conservación de las especies actuales de acuerdo con el caudal ecológico hallado por este método.
5. Se recomienda agregar el método hidráulico para estimar el caudal ecológico dentro de la normativa peruana ya que es una metodología con resultados de alta confiabilidad y que puede adecuarse a las variables hidrobiológicas de especies.
6. Para el cálculo de caudales ecológicos se debe tener en consideración la demanda de agua poblacional, así como los servicios turísticos que esta presentes en la cuenca del río Rímac.
7. Para la simulación de hábitat es necesario tener en cuenta las condiciones de calidad de agua y parámetros como el PH, y los diferentes residuos vertidos en los ríos, para obtener un balance del impacto que puede incurrir en la zona de estudio.
8. Se recomienda profundizar el estudio de curvas de preferencia de las especies representativas en los ríos del Perú ya que, la falta de esta información se puede convertir en un obstáculo para el cálculo de caudales ecológicos mediante la simulación de hábitat. Esto traería consecuencias para el desarrollo de proyectos sobre los ríos.

9. Se recomienda que la Autoridad Nacional del Agua, juntamente con el gobierno local ALA, planteen programas de concientización sobre los altos índices de contaminación que se vierten al río Rímac y de esta manera prevenir la alteración de las especies acuática con su hábitat, y valorar más el ecosistema de tal manera no sea depredado ni presente una reducción en su recurso hídrico.

10. Es importante que para obtener mejores resultados de modelación con el programa PHABSIM se debe tener en consideración más estudios con información lo más completa posible en donde se reflejen ciclos de vida de diferentes especies y, de esta manera, generalizar un caudal ecológico que englobe diversas especies.

11. Adicionalmente a las diversas maneras para calcular el caudal ecológico, también se debe realizar una exhaustiva investigación e influencia de estudios realizados sobre la calidad de agua, incluyendo en estos, parámetros de residuos contaminantes que de alguna manera alteren la condición del agua como la temperatura, residuos bioquímicos, desechos sólidos, metales pesados. Entre otros y de esta manera encontrar una limitación de rangos permisibles para salvaguardar el hábitat físico de diversas especies acuáticas, pues existe métodos más completos como es el caso del holístico, que además de contar información hidráulica e hidrológica incorpora el impacto que tiene las especies acuáticas en relación con el ecosistema, conjuntamente con el manejo de flujo que afecta la calidad del agua, mostrando diferentes escenarios de huellas ambientales para cada ser vivo presente el cual se determina un caudal ecológico beneficioso para un conjunto de especies acuáticas.

6. REFERENCIAS.

- A.Chávez-Jiménez, y D.González-Zeas.(2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. Revista Iberoamericana del Agua. Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid.
- Aguilera, Gastón y Marc Pouilly. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. Revista Acta zoológica lilloana. Vol. 56 N° 1-2.
- Aliaga Rojas, Elmer Oliver (2005). Programa de Monitoreo del Río Rímac en la cuenca Media y Baja. (Tesis). UNI.
- Alcántara, Ramón y Orbegoso Marilez (SEDAPAL) (1998). Reserva Ecológica del Río Rímac. Perú
- Armando Romero, Enrique Guadalupe y Wilfredo Blas (2010) Estimado de descargas máximas en la microcuenca de Huaycoloro (Huachipa – Lima). Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (2016). Resolución Jefatural N°98-2016-ANA: Metodologías para la determinación del Caudal Ecológico.
- Autoridad Nacional del Agua (2016). Informe técnico de resultados del primer monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Rímac. Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (2015). Plan maestro del proyecto restauración del Río Rímac. Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (2015) Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (2010) Evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca del río Rímac. Perú.
- Brown, Gallardo, Williams & Torres (2015). Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila, Univ. De Cuba.revista scielo.pp (58-71).
- Cabrera Juan (2012) Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.
- Cardoso Landa, Guillermo (2014) Evolución y perspectivas del gasto ecológico utilizando metodologías holísticas. xxiii Congreso Nacional de Hidráulica. México.

- Cáceres Mayorga, N.E.; Castro Ortíz, L.M et al. (2000). Reforestación con fines de mejora ambiental de los pisos altitudinales comprendidos entre los 1000 y 5000 m.s.n.m. de la cuenca del río Rímac. Lima, Perú. Tesis (Ing. Forestal, Ing. Agronoma, Ing. Meteorólogo).
- Diseño y Producción Leaders S.A. Endesa Chile. (2011). Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. (pp.12-14). Empresa Nacional de Electricidad S.A. Endesa Chile.
- Díez Hernández, Juan (2002). Determinación de Caudal Ecológico Metodología IFIM-PHABSIM. España.
- Duque Luis, Vázquez Raúl (2015) Modelación de la oferta hídrica en una cuenta de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe. Vol. 7 - N° 1 - Mar. 2015. pp. 63- 76.
- Global Environmental Flows Network. (2000). (<http://www.eflownet.org/viewinfo.cfm?linkcategoryid=18&linkid=85&siteid=2&FuseAction=display>).
- Hanguk Yun (2015). El río que se quedó sin vida. Revista Ideele, 249.
- INEI (2014) Perú: Anuario de estadísticas Ambientales 2013.
- IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo) (2002), Manual de uso del Software Hydracces. Francia.
- Jamett Gabriela. (2006) Evaluación del concepto caudal ecológico como medida para la conservación de ecosistemas lóticos. (tesis doctoral). Chile: Univ. De Chile.
- L. del Castillo, C. Llerena (2012). Análisis del marco legal e institucional sobre los caudales ecológicos/ambientales en el Perú. UICN, Quito,Ecuador. 57 pp.
- Loaiza Juan, Pauwels Valentijn (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales, Caso de estudio para vertientes de alta montaña. Revista Gestión y Ambiente Vol. 14 N°3 pp. 23-22. Colombia.
- López, Emilio (2015) Evaluación del hábitat acuático PHABSIM bi-dimensional para el establecimiento de un nuevo régimen de caudal ecológico en el río Inglares (Álava). Revista Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vol. 41 pp 229-244.

- Lozano, Monsalve & García (2012). Estimación de Caudales Ecológicos mediante Métodos Hidrológicos e Hidráulicos en la cuenca del Río Quindío. Proyecto de investigación Univ. De Quindío.
- M. Pouilly, G. Aguilera (2012) Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco. Chile.
- Máximo Villón (2002). Hidrología. Edit. Taller de Publicaciones del Instituto tecnológico de Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Riego, y Autoridad Nacional del Agua (2015) Lineamientos para la elaboración de estudios de Caudal Ecológico con fines de otorgamiento de derecho de uso de agua. Perú.
- Ministerio de Medio Ambiente BOE (2013). Legislación consolidada Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.2013.
- Ministerio del Medio Ambiente (2012). Reglamento para determinar caudal ecológico mínimo.
- Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural Marino, Gobierno de España (2011). Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. España.
- Ministerio de Agricultura y Riego, y Autoridad Nacional del Agua (2012) Plan Nacional de Recurso Hídricos, Resumen ejecutivo. Perú.
- Ministerio de Agricultura y Autoridad Nacional del Agua (2012) Política y Estrategia Nacional de Recurso Hídricos. Perú.
- Milhous, Robert (2007). Application of physical habitat simulation in the evaluation of physical habitat suitability. Integrated investigations of environmental effects of historical mining in the Animas River watershed, San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 165. Vol.2 (E21),877-888.
- Mónica Lucía Izquierdo Santacruz. (2014). régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. (pp77-95). OMS.
- Nadia Paulina Castro. (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. (Tesis Doctoral). Quito. Universidad Politécnica Salesiana

- Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (2012) Que establece el procedimiento para la determinación del Caudal Ecológico en Cuencas Hidrológicas.
- SEI (Stockholm Environment Institute) (2015), Tutorial WEAP Water Evaluation and Planning System. Suecia.
- Trucios Caciono, R.; Martínez Rodríguez, J.G et al. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Río Sextin en Durango, México. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, vol. VI núm. 1, 2007, pp. 91-101. Universidad Autónoma Chapingo Durango, México.
- Tumialán de la Cruz, Pedro (2016). Rasgos Geológicos del Río Rímac, Abastecimiento de Agua en su Cono de Deyección. Perfiles de Ingeniería, 12(12), 19-26.
- Ven Te Chow (1986). Hidráulica de los canales abiertos. edit. Diana México.
- Villanueva Ure, Justo Reynaldo (2011). Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú. (Tesis doctoral). UNI

7. ANEXOS.

Subcuenca Rímac y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydraces. Fuente Propia.

Subcuenca Alto Rímac y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydraces. Fuente Propia.

Subcuenca Medio Alto Rímac y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente Propia.

Subcuenca Parac y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente Propia.

Subcuenca Medio Rímac (San Mateo) y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente Propia.

Subcuenca Medio Bajo Rímac (Chosica) y estaciones de la cuenca, en el interfaz de la herramienta precipitación media del Hydracces. Fuente Propia.

Kc e influencia en el área de la subcuenca Rímac.

Kc e influencia en el área de la subcuenca Alto Rímac.

Kc e influencia en el área de la subcuenca Medio Alto Rímac.

Kc e influencia en el área de la subcuenca Parac.

Kc e influencia en el área de la subcuenca Medio Rímac (San Mateo).

Kc e influencia en el área de la subcuenca Medio Bajo Rímac (Chosica).

Precipitación media subcuenca Rímac.

Precipitación media subcuenca Alto Rímac.

Precipitación media subcuenca Medio Alto Rímac.

Precipitación media subcuenca Parac.

Temperatura subcuenca Rímac.

Temperatura subcuenca Alto Rímac.

Temperatura subcuenca Medio Alto Rímac.

Temperatura subcuenca Parac.

Humedad subcuenca Medio Alto Rímac.

Humedad subcuenca Parac.

Humedad subcuenca Medio Rímac (San Mateo).

Humedad subcuenca Medio Bajo Rímac.

Viento subcuenca Rímac.

Viento subcuenca Alto Rímac.

Viento subcuenca Medio Alto Rímac.

Viento subcuenca Parac.

Viento subcuenca Medio Rímac.

Viento subcuenca Medio Bajo Rímac

Planillas de coordenadas

CODIGO	X	Y	Z	DESCRIP.
R-1	291831.998	8670764.7	1063.1758	PUNTO
1	291990.172	8670714.08	1062.1848	R
2	291978.847	8670715.82	1062.1122	H
3	291975.535	8670718.85	1059.9466	P
4	291936.473	8670722.5	1058.9705	R
5	291903.387	8670730.9	1058.5798	R
6	291878.586	8670738.34	1059.2975	R
7	291854.632	8670746.33	1059.6665	H
8	291849.268	8670746.56	1058.6022	E-R
9	291836.55	8670763.83	1058.6557	E-R
10	291824.454	8670760.26	1063.205	H
11	291817.174	8670760.53	1063.2763	R
12	291814.249	8670743.08	1062.7831	R
13	291821.413	8670741.26	1062.8174	H
14	291830.553	8670740.37	1058.4335	E-R
15	291846.323	8670720.84	1058.7374	E-R
16	291849.532	8670719.69	1060.4562	H
17	291853.745	8670718.68	1059.0159	P
18	291872.793	8670713.47	1059.1396	R

19	291904.125	8670707.45	1059.0497	R
20	291947.502	8670700.16	1058.6405	R
21	291971.607	8670697.94	1059.1404	P
22	291977.978	8670698.77	1062.3077	H
23	291991.722	8670695.56	1062.2402	R
24	291990.169	8670672.83	1061.9194	R
25	291983.418	8670671.9	1061.6987	H
26	291977.168	8670670.29	1058.2598	P
27	291944.298	8670668.83	1057.556	R
28	291908.429	8670670.62	1058.5283	R
29	291878.587	8670673.46	1057.9913	R
30	291843.509	8670677.57	1058.881	P

31	291840.216	8670678.58	1060.4271	H
32	291834.974	8670679.48	1057.642	E-R
33	291817.136	8670680.88	1057.4715	E-R
34	291809.297	8670679.18	1061.3985	H
35	291803.52	8670680.27	1061.4821	R
36	291796.249	8670646.28	1060.7956	R
37	291802.87	8670644.74	1060.8632	H
38	291809.809	8670643.92	1057.7778	E-R
39	291827.725	8670640.13	1057.3419	E-R
40	291832.032	8670638.8	1059.1325	H
41	291836.128	8670637.88	1057.5881	P
42	291870.625	8670629.3	1057.4539	R
43	291915.381	8670620.22	1057.3487	R
44	291976.905	8670611.51	1056.5206	P
45	291984.927	8670610.16	1060.7765	H
46	291994.029	8670607.5	1060.7098	R
47	291986.631	8670576.42	1059.8124	R
48	291979.992	8670578.46	1059.7808	H
49	291973.77	8670581.29	1056.4832	P
50	291937.067	8670591.02	1056.9178	R
51	291893.746	8670601.04	1056.5957	R
52	291845.237	8670608.32	1056.8969	P
53	291838.035	8670606.67	1059.8774	H
54	291830.14	8670606.78	1059.6983	H
55	291823.691	8670606.61	1057.3538	E-R
56	291806.085	8670615.46	1057.0304	E-R
57	291796.637	8670615.84	1060.3782	H
58	291789.43	8670616.28	1060.3026	R
59	291780.458	8670569.95	1059.4645	R
60	291787.023	8670569.16	1059.4294	H

61	291794.484	8670564.61	1056.3949	E-R
62	291819.02	8670559.53	1056.3599	E-R
63	291821.932	8670559.68	1056.5966	P
64	291826.083	8670558.83	1059.0095	H
65	291832.441	8670557.54	1059.124	H
66	291839.681	8670556.51	1055.5566	P
67	291885.955	8670542.33	1055.6198	R
68	291914.098	8670538.18	1055.8319	R
69	291943.922	8670526.73	1055.4622	R
70	291955.081	8670522.96	1054.9928	P
71	291962.772	8670520.66	1058.7813	H
72	291972.249	8670517.41	1058.8222	R
73	291961.371	8670465.91	1057.8384	R
74	291952.742	8670467.86	1057.8081	H
75	291947.331	8670468.86	1054.6227	P
76	291906.039	8670478.08	1055.1847	R
77	291871.571	8670487.06	1054.9232	R
78	291825.389	8670499.23	1054.9382	P
79	291819.674	8670500.54	1057.2977	H
80	291817.26	8670500.9	1055.744	P
81	291809.642	8670502.67	1055.8655	R
82	291799.524	8670503.39	1055.0962	E-R
83	291781.385	8670508.89	1055.1047	E-R
84	291772.783	8670509.72	1058.1325	H
85	291765.872	8670510.93	1058.1135	R
86	291754.213	8670447.07	1057.0589	R
87	291758.275	8670445.47	1057.0313	H
88	291765.835	8670446.56	1054.1558	E-R
89	291780.945	8670439.64	1054.2778	E-R
90	291786.323	8670438.34	1054.5533	P
91	291791.669	8670436.53	1057.7428	H
92	291797.737	8670434.33	1058.004	H
93	291805.155	8670432.95	1054.1861	P
94	291844.877	8670418.9	1053.615	R
95	291891.895	8670401.61	1053.5139	R
96	291935.936	8670387.6	1052.2537	P
97	291941.025	8670384.41	1056.5359	H
98	291947.137	8670382.37	1056.6066	R
99	291933.614	8670329.69	1055.4613	R
100	291928.453	8670332.03	1055.5487	H
101	291920.776	8670332.19	1051.7353	P
102	291889.251	8670342.87	1052.5288	R
103	291857.26	8670354.04	1052.6833	R

104	291820.75	8670362.45	1053.1231	R
105	291786.496	8670368.49	1053.7032	P
106	291781.094	8670371.31	1056.5696	H
R-3	291746.762	8670276.61	1055.8257	PUNTO
R-3	291746.762	8670276.61	1055.8257	
107	291779.472	8670371.65	1056.4279	H
108	291775.863	8670372.65	1053.8046	P
109	291775.722	8670372.71	1053.8021	E-R
110	291748.193	8670382.07	1053.7162	E-R
111	291742.183	8670382.56	1055.984	H
112	291737.056	8670384.45	1055.829	R
113	291729.716	8670354.42	1055.2414	R
114	291734.499	8670352.23	1055.2383	H
115	291739.982	8670348.98	1053.1805	E-R
116	291761.097	8670342.41	1053.406	E-R
117	291762.455	8670341.98	1054.2624	H
118	291766.01	8670341.01	1052.7353	P
119	291787.069	8670332.84	1052.4051	R
120	291830.4	8670313.77	1051.9973	R
121	291872.177	8670297.28	1050.6378	R
122	291905.553	8670282.54	1051.0423	P
123	291912.59	8670278.49	1054.4647	H
124	291920.821	8670275.97	1054.5078	R
125	291762.629	8670312.58	1053.2321	P
126	291759.499	8670311.77	1054.604	H
127	291759.649	8670321.09	1053.9167	H
128	291756.013	8670316.74	1052.9706	E-R
129	291747.932	8670292.89	1052.5644	E-R
130	291749.584	8670288.74	1054.3091	H
131	291750.309	8670288.32	1054.3696	H
132	291754.375	8670296.75	1052.4989	P
133	291911.193	8670240.81	1053.8056	R
134	291903.051	8670242.92	1054.0139	H
135	291896.997	8670243.67	1050.6455	P
136	291855.48	8670257.53	1050.2076	R
137	291799.839	8670273.66	1051.8095	R
138	291756.596	8670289.29	1052.0875	P
139	291752.932	8670285.44	1055.1409	H
140	291750.448	8670285.54	1055.2159	H
141	291746.19	8670286.69	1052.4747	ER
142	291731.468	8670325.12	1053.1633	ER
143	291727.595	8670326.61	1054.8048	H
144	291724.437	8670327.85	1055.8653	R

145	291743.461	8670272.94	1055.6056	H
146	291741.52	8670264.03	1055.449	H
147	291740.425	8670254.8	1055.2565	H
148	291740.76	8670252.45	1055.0484	H
149	291744.91	8670265.4	1055.5247	H
150	291748.229	8670271.84	1055.7187	H
151	291720.212	8670276.17	1052.2017	ER
152	291720.211	8670276.17	1052.2016	ER
153	291713.44	8670257.74	1051.5454	ER
154	291709.07	8670258.17	1053.5313	H
155	291697.054	8670258.99	1053.4215	R
156	291697.316	8670234.7	1052.887	R
157	291699.411	8670231.21	1052.9038	H
158	291704.619	8670225.64	1050.9088	ER
159	291732.556	8670223.67	1052.5251	ER
160	291733.706	8670223.34	1053.8136	H
161	291738.739	8670221.52	1050.8919	P
162	291780.357	8670200.02	1049.6918	R
163	291810.752	8670184.99	1050.0095	R
164	291862.813	8670166.79	1049.3068	R
165	291872.896	8670163.42	1049.2918	P
166	291878.868	8670160.22	1052.6773	H
167	291885.491	8670158.22	1052.5698	R
168	291868.572	8670099.49	1051.4636	R
169	291861.273	8670102.11	1051.5559	H
170	291855.129	8670102.38	1047.7929	P
171	291825.715	8670110.48	1048.2824	R
172	291787.145	8670120.78	1048.5348	R
173	291740.811	8670137.91	1048.1983	R
174	291716.497	8670146.35	1049.3027	P
175	291711.417	8670146.88	1051.3736	H
176	291708.743	8670147.46	1049.9656	P
177	291708.017	8670147.57	1049.5752	ER
178	291683.757	8670155.95	1049.8035	ER
179	291678.498	8670157.52	1051.4486	H
180	291673.938	8670158.17	1051.526	R
181	291667.186	8670126.21	1050.9925	R
182	291669.118	8670126.03	1051.648	H
183	291674	8670124.31	1049.5073	P
184	291680.675	8670122.21	1049.3726	ER
185	291698.97	8670117.41	1049.1596	ER
186	291700.231	8670117.25	1049.9924	H
187	291704.296	8670114.93	1049.2705	P

188	291709.099	8670113.19	1048.7138	R
189	291749.088	8670099.85	1047.5841	R
190	291789.033	8670083.16	1048.0973	R
191	291829.669	8670063.1	1046.5516	R
192	291842.254	8670057.8	1046.768	P
193	291850.287	8670056.14	1051.0254	H
194	291855.173	8670054.36	1050.9831	R
195	291835.539	8669997.8	1049.977	R
196	291829.331	8670000.36	1050.3258	H
197	291822.986	8670007.45	1045.9043	P
198	291788.471	8670017.15	1046.877	R
199	291753.976	8670027.89	1046.5526	R
200	291709.927	8670033.5	1047.0534	R
201	291683.144	8670039.39	1047.7721	P
202	291680.883	8670039.34	1048.795	H
203	291679.714	8670039.42	1047.7404	ER
204	291637.493	8670045.46	1049.296	R
205	291641.66	8670043.2	1049.4113	H
206	291651.421	8670040.27	1047.8049	ER
207	291621.595	8670007.23	1048.5154	R
208	291628.83	8670003.84	1048.5408	H
209	291632.922	8670001.01	1045.8984	ER
210	291662.551	8669992.93	1047.2309	ER
211	291664.62	8669992.5	1048.5797	H
212	291667.127	8669990.59	1046.8981	P
213	291704.477	8669977.92	1045.914	R
214	291752.363	8669932.68	1044.4981	R
215	291777.645	8669924.82	1045.6287	R
216	291796.104	8669916.68	1044.3633	P
217	291802.206	8669912.84	1048.5501	H
218	291808.682	8669910.6	1048.6015	R
219	291793.957	8669870.55	1047.7233	R
220	291788.441	8669873.04	1047.6856	H
221	291780.238	8669871.87	1043.8686	P
222	291760.424	8669878.91	1043.989	R
223	291715.111	8669894.68	1044.2568	R
224	291660.625	8669909.39	1044.9968	R
225	291643.54	8669913.27	1045.0415	P
226	291635.867	8669914.54	1046.7836	H
227	291633.333	8669915.65	1045.5369	ER
228	291606.858	8669925.46	1045.3537	ER
229	291601.971	8669928.13	1047.1292	H
230	291600.777	8669926.25	1046.9968	R

231	291588.892	8669899.5	1047.3588	R
232	291591.477	8669897.95	1046.7256	H
233	291595.673	8669895.23	1044.8352	ER
234	291624.198	8669884.68	1044.9821	ER
235	291626.962	8669883.71	1046.6117	H

Tabla de puntos de levantamiento topográfico de un tramo del río Rímac. Fuente Propia.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de río	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de río eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.07	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.29	W/t. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	1032.78	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1032.81	Flow Area (m2)		0.42	
E.G. Slope (m/m)	0.016451	Area (m2)		0.42	
Q Total (m3/s)	1.00	Flow (m3/s)		1.00	
Top Width (m)	25.66	Top Width (m)		25.66	
Vel Total (m/s)	2.37	Avg. Vel. (m/s)		2.37	
Max Chl Dpth (m)	0.03	Hydr. Depth (m)		0.02	
Conv. Total (m3/s)	7.8	Conv. (m3/s)		7.8	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		25.66	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m2)		2.65	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.26	Cum Volume (1000 m3)		0.40	
C & E Loss (m)	0.03	Cum SA (1000 m2)		6.26	

Variables hidráulicas para un caudal de 1 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.25	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.46	Wt. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	1032.79	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1032.84	Flow Area (m2)		0.67	
E.G. Slope (m/m)	0.018174	Area (m2)		0.67	
Q Total (m3/s)	2.00	Flow (m3/s)		2.00	
Top Width (m)	30.85	Top Width (m)		30.85	
Vel Total (m/s)	2.99	Avg. Vel. (m/s)		2.99	
Max Chl Dpth (m)	0.04	Hydr. Depth (m)		0.02	
Conv. Total (m3/s)	14.8	Conv. (m3/s)		14.8	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		30.85	
Min Ch EI (m)	1032.75	Shear (N/m2)		3.86	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.25	Cum Volume (1000 m3)		0.59	
C & E Loss (m)	0.02	Cum SA (1000 m2)		7.93	

Variables hidráulicas para un caudal de 2 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1032.94	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1032.92	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1032.86	Flow Area (m2)		6.01	
E.G. Slope (m/m)	0.004921	Area (m2)		6.01	
Q Total (m3/s)	3.00	Flow (m3/s)		3.00	
Top Width (m)	48.37	Top Width (m)		48.37	
Vel Total (m/s)	0.50	Avg. Vel. (m/s)		0.50	
Max Chl Dpth (m)	0.17	Hydr. Depth (m)		0.12	
Conv. Total (m3/s)	42.8	Conv. (m3/s)		42.8	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		48.37	
Min Ch EI (m)	1032.75	Shear (N/m2)		6.00	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.20	Cum Volume (1000 m3)		2.22	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		17.05	

Variables hidráulicas para un caudal de 3 m³/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1032.99	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.02	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1032.97	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1032.91	Flow Area (m ²)		8.58	
E.G. Slope (m/m)	0.004835	Area (m ²)		8.58	
Q Total (m ³ /s)	5.00	Flow (m ³ /s)		5.00	
Top Width (m)	54.06	Top Width (m)		54.06	
Vel Total (m/s)	0.58	Avg. Vel. (m/s)		0.58	
Max Chl Dpth (m)	0.22	Hydr. Depth (m)		0.16	
Conv. Total (m ³ /s)	71.9	Conv. (m ³ /s)		71.9	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		54.06	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m ²)		7.53	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.22	Cum Volume (1000 m ³)		3.11	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)		19.95	

Variables hidráulicas para un caudal de 5 m³/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.02	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.03	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1033.00	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		9.80	
E.G. Slope (m/m)	0.006474	Area (m2)		9.80	
Q Total (m3/s)	7.00	Flow (m3/s)		7.00	
Top Width (m)	56.54	Top Width (m)		56.54	
Vel Total (m/s)	0.71	Avg. Vel. (m/s)		0.71	
Max Chl Dpth (m)	0.25	Hydr. Depth (m)		0.17	
Conv. Total (m3/s)	87.0	Conv. (m3/s)		87.0	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		56.55	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m2)		11.00	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.22	Cum Volume (1000 m3)		3.82	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		21.84	

Variables hidráulicas para un caudal de 7 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.05	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.03	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1033.02	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		10.91	
E.G. Slope (m/m)	0.007869	Area (m2)		10.91	
Q Total (m3/s)	9.00	Flow (m3/s)		9.00	
Top Width (m)	58.73	Top Width (m)		58.73	
Vel Total (m/s)	0.83	Avg. Vel. (m/s)		0.83	
Max Chl Dpth (m)	0.26	Hydr. Depth (m)		0.19	
Conv. Total (m3/s)	101.5	Conv. (m3/s)		101.5	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		58.73	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m2)		14.33	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.23	Cum Volume (1000 m3)		4.56	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		23.84	

Variables hidráulicas para un caudal de 9 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.09	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.04	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1033.05	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		13.20	
E.G. Slope (m/m)	0.006836	Area (m2)		13.20	
Q Total (m3/s)	11.00	Flow (m3/s)		11.00	
Top Width (m)	62.99	Top Width (m)		62.99	
Vel Total (m/s)	0.83	Avg. Vel. (m/s)		0.83	
Max Chl Dpth (m)	0.30	Hydr. Depth (m)		0.21	
Conv. Total (m3/s)	133.0	Conv. (m3/s)		133.0	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		62.99	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m2)		14.05	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.23	Cum Volume (1000 m3)		5.13	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		25.08	

Variables hidráulicas para un caudal de 11 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1033.11	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.04	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1033.07	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		14.43	
E.G. Slope (m/m)	0.007415	Area (m2)		14.43	
Q Total (m3/s)	13.00	Flow (m3/s)		13.00	
Top Width (m)	65.17	Top Width (m)		65.17	
Vel Total (m/s)	0.90	Avg. Vel. (m/s)		0.90	
Max Chl Dpth (m)	0.32	Hydr. Depth (m)		0.22	
Conv. Total (m3/s)	151.0	Conv. (m3/s)		151.0	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		65.18	
Min Ch El (m)	1032.75	Shear (N/m2)		16.10	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.25	Cum Volume (1000 m3)		5.94	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		26.71	

Variables hidráulicas para un caudal de 13 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	500	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 500 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	1033.14	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	0.05	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1033.09	Flow Area (m2)		15.80	
E.G. Slope (m/m)		Area (m2)		15.80	
Q Total (m3/s)	0.007659	Flow (m3/s)		15.00	
Top Width (m)	15.00	Top Width (m)		67.50	
Vel Total (m/s)	67.50	Avg. Vel. (m/s)		0.95	
Max Chl Dpth (m)	0.95	Hydr. Depth (m)		0.23	
Conv. Total (m3/s)	0.34	Conv. (m3/s)		171.4	
Length Wtd. (m)	171.4	Wetted Per. (m)		67.50	
Min Ch El (m)	20.00	Shear (N/m2)		17.58	
Alpha	1032.75	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	1.00	Cum Volume (1000 m3)		6.48	
C & E Loss (m)	0.25	Cum SA (1000 m2)		27.70	
	0.00				

Variables hidráulicas para un caudal de 15 m3/s, progresiva 0 + 500.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	1043.63	Wt. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	0.73	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1042.91	Flow Area (m2)		0.26	
E.G. Slope (m/m)	1043.00	Area (m2)		0.26	
Q Total (m3/s)	0.008982	Flow (m3/s)		1.00	
Top Width (m)	1.00	Top Width (m)		5.08	
Vel Total (m/s)	5.08	Avg. Vel. (m/s)		3.78	
Max Chl Dpth (m)	3.78	Hydr. Depth (m)		0.05	
Conv. Total (m3/s)	0.10	Conv. (m3/s)		10.6	
Length Wtd. (m)	10.6	Wetted Per. (m)		5.08	
Min Ch El (m)	20.00	Shear (N/m2)		4.59	
Alpha	1042.80	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	1.00	Cum Volume (1000 m3)		1.12	
C & E Loss (m)	0.22	Cum SA (1000 m2)		14.12	
	0.02				

Variables hidráulicas para un caudal de 1 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	1.01	Wt. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	1042.94	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.07	Flow Area (m2)		0.45	
E.G. Slope (m/m)	0.008797	Area (m2)		0.45	
Q Total (m3/s)	2.00	Flow (m3/s)		2.00	
Top Width (m)	6.61	Top Width (m)		6.61	
Vel Total (m/s)	4.46	Avg. Vel. (m/s)		4.46	
Max Chl Dpth (m)	0.14	Hydr. Depth (m)		0.07	
Conv. Total (m3/s)	21.3	Conv. (m3/s)		21.3	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		6.62	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		5.85	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.22	Cum Volume (1000 m3)		1.53	
C & E Loss (m)	0.02	Cum SA (1000 m2)		17.54	

Variables hidráulicas para un caudal de 2 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1060	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1060 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.10	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1041.20	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1041.20	Flow Area (m2)		2.13	
E.G. Slope (m/m)	0.021848	Area (m2)		2.13	
Q Total (m3/s)	3.00	Flow (m3/s)		3.00	
Top Width (m)	10.99	Top Width (m)		10.99	
Vel Total (m/s)	1.41	Avg. Vel. (m/s)		1.41	
Max Chl Dpth (m)	0.39	Hydr. Depth (m)		0.19	
Conv. Total (m3/s)	20.3	Conv. (m3/s)		20.3	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		11.12	
Min Ch El (m)	1040.81	Shear (N/m2)		41.12	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.25	Cum Volume (1000 m3)		4.35	
C & E Loss (m)	0.02	Cum SA (1000 m2)		34.88	

Variables hidráulicas para un caudal de 3 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1043.28	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.10	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1043.19	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.19	Flow Area (m2)		3.60	
E.G. Slope (m/m)	0.021345	Area (m2)		3.60	
Q Total (m3/s)	5.00	Flow (m3/s)		5.00	
Top Width (m)	18.73	Top Width (m)		18.73	
Vel Total (m/s)	1.39	Avg. Vel. (m/s)		1.39	
Max Chl Dpth (m)	0.38	Hydr. Depth (m)		0.19	
Conv. Total (m3/s)	34.2	Conv. (m3/s)		34.2	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		18.74	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		40.19	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.41	Cum Volume (1000 m3)		7.09	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		42.90	

Variables hidráulicas para un caudal de 5 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1043.35	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.11	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1043.24	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.24	Flow Area (m2)		4.70	
E.G. Slope (m/m)	0.020577	Area (m2)		4.70	
Q Total (m3/s)	7.00	Flow (m3/s)		7.00	
Top Width (m)	21.39	Top Width (m)		21.39	
Vel Total (m/s)	1.49	Avg. Vel. (m/s)		1.49	
Max Chl Dpth (m)	0.44	Hydr. Depth (m)		0.22	
Conv. Total (m3/s)	48.8	Conv. (m3/s)		48.8	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		21.41	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		44.26	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.41	Cum Volume (1000 m3)		8.99	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		49.93	

Variables hidráulicas para un caudal de 7 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output						
File Type Options Help						
River:	eje de rio	Profile:	PF 1			
Reach	eje	RS:	1160	↓	↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1						
E.G. Elev (m)	1043.41	Element	Left OB	Channel	Right OB	
Vel Head (m)	0.12	Wt. n-Val.		0.035		
W.S. Elev (m)	1043.29	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00	
Crit W.S. (m)	1043.29	Flow Area (m2)		5.75		
E.G. Slope (m/m)	0.019817	Area (m2)		5.75		
Q Total (m3/s)	9.00	Flow (m3/s)		9.00		
Top Width (m)	23.67	Top Width (m)		23.67		
Vel Total (m/s)	1.57	Avg. Vel. (m/s)		1.57		
Max Chl Dpth (m)	0.49	Hydr. Depth (m)		0.24		
Conv. Total (m3/s)	63.9	Conv. (m3/s)		63.9		
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		23.69		
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		47.17		
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00	
Frctn Loss (m)	0.39	Cum Volume (1000 m3)		10.78		
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		55.02		

Variables hidráulicas para un caudal de 9 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output						
File Type Options Help						
River:	eje de rio	Profile:	PF 1			
Reach	eje	RS:	1160	↓	↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1						
E.G. Elev (m)	1043.46	Element	Left OB	Channel	Right OB	
Vel Head (m)	0.13	Wt. n-Val.		0.035		
W.S. Elev (m)	1043.33	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00	
Crit W.S. (m)	1043.33	Flow Area (m2)		6.78		
E.G. Slope (m/m)	0.019072	Area (m2)		6.78		
Q Total (m3/s)	11.00	Flow (m3/s)		11.00		
Top Width (m)	25.71	Top Width (m)		25.71		
Vel Total (m/s)	1.62	Avg. Vel. (m/s)		1.62		
Max Chl Dpth (m)	0.53	Hydr. Depth (m)		0.26		
Conv. Total (m3/s)	79.7	Conv. (m3/s)		79.7		
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		25.73		
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		49.30		
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00	
Frctn Loss (m)	0.39	Cum Volume (1000 m3)		12.16		
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		58.79		

Variables hidráulicas para un caudal de 11 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1043.51	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.14	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1043.36	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.36	Flow Area (m2)		7.72	
E.G. Slope (m/m)	0.018836	Area (m2)		7.72	
Q Total (m3/s)	13.00	Flow (m3/s)		13.00	
Top Width (m)	27.43	Top Width (m)		27.43	
Vel Total (m/s)	1.68	Avg. Vel. (m/s)		1.68	
Max Chl Dpth (m)	0.56	Hydr. Depth (m)		0.28	
Conv. Total (m3/s)	94.7	Conv. (m3/s)		94.7	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		27.46	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		51.96	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frictn Loss (m)	0.39	Cum Volume (1000 m3)		13.95	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		64.59	

Variables hidráulicas para un caudal de 13 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1043.55	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.15	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1043.40	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.40	Flow Area (m2)		8.66	
E.G. Slope (m/m)	0.018489	Area (m2)		8.66	
Q Total (m3/s)	15.00	Flow (m3/s)		15.00	
Top Width (m)	29.05	Top Width (m)		29.05	
Vel Total (m/s)	1.73	Avg. Vel. (m/s)		1.73	
Max Chl Dpth (m)	0.60	Hydr. Depth (m)		0.30	
Conv. Total (m3/s)	110.3	Conv. (m3/s)		110.3	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		29.07	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		54.00	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frictn Loss (m)	0.35	Cum Volume (1000 m3)		15.13	
C & E Loss (m)	0.01	Cum SA (1000 m2)		67.23	

Variables hidráulicas para un caudal de 15 m3/s, progresiva 0 + 1160.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1050.88	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.59	Wt. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	1050.29	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1050.36	Flow Area (m2)		0.29	
E.G. Slope (m/m)	0.012937	Area (m2)		0.29	
Q Total (m3/s)	1.00	Flow (m3/s)		1.00	
Top Width (m)	8.74	Top Width (m)		8.74	
Vel Total (m/s)	3.39	Avg. Vel. (m/s)		3.39	
Max Chl Dpth (m)	0.07	Hydr. Depth (m)		0.03	
Conv. Total (m3/s)	8.8	Conv. (m3/s)		8.8	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		8.74	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		4.28	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.28	Cum Volume (1000 m3)		1.36	
C & E Loss (m)	0.04	Cum SA (1000 m2)		18.53	

Variables hidráulicas para un caudal de 1 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓	↑
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1051.24	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.93	Wt. n-Val.		0.004	
W.S. Elev (m)	1050.31	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1050.40	Flow Area (m2)		0.47	
E.G. Slope (m/m)	0.015091	Area (m2)		0.47	
Q Total (m3/s)	2.00	Flow (m3/s)		2.00	
Top Width (m)	11.03	Top Width (m)		11.03	
Vel Total (m/s)	4.27	Avg. Vel. (m/s)		4.27	
Max Chl Dpth (m)	0.09	Hydr. Depth (m)		0.04	
Conv. Total (m3/s)	16.3	Conv. (m3/s)		16.3	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		11.04	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		6.28	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.32	Cum Volume (1000 m3)		1.89	
C & E Loss (m)	0.05	Cum SA (1000 m2)		23.09	

Variables hidráulicas para un caudal de 2 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.03	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.46	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		3.77	
E.G. Slope (m/m)	0.013083	Area (m2)		3.77	
Q Total (m3/s)	3.00	Flow (m3/s)		3.00	
Top Width (m)	31.40	Top Width (m)		31.40	
Vel Total (m/s)	0.80	Avg. Vel. (m/s)		0.80	
Max Chl Dpth (m)	0.24	Hydr. Depth (m)		0.12	
Conv. Total (m3/s)	26.2	Conv. (m3/s)		26.2	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		31.41	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		15.41	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.22	Cum Volume (1000 m3)		6.62	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		48.12	

Variables hidráulicas para un caudal de 3 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)		Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.04	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.51	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		5.45	
E.G. Slope (m/m)	0.013586	Area (m2)		5.45	
Q Total (m3/s)	5.00	Flow (m3/s)		5.00	
Top Width (m)	37.77	Top Width (m)		37.77	
Vel Total (m/s)	0.92	Avg. Vel. (m/s)		0.92	
Max Chl Dpth (m)	0.29	Hydr. Depth (m)		0.14	
Conv. Total (m3/s)	42.9	Conv. (m3/s)		42.9	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		37.78	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		19.24	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.23	Cum Volume (1000 m3)		9.35	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		57.65	

Variables hidráulicas para un caudal de 5 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1050.60	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.05	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.55	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		6.94	
E.G. Slope (m/m)	0.014006	Area (m2)		6.94	
Q Total (m3/s)	7.00	Flow (m3/s)		7.00	
Top Width (m)	42.61	Top Width (m)		42.61	
Vel Total (m/s)	1.01	Avg. Vel. (m/s)		1.01	
Max Chl Dpth (m)	0.33	Hydr. Depth (m)		0.16	
Conv. Total (m3/s)	59.1	Conv. (m3/s)		59.1	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		42.62	
Min Ch El (m)	1050.22	Shear (N/m2)		22.37	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frcn Loss (m)	0.24	Cum Volume (1000 m3)		11.84	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		66.58	

Variables hidráulicas para un caudal de 7 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1160	↓ ↑	Plan: Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1160 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1043.41	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.12	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1043.29	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)	1043.29	Flow Area (m2)		5.75	
E.G. Slope (m/m)	0.019817	Area (m2)		5.75	
Q Total (m3/s)	9.00	Flow (m3/s)		9.00	
Top Width (m)	23.67	Top Width (m)		23.67	
Vel Total (m/s)	1.57	Avg. Vel. (m/s)		1.57	
Max Chl Dpth (m)	0.49	Hydr. Depth (m)		0.24	
Conv. Total (m3/s)	63.9	Conv. (m3/s)		63.9	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		23.69	
Min Ch El (m)	1042.80	Shear (N/m2)		47.17	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frcn Loss (m)	0.39	Cum Volume (1000 m3)		10.78	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		55.02	

Variables hidráulicas para un caudal de 9 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1050.68	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.06	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.62	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		10.13	
E.G. Slope (m/m)	0.012621	Area (m2)		10.13	
Q Total (m3/s)	11.00	Flow (m3/s)		11.00	
Top Width (m)	51.48	Top Width (m)		51.48	
Vel Total (m/s)	1.09	Avg. Vel. (m/s)		1.09	
Max Chl Dpth (m)	0.40	Hydr. Depth (m)		0.20	
Conv. Total (m3/s)	97.9	Conv. (m3/s)		97.9	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		51.49	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		24.35	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.24	Cum Volume (1000 m3)		16.26	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		78.88	

Variables hidráulicas para un caudal de 11 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	Plan:	Plan 02
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1050.71	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.07	Wt. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.64	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		11.46	
E.G. Slope (m/m)	0.012680	Area (m2)		11.46	
Q Total (m3/s)	13.00	Flow (m3/s)		13.00	
Top Width (m)	54.76	Top Width (m)		54.76	
Vel Total (m/s)	1.13	Avg. Vel. (m/s)		1.13	
Max Chl Dpth (m)	0.42	Hydr. Depth (m)		0.21	
Conv. Total (m3/s)	115.4	Conv. (m3/s)		115.4	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		54.77	
Min Ch EI (m)	1050.22	Shear (N/m2)		26.02	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.24	Cum Volume (1000 m3)		18.65	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		86.24	

Variables hidráulicas para un caudal de 13 m3/s, progresiva 0 + 1600.

Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	eje de rio	Profile:	PF 1		
Reach	eje	RS:	1600	↓	↑
Plan: Plan 02					
Plan: Plan 02 eje de rio eje RS: 1600 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	1050.74	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.07	W/t. n-Val.		0.035	
W.S. Elev (m)	1050.67	Reach Len. (m)	20.00	20.00	20.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		12.79	
E.G. Slope (m/m)	0.012602	Area (m2)		12.79	
Q Total (m3/s)	15.00	Flow (m3/s)		15.00	
Top Width (m)	57.85	Top Width (m)		57.85	
Vel Total (m/s)	1.17	Avg. Vel. (m/s)		1.17	
Max Chl Dpth (m)	0.44	Hydr. Depth (m)		0.22	
Conv. Total (m3/s)	133.6	Conv. (m3/s)		133.6	
Length Wtd. (m)	20.00	Wetted Per. (m)		57.86	
Min Ch El (m)	1050.22	Shear (N/m2)		27.32	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	10868.28	0.00	0.00
Frctn Loss (m)	0.25	Cum Volume (1000 m3)		20.36	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		90.05	

Variables hidráulicas para un caudal de 15 m3/s, progresiva 0 + 1600.

TRABAJO EN CAMPO										TRABAJO EN GABINETE						
TIEMPO(s)										VELOCIDAD (m/s)			SECCION			CAUDAL (m ³ /s)
MARGEN DERECHA			CENTRO			MARGEN IZQUIERDA			TIEMPO PROM.	DISTANCIA RECORRIDA	V _{super.}	V _{media}	PROFUNDIDAD PROMEDIO	ANCHO DE RIO	AREA (m ²)	
F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	Tp	D(m)	V=D/t	V=Vx0.85	Hp(h ₁ ;h ₂ ;h ₃)	B(m)	A=Hpxb	Q=VmxA
9.01	8.17	8.49	9.29	8.68	7.92	10.84	9.8	9.9	9.12	30.0	3.29	2.85	0.3	27.4	8.21	22.96

FECHA DE AFORO: 21/10/2018

FECHA DE AFORO: 24/10/2018

TRABAJO EN CAMPO										TRABAJO EN GABINETE						
TIEMPO(s)										VELOCIDAD (m/s)			SECCION			CAUDAL (m ³ /s)
MARGEN DERECHA			CENTRO			MARGEN IZQUIERDA			TIEMPO PROM.	DISTANCIA RECORRIDA	V _{super.}	V _{media}	PROFUNDIDAD PROMEDIO	ANCHO DE RIO	AREA (m ²)	
F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	Tp	D(m)	V=D/t	V=Vx0.85	Hp(h ₁ ;h ₂ ;h ₃)	B(m)	A=Hpxb	Q=VmxA
9.01	9.00	9.00	9.40	9.20	9.50	9.20	9.00	9.2	9.18	30.0	3.27	2.78	0.32	26	8.32	23.12

FECHA DE AFORO: 28/10/2018

TRABAJO EN CAMPO										TRABAJO EN GABINETE						
TIEMPO(s)										VELOCIDAD (m/s)			SECCION			CAUDAL (m ³ /s)
MARGEN DERECHA			CENTRO			MARGEN IZQUIERDA			TIEMPO PROM.	DISTANCIA RECORRIDA	V _{super.}	V _{media}	PROFUNDIDAD PROMEDIO	ANCHO DE RIO	AREA (m ²)	
F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	Tp	D(m)	V=D/t	V=Vx0.85	Hp(h1;h2;h3)	B(m)	A=Hpxb	Q=VmxA
9.01	9.17	9.49	9.40	9.68	9.92	10.84	11	12	10.10	30.0	2.97	2.52	0.3	26.00	7.80	19.65