

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Restauración ecohidráulica del río Tejar en el municipio de Chocontá,  
Cundinamarca.**

**Ana Milena Hernández Quinchara**

**Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2020**



**Restauración ecohidráulica del río Tejar en el municipio de Chocontá,  
Cundinamarca.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en  
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.**

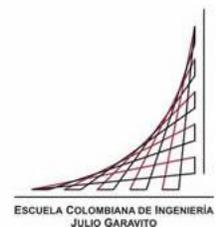
**PhD. German Ricardo Santos Granados**

**Director**

**MSc. Felipe Sierra Pongutá**

**Codirector**

**Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2020.**



La tesis de maestría titulada “Restauración ecohidráulica del río Tejar en el municipio de Chocontá, Cundinamarca.”, presentada por Ana Milena Hernández Quinchara, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis



---

German Ricardo Santos Granados

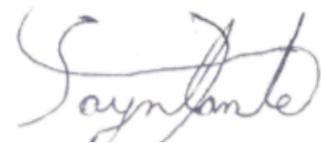
Codirector



---

Felipe Sierra Pongutá

Jurado



---

Santiago Duarte Prieto

Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2020.

## **Dedicatoria**

*A Dios y a la vida, por cada instante.*

*A mi abuela, por sus enseñanzas*

*A mis padres, por su amor, lucha y tenacidad*

*A mis hermanos Diego y Manolo por su amistad y apoyo incondicional.*

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los que me apoyaron durante los procesos asociados a mi formación profesional y al desarrollo de esta investigación.

En primer lugar, a German Ricardo Santos Granados PhD D, director de posgrados, profesor asociado a la facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, quien ha sido guía durante el desarrollo de esta investigación.

Así mismo, al ingeniero Felipe Sierra quien hizo parte fundamental de este proceso, quien, a pesar de la distancia, con su constante compromiso dio su orientación, aportes y colaboración para la finalización de esta investigación.

A todos los profesores y compañeros del centro de Estudios Hidráulicos, quienes, a través de sus enseñanzas, experiencias y consejos, fueron parte de mi proceso de formación profesional

A mi familia, en especial a mis padres quien siempre han sido mi ejemplo y motivación para superar cualquier dificultad en el camino. Este logro es de ustedes.

## Resumen

Los ríos tienen una importancia estratégica tanto para la biodiversidad del país como para la sociedad, su adecuada gestión exige analizar desde diferentes enfoques su estructura y funcionamiento como la fase preliminar para establecer planes, programas o proyectos en este caso de restauración. Para este propósito, esta investigación se centra en describir y aplicar algunas de las principales técnicas y conceptos de la ecohidráulica relacionados con los procesos físicos, químicos y biológicos del ecosistema del Río Tejar, ubicado en el municipio de Chocontá Cundinamarca.

Esta investigación presenta la aplicación y análisis comparativo de las herramientas computacionales IberHABITAT y HEC EFM aplicadas para la evaluación de los cambios del régimen de flujo bajo el escenario de diseño de restauración propuesto. Para la aplicación del software HEC EFM se establecieron diferentes relaciones funcionales que permitieron vincular las características de los regímenes de flujo con elementos del ecosistema a través de consultas estadísticas y geográficas para analizar las conexiones entre hidrología y ecología. Por su parte, el software IberHábitat se aplicó para evaluar la idoneidad del hábitat físico de la especie *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris), para sus tres estadios de desarrollo, en función de dos variables hidráulicas (profundidad y velocidad).

**Palabras clave:** Ecohidráulica, HEC EFM, IberHABITAT, caudal ambiental, Modelo de funciones del ecosistema, restauración de ecosistemas.

## Abstract

Rivers are of strategic importance both for the country's biodiversity and for society. Their proper management requires analyzing the structure and operation from different approaches as the preliminary phase to establish plans, programs, or projects in this case of restoration. For this purpose, this research focuses on describing and applying some of the main techniques and concepts of ecohydraulics related to the physical, chemical, and biological processes of the Río Tejar ecosystem, located in the Chocontá municipality, in Cundinamarca state.

This research presents the application and comparative analysis of the IberHABITAT and HEC EFM computational tools applied to evaluate the flow regime changes under the proposed restoration design scenario. In using HEC EFM software, different functional relationships were established to make it possible to link the flow regimes' characteristics with elements of the ecosystem through statistical and geographical consultations to analyze the connections between hydrology and ecology. For its part, the IberHABITAT software was applied to evaluate the suitability of the *Oncorhynchus mykiss* species (rainbow trout), in its three stages of development, based on two hydraulic variables (depth and velocity).

**Keywords:** Ecohydraulics, HEC EFM, IberHABITAT, environmental flow, Model of ecosystem functions, ecosystem restoration.

## Contenido

<b>1. Capítulo I. Introducción</b> .....	14
1.2 Problemática .....	15
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos .....	16
1.4 Marco de referencia .....	17
1.4.1 Ecología de ríos.....	17
1.4.2 Ecohidráulica .....	17
1.5. Modelo de Funciones del ecosistema (HEC –EFM).....	21
1.6 Iber Habitat .....	22
<b>2. Capítulo II. Definición de los criterios de valoración ambiental.</b> .....	24
2.1 Estructura física a múltiples escalas.....	24
2.2 Procesos hidrológicos e hidráulicos .....	24
2.3 Procesos geomórficos .....	24
2.4 Calidad del agua.....	25
2.5 Características de la comunidad biológica.....	25
2.6 Estructura de la investigación .....	25
<b>3. Capítulo III. Diagnóstico: Caso de estudio, cuenca río Tejar, municipio de Chocontá Cundinamarca</b> .....	26
3.1 Delimitación del área de estudio .....	26
3.2 Características climatológicas.....	27
3.2.1 Precipitación .....	28
3.2.2 Temperatura .....	29
3.2.3 Hidrografía .....	29
3.3 Análisis de caudales .....	31
3.3.1 Verificación y análisis de la información hidrométrica .....	32
3.3.2 Caracterización del régimen anual de caudales .....	33
3.4 Análisis de frecuencia .....	34
3.5 Mayoración de caudales máximos .....	36
3.6 Curva de duración de caudales.....	37
3.7 Análisis de las condiciones actuales de drenaje sobre el río Tejar.....	38
3.7.1 Condiciones de frontera .....	40
3.8 Relaciones de caudal y ecología .....	42

3.8.1 Caudales bajos .....	43
3.8.2 Caudales extremadamente bajos .....	43
3.8.3 Pulsos de caudal alto .....	43
3.8.4 Pequeñas inundaciones .....	43
3.8.5 Grandes inundaciones .....	44
3.9 Suelos.....	44
3.10 Características morfológicas .....	50
3.11 Obras de infraestructura .....	53
3.12 Otras actividades .....	53
3.13 Información hidrobiológica.....	54
3.13.1 Rasgos biológicos de <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoíris) .....	55
3.13.2 Descripción taxonómica <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha arcoíris) .....	56
3.13.3 Aspectos ecológicos.....	56
3.14 Calidad del agua.....	60
3.14.1 Evaluación de los parámetros de calidad del agua .....	61
3.14.2 Índice de calidad del Agua (ICA) .....	65
3.15 Vegetación y flora terrestre.....	69
3.15.1 Herbazal denso.....	70
3.15.2 Arbustal denso .....	71
<b>4. Capítulo IV. Análisis de las relaciones entre el régimen de caudal y el ecosistema del Río Tejar mediante HEC EFM (Ecosystem Functions Model).....</b>	<b>72</b>
4.1 Aplicación del modelo HEC – EFM .....	72
4.2. Procesamiento y análisis de datos .....	72
4.3 Relaciones funcionales.....	73
4.3.1 Hábitat de desove de peces: .....	74
4.3.2 Vegetación riparia .....	75
4.4 Análisis hidráulico .....	76
4.5 Análisis espacial.....	77
<b>5. Capítulo V. Análisis de las relaciones entre el régimen de caudal y el ecosistema del río Tejar mediante Iber Habitat .....</b>	<b>78</b>
5.1 Aplicación del modelo Iber Habitat .....	78
5.2 Curvas de idoneidad.....	78
5.3 Aplicación del modelo IberHabitat .....	80
5.3.1 Resultados del modelo Iber Habitat en la etapa de diagnóstico.....	80

<b>6. Capítulo VI. Resultados de la fase de diagnóstico.....</b>	<b>83</b>
<b>7. Capítulo VII. Diseño propuesto para la restauración ecohidráulica del Río Tejar .....</b>	<b>84</b>
7.1 Ajuste longitudinal.....	84
7.2 Ajuste lateral y control de la erosión.....	85
7.2.1 Transporte de sedimentos.....	85
7.3 Procesos ecológicos.....	85
7.4 Diseño de canal de dos etapas.....	86
7.5 Ecosistema Acuático.....	87
7.8 Diseño, establecimiento y mantenimiento de la zona de protección.....	89
7.9 Aplicación de criterios de diseño .....	92
7.9.1 Reconfiguración del alineamiento .....	92
7.9.2 Sección Transversal de diseño .....	95
7.9.3 Perfil de diseño del Cauce.....	96
7.9.4 Superficie de diseño del cauce .....	97
7.9.5 Análisis de estabilidad longitudinal para las condiciones de diseño.....	98
7.9.6 Caudales de diseño para el modelo de transporte de sedimentos.....	98
7.9.7 Capacidad de transporte de sedimentos del río Tejar.....	99
7.10. Transporte de sedimentos de fondo .....	102
7.10.1 Cálculo de la capacidad de transporte.....	104
7.11 Verificación hidráulica de las condiciones de diseño .....	106
7.11.1 Malla de cálculo en condición de diseño .....	106
7.11.2 Revisión de velocidades y niveles .....	108
<b>8. Capítulo VIII. Resultados de la modelación aplicando el diseño propuesto.....</b>	<b>109</b>
8.1 Resultados de la modelación empleando HEC EFM para la fase de diseño.....	109
8.2 Resultados de la modelación empleando IberHabitat para la fase de diseño.....	111
8.3 Comparación entre el modelo Iber Habitat y el modelo HEC EFM.....	114
<b>9. Capítulo IX. Conclusiones.....</b>	<b>117</b>
<b>10. Capítulo X. Recomendaciones.....</b>	<b>119</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>121</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Estaciones empleadas para el diagnóstico del Río Tejar .....	27
Tabla 2. Características físicas de la subcuenca del río Tejar.....	30
Tabla 3. Clasificación ENOS .....	34
Tabla 4. Caudales obtenidos para las diferentes distribuciones de probabilidad .....	36
Tabla 5. Mayoración de caudales, Río Tejar .....	37
Tabla 6. Porcentaje de excedencia de caudales, estación Puente de Chocontá.....	37
Tabla 7. Resumen de los componentes del flujo, alteraciones del flujo y respuestas ecológicas. ....	38
Tabla 8. Rangos de clasificación de caudal para la estación Puente de Chocontá.....	42
Tabla 9. Leyenda fisiográfica pedológica Río Tejar (Ecoforest Ltda , 2005).....	46
Tabla 10. Categorías de uso de suelo, Chocontá, Cundinamarca.Fuente: (Municipio de Chocontá, 2007)48	
Tabla 11. Características cualitativas de un segmento de lecho plano, Río Tejar .....	52
Tabla 12. Características cualitativas de un segmento del sistema pozo –cruce, Río Tejar. ....	52
Tabla 13. Dieta de la especie de estudio, nombre común trucha arcoíris. ....	58
Tabla 14. Requerimientos de calidad del agua para la trucha arcoíris. ....	60
Tabla 15. Parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y métodos analíticos para el análisis de muestras, Río Tejar .....	62
Tabla 16. Variables involucradas en el cálculo del ICA .....	65
Tabla 17. Descriptores de Calidad del ICA .....	65
Tabla 18. Variables empleadas para el cálculo del ICA. ....	66
Tabla 19. Punto de monitoreo Cuenca Río Bogotá - Subcuenca Río Tejar .....	68
Tabla 20. Histórico ICA - Punto de monitoreo Río Tejar .....	68
Tabla 21. Clasificación clase de uso de agua en la Subcuenca del Río Tejar. ....	69
Tabla 22. Clasificación taxonómica de herbazal denso .....	70
Tabla 23. Clasificación taxonómica de arbustal denso .....	71
Tabla 24. Relaciones funcionales para el Río Tejar.....	74
Tabla 25. Rangos de idoneidad .....	82
Tabla 26. Evaluación de las características de calidad del agua para la especie de estudio .....	83
Tabla 27. Esquema comparativo de los modelos Iber Habitat y HEC EFM.....	115
Tabla 28. Compración de resultados cuantitativos Iber Habitat y HEC EFM para el estadio alevín .....	117

## Índice de figuras

Figura 1. Diagrama del proceso Ecosystem Functions Model (HEC – EFM). -----	22
Figura 2. Esquema metodológico de la investigación -----	25
Figura 3. Localización cuenca Río Tejar -----	26
Figura 4. Ubicación de estaciones empleadas para el diagnóstico del Río Tejar-----	27
Figura 5. Histograma de promedios mensuales multianuales de precipitación (1955-2018). -----	28
Figura 6. Promedios mensuales multianuales de temperatura (1966-2016). -----	29
Figura 7. Cuenca del Río Tejar hasta su confluencia con el Río Bogotá-----	30
Figura 8. Histograma de caudales medios multianuales (1992 -2019)-----	31
Figura 9. Datos de caudal y nivel, estación Puente de Chocontá -----	32
Figura 10. Curva de calibración de caudales, Puente de Chocontá-----	33
Figura 11. Análisis de frecuencias, caudales máximos estación Puente de Chocontá - subcuenca Río Tejar. -----	35
Figura 12. Curva de duración de caudales, estación Puente de Chocontá. Fuente: Autora 2020.-----	37
Figura 13. Superficie topobatemétrica del Río Tejar. -----	39
Figura 14. Detalle de la malla RTIN en la condición actual del Río Tejar -----	40
Figura 15. Condición de frontera a la salida del modelo hidráulico, tipo curva de gasto -----	41
Figura 16. Inundación para un periodo de retorno de 100 años -----	41
Figura 17. Sección transversal zona inundable-----	42
Figura 18. Clasificación de caudales del Río Tejar, empleando el software IHA-----	44
Figura 19. Maapa de leyenda fisiográfica pedológica, Río Tejar -----	45
Figura 20. Clasificación de suelos, subcuenca del Río Tejar -----	50
Figura 21. Jerarquía taxonómica-----	56
<i>Figura 22. Invertebrados que sirven de alimento a la trucha -----</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23. Invertebrados que se alimenta la trucha, larvas de insectos acuáticos -----</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24. Principales macroinvertebrados bentónicos que constituyen la dieta de salmónidos -----</i>	<i>59</i>
<i>Figura 25. Invertebrados que constituyen la dieta de salmónidos -----</i>	<i>59</i>
Figura 26. Resultados del muestreo de alcalinidad, Río Tejar-----	63
Figura 27. Resultados del muestreo de oxígeno disuelto, Río Tejar -----	63
Figura 28. Resultados del muestreo de temperatura, Río Tejar -----	63
Figura 29. Resultados del muestreo de pH, Río Tejar -----	63
Figura 30. . Resultados del muestreo de fosforo total, Río Tejar -----	64
Figura 31. . Resultados del muestreo de dureza, Río Tejar-----	64
Figura 32. Histórico ICA punto de monitoreo Río Tejar.-----	69
Figura 33. Punto de muestreo cobertura arbustal denso ubicado en el municipio de Chocontá, vereda Tilata (Consortio Huitaca, 2019)-----	70

Figura 34. Ventana de relaciones funcionales de HEC EFM. -----	73
Figura 35. Relación funcional para el desove de peces, por año hidrológico. -----	75
Figura 36. Representación gráfica de los resultados de HEC EFM. -----	76
Figura 37. Transiciones en el proceso EFM donde los resultados estadísticos (A) ingresan al modelo hidráulico del río (B) y los resultados del modelo hidráulico se importan a un Sistema de información geográfico para el análisis espacial (C). -----	76
Figura 38. Resultados de la fase de diagnóstico empleando HEC EFM en el río Tejar -----	77
Figura 39. Curva de idoneidad, estadio alevín, velocidad -----	79
Figura 40. Curva de idoneidad, estadio alevín, profundidad -----	79
Figura 41. Curva de idoneidad, estadio juvenil, velocidad -----	79
Figura 42. Curva de idoneidad, estadio juvenil, profundidad -----	79
Figura 43. Curva de idoneidad, estadio adulto, velocidad -----	79
Figura 44. Curva de idoneidad, estadio adulto, velocidad -----	79
Figura 45. Interfaz gráfica del módulo de hábitat. Incluye una base de datos con curvas de idoneidad de diferentes autores, tanto salmónidos ( <i>Salmo trutta</i> ) y como ciprínidos (a) así como la posibilidad de incorporar curvas de idoneidad definidas por el usuario (b). -----	80
Figura 46. Diagnóstico, Cv estadio alevín -----	81
Figura 47. Diagnóstico, Cv estadio juvenil -----	81
Figura 48. Diagnóstico, Cv estadio adulto -----	81
Figura 49. Diagnóstico, Ch estadio alevín -----	81
Figura 50. Diagnóstico, Ch estadio juvenil -----	81
Figura 51. Diagnóstico, Ch estadio adulto -----	81
Figura 52. Hábitat potencialmente útil (HPU), fase de diagnóstico Río Tejar -----	82
Figura 53. Diseño conceptual para el diseño de un canal de dos etapas -----	87
Figura 54. Inclusión de microdiques para el diseño de restauración. -----	88
Figura 55. Secuencia de canales de grupos escalonados que incluye grupos más grandes, como se describen (University of California, 2009) -----	89
Figura 56. Configuración del modelo de franja de protección ribereña de múltiples especies -----	90
Figura 57. Uso de zonas de protección para enderezar los límites de la labranza -----	90
Figura 58. Representación gráfica del diseño propuesto, incluye zona de protección -----	92
Figura 59. Caracterización geométrica de meandros en cauces -----	93
Figura 60. Planimetría natural -----	93
Figura 61. Planimetría modificada -----	93
Figura 62. Mancha de velocidades para la condición actual y rectificación propuesta -----	94
Figura 63. Comparación entre el alineamiento actual y el alineamiento propuesto para el proyecto. -----	94
Figura 64. Características geométricas de la sección tipo doble nivel (Two stage channel) (NRCS, 2007). -----	95
Figura 65. Sección de diseño propuesta a lo largo del corredor del cauce -----	96
Figura 66. Pendientes de diseño, Río Tejar -----	96
Figura 67. Superficie de diseño, Río Tejar -----	97
Figura 68. Superficie de diseño y empalme con el terreno existente -----	97
Figura 69. Perfil longitudinal del cauce del Río Tejar -----	98
Figura 70. Curva granulométrica calculada en el Río Tejar -----	102

Figura 71. Hidrogramas del Rio Tejar-----	103
Figura 72. Comparación de perfiles respecto a los efectos de transporte de sedimentos-----	104
Figura 73. Sección típica con procesos de agradación -----	105
Figura 74. Evolución temporal del fondo del cauce, sección 2394. -----	105
Figura 75. Malla de cálculo tipo hibrida para la superficie de diseño -----	106
Figura 76. Inclusión de microdiques en la malla de calculo -----	107
Figura 77. Curva de gasto, condición de frontera de salida -----	107
Figura 78. Comparación de velocidades máximas asociadas a un TR 100 años entre la condición actual y la condición de diseño-----	108
Figura 79. Sección transversal de diseño típica del Rio Tejar -----	108
Figura 80. Mancha de inundación TR 100 años en la condición de diseño -----	109
.Figura 81. Zonas de fertilización y desove de peces fase de diagnóstico – HEC EFM-----	110
Figura 82. Zonas de fertilización y desove de peces fase de diseño – HEC EFM -----	110
Figura 83 . Relaciones Funcionales, Río Tejar-----	111
Figura 84. Mapa de idoneidad, Cv estadio alevín -----	112
Figura 85. Mapa de idoneidad , Cv estadio juvenil-----	112
Figura 86. Mapa de idoneidad , Cv estadio adulto-----	112
Figura 87. Mapa de idoneidad , Ch estadio alevín-----	112
Figura 88. Mapa de idoneidad , Ch estadio juvenil-----	112
Figura 89. Mapa de idoneidad , Ch estadio adulto-----	112
Figura 90. Hábitat potencial útil (HPU), fase de diagnostico Rio Tejar. -----	113
Figura 91. Hábitat potencial útil (HPU), fase de diseño Rio Tejar. -----	113
Figura 93. Esquema del diseño de la restauración del Rio Tejar. -----	114
Figura 94. Comparación de resultados entre el software Iberhabitat y HEC EFM -----	116

## 1. Capítulo I. Introducción

El patrimonio hídrico del país está representado por el agua en las diferentes fases y manifestaciones en que se encuentra, ocurre e interactúa en el ciclo hidrológico (IDEAM, 2018). Los ríos tienen una importancia estratégica en términos de aprovisionamiento y servicios ecosistémicos, que son resultado de la integración de los diferentes componentes, estructuras y funciones que lo constituyen.

La rápida conversión y deterioro de los ecosistemas fluviales ha generado pérdida de biodiversidad, disminución en la calidad y cantidad de los recursos hídricos en el país. Con estas condiciones de deterioro, surge la necesidad de implementar estrategias para su restauración, a fin de adelantar acciones que contrarresten los efectos negativos. La restauración es una estrategia de carácter interdisciplinario, la cual articula el conocimiento científico para dar respuestas a procesos de gestión y manejo de los ecosistemas, ante las necesidades de restablecer condiciones y prevenir daños futuros (MADS, 2015).

Es fundamental considerar la ecología en las prácticas de restauración de ríos ya que permite una mayor comprensión e integración de los procesos físicos, biológicos y químicos que en él ocurren, y que son caracterizados por descargas variables, patrones hidráulicos, cargas de sedimentos y nutrientes que pueden cambiar temporal y espacialmente (Maddock, 2005). La complejidad y el dinamismo de los sistemas fluviales, la fortaleza de sus vínculos biofísicos y la necesidad de responder a los impactos antropogénicos adversos, ha llevado a la aparición de la ecohidráulica como un área clave de investigación interdisciplinaria. La ecohidráulica se basa en el supuesto de que las fuerzas de flujo son ecológicamente relevantes, es decir, que influyen en la aptitud de los organismos individuales y, por lo tanto, en la estructura y función de las comunidades acuáticas.

Ante esta situación, se evidencia la necesidad de avanzar en las investigaciones relacionadas con la restauración de ríos, desde el enfoque ecohidráulico, a través de la cual se logran los objetivos medioambientales en la conservación y recuperación de ríos se manifiesta, cuantifica y valora en términos del estado ecológico aplicando métodos que correlacionan la ocurrencia de caudales y de conformaciones del cauce con determinadas funciones biológicas, los cuales estén enfocados al diseño e implementación de medidas de intervención.

El desarrollo de esta investigación se centrará en la aplicación de los conceptos de ecohidráulica a través de los modelos Iber HÁbitat y HEC EFM en el Río Tejar, localizado en el municipio de Chocontá, Cundinamarca. El documento está dividido en capítulos que exponen en primer lugar los antecedentes y marco de referencia de la restauración de ríos y ecohidráulica, el segundo componente de la investigación presenta la definición de criterios de valoración ambiental, el tercer capítulo consiste en una etapa de diagnóstico a partir de los criterios previamente definidos, los capítulos cuarto y quinto describe la aplicación de los modelos Iber habitat y HEC EFM para la condición actual del río Tejar, en el capítulo 6 se resumen estos resultados, en el capítulo 7 se formula y elabora el diseño de restauración ecohidráulica del río Tejar. Finalmente, en el capítulo 8 se presenta el análisis de resultados del diseño, en el capítulo 9 se describen las conclusiones de la investigación y en el capítulo 10 recomendaciones producto de la investigación.

## 1.2 Problemática

En Colombia, se formuló la Política para la Gestión Integral del Recurso Hídrico la cual surge como la culminación de una serie de iniciativas por parte del hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), por establecer directrices unificadas para el manejo del agua en el país, que además de apuntar a resolver la actual problemática del recurso hídrico, permitan hacer uso eficiente del recurso y preservarlo como una riqueza natural para el bienestar de las generaciones futuras. En su capítulo 5 “Una gestión ambiental y del riesgo que promueva el desarrollo sostenible” incorporó como una de sus líneas de acción, la denominada gestión integral del recurso hídrico (GIRH). Este componente plantea el reto de garantizar la sostenibilidad del recurso, entendiendo que su gestión se deriva del ciclo hidrológico que vincula una cadena de interrelaciones entre diferentes componentes naturales y antrópicos (MAVDT, 2010).

Como aporte de los actores institucionales a la Gestión Integral del Recurso Hídrico, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), lidera la ejecución del proyecto Adecuación Hidráulica y Recuperación Ambiental del río Bogotá – AHRARB cuyo objetivo es recuperar el Río Bogotá y prevenir inundaciones, a través de obras de adecuación hidráulica enfocadas en mejorar el transporte hidráulico del Río Bogotá mediante la ampliación del cauce, la remoción de sedimentos y basura y la adquisición de predios para recuperación de zonas de amortiguación y descanso para inundación controlada. El enfoque con el cual se han desarrollado este tipo de obras, no incluye una perspectiva ecológica, por ello, la atención debe centrarse en restaurar hábitats hidrológicos e hidráulicos sostenibles utilizando principios del comportamiento fluvial, en el cual existen interconexiones entre la estructura física, la función hidrológica y las respuestas ecológicas.

Por otra parte, los impactos derivados de la construcción de estructuras hidráulicas, tales como la construcción de presas, la regulación de ríos y la canalización han reducido significativamente la variabilidad natural del régimen de flujo y la morfología del de los ríos. Esto da como resultado la degradación, fragmentación y pérdida de la estructura y disponibilidad del hábitat, con la consiguiente reducción de la biodiversidad acuática (Maddock, 2005).

La ecohidráulica estudia la relación entre los diversos componentes del ecosistema fluvial y las características del entorno hidráulico en un tramo de río, mediante métodos de resolución variada. El núcleo operativo de la modelación ecohidráulica es la simulación hidráulica, que resuelve formulaciones con dimensionalidades simples o múltiples para predecir las profundidades, las velocidades y otras variables determinantes del hábitat acuático, en cada punto del sistema de representación espacial del cauce. (Stalnaker , Lamb, & Henriksen, 1995) .

En relación con el caso de estudio, el municipio de Chocontá está ubicado al nordeste del departamento de Cundinamarca; en la jurisdicción del municipio la cuenca del río Bogotá recoge en su recorrido por el valle de Chocontá, todas las corrientes superficiales provenientes del sector este donde se localizan los sectores del páramo y subpáramo y todas las fuentes hídricas que bajan por el sector oeste y otras fuentes superficiales como el Rio Tejar correspondiente al caso de estudio, el cual alberga especies como la *Oncorhynchus mykiss*, nombre común trucha arcoíris, macroinvertebrados y plantas que prestan una serie de servicios ecosistémicos en la zona.

Durante el año 2015 se presentaron inundaciones que afectaron cerca de 210 hectáreas de diferentes municipios entre ellos el municipio de Chocontá, razón por la cual se declaró estado de alerta roja en la región (El Espectador, 2015). Posterior a ello, en el 2017 el fenómeno se repite, los caudales del Rio Tejar, monitoreados a través la estación Puente Chocontá pasaron de 2.6 a 12  $m^3/s$  y su nivel de 1.58 metros a 2.89 metros (Extrategia, 2017). De acuerdo con esta situación y la posible expansión urbana del municipio de Chocontá hacia la zona en la cual está ubicado el Rio Tejar, se evidencia la necesidad de proponer acciones para la planificación del territorio, a fin de reducir el riesgo por inundación aunado a fortalecer los servicios ecosistémicos que el río provee en la actualidad.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Formular y evaluar la restauración ecohidráulica integral del Rio Tejar en el municipio de Chocontá, Cundinamarca.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Definir los criterios de valoración ambiental para una corriente hídrica desde el enfoque de restauración ecohidráulico.
- Determinar los caudales representativos que permitan restaurar los procesos del ciclo de vida de la especie de estudio y mantener los servicios ecosistémicos del Rio Tejar.
- Evaluar y comparar la respuesta de los modelos IBER y HEC-EFM desde el componente de sostenibilidad de los organismos acuáticos y los servicios ecosistémicos proporcionados para los diferentes escenarios de caudal.
- Proponer acciones y medidas para la conservación y restauración de los servicios ecosistémicos del Rio Tejar, como una herramienta de planificación considerando el futuro desarrollo urbano en la zona.

## 1.4 Marco de referencia

### 1.4.1 Ecología de ríos

Los ríos son ecosistemas complejos que se caracterizan principalmente por el flujo y el transporte de sedimentos. Las características del clima y la geología son los factores fundamentales que explican las diferencias entre ríos de distintas latitudes y biomas.

La estructura del ecosistema fluvial (el cauce, la zona de ribera, la llanura de inundación, la zona hiporreica) cambian en tamaño y complejidad como respuesta a la hidrología, que determina el trabajo cinético del agua y la distribución de los sustratos y materiales transportados. Las variaciones de caudal determinan que las comunidades de organismos que habitan en épocas de aguas altas no sean las mismas que en situaciones de aguas bajas. La llegada de materiales disueltos y particulados se modifican con el tiempo y con las variaciones hidrológicas y los cambios en el medio terrestre circundante, al igual como lo hace la disponibilidad de la luz. La composición de la biota responde a la disponibilidad de materiales (materia orgánica y nutrientes disueltos) y de energía (luz, velocidad del agua), con lo cual varía tanto espacial como temporalmente (Elosegi & Sabater, 2009), todos estos elementos hacen parte de las variables a considerar en el estudio desarrollado para la restauración ecohidráulica del Río Tejar.

### 1.4.2 Ecohidráulica

La gestión de los recursos hídricos requiere nuevas soluciones para contrarrestar los crecientes desafíos de la seguridad hídrica derivados del aumento de la población y el cambio climático. Los recursos hídricos mundiales han sido impactados de manera negativa tanto en calidad como en cantidad, estos efectos son mayores ya que están influenciados por el cambio climático y por la presión ejercida a través de los procesos antrópicos en la degradación de lagos, ríos, pantanos y aguas subterráneas.

Hacia la década de los noventa, durante el quinto Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, nació la ecohidrología, como una respuesta a las declaraciones derivadas de la Conferencia de Dublín sobre el agua. La importancia de este recurso, se tradujo en la necesidad de comprender el papel potencial de los subsistemas para amortiguar los efectos del impacto de las actividades humanas, enfocado en la ecología, la geomorfología y la ingeniería del agua como un componente central para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Harper, Zalewski, & Pacini, 2008).

Posteriormente, se desarrollaron nuevos enfoques para la restauración de ríos, fundamentados en los avances obtenidos en países como Reino Unido, Dinamarca, Italia y Estados Unidos (Ramirez, 2015), la ecohidráulica surgió entonces, como una herramienta para mejorar la comprensión de la dinámica fluvial en términos de la evaluación del hábitat, la conservación y restauración de los sistemas fluviales.

Como parte del estudio ecohidráulico, se considera de suma importancia tener un referente o diagnóstico de la situación actual del río, como punto de partida para priorizar las diferentes acciones de manejo. De acuerdo con González y García (2007) partiendo del análisis del estado actual de la corriente y

comparándolo con el que debería tener sino hubiera sido alterado, se pueden observar las diferencias que reflejan el grado de conservación o deterioro del mismo.

Adicionalmente, la correcta comprensión de las características del flujo resulta básica para el estudio de los procesos relacionados con el transporte de sedimentos, la calidad del agua y la protección del hábitat acuático, por lo tanto, la aplicación de los enfoques de la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF) en los análisis del hábitat fluvial y en los estudios de restauración fluvial es clave, ya que permite resolver formulaciones con dimensiones simples o múltiples para obtener variables determinantes en el hábitat acuático como la profundidad, la velocidad y el hábitat potencialmente útil.

Los elementos simulados se vinculan con los criterios de idoneidad del hábitat para los organismos objetivo, con la finalidad de evaluar la calidad y cantidad del microhábitat físico generado en cada elemento discretizador del dominio, esto se desarrolla mediante de las relaciones funcionales entre el caudal y un Índice de calidad del hábitat acuático generado en un tramo del río.

La metodología IFIM por sus siglas en inglés, Instream Flow Incremental Methodology, empleada como fundamento teórico para el uso de las herramientas ecohidráulicas, permite evaluar los efectos de eventuales alteraciones de las condiciones del flujo en una corriente sobre la disponibilidad de hábitat para la biocenosis acuática. Las aplicaciones hasta la fecha se han concentrado principalmente en los hábitats de los peces, investigando los posibles impactos relativos de los cambios en las descargas de los reservorios o pozos, las extracciones y las transferencias de agua (The Environment Agency, Regional Water Resources, 2000).

Otros métodos empleados para el análisis ecohidráulico en corrientes hídricas, proponen que la gestión debería centrarse en los hábitats funcionales, que son unidades de hábitat visualmente distintos dentro de los arroyos y se basan en tipos de sustrato y vegetación tanto dentro como al lado del canal (Stewart, Bruce, & Wharton, 2003). Se ha demostrado que los hábitats funcionales están asociados con condiciones distintas de profundidad y velocidad en los arroyos y se proponen como un medio para integrar la ecología, la geomorfología y la hidrología en la restauración de ríos.

En Colombia se han desarrollado investigaciones relacionadas con la aplicación de la metodología IFIM, “Instream Flow Incremental Methodology”, incorporando el modelo conceptual PHABSIM. El proyecto descrito, fue desarrollado en el Trasvase Manso, ubicado en el departamento de Caldas, Municipios de Samaná y Norcasia, estudio en el cual se involucraron varios actores para satisfacer múltiples objetivos económicos, sociales y ecológicos. La metodología holística aplicada consideró la hidrología de la cuenca, el hábitat de idoneidad para la especie en peligro *Ichthyoelephas longirostris* y la capacidad instalada de la derivación del río Manso que alimenta el proyecto hidroeléctrico Miel I como resultado se obtuvo el área ponderada útil para la especie de estudio (Parra, 2012). Otras investigaciones se han desarrollado en el ámbito académico, con el propósito de determinar aspectos relevantes en la dinámica del flujo, para la estimación de caudales ambientales y evaluar la respuesta de los ecosistemas frente a proyectos u obras hidráulicas.

#### 1.4.2.1 Modelos empleados para estudios ecohidráulicos

La elección de un método para caracterizar las propiedades de flujo depende de varios factores, que incluyen entre otros, los procesos a modelar, las preguntas a responder y las escalas temporales y espaciales del proceso y su resolución (Maddock, 2005).

La capacidad predictiva de los modelos unidimensionales y bidimensionales depende en esencia de la calidad de la información de entrada y las capacidades técnicas del modelador. Los modelos ecohidráulicos unidimensionales requieren información hidrotopográfica, para resolver formulaciones físicas simples mediante procedimientos rápidos, sencillos y poco exigentes en cuanto a los recursos informáticos. El dominio del hábitat unidimensional proporciona una resolución transversal, pero su limitada representatividad restringe el tipo de análisis abordable. Adicionalmente, los campos de velocidad 1D incluyen unos desajustes mejorables, que están determinados por los esquemas de simplificación del cauce y de los modelos de turbulencia (Diez & Burbano , 2007). Los esquemas analíticos 2D son mucho más exigentes en cuanto a los datos de entrada, la preparación del modelador y los recursos computacionales. Sin embargo, las ventajas de la solución hidrodinámica son evidentes, dada su mayor capacidad para generar los dominios de microhábitat con mayor resolución espacial y unos campos de velocidad más exactos.

En esta investigación, el alcance se enfoca en la aplicación de modelos unidimensionales y bidimensionales para la modelación hidráulica con el propósito de analizar las propiedades de flujo utilizadas en la ecohidráulica, que abarcan entre otros, la modelación del hábitat acuático, la evaluación ecológica y la interacción entre el flujo y los organismos que en el habitan.

#### 1.4.2.2 Modelos unidimensionales

Desde el inicio de la ecohidráulica se han empleado modelos de hábitat físico de carácter unidimensional (1D), aplicados a tramos cortos de ríos, modelos como PHABSIM se han empleado para la evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF) y del HPU (Hábitat potencialmente útil) ya que integran el modelo hidrodinámico y ecológico. La principal limitación de los modelos unidimensionales (1D) reside en que las variables se evalúan en una sección y en una dirección (Diez & Burbano , 2007).

La investigación de las interacciones entre ríos y llanuras de inundación puede extenderse varios cientos de kilómetros cuadrados, de modo que la aplicación de modelos bidimensionales con un tamaño de cuadrícula de alta resolución puede estar limitada por el tiempo de cálculo. Los modelos de aguas poco profundas 1D son adecuados para el estudio de flujos con un marcador carácter unidimensional, utilizándose básicamente para la modelización de ríos y canales en los cuales la geometría se puede definir por una línea o cauce longitudinal con una sección transversal asociada en cada punto. Cuando se pierde la unidimensionalidad de la geometría de estudio los modelos 1D dejan de ser eficientes, porque el campo de velocidad deja de ser homogénea en toda la sección y por lo tanto se introducen errores importantes en las ecuaciones 1D, asumiendo una velocidad quasi-uniforme (Cea , 2010).

Esta limitación ha impulsado el desarrollo de otro tipo de modelos 2D, que se ha aplicado en el estudio de áreas y procesos de inundación de llanuras de inundación (por ejemplo, sucesión de vegetación ribereña). Los modelos de este tipo tienen un modelo 1D para la hidráulica en el canal, pero utiliza diferentes enfoques para esquematizar los procesos de llanura de inundación. Hasta el momento se han utilizado tres técnicas: modelos de sistemas de información geográfica (SIG), ráster o modelos de compartimento y modelos hidrodinámicos cuasi bidimensionales. El primero extiende los niveles de agua en el canal predichos por los modelos 1D sobre la llanura de inundación independientemente de cualquier conservación de masa o momento.

Posteriormente, ya sea por el propio modelo o como un proceso post-cálculo, los resultados se interpolan entre secciones contiguas o se asumen constantes en la mitad del tramo entre secciones para cubrir toda la longitud del tramo de río estudiado. Esta metodología incrementa la incertidumbre de los resultados y puede inducir a error al tratar el tramo entre secciones con las mismas condiciones hidráulicas sin tener en cuenta la heterogeneidad morfológica e hidrodinámica (zonas de remanso, zonas de recirculación, saltos, pozas, cambios de régimen, etc.). En consecuencia, a través de la aplicación de modelos 1D se tiende a sobreestimar la variabilidad lateral y a subestimar la variabilidad longitudinal del lecho, y no se representa adecuadamente la hidrodinámica para geometrías de cauce complejas (Ramos, Castellet, Ibars, & Querol, 2019).

#### 1.4.2.3 Modelos bidimensionales

El desarrollo de la Dinámica Computacional de Fluidos (DCF) ha posibilitado la resolución de flujos a lámina libre con un grado de resolución progresivo, mediante esquemas numéricos hidrodinámicos procesados computacionalmente. Las herramientas de simulación cinemática bidimensional (2D) se han popularizado durante la última década, gracias a su descripción mejorada de los fenómenos hidráulicos complejos, especialmente en áreas de velocidad elevada, regímenes rápidamente variados y zonas de reflujos. El sistema de algoritmos bidimensionales promediado en profundidad proporciona dominios simulados más acertados en el plano horizontal que los modelos unidimensionales, describiendo convenientemente el movimiento alrededor de islas y obstrucciones, en zonas de reflujo y en cauces anastomosados (Diez & Burbano, 2007).

Los modelos 2D transforman la realidad física en una formulación matemática basada en las ecuaciones de Saint-Venant, expresadas de forma conservativa en las direcciones longitudinal ( $x$ ) y transversal ( $y$ ). El sistema cuasilíneo de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) que representan la conservación de la masa y de las dos componentes del vector momento se resuelve mediante diferentes métodos numéricos, que proporcionan la profundidad y las dos intensidades de flujo ( $xy$ ) en cada uno de los elementos de la malla representativa del dominio (Diez & Burbano, 2007).

Los esquemas discretizadores de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos son conceptualmente distintos, pero comparten la finalidad de representar numéricamente tanto la morfología del cauce como la estructura matemática del flujo. La secuencia resolutoria de las EDP tiene la finalidad de transformar la representación matemática del flujo en unos algoritmos informáticos que conciben el espacio modelable compuesto de un número finito de puntos.

La discretización en los modelos 2D, se trata en esencia de una simplificación del dominio espacial y temporal continuo e infinito a un sistema discreto y finito, para ser resuelto computacionalmente. De este modo, el espacio se divide en una malla compuesta de celdas unidas en los nodos topográficos, que constituye el sistema de caracterización batimétrica. La tipología de las mallas es variada, dependiendo de la forma de sus elementos, del ángulo formado entre ellos, y de la curvatura determinada por el sistema de coordenadas. Estos modelos tienen tres ventajas ya que proporcionan (1) mapas planimétricos de cantidades físicas, como velocidades promediadas verticalmente, tensiones de cizalladura del fondo, profundidades de agua y otras cantidades derivadas, gradiente de energía de la corriente, vorticidad y circulación, que pueden ser índices ecohidráulicos importantes, (2) componentes longitudinales y transversales del vector; y (3) estructura transversal de las características del flujo y elevación de la superficie del agua (Maddock, 2005).

### 1.5. Modelo de Funciones del ecosistema (HEC –EFM)

El modelo de funciones del ecosistema por sus siglas en inglés Ecosystem Functions Model (HEC EFM), es una herramienta de planificación que ayuda a analizar la respuesta del ecosistema a los cambios en el régimen de flujo. El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos desarrolló HEC-EFM para permitir la visualización de las condiciones ecológicas existentes, determinar los sitios de restauración y evaluar y clasificar las alternativas según el cambio relativo en los aspectos del ecosistema. Los análisis de HEC –EFM implican 1) análisis estadísticos de las relaciones entre hidrología y ecología, 2) modelación hidráulica y 3) uso de sistemas de información geográfica (SIG).

Los análisis centrales de HEC-EFM son las "relaciones funcionales". Estas relaciones vinculan las características de las series de tiempo hidrológicas e hidráulicas (flujo y etapa) con los elementos del ecosistema mediante la combinación de cuatro criterios básicos: 1) temporada, 2) duración, 3) tasa de cambio y 4) excedencia porcentual (US Army Corps of Engineers , 2013).

La consulta de porcentaje de excedencia ofrece una opción de frecuencia de flujo o duración de flujo. Cuando se selecciona la frecuencia de flujo, EFM clasifica los resultados estacionales de cada año (calculados a través de las consultas de temporada, duración y tasa de cambio) e interpola para obtener el flujo (o etapa, si se usa la tasa de cambio para investigar la dinámica de la etapa) que es igual o excedido para el porcentaje definido en años. El valor resultante sería el resultado estadístico. Cuando se selecciona la duración del flujo, EFM genera una curva de duración del caudal utilizando los valores medios diarios obtenidos de los regímenes de flujo en el extracto estacional y los interpolados para obtener el flujo que corresponde al porcentaje definido (Hickey, Huff, & Dunn, 2015).

Una vez se desarrollan las relaciones, HEC-EFM realiza cálculos estadísticos para analizar series temporales de flujo y etapas para los criterios especificados y produce un valor de flujo único para cada relación. Este proceso se puede repetir para que los regímenes de flujo alternativos comparen diferentes escenarios de proyectos e indiquen las direcciones de los cambios en la salud del ecosistema. Además de los cálculos estadísticos, los análisis de HEC-EFM involucran la modelación hidráulica, que permite traducir los resultados estadísticos en resultados espaciales localizados en los perfiles de la superficie del agua.

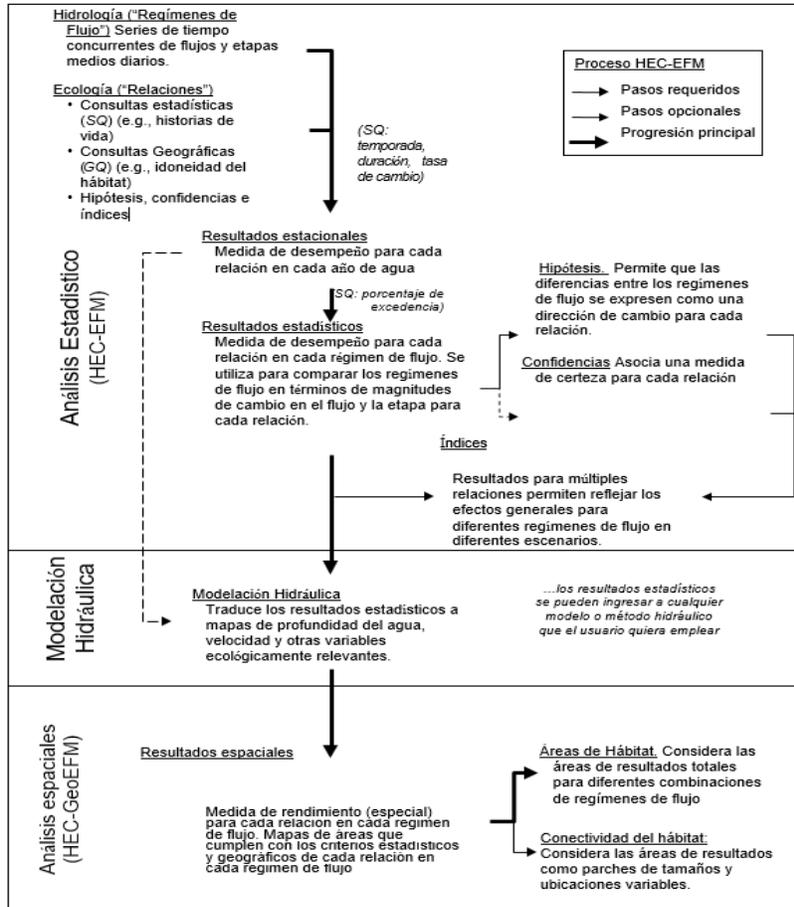


Figura 1. Diagrama del proceso Ecosystem Functions Model (HEC – EFM).  
Fuente (US Army Corps of Engineers , 2013)

### 1.6 Iber Habitat

Iber es un modelo matemático bidimensional empleado en la simulación del flujo en ríos y estuarios. Este modelo se desarrolló a partir de 2 herramientas de modelización numérica bidimensional ya existentes, Turbillón y CARPA, ambas con el método de volúmenes finitos, que fueron integradas en un único código ampliado con nuevas capacidades. El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí, que incluyen entre otros: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, un módulo de hábitat fluvial y un módulo de calidad de aguas.

El módulo de hábitat fluvial, denominado IberHABITAT resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones (modelo hidráulico) sobre una malla de volúmenes finitos empleando el esquema numérico de Roe, e incorpora curvas de preferencia (modelo ecológico) de diferentes estadios de desarrollo (alevín, juvenil y adulto) de salmónidos y ciprínidos para diferentes variables hidráulicas y geomorfológicas (velocidad, calado y sustrato).

Cuenta con un modelo ecológico que evalúa el hábitat físico para peces a través de curvas de idoneidad o preferencia. Estas curvas son funciones de transformación normalizadas que relacionan variables del medio fluvial con el uso que los peces hacen del espacio. Habitualmente las variables de referencia hidráulicas son la profundidad y la velocidad, y a nivel geomorfológico el sustrato. Se pueden considerar, también, variables de calidad del agua (temperatura) o de la fisiografía del cauce (zonas de refugio). Las preferencias de hábitat se evalúan entre cero y uno, siendo valores cercanos a la unidad los correspondientes a un alto grado de idoneidad o adecuación y, por el contrario, un bajo grado de idoneidad para valores cercanos a cero. Cada especie, incluso cada estadio de desarrollo, cuenta con unas curvas de preferencia propias, descriptoras de sus requerimientos de hábitat en términos físicos (Bladé, Cea, Corestein, & Puertas, 2012).

Por otra parte, el modelo Iberhabitat, cuenta con un modelo de hábitat físico que permite cruzar los resultados del modelo hidráulico con la información del modelo ecológico para obtener la Idoneidad del hábitat físico (IHF). Esta se evalúa habitualmente como combinación de las diferentes idoneidades parciales de cada variable, o idoneidad elemental. Existen diversas maneras de evaluar la idoneidad elemental en función del criterio de hábitat descritas a continuación:

$$\text{Suma de idoneidades} \quad \sum_{k=1}^n C_k \quad (1)$$

$$\text{Producto de idoneidades} \quad \prod_{k=1}^n C_k \quad (2)$$

$$\text{Media aritmética de idoneidades} \quad \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C_k \right) \quad (3)$$

$$\text{Media geométrica} \quad \left( \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n C_k} \right) \quad (4)$$

siendo  $n$  el número de variables consideradas y  $C_k$  el valor de la idoneidad de la variable  $k$  evaluada.

Resultan notorias las diferencias entre los distintos criterios de hábitat, por lo que la elección de uno u otro puede condicionar notablemente los resultados de hábitat físico de la especie evaluada. El valor de la IHF se emplea como variable básica para la obtención del HPU, que se define como la superficie, o como porcentaje sobre el cauce inundado, que puede ser potencialmente utilizado por la especie o estadios de desarrollo evaluados. La evaluación hidráulica para diferentes caudales ( $Q$ ) posibilita la obtención de relaciones HPU- $Q$  (Andrey, 2019).

## **2. Capítulo II. Definición de los criterios de valoración ambiental.**

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2001).elaboró una guía para la restauración de ríos y corrientes, como resultado del esfuerzo entre quince agencias federales para producir una referencia común sobre la restauración de un corredor fluvial. Este documento define una serie de criterios a considerar para la planificación y puesta en marcha de los procesos de restauración, en consecuencia, estos criterios se emplearán como base para la presente investigación

### **2.1 Estructura física a múltiples escalas**

Existen múltiples escalas espaciales bajo las cuales se puede realizar el análisis de un corredor fluvial de restauración, cada elemento dentro del ecosistema tiene vínculos con otros elementos externos, en este sentido, existen funciones comunes del ecosistema que involucran el movimiento de materiales (sedimentos y escorrentía), energía y organismos (movimiento de mamíferos, peces e insectos, macro y microinvertebrados). Definir la escala espacial es clave para planificar y diseñar la restauración de un río. Para el caso de estudio se analizan las características del río Tejar en una escala de corredor fluvial, que es un elemento espacial en el cual confluyen los elementos de la cuenca y la tierra (llanura de inundación, vegetación riparia).

### **2.2 Procesos hidrológicos e hidráulicos**

El análisis de los procesos hidrológicos es fundamental, ya que permite comprender como fluye el agua a través del corredor fluvial para desarrollar iniciativas de restauración y tomar las decisiones adecuadas para la implementación de cualquier tipo de medida. En esos términos, para efectos de la investigación se analiza la frecuencia y duración de caudales a través del análisis de frecuencia. Adicionalmente se estima cual es el caudal dominante o formador, empleado para el diseño de la restauración

### **2.3 Procesos geomórficos**

El análisis de los procesos geomórficos combina los aspectos hidrológicos básicos con las funciones y características físicas. El agua que fluye a través del río se ve afectada por los tipos de suelos y características aluviales dentro el canal, en la llanura aluvial y en las tierras altas. La cantidad y tipo de sedimentos. transportado por una corriente es en gran medida un determinante de sus características de equilibrio, incluyendo tamaño, forma y perfil, para efectos de esta investigación se hará un análisis exploratorio de estas características para comprender como el agua y los sedimentos están relacionados con la forma del canal, su función y en que procesos están involucrados con la evolución del canal.

## 2.4 Calidad del agua

La evaluación de los parámetros químicos del agua es un indicador para determinar si una restauración fue exitosa o no, generalmente los objetivos de restauración están enfocados ya sea para mejorar a una condición deseada o para mantener las condiciones actuales, las características físico químicas del agua, a pesar de no ser evidentes son fundamentales para el desarrollo de las funciones y procesos ecosistémicos a lo largo del río. Para la etapa de diagnóstico de esta investigación se emplean los resultados analíticos de los monitoreo de calidad del agua realizados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

## 2.5 Características de la comunidad biológica

Comprender cómo el agua fluye, cómo se transportan los sedimentos y cómo las características geomórficas evolucionan a través del tiempo es importante, sin embargo, el entendimiento de cada una de esas partes en conjunto, incluyendo peces, macroinvertebrados, plantas e incluso seres humanos es uno de los retos más importantes en el proceso de restauración. Colombia, a pesar de ser uno de los países más megadiversos del mundo tiene limitaciones en cuanto a la caracterización y conocimiento de especies, lo que recae a su vez en una dificultad para definir aspectos técnicos, que permitan fortalecer o mejorar las relaciones funcionales de los organismos dentro y en conexión con el ecosistema. En consecuencia, para el desarrollo de esta investigación se realizó una vista de caracterización cualitativa del ecosistema en un tramo del río Tejar.

## 2.6 Estructura de la investigación

Para formular y evaluar la restauración ecohidráulica integral del río Tejar en el municipio de Chocontá, Cundinamarca, se desarrollaron los pasos descritos en el siguiente diagrama.

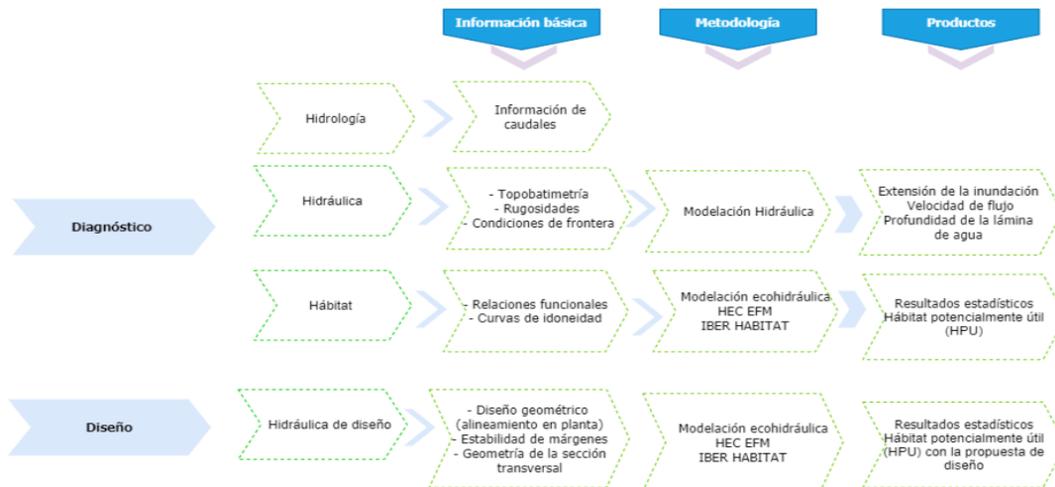


Figura 2. Esquema metodológico de la investigación

Fuente: Autora 2020

### 3.Capitulo III. Diagnóstico: Caso de estudio, cuenca río Tejar, municipio de Chocontá Cundinamarca

#### 3.1 Delimitación del área de estudio

El Municipio de Chocontá se localiza al nordeste del departamento de Cundinamarca, hace parte de la región denominada Sabana Norte en unión con Suesca, Sesquilé, Guatavita, Macheta, Manta, Tibirita y Villapinzón. Dada su localización, cerca de las estribaciones de la cordillera oriental, la mayor parte del territorio es montañoso, sus tierras corresponden a piso térmico frío y páramo y están drenadas por los ríos Bogotá, Tejar y Sisga (Municipio de Chocontá, 2007). En la Figura 3, se observa la ubicación del sitio de estudio.

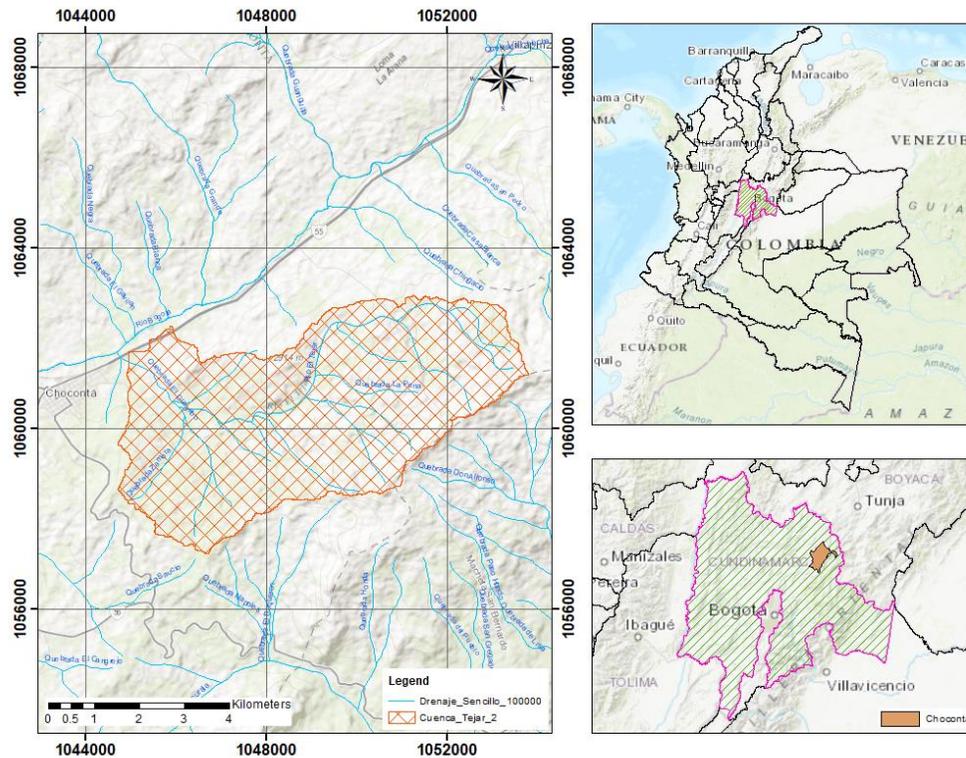


Figura 3. Localización cuenca Río Tejar

Fuente: Autora, 2020.

### 3.2 Características climatológicas

La caracterización climatológica e hidrométrica del Río Tejar, se realizó considerando la información de las estaciones presentadas en la *Tabla 1*, su localización espacial está en descrita en la *Figura 4*.

Tabla 1. Estaciones empleadas para el diagnóstico del Río Tejar

Nombre	Código de la Estación	Tipo	Altitud (m.s.n.m)	Latitud	Longitud
Villapinzón	2120043	Pluviográfica	2730	5° 12' 38"N	73°36'0" W
Saucio	2120027	Pluviográfica	2643	5° 6' 32" N	73° 42' 22" W
La Iberia	2120548	Climatológica principal	2721	5° 12' 13.4"N	73°43'27.5" W
Puente de Chocontá	2120917	Limnimétrica	2600	5° 9' 10,98" N	73° 40' 28,16" W

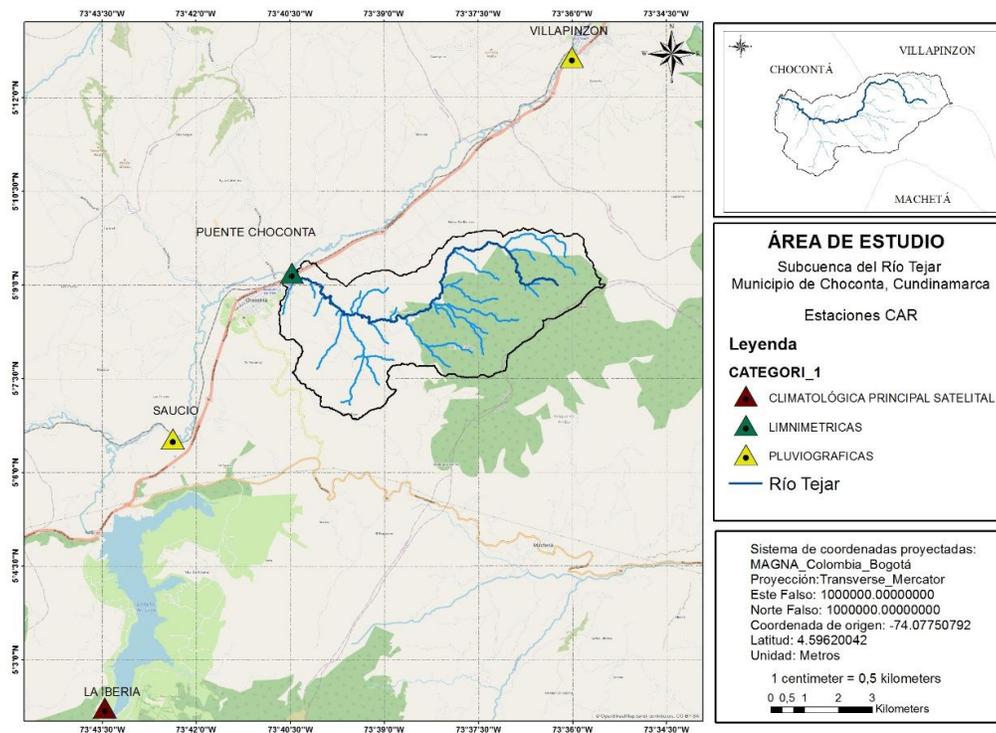


Figura 4. Ubicación de estaciones empleadas para el diagnóstico del Río Tejar  
Fuente. Autora, 2020.

### 3.2.1 Precipitación

Por pertenecer a la franja baja de presión de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cuenca alta del río Bogotá debería tener un régimen bimodal, con dos periodos lluviosos entre abril y junio el primero y de septiembre a octubre, el segundo y dos periodos secos entre enero a marzo y entre julio y agosto. Sin embargo, por influencias locales el sistema se modifica sustancialmente, ya que la zona se encuentra enmarcada por un núcleo montañoso alto y muy frío, que la rodea y con entrada desde los Llanos Orientales, que hace que los vientos húmedos provenientes de los Llanos y la Amazonía lleguen relativamente fácil a esta parte de la subcuenca, cambiando el régimen de las precipitaciones en la margen izquierda de la cuenca de tipo bimodal a monomodal, iniciándose el periodo húmedo en el mes de abril y finalizando el mes de octubre (Ecoforest Ltda, 2006).

Para establecer la caracterización climatológica de la subcuenca del Rio Tejar, se seleccionaron las estaciones operadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) localizadas en cercanía a la subcuenca, y se determinó la variabilidad temporal de precipitación y temperatura.

Para la distribución temporal de la precipitación se seleccionaron las estaciones pluviográficas Villapinzón [2120043] y Saucio [2120027], consideradas como representativas de la subcuenca por contener registros de por lo menos veinte años.

La distribución a lo largo del año, en la mayor parte de la subcuenca es de tipo monomodal (*Figura 5*), tanto en el primer semestre del año, como en el segundo, adicionando a mediados del año una carga apreciable de precipitación, proveniente del Amazonas, presentando un periodo lluvioso entre los meses de abril a noviembre, siendo julio el mes que registra mayor precipitación con un valor cercano a los 125 mm y un periodo de estiaje que se extiende de diciembre a marzo, en el cual se evidencia el mes de enero como el mes más seco, con un registro del orden de 20 mm.

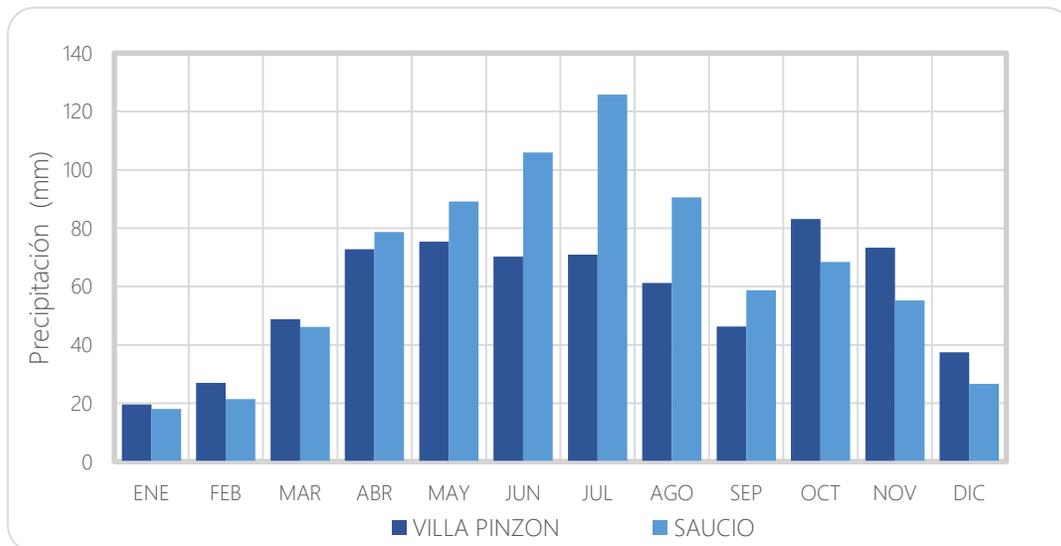


Figura 5. Histograma de promedios mensuales multianuales de precipitación (1955-2018).

Fuente. Autora, 2020.

### 3.2.2 Temperatura

En la *Figura 6*, se observa una tendencia bimodal de la temperatura característica de gran parte de la región Andina. Los valores máximos de temperatura media se presentan en los meses de enero y diciembre, mientras los valores mínimos de temperatura media se presentan entre los meses de febrero y marzo, sin embargo, la fluctuación interanual de la temperatura no es mayor a 2°C.

De acuerdo con la metodología planteada por Caldas Lang (1962), se estableció la clasificación climática de la subcuenca, considerando los parámetros de temperatura, altura y el factor de lluvia o índice de efectividad de la precipitación. El cruce de estos parámetros produce la clasificación correspondiente al tipo climático de frío semihúmedo (Tsh).

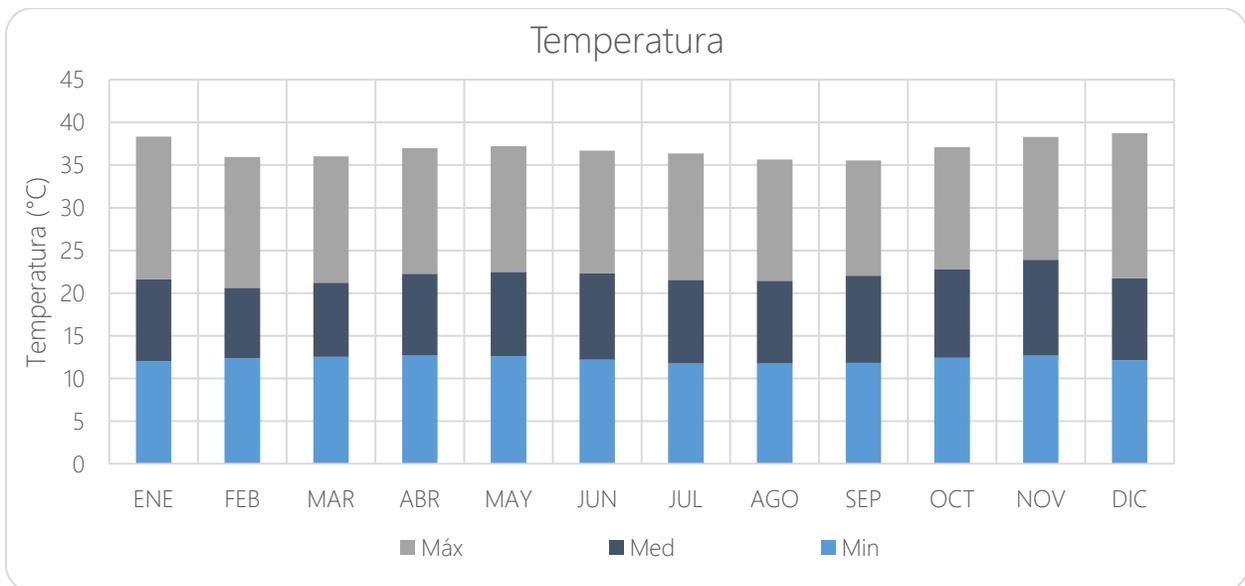
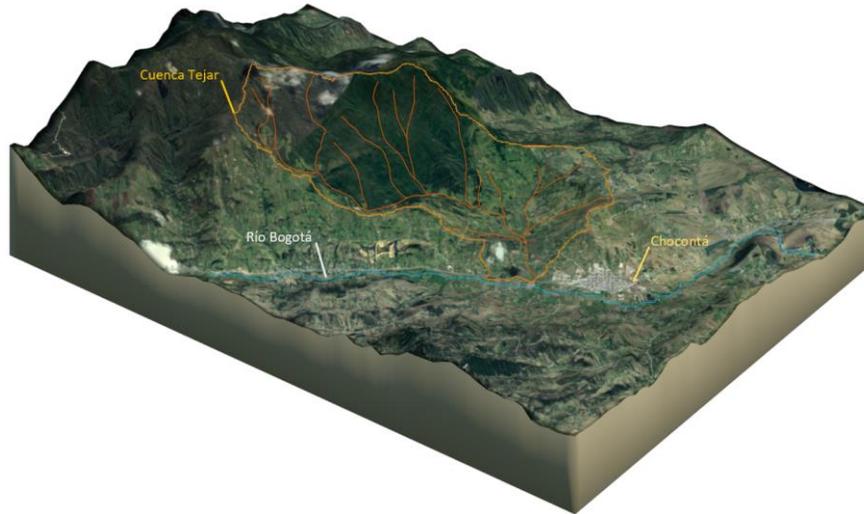


Figura 6. Promedios mensuales multianuales de temperatura (1966-2016).

Fuente Autora 2020.

### 3.2.3 Hidrografía

El Río Tejar nace en la Cuchilla o páramo del Choque a una altura aproximada de 3.200 m.s.n.m y posee una red de drenaje, representada por un gran número de afluentes como las quebradas La Peña, Zamora, Pozo azul, Piedra Blanca, Paso Real, La Peña, el Guachabo, el Tablón, el Guayabo, Cañada Honda y Navarrete, desciende hasta los 2.700 m.s.n.m para entregar sus aguas al Río Bogotá, en dirección este-oeste en un recorrido de aproximadamente 12 km (Municipio de Chocontá, 2007).



*Figura 7. Cuenca del Río Tejar hasta su confluencia con el Río Bogotá*  
Fuente: Autora 2020.

En la tabla 8 se presentan diferentes características del Río Tejar que hacen parte de la fase de diagnóstico del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá.

*Tabla 2. Características físicas de la subcuenca del río Tejar.*

Nombre de la subcuenca	Nombre	Código subcuenca	Número de orden cuenca	Patrón de drenaje	Longitud Cauces (km)	Área (km <sup>2</sup> )	Dd (km/km <sup>2</sup> )
Rio Alto Bogotá (2120-11)	Rio Tejar	2120-1102	4	Dendrítico	1115.7	3	3.71

### 3.2.3.1 Sistema de drenaje

El sistema de drenaje en general para toda la subcuenca, es de tipo superficial por medio de cauces naturales que tributan al río principal y luego drenan al río Bogotá, este recoge las aguas de toda la cuenca, siendo el cauce principal de tipo sinuoso, al igual que sus tributarios.

### 3.2.3.2 Tiempo de concentración

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. Para su determinación se empleó la fórmula de Kirpich.

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (5)$$

$$t_c = 1.6 \text{ hr}$$

### 3.3 Análisis de caudales

El régimen natural de flujo puede ser considerado una variable que limita la distribución y abundancia de especies y regula la integridad ecológica en los sistemas fluviales, ya que condiciona características fisicoquímicas como la temperatura, geomorfología del cauce y diversidad de hábitats. En tal sentido, hay un consenso mundial en entender que los ecosistemas de agua dulce requieren un régimen de flujo variable, más allá de un valor mínimo, para mantener unos límites de sostenibilidad en su aprovechamiento (Magdaleno, 2018).

Con el propósito de determinar el régimen de caudales en la subcuenca, se calcula la distribución temporal de los caudales medios, máximos y mínimos, a fin de establecer la probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno. Para ello, se emplearon los datos de la estación limnimétrica Puente de Chocontá [Código: 2120705] que pertenece a la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Esta cuenta con registros de caudal desde el 1/01/1992 hasta el 31/12/2019. En la *Figura 8*, se observa la distribución del caudal que de forma similar a la precipitación, es de tipo monomodal.

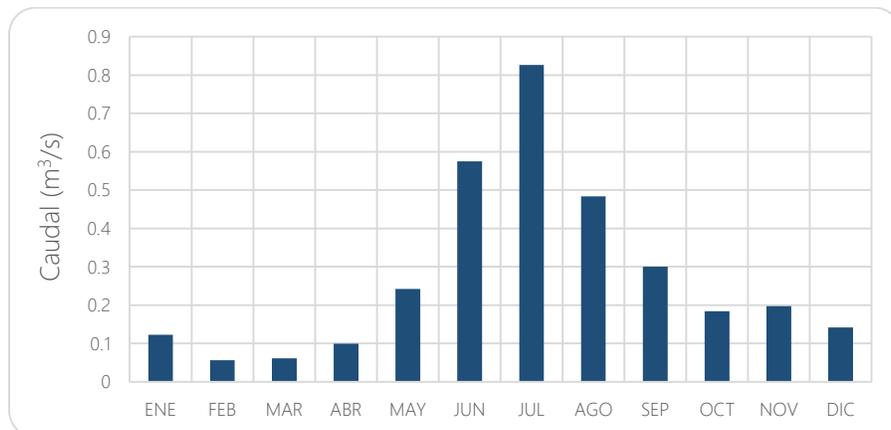


Figura 8. Histograma de caudales medios multianuales (1992 -2019)

Fuente: Autora 2020.

### 3.3.1 Verificación y análisis de la información hidrométrica

Dada la localización de la estación limnimétrica Puente de Chocontá los datos recolectados reflejan el comportamiento hidrológico del Río Tejar, ya que está se encuentra en la descarga del río. Por otra parte, es de precisar que el régimen de flujo del Río Tejar está influenciado por el río Bogotá, en el sector de confluencia, razón por la cual, no se realizó el procedimiento de complementación de datos faltantes, ya que los registros de caudal de las estaciones cercanas no son comparables en magnitud. Por otra parte, resulta importante mencionar que los registros de caudal y nivel de la estación presentan debilidades en términos de captura y procesamiento de la información ya que la relación entre el nivel y caudal no es consistente en toda la serie de datos, como se evidencia en la *Figura 9* en la que se observa la distribución temporal de caudal y nivel de la estación Puente de Chocontá.

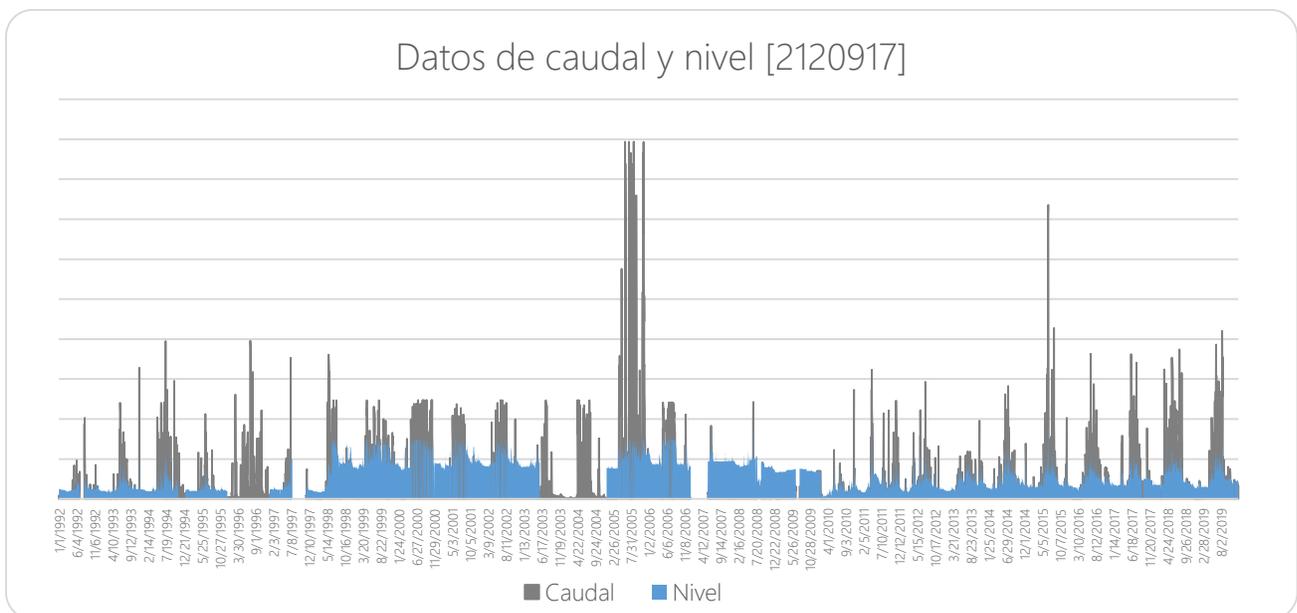


Figura 9. Datos de caudal y nivel, estación Puente de Chocontá  
Fuente: Autora 2020.

De acuerdo con esto se elaboró la curva de calibración de caudales (*Figura 10*), que es la representación gráfica de las variaciones de las descargas en la sección transversal del río en función de las lecturas de nivel, esta curva se construyó con la información que presenta una relación directa entre nivel y caudal que se da en el periodo comprendido entre 2011 a 2019, información que se empleó para el desarrollo del modelo HEC EFM.

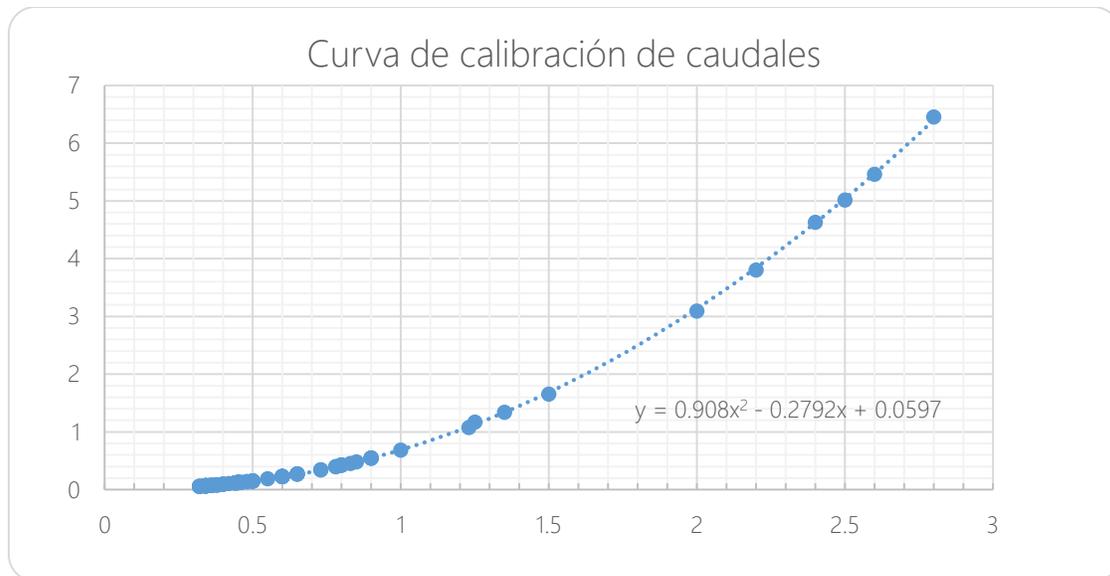


Figura 10. Curva de calibración de caudales, Puente de Chocontá  
Fuente. Autora 2020.

### 3.3.2 Caracterización del régimen anual de caudales

La respuesta hidrológica de los ríos, en condiciones normales, está mediada por las variaciones del régimen climático a diferentes escalas temporales: tanto por la variabilidad intranual como interanual. Las dos fases del fenómeno ENOS no tienen una periodicidad definida, no son fácilmente predecibles, pero son relativamente frecuentes y son determinantes de la variabilidad natural en la cantidad de agua y sedimentos en los cauces del sistema fluvial. En tal sentido, se utilizarán como referente de ocurrencia de fenómenos ENOS en sus fases fría y cálida, eventos extremos máximos con un período de retorno de 15 años, y eventos extremos mínimos con período de retorno de 10 años. Dichos eventos son los mismos que se utilizan como referente en las métricas de interés ecológico.

El análisis de la información histórica, indica que las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en Colombia son explicadas en buena parte, por la variabilidad climática interanual, relacionada con los fenómenos El Niño y La Niña, los cuales han sido causa de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones del país, ocasionando un efecto negativo sobre el medio físico natural y un impacto social y económico de grandes proporciones (IDEAM, 2007).

En este sentido, a continuación, se presenta la clasificación para los diferentes años de registros disponibles en el área de estudio asociados a las dos fases del fenómeno ENOS.

Tabla 3. Clasificación ENOS

Año	Niña	Neutro	Niño
1992			✓
1993		✓	
1994		✓	
1995		✓	
1996		✓	
1997			✓
1998	✓		
1999	✓		
2000	✓		
2001		✓	
2002			✓
2003			✓
2004		✓	
2005		✓	
2006		✓	
2007	✓		
2008	✓		
2009			✓
2010	✓		
2011	✓		
2012			✓
2013			✓
2014			✓
2015			✓
2016		✓	
2017			
2018		✓	
2019		✓	

### 3.4 Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales. Es un método basado en procedimientos estadísticos, que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidad seleccionada (Universidad de Talca, 2007).

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos de la subcuenca, se realizó el ajuste de las series anuales a diferentes distribuciones de probabilidad tales como: Normal, Log Normal, Pearson Tipo III, Log Pearson y Gumbel y se determinó, a través de la prueba de Kolmogorov la distribución que presentó mejor ajuste.

La selección de los periodos de retorno se realizó considerando los objetivos ambientales de preservación y prestación de servicios ecosistémicos de soporte y regulación. Para el caudal formador, que se supone como el caudal dominante en la configuración morfológica del cauce y el de mayor capacidad y eficacia para el transporte de carga (MADS, 2018), se consideró la serie de caudales máximos anuales, y la distribución de probabilidad de Gumbel y un periodo de retorno de 2.33 años.

Por otra parte, para considerar el funcionamiento del ecosistema relacionado con el control de especies invasoras y la generación de condiciones favorables de hábitat para especies nativas, se determinó el caudal mínimo, asociado a un periodo de retorno de 10 años. En cuanto a la conectividad lateral del río y sus planicies inundables u otros cuerpos de agua, el mantenimiento de la funcionalidad de la ronda hídrica, el transporte de sedimentos, madera, nutrientes y materia orgánica, el lavado del cauce y la formación de nuevos hábitats se determinó el caudal máximo asociado a un periodo de retorno de 15 años.

La *Figura 11*, presenta los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones de probabilidad. Al realizar la prueba de bondad y ajuste de Kolmogorov Smirnov para un nivel de significancia de  $\alpha = 0.01$  y un tamaño de muestra de 27 años de registros, se obtiene que el mejor ajuste corresponde a la distribución de probabilidad Gumbel.

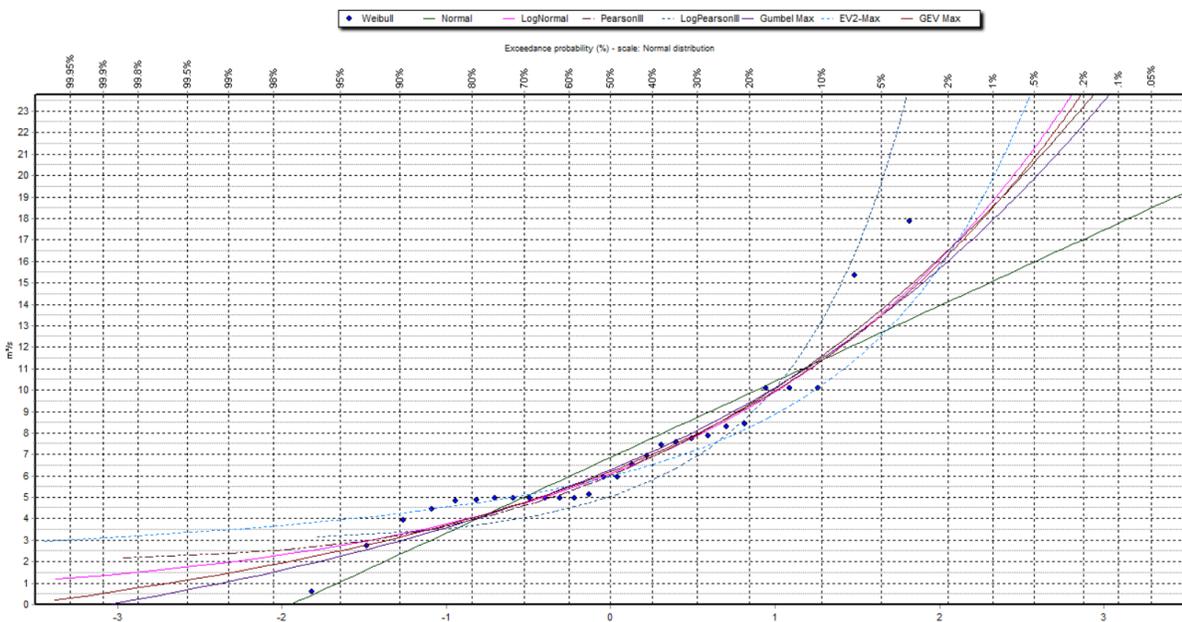


Figura 11. Análisis de frecuencias, caudales máximos estación Puente de Chocontá - subcuenca Río Tejar.

Fuente. Autora 2020.

Los caudales determinados se proponen como punto de partida para evaluar la relación del régimen de flujo y su relación con la preservación de los atributos del caudal necesario para el desarrollo de las comunidades hidrobiológicas que se han adaptado y que, de acuerdo con la visita técnica realizada existen en diferentes sectores de la red de drenaje del Río Tejar.

Tabla 4. Caudales obtenidos para las diferentes distribuciones de probabilidad

Caudal ( $m^3/s$ )					
Tr (años)	Gumbel	Normal	Log Normal	Pearson III	Log Pearson
100	20.05	15.08	18.48	18.57	48.01
50	18.13	14.12	16.51	16.52	32.23
20	15.36	12.67	13.54	13.74	19.64
15	14.47	12.16	12.63	12.85	16.67
10	12.89	11.39	11.36	11.58	13.22
5	10.23	9.84	9.18	9.32	8.83
2.33	7.56	7.49	6.65	6.62	5.57

### 3.5 Mayoración de caudales máximos

Las estaciones limnimétricas como lo es la estación Puente Chocontá presentan únicamente dos registros diarios de caudales, para los cuales se selecciona el mayor como el caudal máximo diario. La anterior condición de medición es apropiada para ríos con cuencas significativas, las cuales no presenten mayores fluctuaciones de niveles a nivel diario y cuyos hidrogramas tienen duración de días. En el caso de la cuenca del río Tejar, la duración de estos hidrogramas es de horas y por lo tanto hay una probabilidad muy baja de que los registros de caudales coincidan con los picos de las crecientes, por lo tanto, es necesario aplicar metodologías de mayoración de caudales a los registros de caudales máximos.

Con el fin de aplicar el factor de mayoración se utilizó la ecuación de Manitoba, la cual se muestra a continuación.

$$Cm = 3.7 * (A^{-0.38}) \quad (6)$$

Donde:

- Cm: Coeficiente de Amplificación
- A: Área de Drenaje ( $mi^2$ )

Como resultado de la aplicación de la fórmula de Manitoba, se encontró que el factor de mayoración para el caso de estudio es de 1.2, el cual es multiplicado a los caudales pico obtenidos mediante ajustes probabilísticos. Los caudales usados para la verificación hidráulica y condiciones de diseño se muestran a continuación:

Tabla 5. Mayoración de caudales, Río Tejar

Tr (años)	Gumbel Mayorada (m <sup>3</sup> /s)
100	23.5
50	20.9
20	17.4
10	14.7
5	11.9
2.33	8.4

Estos caudales serán usados para el diagnóstico de las condiciones actuales del cauce, así como para la evaluación de las alternativas de restauración ecohidráulica del río Tejar.

### 3.6 Curva de duración de caudales

Una curva de duración de caudales representa la relación entre una descarga determinada y su correspondiente porcentaje de tiempo en que la descarga se iguala o supera. Proporciona una vista gráfica de la variabilidad histórica general asociada con el caudal de la cuenca del río. Es uno de los métodos más informativos que muestra las características del régimen de flujo mostrando el rango completo del flujo del río. La curva de duración de caudales se puede construir utilizando diferentes resoluciones de tiempo de datos de flujo de corriente: anual, mensual o diaria. La construcción sobre la base de series de tiempo de caudal diario proporcionan la forma más detallada de examinar las características de duración de un río (Katuva, 2014). La forma de la curva de duración del flujo refleja fuertemente el tipo de régimen de flujo en el río y las características de la cuenca aguas arriba.

Porcentaje de tiempo excedido	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
99	0.0
95	0.1
90	0.1
80	0.2
70	0.2
50	0.5
25	1.1
15	2.4
10	3.3
5	4.5
1	5.8
0.5	6.8
0.2	8.5

Tabla 6. Porcentaje de excedencia de caudales, estación Puente de Chocontá.

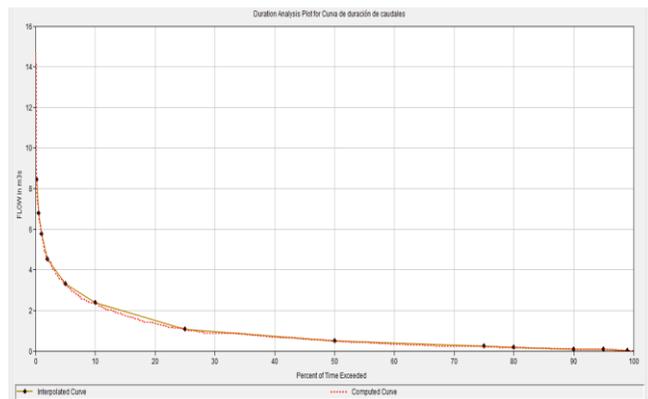


Figura 12. Curva de duración de caudales, estación Puente de Chocontá. Fuente: Autora 2020.

A continuación, en la Tabla 7, se describe conceptualmente el comportamiento de los regímenes de flujo y la respuesta ecológica de cada de los ecosistemas frente a dichos cambios.

Tabla 7. Resumen de los componentes del flujo, alteraciones del flujo y respuestas ecológicas.

Fuente: (Poff & Zimmerman, 2010)

Componente de flujo	Alteración de flujo	Respuesta ecológica
Magnitud	Falta de caudales extremos y / o mayor magnitud de caudales extremos	Pérdida de especies sensibles; diversidad reducida; conjuntos alterados y taxones dominantes; abundancia reducida; incremento de especies invasoras; interrupción del ciclo de vida; riqueza de especies reducida; reclutamiento alterado; fracaso del establecimiento de plántulas; territorialización de la flora; menor riqueza de especies; invasión de vegetación en canales.
Frecuencia	Frecuencia reducida de los picos de flujo	Reproducción interrumpida / reducida; disminución de la riqueza de especies endémicas y sensibles; hábitat reducido para peces jóvenes; cambio en la composición de la comunidad; reducciones en la riqueza de especies.
Duración	Duración reducida de la inundación de la llanura aluvial	Disminución de la abundancia de alevines; pérdida del hábitat de la llanura aluvial; tasa de crecimiento o mortalidad reducida; ensamblajes alterados; terrestreización de la composición de especies; área reducida de cubierta vegetal o forestal de ribera.
Sincronización	Turnos / Pérdida de caudales pico estacionales	Interrupción de las señales de desove; disminución de la reproducción y el reclutamiento; cambio en la estructura de la diversidad y el ensamblaje; reducción del reclutamiento de plantas ribereñas; invasión de especies exóticas de plantas ribereñas; reducción del crecimiento de las plantas y aumento de la mortalidad; reducción de la riqueza de especies.
Tasa de cambio	Variabilidad aumentada o reducida	Aumento de infecciones y enfermedades; disminución de la germinación, supervivencia y crecimiento de las plantas; disminución de la abundancia y cambio en el conjunto de especies; disminución de la riqueza de especies; aumento de la abundancia de algunos taxones de macroinvertebrados.

### 3.7 Análisis de las condiciones actuales de drenaje sobre el río Tejar

La cuenca del río Tejar en su parte baja esta propensa a fenómenos de desbordamientos debido a las crecientes. Estas condiciones deben ser controladas, teniendo en cuenta la futura expansión del casco urbano del municipio de Chocontá. A partir del diagnóstico del drenaje actual del río Tejar, es posible establecer el tipo de medidas a realizar para mejorar sus condiciones de drenaje, partiendo del alto deterioro

que ha sufrido su alineamiento debido a continuos cambios de su posición e invasión de la ronda hídrica producto de la expansión de cultivos y zonas de pastoreo.

Para el diagnóstico de las condiciones actuales se recurre al uso de modelos hidráulicos como lo es el caso del modelo Hec-Ras y el modelo Iber, siendo limitante para el uso de los mismos la extensión de la superficie generada a partir de los levantamientos topográficos. En la *Figura 13* se muestran la superficie generada a partir de los levantamientos topográficos realizados en el sitio de estudio.

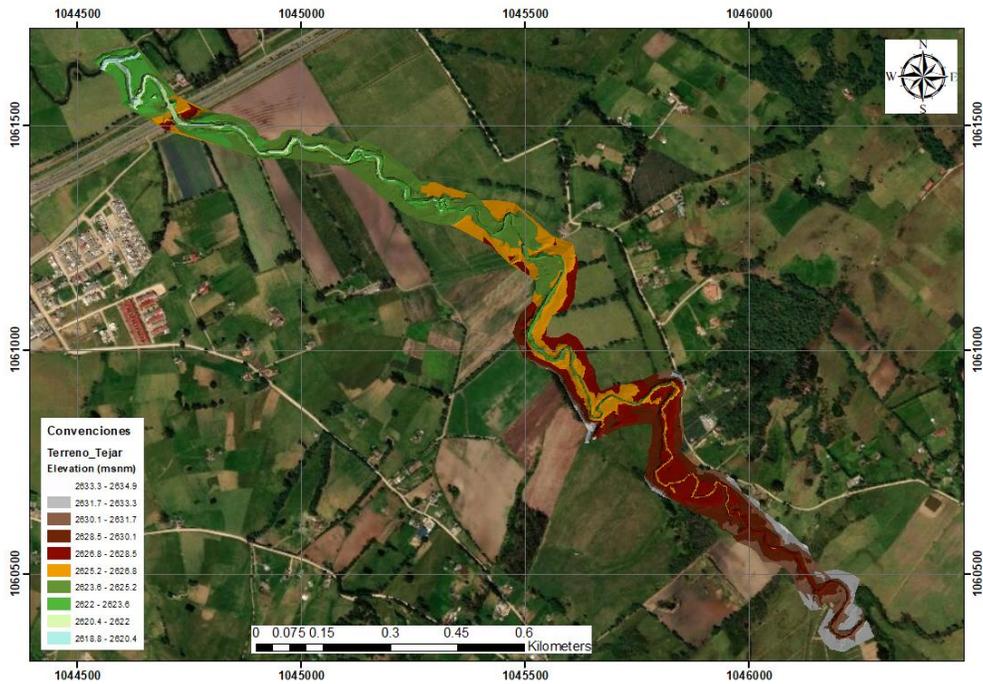


Figura 13. Superficie topobatimetrica del Rio Tejar.

Fuente. Autora, 2020

Utilizando esta superficie y partiendo del criterio de bidimensionalidad del comportamiento de la lámina de agua una vez de produzcan condiciones de desbordamiento, se realizó una modelación hidráulica utilizando el software Iber que aplica ecuaciones de Saint Venant para aguas someras para calcular los parámetros hidráulicos mediante un esquema de volúmenes finitos, el cual presenta ventajas en comparación con los modelos unidimensionales dada su estabilidad numérica.

El modulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. Se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_y)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$(8)$$

$$\frac{\partial(hu_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_xu_y)}{\partial y} = -gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_0) - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fu_y + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy})$$

$$\frac{\partial(hu_y)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_y^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_xu_y)}{\partial y} = -gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_0) - \frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho} + fu_x + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) \quad (9)$$

Para la construcción del modelo se generó una malla del tipo RTIN (Red Irregular de Triángulos Rectángulos), la cual es del tipo no estructurada. Para la construcción de la malla se realizó un proceso de aligeramiento mediante la eliminación de los elementos que permanecen secos para un caudal superior al esperado para un periodo de retorno de 100 años. La cantidad final de elementos del modelo de diagnóstico posterior al aligeramiento es de 140127. Con esta malla se realizó posteriormente el análisis del diagnóstico de las condiciones actuales de hábitat acuático en el sitio de estudio. En la Figura 14 se muestra el detalle de la malla tipo RTIN aligerada generada en el sitio de estudio.

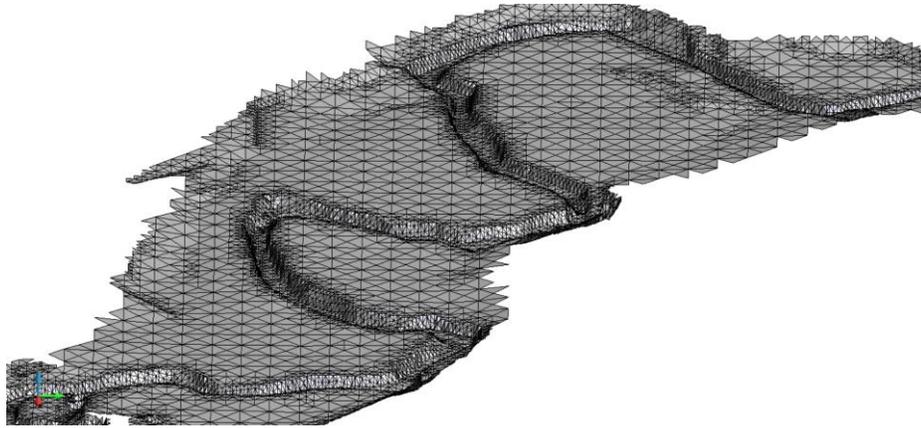


Figura 14. Detalle de la malla RTIN en la condición actual del Rio Tejar

Fuente: Autora 2020.

### 3.7.1 Condiciones de frontera

La ejecución del modelo hidráulico requiere la asignación de condiciones de frontera de entrada y salida. En el caso de las condiciones de entrada, corresponde al caudal mayorado para un periodo de retorno de 100 años, el cual, para el caso de estudio corresponde a 23.5 m<sup>3</sup>/s. Debido a que este caudal corresponde a un pico instantáneo, es decir, el pico del hidrograma de crecientes, se utilizará la herramienta *Caudal Escalonado* la cual ha sido implementada en las versiones más recientes de Iber para simular las condiciones de flujo permanente con el propósito de reducir los tiempos de cálculo.

Las condiciones de frontera a la salida corresponden para el caso de estudio se asignaron del tipo *Curva de Gasto*, las cuales establecen una relación entre el caudal de salida y la elevación lámina de agua asociada en el contorno final del modelo hidráulico. En la Figura 15 se observa la curva de gasto asignada a la salida del modelo hidráulico.

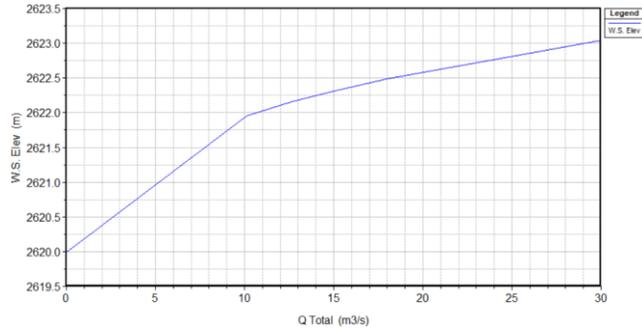


Figura 15. Condición de frontera a la salida del modelo hidráulico, tipo curva de gasto

Fuente: Autora 2020.

Una vez realizada la simulación para la condición actual del cauce de estudio, se obtuvo la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

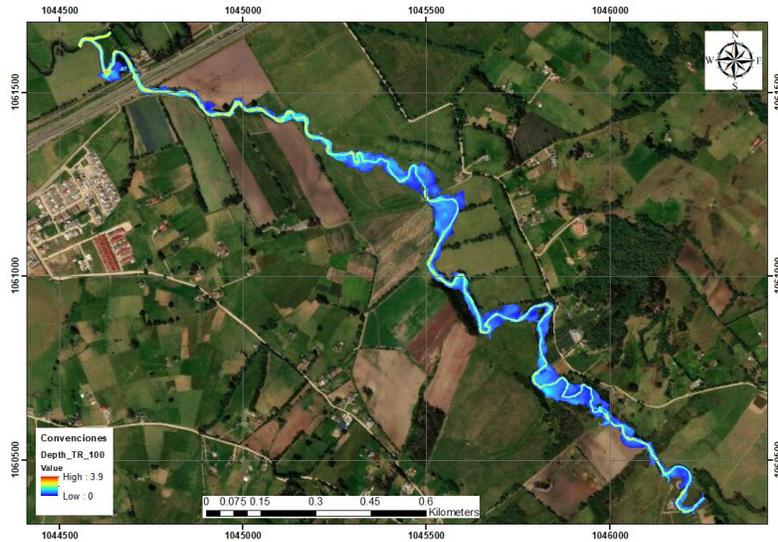


Figura 16. Inundación para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Autora 2020.

Es de aclarar que la extensión de la mancha es mucho mayor debido a las limitaciones propias de los levantamientos topográficos, por lo que la extensión de la mancha del modelo no podrá ser mayor a la extensión del levantamiento. Con el fin de validar este hecho, se generó una sección transversal en la zona de desbordamientos, en la cual se muestra la lámina para éste periodo de retorno y la extensión de los levantamientos topográficos. En la Figura 17 se observa la sección transversal en la zona inundable para un periodo de retorno de 100 años.

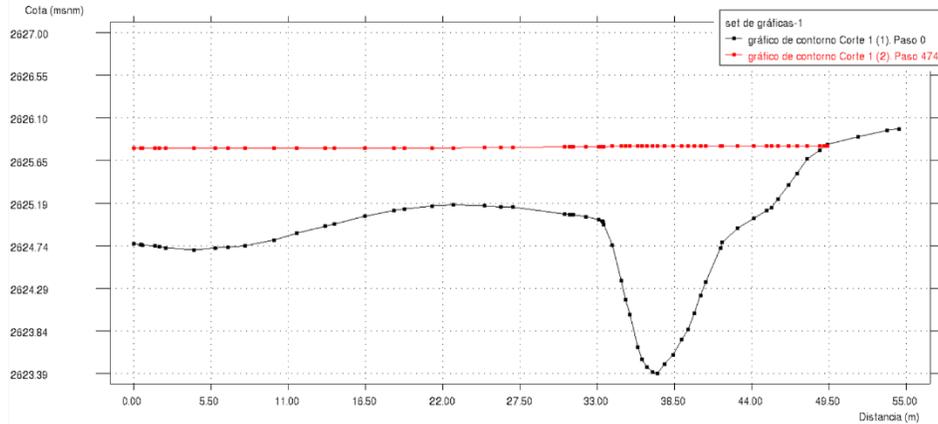


Figura 17. Sección transversal zona inundable  
Fuente: Autora 2020

### 3.8 Relaciones de caudal y ecología

El software Indicadores de Alteraciones Hidrológicas (IHA), por sus siglas en inglés fue desarrollado por The Nature Conservancy (TNC) como una herramienta para calcular las características de los regímenes hidrológicos naturales y alterados. En este caso emplea la información de los registros de caudales medios diarios de la estación limnimétrica de la CAR, Puente de Chocontá, con el propósito de comprender y manejar los cambios del régimen de flujo en la subcuenca de estudio, para ello IHA calcula parámetros para cinco tipos de componentes del caudal, caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones.

Esta delimitación se basa en investigaciones realizadas por ecólogos a los hidrogramas de los ríos, que evidencian que estos pueden dividirse en un conjunto de modelos hidrográficos ecológicamente relevantes que se repiten y que deben mantenerse para conservar la integridad ecológica del río (The Nature Conservancy, 2011). En este sentido, no solo es esencial mantener caudales adecuados durante los periodos de caudal bajo, sino también los caudales más altos y las inundaciones que cumplen funciones ecológicas importantes, a continuación, se describen con más detalle las clasificaciones de flujo empleadas por IHA, de acuerdo con la información de caudales medios diarios de la estación Puente Chocontá.

Tabla 8. Rangos de clasificación de caudal para la estación Puente de Chocontá.

Clasificación de caudal	Clasificación de caudal (m <sup>3</sup> /s)
Caudal extremadamente bajo	0 -0.05
Caudal bajo	0.05 -0.89
Pulso de caudal	0.891 -5.472
Pequeña inundación	0.901 -8.409
Gran inundación	0.923 – 17.87

### 3.8.1 Caudales bajos

Ésta es la condición de caudal dominante en la mayoría de los ríos. En los ríos naturales, después de un evento de precipitación y después de que la escorrentía de superficie proveniente de la captación relacionada con estos eventos ha disminuido, el río retorna a su nivel de flujo de base o caudal bajo. Estos niveles de caudal bajo se mantienen por la descarga de agua subterránea en el río. Los niveles de caudal bajo de un río, que varían con la estación, imponen una restricción fundamental a las comunidades acuáticas del río porque determinan la cantidad de hábitat acuático disponible durante la mayor parte del año. Esto influye enormemente sobre la diversidad y el número de organismos que pueden vivir en el río.

### 3.8.2 Caudales extremadamente bajos

Durante los períodos de sequía, el caudal de los ríos alcanza niveles muy bajos, lo que puede ejercer presión sobre muchos organismos, pero puede proporcionar las condiciones necesarias para otras especies. La química del agua, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto en ella pueden volverse fuentes de gran presión para muchos organismos durante los caudales extremadamente bajos, al punto de que estas condiciones pueden causar una considerable mortalidad. Por otra parte, los caudales extremadamente bajos pueden concentrar presas acuáticas para algunas especies, o pueden ser necesarios para secar las áreas bajas de las planicies de inundación y permitir la regeneración de ciertas especies de plantas.

### 3.8.3 Pulsos de caudal alto

Cuando una tormenta produce precipitaciones abundantes, un río superará su nivel de caudal bajo. Por su parte, los pulsos de caudal alto incluyen cualquier crecimiento del agua que no sobrepase las riberas del cauce. Estos pulsos proporcionan interrupciones importantes y necesarias en los caudales bajos. Incluso una corrida de agua dulce breve o pequeña puede proporcionar un alivio muy necesario para las temperaturas altas del agua o los niveles de oxígeno pobres que caracterizan los períodos de caudal bajo y suministrar un aporte nutritivo de material orgánico u otro alimento para apoyar la red alimentaria acuática. Los pulsos de caudal alto también proporcionan un mejor acceso a las áreas corriente arriba y abajo a los peces y otras criaturas móviles.

### 3.8.4 Pequeñas inundaciones

Durante las inundaciones, los peces y otros organismos móviles pueden moverse corriente arriba, corriente abajo y a las planicies de inundación o a los humedales inundados para entrar a hábitats adicionales como cauces secundarios, remansos, ciénagas y áreas inundadas de poca profundidad. Estas áreas generalmente inaccesibles pueden proporcionar recursos alimentarios sustanciales. Las áreas inundadas de poca profundidad son generalmente más templadas que el cauce principal y están llenas de nutrientes e insectos que estimulan un crecimiento rápido en los organismos acuáticos. Según el uso que se da aquí, una “pequeña inundación” incluye todas las crecidas del río que sobrepasan el cauce principal pero no incluye inundaciones más extremas de menor frecuencia.

### 3.8.5 Grandes inundaciones

Las inundaciones extremas generalmente cambian la estructura biológica y física de un río y su planicie de inundación. Estas grandes inundaciones pueden literalmente empujar con el agua a muchos organismos, y de ese modo reducir muchas poblaciones, pero en muchos casos también pueden crear nuevas ventajas competitivas para algunas especies. Las inundaciones extremas también pueden ser importantes para formar hábitats clave tales como meandros abandonados y humedales en planicies de inundación.

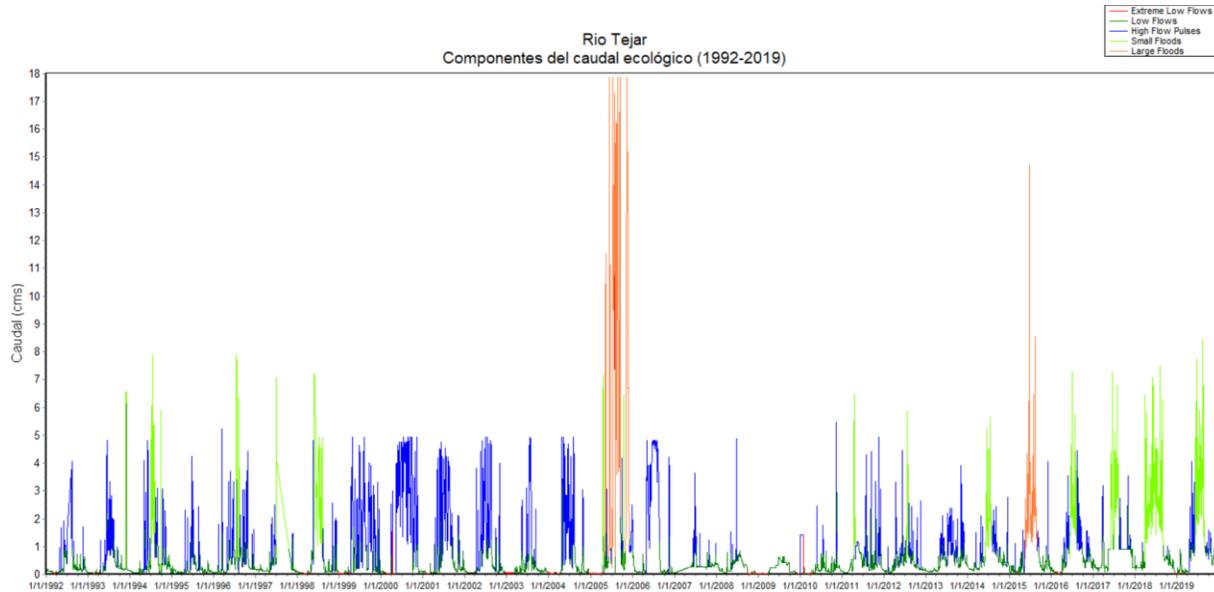


Figura 18. Clasificación de caudales del Río Tejar, empleando el software IHA  
Fuente: Autora 2020.

En la Figura 18, se observa la distribución de caudales de la estación Puente de Chocontá para las diferentes clasificaciones consideradas por TNC, en este caso, se evidencia que la serie de datos se distribuye con mayor frecuencia entre los caudales bajos y pulsos de caudal, condiciones que proporcionan una dinámica para el crecimiento y establecimiento de especies a lo largo del río.

### 3.9 Suelos

Cundinamarca es uno de los departamentos de Colombia con mayor biodiversidad en su territorio, de igual manera se encuentran todos los pisos térmicos y ecosistemas del país, con excepción de selva; factores que han llevado a que la mayoría del territorio departamental haya sufrido de sobre explotación por parte de diversos productores, la mayor explotación presente en el territorio es el de la ganadería, actividad llevada sin control a través de casi un siglo, la segunda actividad que ha explotado de manera desmedida los recursos naturales es la agricultura tradicional, la que en conjunto con la ganadería se ha extendido desde la ronda de los diferentes afluentes hídricos, lénticos y corrientes, hasta los páramos y todos los otros ecosistemas presentes en su recorrido, esta sobre explotación del suelo ha generado una degradación constante del recurso, a tal medida que en muchos casos la estructura original del suelo ha cambiado por completo (CAR, 2015).

El municipio de Chocontá se encuentra ubicado en el piso altitudinal Andino, dentro del denominado Altiplano Cundiboyacense, con alturas sobre el nivel del mar entre los 2.700 y 3400 metros correspondiente a los climas muy frío y subparamo y frío del piso Andino, que condiciona el uso actual del suelo.

La mayor parte del territorio del Municipio de Chocontá es montañoso, por pertenecer a la Vertiente Occidental de la Cordillera Oriental, pero también cuenta con extensas zonas planas principalmente en las proximidades al Río Bogotá. A continuación, se describen las categorías correspondientes a la zona de estudio.

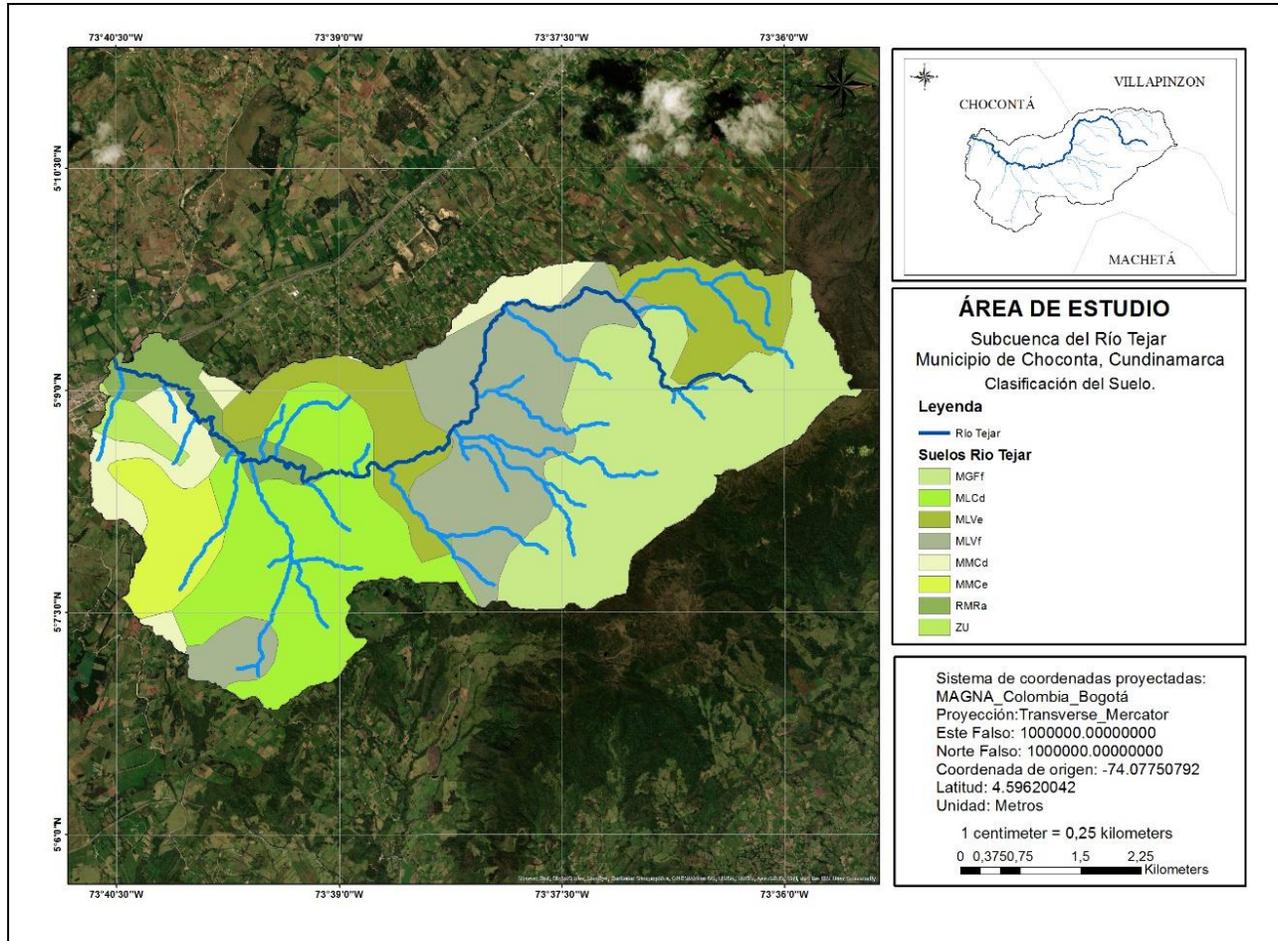


Figura 19. Mapa de leyenda fisiográfica pedológica, Rio Tejar  
Fuente. Autora 2020

Tabla 9. Leyenda fisiográfica pedológica Rio Tejar (*Ecoforest Ltda* , 2005).

Unidad climática	Gran paisaje	Paisaje y material litológico	Subpaisaje	Características de las geoformas	Principales características de los suelos		Unidades cartográficas y contenido pedológico				
					Tipo	Clase	Nombre de la unidad	Subgrupo	Perfil No	%	Símbolo
Muy frío muy húmedo	Montaña estructural erosional	Crestones homoclinales rocas clásticas arenosas y limoarcillosa	Laderas estructurales y erosionales	Laderas moderadamente escarpadas caracterizadas por frecuente presencia de deslizamientos y erosión hídrica laminar ligera en sectores	Suelo Rural	Bien a excesivamente drenados- profundos a superficiales limitados por contacto con material rocoso coherente y de grupo textural fino a moderadamente grueso	Consociación	Andic Dystrudeptsfamilia franca finamezclada- isofrígida	CU-126	75	MGFf
Frío seco	Montaña estructural erosiona	Lomas en rocas clásticas limo arcillosas	Laderas erosionales	Laderas ligeramente empinadas caracterizadas por frecuentes deslizamientos sectorizados	Suelo Rural	Bien drenados- de texturas medias a moderadamente finas y de evolución baja	Consociación	Humic Dystrudeptsfamilia franca finamezcladaisoméica	CC-230	80	MMCd
	Planicie aluvial	Terrazas en depósitos clásticos hidrogénicos	Plano de terraza	Áreas planas- afectadas en sectores muy aislados por encharcamiento poco frecuentes	Suelo Rural	Moderadamente bien drenados- profundos y de texturas finas	Consociación	Humic Dystrudeptsfamilia finamezcladaisoméica	CU-132		70
Frío húmedo		Crestas homoclinales	Laderas estructurales	Laderas fuertemente escarpadas caracterizadas	Suelo Rural	Bien drenados- de texturas	Consociación	Typic Eutrudeptsfamilia	CC-94	70	MLVe

	Montaña estructural erosional	en rocas clásticas limoarcillosas y depósitos de ceniza volcánica	y erosionales	por frecuente presencia de deslizamientos y erosión hídrica laminar ligera en sectores Laderas ligera a moderadamente escarpadas caracterizadas por frecuentes deslizamientos sectorizados		moderadamente finas a moderadamente gruesas y profundos a superficiales limitados por mantos de roca dura y coherente Profundos a superficiales limitados por contacto con el manto rocoso-bien a moderadamente bien drenados y de texturas finas a moderadamente gruesas		franca finamezclada isomésica Humic Lithic Eutrudepts- familia franca finamezclada isomésica	CC-307		MLVf
Otras áreas					Zona de expansión						Zu

Tabla 10. Categorías de uso de suelo, Chocontá, Cundinamarca. Fuente: (Municipio de Chocontá, 2007)

Nombre	Descripción	Uso actual
<i>Tierras en vegetación natural y exótica</i>	Comprende todas aquellas áreas del paisaje original del Altiplano que aún no han sufrido desaparición total.	
<i>Vegetación graminoide de paramo y subparamo –Vpa</i>	La mayor parte del territorio de Chocontá es montañoso, en donde predomina una vegetación especial que crece en las partes más altas escarpadas entre los 2800 y 3400 m.s.n.m de elevación aproximadamente; este tipo de vegetación se encuentra sobre los costados Oriental y Sur del área municipal, especialmente sobre la Cuchilla El Choque, en las veredas Soatama, Retiro de Blancos, Boqueron y Tilatá, en donde dominan los pajonales de gramíneas de <i>Calamagrostis effisa</i> y <i>Festuca</i> .	A medida que se desciende de los 3.400 hacia los 2.800 metros, aparecen los frailejones ( <i>Espeltia</i> spp), chusque ( <i>Chusquea scandens</i> ) y los cardos ( <i>Puya</i> sp), como una vegetación paramuna de tipo herbácea y arbustiva de bajo porte y de vistosos colores, que se desarrolla en un ambiente muy húmedo y bajas temperaturas, muy importantes para la retención del agua.
<i>Bosque primario intervenido Bpi</i>	Este tipo de vegetación nativa está localizada en las partes inaccesibles de la región montañosa, como últimos remanentes de bosque de gran importancia ecológica, están localizados a lo largo de la vertiente sobre relieves quebrado, escarpado y muy escarpado, con pendientes de 25-50-75% y mayores, entre los 2700 y 3000 m.s.n.m aproximadamente, en los costados Nororiental al Sur del municipio. El bosque natural se encuentra en las veredas Soatama, Chingacio, Retiro de Blancos, Retiro de Indios, Boqueron y Tilatá.	La vegetación está constituida por árboles y arbustos correspondiente al bosque Andino de bajo porte de las especies encenillo ( <i>Weinmannia tomentosa</i> ), aliso ( <i>Almus acuminata</i> ), arrayán <i>Myrcianthes leucoxla</i> ), tuno ( <i>Miconia bixifolia</i> ), chusque ( <i>Chusquea scandens</i> ), gaque ( <i>Clusia multiflora</i> ), árbol loco ( <i>Polimnia</i> sp), cerezo ( <i>Prumes serótina</i> ), angelito ( <i>Bucquetia glurinoso</i> ) y nogal ( <i>Juglans neotropica</i> ) y mortiño ( <i>Vaccinium myrtilloides</i> ), entre otras. Estas masas boscosas se encuentran principalmente sobre la cima y laderas de la Cuchilla El Choque y Cerro de las Tres Viejas.
<i>Rastrojo Alto o matorral Alto –Ra</i>	Son áreas de vegetación natural tipo arbustiva, desarrollada en zonas de relieve plano a escarpado con pendientes 0 a 50% y más, en donde ha habido tala total del bosque primario y se encuentra en las etapas finales de la sucesión vegetal, hacia el bosque maduro. Se distribuye en casi toda el área, pero mayormente en las zonas montañosas, en los costados Sur y Suroriental del municipio, en las veredas Boquerón y Tilatá.	Este tipo de vegetación está compuesta por algunas de las siguientes especies de Familias: Euphotbiaceae, Ericaceae, Polipodiaceae, Gramininae y Melastomataceae: Sangregao ( <i>Croton funcckiamus</i> ), higuera ( <i>Ricinus communis</i> ), pegamosco ( <i>Befaria resinosa</i> ), chusque

		(Chusquea scandens), mangle de tierra fría ( Escallonia pendula) y tuno rojo (Tibouchina grossa) entre otras.
<i>Rastrojo bajo o matorral bajo –Rb</i>	Son áreas relativamente pequeñas de vegetación natural herbácea y arbustiva que crece en los primeros estados del bosque, después de haber sido abandonado el cultivo agrícola. Se localiza en suelos de relieve plano a escarpado, con pendientes 0-25-50% y mayores, especialmente en la zona montañosa, en los sectores Oriental y Centro oriental del municipio, en las veredas Soatama, Boqueron y Tilatá.	Está compuesta por algunas de las siguientes especies: cilco (Bacharis sp), chusque (Chusquea scandens), angelito (Bucquetia resinosa) y romero de paramo (Diplostegium rasmarinifolium) entre otros.
<i>Plantaciones Forestales</i>	Constituyen áreas reforestadas con especies exóticas y nativas de pino (Pinus patula, Pradiata) cruoes (Cupressys spp), eucalipto (Eucalyptus globulus), acacia (Acacia melonoxylon A, decurrens) y aliso (Alnus acuminata), en suelos de vocación forestal de relieve ondulado a escarpado, con pendientes 25-50 % y más. Estas reforestaciones se han hecho con fines de protección y producción y se hallan distribuidas en caso toda el área de estudio, pero con mayor intensidad en los costados Sur y Occidente de Chocontá.	Estas plantaciones han sido establecidas con la participación e interés de la comunidad, de entidades públicas y privadas, en gran parte, con fines de protección y en menor proporción, para la producción maderera, especialmente en zonas degradadas.

A continuación, se relacionan los diferentes usos que se desarrollan en el área de estudio:

*Tierras agrícolas y ganaderas:* La principal actividad económica del municipio de Chocontá la constituyen los cultivos de papa, maíz, arveja, hortalizas y fresa, que alternan con una ganadería tipo extensiva, que se concentra en pequeñas áreas hacia la producción de leche principalmente.

*Áreas en agricultura y ganadería (AG):* Son extensas áreas esencialmente ocupadas por pequeñas parcelas en cultivos intensivos comerciales o no en más de un 60% del área dedicada en agricultura y ganadería y el resto, en pastos. El área dedicada a esta actividad se encuentra localizada sobre los 2.700 y 3.400 m.s.n.m aproximadamente, en casi toda el área del municipio, principalmente en suelos de relieve plano, ondulado a quebrado, en pendientes que varían entre 0-25 -50-75% y mayores. En estas áreas se cultiva principalmente para, maíz, hortalizas y fresa, generalmente no tecnificada

*Tierras en pastoreo:* Esta actividad constituye un renglón muy importante en la economía de Chocontá, en cuanto a la ganadería de leche, seguida de la agricultura intensiva. Las razas lecheras utilizadas en el área son Holstein, Normando y Criollo.

*Áreas en pasto (P):* Son zonas dedicadas a pastoreo de ganadería extensiva, con gramíneas y leguminosas forrajeras en más de un 80% del área, localizadas por encima de los 2700 m.s.n.m distribuido en casi toda el área del municipio. En estas áreas se manejan pastos mejorados y naturales como el kikuyo, ray grass, azul y orchoro, entre otros.

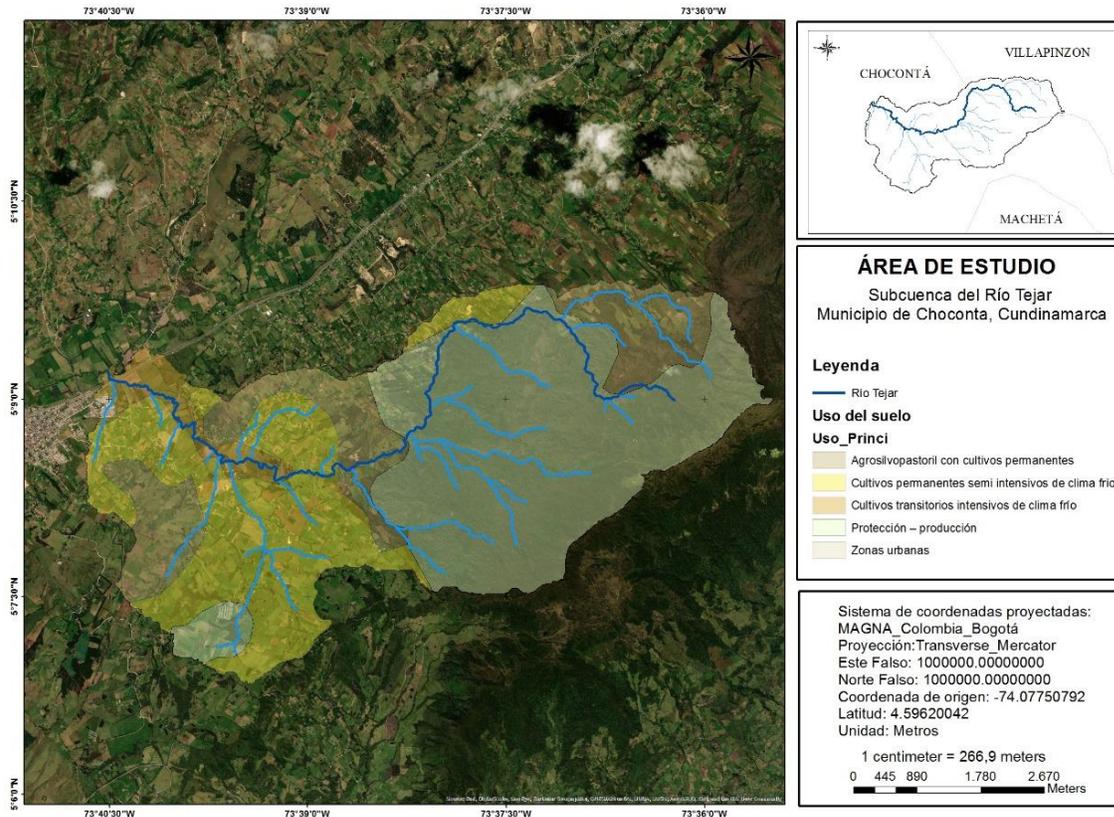


Figura 20. Clasificación de suelos, subcuenca del Río Tejar

Fuente: Autora 2020

### 3.10 Características morfológicas

El Río Tejar es un río meándrico ya que posee una serie de curvas, que le dan al cauce, visto en planta, forma de S. El continuo trabajo de erosión y deposición de materiales en los sistemas fluviales de media y baja energía definen la formación de meandros, que son estructuras dinámicas que varían su trazado en función del caudal que el sistema transporta.

En esta dinámica de continua formación del meandro, la vegetación riparia y animales que habitan en la orilla o en el lecho fluvial son alimentados, transportados o capturados, en un proceso continuo que se reinicia con cada cambio apreciable de flujo. Para el caso del río Tejar, la relación entre la longitud del

cauce principal ( $L_t$ ) la longitud del valle ( $L_v$ ) por la cual discurre dicho cauce ( $S = L_t/L_v$ ) (Rodríguez Díaz, 2010), es de 1.6, que refiere a una condición de sinuosidad.

En este tipo de cauces existe una relación fundamental entre el ancho del cauce con la longitud del meandro y el radio de curvatura. Los ríos meandricos se caracterizan por presentar depresiones o pozos bien definidos que se conocen como barras de punta y constituyen principal característica de la sedimentación fluvial.

Cuando se presentan meandros en corrientes que discurren sobre material aluvial sin controles geológicos se puede observar que los flujos altos erosionan la banca cóncava (exterior de la curva) y el lecho se profundiza. Al mismo tiempo, el material erosionado se deposita aguas abajo, formando una barra de punta en el siguiente cinturón en la zona de la orilla convexa.



Fotografía 1. Erosión lateral de la margen del Río Tejar

Dentro de las características generales para el patrón de cauce sinuoso, se encuentra que, las bancas son relativamente menos cohesivas que para el caso de canales sinuosos de ancho uniforme. Las alturas de los bancos van de moderadas a altas. Comúnmente se presentan los diques naturales en el lado cóncavo de las curvas (Rodríguez Díaz, 2010) y los sedimentos son transportados en forma suspendida.

Esta clasificación se basa en gran medida en la carga de sedimentos porque, a partir de ésta, se determina la estabilidad del cauce, el perfil y la sinuosidad. Se definen tres clases de canales: estables, erosionados y sedimentables, y entonces se establecen tres subclases con base en el modo predominante del transporte de sedimentos, carga de fondo, carga mixta y carga en suspensión.

Tabla 11. Características cualitativas de un segmento de lecho plano, Rio Tejar

Lecho plano	Material típico del lecho	Se observan en segmentos con pendiente moderada. El material del lecho contiene rocas y arena, pero no posee con mayor frecuencia gravas y guijarros. No desarrollan formas características como en los sistemas escalón –pozo cascada	 <p>Fotografía 2. Rio Tejar, segmento de lecho plano</p>
	Respuesta hidrológica	Por tener pendientes bajas, su respuesta hidrológica no es torrencial como aquella en sistemas de mayor pendiente.	

Tabla 12. Características cualitativas de un segmento del sistema pozo –cruce, Rio Tejar.

Pozo - cruce	Material típico del lecho	Es común encontrar en las zonas de menor curvatura gravas y material grueso. En tanto que en las zonas de mayor curvatura pueden encontrarse arenas y, en general, material más fino que en los cruces.
	Respuesta hidrológica	Su respuesta es lenta ya que generalmente posee llanuras inundables anchas que amortiguan las crecientes que vienen desde aguas arriba.



Fotografía 3 Rio Tejar, segmentos de sistema pozo -cruce

### 3.11 Obras de infraestructura

En el Río Tejar, antes de la confluencia con el Río Bogotá, existe un puente de doble calzada que comunica la ciudad de Bogotá con Tunja, como consecuencia, esta infraestructura altera los grados de libertad del cauce, adicionalmente se observa sedimentación en el centro de la sección, que propicia los procesos de socavación en la base de la estructura, para la modelación hidráulica esta estructura es considerada a partir de la topografía base.



Fotografía 4. Puente, vía Bogotá - Tunja, ubicado cerca de la descarga del Río Tejar  
Fuente: Autora 2020

### 3.12 Otras actividades

Durante la inspección en campo de la zona de estudio, se evidenciaron algunos de los cultivos característicos (cultivos de papa, hortalizas y fresa) y actividades de ganadería que generan presión sobre el Río Tejar, ya que parte de los predios ubicados cerca de la ronda hídrica, captan agua a través de motobombas para su riego.

Estos elementos afectan de forma negativa tanto la calidad del agua por el uso de agroquímicos, como el régimen de caudales, situación que puede ser crítica cuando se presentan caudales bajos en el Río Tejar.



Fotografía 5. Cultivos de fresa y pastizales  
Fuente: Autora 2020



Fotografía 6. Captación de agua  
Fuente: Autora 2020

### 3.13 Información hidrobiológica

La composición y estructura taxonómica de cada comunidad hidrobiológica se encuentran directamente relacionada con el régimen de caudal y son factores clave en el establecimiento de la línea base frente a cualquier cambio en las condiciones iniciales del régimen. De esta forma, todos los organismos o comunidades, incluyendo algas, macro-invertebrados acuáticos, peces, vegetación riparia y macrófitas, son elementos potenciales en la respuesta de las alteraciones en el flujo, ya sea a nivel individual o colectivo, y las respuestas que estos emitan pueden ser traducidas numéricamente en los cambios a través del tiempo en métricas sencillas como la riqueza, abundancia, densidad o biomasa y diversidad.

Colombia posee una de las ictiofaunas dulceacuícolas de mayor diversidad del mundo y muchas de las especies tienen algún tipo de importancia (Mojica et al., 2002). Esta gran diversidad está relacionada con la topografía del territorio colombiano, atribuido principalmente al levantamiento de los Andes apareciendo los grandes ríos que drenan los suelos arrastrando sedimentos más fértiles provenientes de la cordillera formando planicies aluviales, sujetas a inundaciones periódicas. La fertilidad de las aguas dispuso una enorme y variada oferta alimenticia, que generó una multitud de hábitat que dio lugar a nuevas especies (Galvis et al., 1997). Entre los grupos más sobresalientes de Colombia y con la mayor representación de especies están los Characiformes, Siluriformes y Perciformes (CAR, 2012).

A pesar de esta situación, los estudios de la Ictiofauna en el país son limitados, en particular en ríos de pequeña escala, como es el caso del Río Tejar, dentro de las especies encontradas en el municipio de Chocontá se encuentran documentada la familia pseudothelphusidae (cangrejos continentales) y la especie en vía de extinción *Eremophilus mutisii* o Pez Capitán, especie nativa de Cundinamarca, que fue uno de los principales alimentos de los pobladores de los municipios de Suesca, Guasca y Tominé. (CAR, 2018).

Para la determinación de las diferentes comunidades hidrobiológicas del Río Tejar, el día 7 de marzo de 2020, se seleccionó un punto de muestreo que comprendió un tramo de aproximadamente 20 de metros de longitud. El lecho del río está conformado por un sustrato combinado entre limo, grava y rocas de tamaño que oscilan entre 2 y 50 cm de diámetro aproximadamente. En este mismo tramo se logró la captura de un alevín de la especie *Oncorhynchus mykiss*, nombre común trucha arcoíris, su caracterización se realizó con base en la literatura y la información suministrada en campo por la población que habita la zona.

Para la determinación de las diferentes comunidades hidrobiológicas del Río Tejar, el día 7 de marzo de 2020, se seleccionó un punto de muestreo que comprendió un tramo de aproximadamente 20 de metros de longitud. El lecho del río está conformado por un sustrato combinado entre limo, grava y rocas de tamaño que oscilan entre 2 y 50 cm de diámetro aproximadamente. En este mismo tramo se logró la captura de un alevín de la especie *Oncorhynchus mykiss*, nombre común trucha arcoíris, su caracterización se realizó con base en la literatura y la información suministrada en campo por la población que habita la zona.



Fotografía 7. Comunidad de algas del Río Tejar  
Fuente: Autora 2020



Fotografía 8. Muestra de alevín de *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris) capturada en campo  
Fuente: Autora 2020

### 3.13.1 Rasgos biológicos de *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris).

En 1938, el pez *Oncorhynchus mikiss*, fue introducido en Colombia por clubes de pesca, principalmente en el lago de Tota (Boyacá), en la laguna de Chingaza y en el embalse del Neusa (Cundinamarca). Después, tuvo una aceptación económica y se convirtió en pez de cultivo (Agencia de noticias Universidad Nacional, 2014).

La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mikiss*) es un salmónido que presenta cuerpo alargado, fusiforme y cabeza que termina en una boca grande puntiaguda, hendida hacia el nivel de los ojos y con una fila de dientes fuertes en cada una de las mandíbulas que le permiten aprisionar las presas. *Oncorhynchus* significa nariz ganchuda, característica que se manifiesta con mayor énfasis en los machos en la época de reproducción. En el trópico, como especie foránea, la trucha arcoíris tuvo éxito, a pesar de mostrar signos de mal nutrición. La trucha fue introducida a los sistemas de alta montaña sin desarrollar estudios ecológicos suficientes, ya que se tuvo en cuenta solamente la temperatura promedio del agua tanto en el trópico como en la zona templada, y no variables ecológicas como el factor determinante de tipo biológico (Castellanos & Donato, 2004).

Posteriormente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial a través de la Resolución 848 de 2008, declaró al pez *Oncorhynchus Mykiss* como una especie exótica de carácter invasor, que corresponde a aquellas que han sido capaces de colonizar efectivamente un área en donde se ha interrumpido la barrera geográfica y se han propagado sin asistencia humana directa en hábitats naturales o seminaturales y cuyo establecimiento y expansión amenaza los ecosistemas, hábitats o especies con daños económicos o ambientales (MAVDT, 2008).

El establecimiento de especies exóticas ha roto el aislamiento genético de comunidades de especies de plantas y animales que estaban coevolucionando. Dicho aislamiento ha sido esencial para la evolución y el mantenimiento de la diversidad de plantas y animales que componen la riqueza biológica de nuestro planeta. La perturbación de ese aislamiento con especies exóticas ha interferido con la dinámica de los sistemas naturales, causando la extinción prematura de especies, a despesa de especies de plantas y animales particularmente exitosas y agresivas, que han pasado a dominar de manera creciente grandes áreas, luego de haber reemplazado la variedad de comunidades autóctonas (Gutiérrez , 2006). Sin embargo, es importante resaltar que en los sistemas acuáticos los peces desempeñan un papel ecológico importante en la transformación, intercambio, almacenamiento y regulación energética, dado que son los encargados de mover la energía en el medio acuático de niveles tróficos inferiores a niveles tróficos superiores (Villalba, 2009).

### 3.13.2 Descripción taxonómica *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris).

La trucha presenta una primera aleta dorsal, formada por radios, y una segunda dorsal formada por un repliegue epidérmico sin radios y que es común en todos los peces pertenecientes a la familia de salmónidos. (Rodríguez, 1992). La trucha posee un fuerte sistema muscular en su mayoría conformado por músculo rojo, que le permite realizar movimientos ondulantes del cuerpo que contribuyen a disminuir la fricción con el agua, es decir aumentan la hidrodinámica, y a su vez le permite deslizarse por el agua con la menor resistencia posible al avance (Mora & Barrera, 2015).

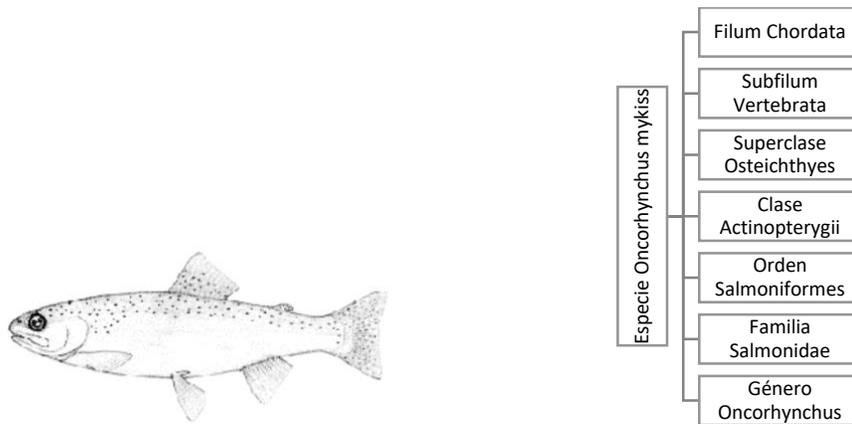


Figura 21. Jerarquía taxonómica  
Fuente (Salamanca, 2020).

### 3.13.3 Aspectos ecológicos

La trucha arcoíris es una especie marina o de agua dulce, bentopelágica, anádroma, se encuentra a profundidades de 0 – 200 m y temperaturas de 10 – 24°C. Tiende a prosperar mejor en lagos fríos, arroyos y ríos. Se alimenta de una gran variedad de invertebrados acuáticos, terrestres y peces pequeños; cuando se encuentran en el mar se alimentan de peces y cefalópodos. El desove ocurre entre noviembre y mayo en el hemisferio norte y de agosto a noviembre en el hemisferio sur, para ello la hembra encuentra un lugar y

cava un hoyo, durante la excavación el macho comienza el cortejo. Tan pronto como se completa la fosa, la hembra cae en ella y es fecundada y puede producir de 700 a 4.000 huevos.

A nivel alimenticio la trucha es carnívora, con una dieta basada principalmente en invertebrados como larvas de insectos y peces de otras especies de menor tamaño, sin embargo, su dieta varía y se adapta según la disponibilidad de alimento y cambios ambientales que se presenten. La trucha aprovecha la mayor cantidad de luz diaria para capturar sus presas, por esta razón no presenta mucha actividad en la noche. Aunque en algunos casos cuando el suministro alimenticio es pobre, puede comer con escasa luz.

Estos organismos son grandes cazadores, dado que poseen una visión excelente y su boca provista de dientes no solo en la maxilar superior e inferior sino en el vómer y en el hueso palatino del paladar. Este pez presenta un estómago en forma de U con fuerte musculatura que puede distenderse cuando la comida es abundante. Entre el estómago e intestino se encuentran los ciegos pilóricos, utilizados para incrementar el área de esta parte del intestino, el resto del intestino consiste en un tubo liso y enrollado (Parker & Hasmell, 1987)

Sus presas pueden estar tanto en el fondo donde se alimenta principalmente de insectos, como en la columna de agua, en la que caza peces. También puede nadar hasta la superficie para atrapar un insecto ahogado o saltar fuera del agua para cazar otro tipo de insectos. La mayoría de los invertebrados que come la trucha son acuáticos, rara vez son terrestres. Los invertebrados acuáticos habituales de su dieta son insectos, los cuales pueden ser tales como los barqueros de agua (Corixidae) o terrestres como los escarabajos (Coleoptera) o solamente mientras duran sus estadios de ninfa, larva y pupa. Otros de los componentes de la dieta de la trucha son los moluscos acuáticos que comen en su mayoría son caracoles (Gasterópoda). Las preferencias que tienen por los crustáceos son más amplias, incluyen animales mayores como el cangrejo de río (Astacoidea), el camarón de agua dulce (Gammarus), la cochinilla de agua o chochinilla piojo (Asellus), crustáceos microscópicos en su mayoría como Copépoda y Cladópera, que se encuentran en aguas tranquilas donde forman parte del zooplancton. Otros tipos de invertebrados acuáticos que come la trucha son “gusanos” incluidos los anélidos (Oligochaeta), gusanos planos (Turbellaria) y sanguijuelas (Hirudinea), también se alimenta de huevos de otras especies de peces, así como de anfibios (Castro, Forero, & Guillot, 2004).

#### 3.13.4 Comunidades de macroinvertebrados

Los macroinvertebrados bentónicos constituyen una comunidad que habita los diferentes sustratos en un río (Allan, 1995). Su dinámica poblacional depende más de las perturbaciones (cambios hidrológicos) que de interacciones con otras poblaciones. De esta manera, los aumentos impredecibles del caudal o la descarga causan un lavado en los sustratos, los cuales quedan disponibles para la colonización de nuevas comunidades. En las comunidades biológicas del río, la velocidad de la corriente es una propiedad definitiva que favorece a una considerable proporción de organismos (Allan, 1995). Sin embargo, el aumento desmedido en los volúmenes del caudal o descarga actúa como una perturbación para los macroinvertebrados acuáticos (Lancaster, 1999). Estos organismos han desarrollado adaptaciones morfológicas y de comportamiento que contrarrestan los efectos de la corriente y el caudal aún bajo la influencia de la heterogeneidad espacial y temporal.

Por otra parte, la disponibilidad y tipo de materia orgánica está relacionada con la distribución de los macroinvertebrados bénticos que tienen un papel importante en la transformación de la materia orgánica al acelerar el proceso de fragmentación y disgregación (Webster, Benfield, & Ehrman, 1999).

Se estima que las fluctuaciones de caudal pueden actuar como un factor importante en las comunidades del río, en términos generales, la amplitud del cauce y el caudal son dos variables que inciden en la abundancia de los macroinvertebrados, seguidas por el oxígeno, la temperatura y la profundidad.

Según estudios realizados en ríos de montaña, se estima que los géneros Ephemeroptera y Diptera se asocian con valores altos de velocidad de la corriente, caudal, profundidad, oxígeno y amplitud del cauce. Para Ephemeroptera usualmente se presentan las mayores abundancias durante la época de lluvias, lo cual puede estar relacionado con sus altos requerimientos de oxígeno. Por su parte, en el caso de Diptera, algunos se registran con abundantes en periodos de descarga alta (Donato, 2008). A continuación, se describen algunas especies que podrían estar presentes en el Rio Tejar, ya que son la base alimenticia de la trucha arcoíris, objeto de estudio en esta investigación.

Tabla 13. Dieta de la especie de estudio, nombre común trucha arcoíris.

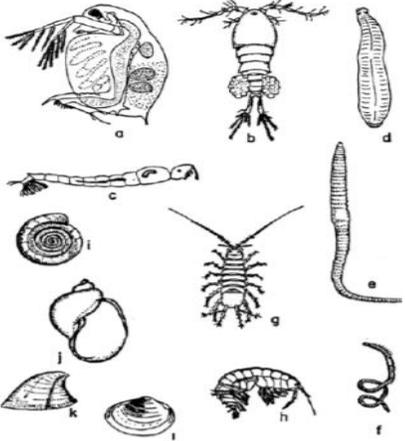
Invertebrados	Descripción
	<p>Zooplacton a-c: a) Cladocera Daphnia, b) Copepodo Cyclops, c) Larva del insecto planctonino Phnthon d) Sanguijuela, e) Gusano oligoqueto, F) Anélido tubulado, g) Cochinilla de agua, h) Camarón, i) Caracol de cuerno de morueco, j) Caracol errante, k) lapa de agua fulce, i) mejillón guisante</p>

Figura 22. Invertebrados que sirven de alimento a la trucha

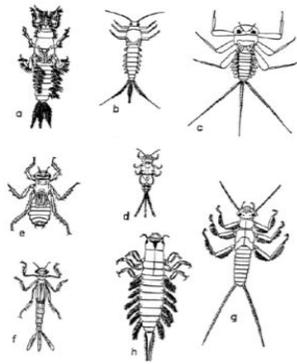


Figura 23. Invertebrados que se alimenta la trucha, larvas de insectos acuáticos

Ninfas de moscas de mayo a-d; a) Ephemera excavadora, b) Baetis nadadora, c) Ecdyonurus adherida a piedras, d) Caenis en el fango. Ninfas de libélula e-f principalmente domiciliadas en la vegetación, g) ninfa de la mosca de la piedra entre piedras, h) larva de la mosca del aliso que vive en el cieno.

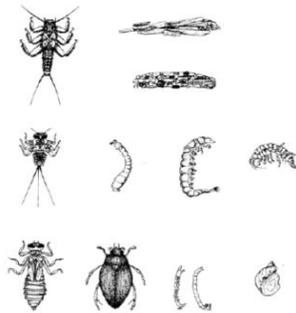


Figura 24. Principales macroinvertebrados bentónicos que constituyen la dieta de salmónidos

Principales tipos de macroinvertebrados bentónicos que constituyen la dieta de los salmónidos; pérlidos, tricópteros con canuto, efemerópteros, simúlidos, hydropsíquidos, gammáridos, libélulas, ditíscidos, quironómidos y gasterópodos acuáticos

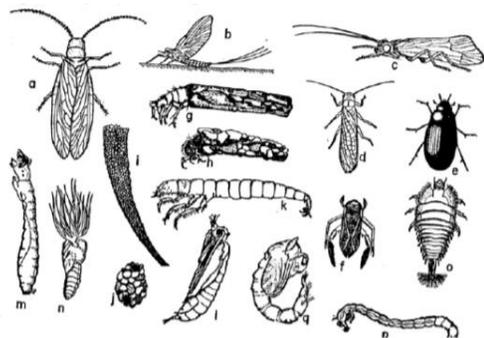


Figura 25. Invertebrados que constituyen la dieta de salmónidos

Invertebrados de los cuales se alimenta la trucha: insectos acuáticos adultos y larvarios. a) Mosca del aliso, b) Mosca de mayo, c) Frigánea d) mosca de la piedra e) escarabajo barqueo de agua. Larva de Frigánea estuches fabricados con: g) hojas cortadas y vegetación, h) piedras mezcladas, i) granos de arena, j) piedras, k) frigánea sin estuche, l) pupa de frigánea, m) y n) mosca negra de larva y pupa, o) larva de escarabajo habitante del musgo p) y q), mosca acuática larva y pupa

En cuanto al comportamiento de la trucha se considera un animal territorial, que es en una pequeña parte migratoria en el momento de la reproducción. Durante la mayor parte del año se encuentra en una zona definida y exclusiva, en la cual cada individuo posee un territorio. Este organismo vive en poblaciones dispersas y tiende a desplazarse de un lado a otro. En el medio natural el alevín a pocas horas de nacido empieza a comer, eligiendo un sitio determinado, que solo abandona para cazar o cuando quiere expulsar a otra trucha. Este territorio es principalmente un área de alimentación.

Existe competencia entre truchas de una misma edad, haciendo que exista una dispersión a lo largo del río, factores como la velocidad de la corriente obligan a la trucha a nadar cerca al fondo y los territorios son menores. Y otros como la existencia de vegetación, ayuda a que existan más territorios ya que hay más refugios y alimento. La superficie del territorio depende en gran medida por supuesto del tamaño del pez. Sin embargo, las truchas con mayor edad suelen tolerar en sus territorios a otras más jóvenes, lo que significa que varios grupos de edad pueden convivir en el mismo lugar.

Debido a sus características y dieta, sus impactos incluyen desplazamiento de especies de peces nativos, reducción de poblaciones, persistencia a largo plazo y cambios en la estructura de las comunidades de anfibios. Algunas de estas especies incluyen peces nativos de quebradas alto andinas de géneros como *Tricomycerus*, *Astroblepus*, *Eremophilus*, los cuales se han visto afectadas por la introducción de la trucha arcoíris. Se cree que esta especie fue la responsable de la extinción del pez graso o runcho (*Rhizosomichthys totae*) endémica de Colombia y que no ha sido reportada desde 1958 (Mojica, Castellanos, & Usma, 2020).

### 3.14 Calidad del agua

La calidad del agua es fundamental para las truchas, pues es el medio donde los peces se desarrollarán, así que conocer y mantener los parámetros del agua como: temperatura, oxígeno, turbidez, pH y amonio es de suma importancia para la producción. Dentro de estos parámetros, la temperatura del agua es fundamental pues regula el crecimiento de los peces, ya que estos no tienen capacidad propia para regular su temperatura corporal. Si la temperatura es muy baja el crecimiento es lento, a temperaturas más altas el desarrollo es más rápido. Otro parámetro que es afectado por la temperatura es el oxígeno disuelto en el agua, pues a temperaturas altas, el oxígeno disuelto es menor que a temperaturas bajas (FAO, 2014).

Tabla 14. Requerimientos de calidad del agua para la trucha arcoíris.

Oxígeno (ppm)					
Cuando su concentración es inferior a 5 mg/l, presenta signos de asfixia aparece mortalidad a concentraciones de 3 mg/l, por lo que sus necesidades no son constantes a lo largo del día y dependen de numerosos factores, entre ellos es, la temperatura y el peso de los peces	0 a 0.3	3.5 a 4.0	5.0 a 6.0	6.5 a 9.0	> 10.0
	Muerte Instantánea	Sufre gravemente estrés	Más o menos adecuadas	Óptima	Peligrosa
Temperatura ° C					

La temperatura del agua tiene una incidencia directa sobre los aspectos reproductivos de las truchas, el ritmo de crecimiento de los alevines y adultos, y especialmente sobre el grado de actividad metabólica	-11° C a 3° C	4° C a 8° C	9° C a 12° C	13° C a 16° C	17° C a 18° C
	Muerte	Crece muy lento	Ideal para reproducción e incubación (alevín 10-12° C)	Ideal para crecimiento y engorde (juvenil 16° C)	Estrés bajo de oxígeno
<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>					
Actúa como regulador de la actividad metabólica	4.0 – 5.0	6.0	7.0-8.0	9.0	10.0 -14.0
	Punto ácido de muerte	Óptimo Deseable: rango de reproducción de peces			Punto alcalino de muerte
<b>Dureza</b>					
Los rangos de dureza apropiados para el agua son de 60 – 300 ppm, los cuales permiten un mejor crecimiento de los peces	Agua blanda 0 - 30 ppm como CaCO <sub>3</sub>	Agua ligeramente dura 30 - 60 ppm como CaCO <sub>3</sub>	Agua dura 30-150 ppm como CaCO <sub>3</sub>	Agua muy dura mayores de 150 ppm como CaCO <sub>3</sub>	
<b>Nitritos – Nitratos y Fosfatos</b>					
Estos están considerados como principales nutrientes responsables de la productividad primaria del agua.	Nitrógeno de nitritos no mayor de 0.055 mg/l.	Nitrógeno de nitratos no mayor de 100 mg/l.	Nitrógeno amoniacal no mayor de 0.012 mg/l.	Fosfato más de 500 mg/l, no es recomendable	
<b>Amonio</b>					
Las moléculas de amoniaco no disociadas, son un gas negativo para los procesos de cría, son altamente tóxicos para el pez. Es una base débil, incluso en bajas concentraciones, el amoniaco puede causar hiperplasia branquial, no se recomienda un nivel superior a 0.02 mg/l (FAO, 2014). Su principal acción tóxica se debe a la irritación que produce sobre el delicado epitelio mucoso que recubre las branquias, donde tiene lugar los intercambios gaseosos entre el medio acuático y el pez					
<b>Alcalinidad</b>					
Se refiere a la presencia de ciertos aniones (carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos), los cuales causan que el agua sea alcalina o mantenga el pH alto (sobre 7), los carbonatos y bicarbonatos tamponan el agua; esto es que, tienden a mantener el pH constante. La alcalinidad total en sistemas de piscicultura debe ser mayor 25mg/l CaCO <sub>3</sub> (FAO, 2014).					

### 3.14.1 Evaluación de los parámetros de calidad del agua.

Esta evaluación se realizó a partir de los resultados obtenidos de los monitoreo y análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que realiza la CAR, distribuidos en dos campañas realizadas anualmente, la información reportada a continuación corresponde a los análisis realizados entre 2014 a 2019, para la subzona hidrográfica de la cuenca Alta del Río Bogotá, en la cual se localiza la Subcuenca del Río Tejar.

La *Tabla 15* presenta los resultados de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y métodos analíticos para el análisis de muestras del Río Tejar.

Tabla 15. Parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y métodos analíticos para el análisis de muestras, Rio Tejar

Parámetro	Unidades	Método Analítico (Ref. Estándar Métodos edición 21)	LCT/LCM	2014 -I	2014 - II	2015-I	2015-II	2016-I	2016-II	2017-I	2017-II	2018-I		2018-II		2019-I		2019-II	
Alcalinidad total	mg CaCO3 / L	Titulación potenciométrica (2320 B)	LCT	10	10	12	10.4	8.0	26.7	6.7	8.7	7.5	1.47	7.0	11.5	5.3			
DBO	mg O2 / L	Incubación a 5 días y Electrodo de Membrana, SM 5210 B, 4500-O G	LCM	2	<LCM	2.2	3.3	<LCM	12.7	<LCM	<LCM	2.7	2.8	<LCM	2.6	<LCM			
DQO	mg O2 / L	Reflujo Abierto (5220 B) Modificado-menor cantidad Reactivos	LCM	10	11.4	<LCM	17.1	12.3	16.3	13.8	<LCM	24.9	71.8	12.9	21.3	17.7			
Dureza total	mg CaCO3 / L	Cálculo (2340 B)	LCT		6.52	7.96	5.56	6.37	8.53	1.61	2.37	7.30	20.0	8.15	17.77	7.23			
N- amoniacal	mg N-NH3 / L	Colorimétrico - Nessler (417 B - Ed. 16)	LCM	0.7	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	2,661	<LCM	<LCM	<LCM	1,265	<LCM	<LCM	0.909			
N- total	mg N-Norg / L	Macro-Kjeldahl, Destilación y Volumetría, SM 4500-NOrg B y SM 4500-NH3 B, C	LCM	1	3.0	<LCM	1.0	<LCM	4.9	<LCM	<LCM	0.538	2,848			1.10			
N- nitrato	mg N-NO3 / L	Colorimétrico Ácido Cromotrópico (418 D - Ed 16)	LCT	0.1	<LCT	0.18	0.35	0.33	0.257	0.408	0.254	0.538	0.144	<LCT	<LCM	<LCM			
N- nitrito	mg N-NO2 / L	Colorimétrico-NED(4500-NO2 B)	LCM	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.035	<LCM	<LCM	<LCM	0.004	<LDI	<LCM	<LCM			
Oxígeno disuelto en campo*	mg O2 / L	Electrodo de membrana (4500-O G)	LCM		6.2	5.9	3.6	5.6	1.5	6.6	3.5	6.01	3.15	6.43	4.89	6.9			
pH en campo	Unidades	Electrométrico (4500 H+- B)	LCM		6.43	7.20	6.50	6.70	6.4	6.5	6.5	6.78	7.26	6.62	6.60	6.2			
Temperatura	Grados Celsius				13.9	11.8	16.3	12.6	16.8	13.3	16.4	13.9	15.9	13.2	15.6	14.8			

LCT Limite cuantificación teórico

LCM Limite cuantificación

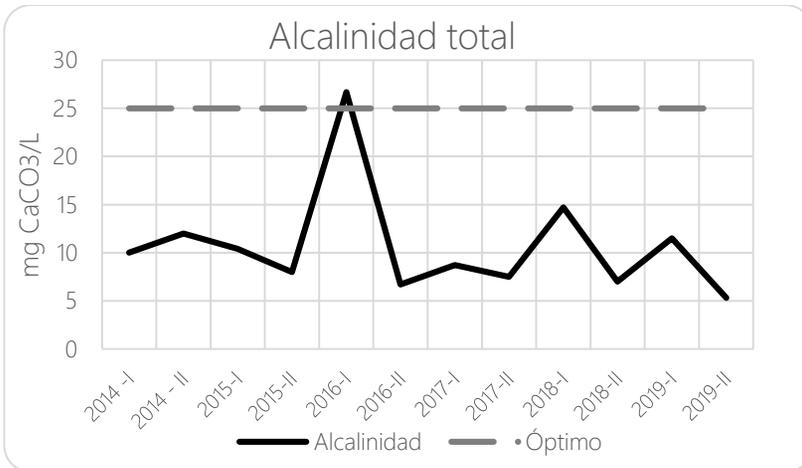


Figura 26. Resultados del muestreo de alcalinidad, Río Tejar

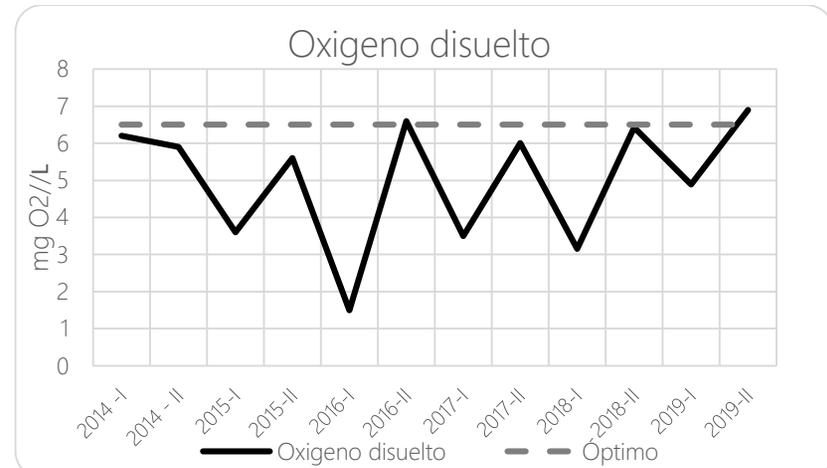


Figura 27. Resultados del muestreo de oxígeno disuelto, Río Tejar

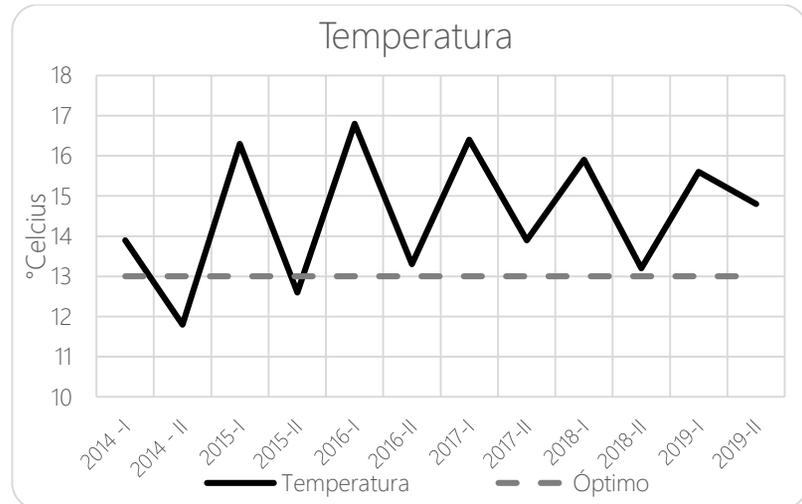


Figura 28. Resultados del muestreo de temperatura, Río Tejar

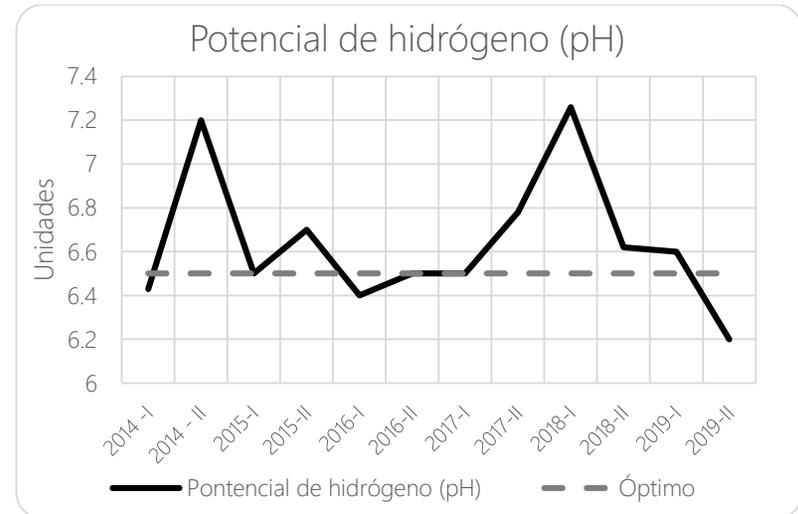


Figura 29. Resultados del muestreo de pH, Río Tejar

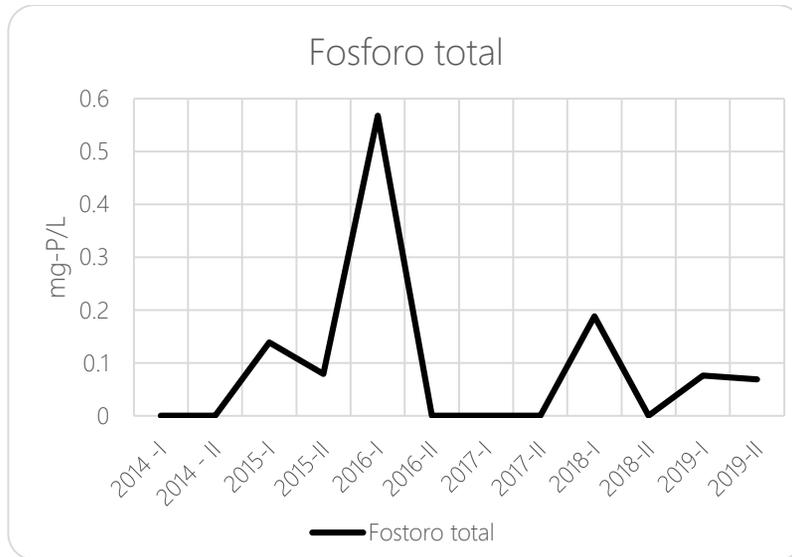


Figura 30. . Resultados del muestreo de fosforo total, Río Tejar

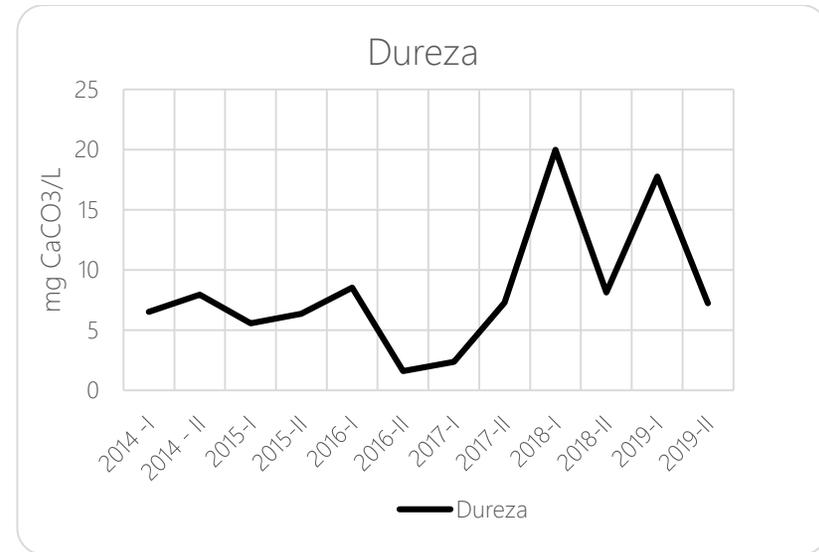


Figura 31. . Resultados del muestreo de dureza, Río Tejar

En términos generales, la calidad del agua del Río Tejar presenta condiciones adecuadas para el desarrollo de la especie de estudio y de los macroinvertebrados acuáticos que hacen parte de su cadena alimenticia. Frente a las variables evaluadas como alcalinidad, oxígeno disuelto, temperatura, pH, fosforo total y dureza, se encuentran en un rango de aceptable.

### 3.14.2 Índice de calidad del Agua (ICA)

El Índice de Calidad del Agua es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de siete (7) variables, registradas en una red de monitoreo. Este indicador permite conocer las condiciones de calidad fisicoquímico y microbiológica de un cuerpo de agua, e identifica problemas de contaminación en un punto determinado.

El ICA toma valores entre 0 y 1, los valores más bajos indican una peor calidad y mayores limitaciones para el uso del agua. La aplicación de ICA se utiliza como una herramienta para determinar el estado de las cuencas de la región en un tiempo determinado y con su análisis se puede evaluar las restricciones en los usos definidos en cada tramo de una corriente.

Tabla 16. Variables involucradas en el cálculo del ICA

Variable	Expresada como	Peso de importancia
Oxígeno disuelto (OD)	% Saturación	0.16
Sólidos en suspensión	$mg/l$	0.14
Demanda química de oxígeno (DQO)	$mg/l$	0.14
Conductividad eléctrica	$\mu S/cm$	0.14
Relación N total /P total	$(\frac{mg}{l}) / (\frac{mg}{l})$	0.14
pH	Unidades de pH	0.14
Coliformes fecales	$NMP/100 ml$	0.14

Tabla 17. Descriptores de Calidad del ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de calidad del agua	Señal de alerta
0.00-0.25	Muy mala	Rojo
0.26-0.50	Mala	Naranja
0.51-0.70	Regular	Amarillo
0.71-0.90	Aceptable	Verde
0.91-100	Buena	Azul

### 3.1.4.1 Metodología para el Cálculo del Indicador

El indicador se calcula a partir de los datos de concentración de un conjunto de 7 variables que determinan, en gran parte, la calidad del agua en corrientes superficiales. La fórmula del cálculo del indicador es:

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * l_{ikjt} \quad (10)$$

Donde:

$ICA_{njt}$ : Es el índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua  $j$  en el tiempo  $t$ , evaluado con base en variables

$l_{ikjt}$ : Es el valor calculado de la variable  $i$  (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo  $j$ , registrado durante la medición realizada en el trimestre  $k$ , del periodo de tiempo  $t$ .

$W_i$ : Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad  $i$ .

$n$ : Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador. Se recomienda que la tabla de datos del indicador incluya el valor mínimo del ICA registrado en el periodo de tiempo  $t$  y además, el ICA promedio de ese periodo.

Para cada una de las variables se construye una “relación funcional” o “curva funcional” (ecuación) en la que los niveles de calidad de 0 a 1 se representan en las ordenadas de cada gráfico, mientras que los distintos niveles (o intensidades) de cada variable se disponen en las abscisas, trazando en cada gráfico una curva que represente la variación de la calidad del agua respecto a la magnitud de cada contaminante.

Para el cálculo del valor de cada variable, el procedimiento general consiste en ingresar el valor que, en una determinada medición haya registrado la variable de calidad  $i$ , en la curva funcional correspondiente y estimar el valor  $l_{ikjt}$ . Cada curva indica en la ordenada la calidad del agua en una escala de 0 a 1; en la abscisa se definen varios niveles de la variable en particular. Cuando se toman como referencia las curvas desarrolladas por Ramírez y Viña respecto al concepto de contaminación, para traducirlo a términos de calidad el subíndice se toma como la diferencia entre uno (1) y el índice de contaminación respectivo de la magnitud de la variable. A continuación, se muestran las ecuaciones de referencia.

Tabla 18. Variables empleadas para el cálculo del ICA.

Variable	Descripción	Método de calculo
OXÍGENO DISUELTO	Esta variable tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas.	<p>Inicialmente se calcula el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto <math>PS_{OD}</math></p> $PS_{OD} = \frac{O_x * 100}{C_p}$

		<p>Donde:</p> <p><math>O_x</math> : Es el oxígeno disuelto medido en campo (<math>mg/l</math>) asociado a la elevación, caudal y capacidad de re oxigenación.</p> <p><math>C_p</math>: Es la concentración de equilibrio de oxígeno (<math>mg/l</math>), a la presión no estándar, es decir, oxígeno de saturación.</p> <p>Una vez calculado el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, el valor <math>I_{OD}</math> se calcula con la fórmula:</p> $I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD})$ <p>Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%:</p> $I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	La presencia de sólidos en suspensión en los cuerpos de agua indica cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros. Tiene una relación directa con la turbiedad.	<p>El subíndice de calidad para sólidos suspendidos se calcula como sigue:</p> $I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$ <p>Si <math>SST \leq 4.5</math>, entonces <math>I_{SST} = 1</math> ;      Si <math>SST \geq 320</math>, entonces <math>I_{SST} = 0</math></p>
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)	Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas en condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica.	<p>Mediante adaptación de la propuesta por la Universidad Politécnica de Catalunya, se calcula con la fórmula:</p> <p>Si <math>DQO \leq 20</math>, entonces <math>I_{DQO} = 0.91</math>  Si <math>20 &lt; DQO \leq 25</math>, entonces <math>I_{DQO} = 0.71</math>  Si <math>25 &lt; DQO \leq 40</math>, entonces <math>I_{DQO} = 0.51</math>  Si <math>40 &lt; DQO \leq 80</math>, entonces <math>I_{DQO} = 0.26</math>  Si <math>DQO &gt; 80</math>, entonces <math>I_{DQO} = 0.125</math></p>
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (C.E)	Está íntimamente relacionada con la suma de cationes y aniones determinada en forma química, refleja la mineralización.	<p>Se calcula como sigue:</p> $I_{C.E} = 1 - 10^{(-3.26 + 1.34 \text{Log } 10 \text{ C.E})}$ <p>Cuando <math>I_{C.E} &lt; 0</math>, entonces <math>I_{C.E} = 0</math></p>

POTENCIAL DE HIDROGENIOS (pH)	Mide la acidez, valores extremos pueden afectar la flora y fauna acuáticas	<p>Si <math>pH &lt; 4</math>, entonces <math>I_{pH} = 0.1</math></p> <p>Si <math>4 \leq pH \leq 7</math>, entonces <math>I_{pH} = 0.02628419e^{(pH*0.520025)}</math></p> <p>Si <math>7 \leq pH \leq 8</math>, entonces <math>I_{pH} = 1</math></p> <p>Si <math>8 \leq pH \leq 11</math>, entonces <math>I_{pH} = 1 * e^{[(pH*8)-0.5187742]}</math></p> <p>Si <math>pH &gt; 11</math>, entonces <math>I_{pH} = 0.1</math></p>
RELACION NITROGENO TOTAL / FOSFATO TOTAL (NT/PT)	Mide la degradación por intervención antrópica, es una forma de aplicar el concepto de saprobiedad empleado para cuerpos de agua lenticos (ciénagas, lagos, etc.) como la posibilidad de la fuente de asimilar carga orgánica; es una relación que indica el balance de nutrientes para la productividad acuícola de las zonas inundables en los ríos neotropicales (desde el norte de Argentina hasta el centro de México).	<p>La fórmula para calcular el subíndice de calidad para NT/PT es:</p> <p>Si <math>15 \leq NT/PT \leq 20</math>, entonces <math>I_{NT/NP} = 0.8</math></p> <p>Si <math>10 \leq NT/PT \leq 15</math>, entonces <math>I_{NT/NP} = 0.6</math></p> <p>Si <math>5 \leq NT/PT \leq 10</math>, entonces <math>I_{NT/NP} = 0.35</math></p> <p>Si <math>NT/NP \leq 5</math> ó <math>NT/NP &gt; 20</math>, entonces <math>I_{NT/NP} = 0.15</math></p>
PATÓGENOS E.COLU	Representa la contaminación por materia orgánica procedente de actividades antrópicas.	<p>Si <math>E. Coli &lt; 50</math>, entonces <math>I_{E.Coli} = 0.98</math></p> <p>Si <math>50 \leq E. coli &lt; 1600</math>, entonces <math>I_{E.Coli} = 0.98 * e^{(E.coli-50)*(-0.0009917754)}</math></p> <p>Si <math>E. Coli \geq 1600</math>, entonces <math>I_{E.Coli} = 0.1</math></p>

Tabla 19. Punto de monitoreo Cuenca Rio Bogotá - Subcuenca Rio Tejar

ID	Identificación punto	Ubicación	Cuenca	Nombre	2018-II
7	212007	Afluyente	Alta	Rio Tejar	0.8059

Tabla 20. Histórico ICA - Punto de monitoreo Rio Tejar

Punto de Monitoreo –Rio Tejar									
2014-I	2014-II	2015-I	2015-II	2016-I	2016-II	2017-I	2017-II	2018-I	2018-II
N.D	0.7882	0.6498	0.8377	0.5121	0.8911	0.8318	0.755	0.6145	0.8059

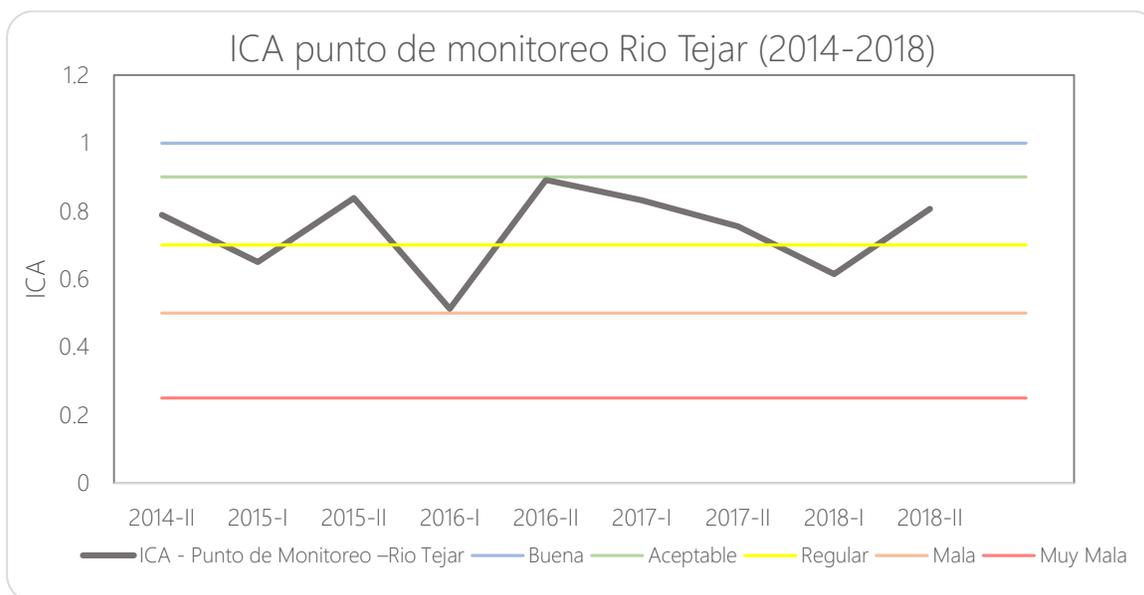


Figura 32. Histórico ICA punto de monitoreo Rio Tejar.

De acuerdo con los objetivos de Calidad del agua establecidos mediante el Acuerdo CAR No 43 de 2006, teniendo en cuenta los cinco usos del agua el rio El Tejar corresponde a los siguientes objetivos de calidad.

Tabla 21. Clasificación clase de uso de agua en la Subcuenca del Río Tejar.

Clase	Descripción	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	OD (mg/L)	CT (NMP/100ml)
Clase I	Corresponde a los valores asignados para uso humano y domestico con tratamiento convencional, uso agrícola con restricciones y uso pecuario e industrial	7	10	4	5000

### 3.15 Vegetación y flora terrestre

De acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, el municipio de Chocontá y, por lo tanto, la subcuenca del río Tejar, corresponden a la zona de vida Bosque seco montano bajo (bs- MB). Por otra parte, de acuerdo con la actualización del POMCA del Rio Bogotá, esta zona está caracterizada por la presencia de herbazal y arbustal denso determinado a través de la metodología Corine Land Cover, que permitió evaluar la cobertura forestal presente en la zona. La figura 37, muestra un esquema general de la distribución de algunas especies caracterizadas

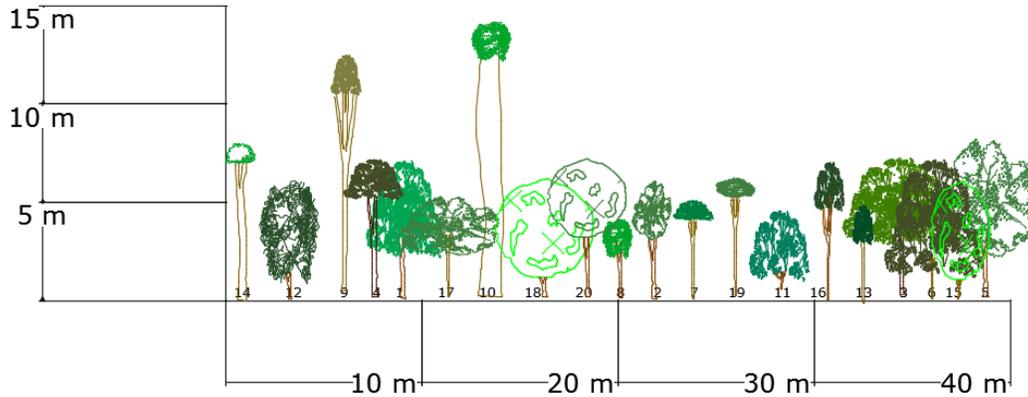


Figura 33. Punto de muestreo cobertura arbustal denso ubicado en el municipio de Chocontá, vereda Tilata (Consortio Huitaca, 2019)

### 3.15.1 Herbazal denso

La cobertura del herbazal denso está compuesta por elementos típicamente herbáceos de forma natural, a través de esa caracterización se encontraron las siguientes especies, entre las cuales predominó con un mayor número de individuos es *Myrsine coriacea*, Roem. & Schult. seguido de *Myrcia popayanensis* Hieron.

Tabla 22. Clasificación taxonómica de herbazal denso

Familia	Nombre científico	Nombre común
Myricaceae	<i>Morella parvifolia</i> (Benth.) Parra-Os.	Laurel Cruces
Myrtaceae	<i>Myrcia popayanensis</i> Hieron.	Arrayan
Leguminosae	<i>Acacia dealbata</i> Link	Acacia
Lamiaceae	<i>Aegiphila bogotensis</i> (Spreng.) Moldenke	Blanquillo
Asteraceae	<i>Ageratina glyptophlebia</i> (BLRob.) RMKing y H.Rob.	Chilco
Betulaceae	<i>Alnus acuminata</i> Kunth	Aliso
Verbenaceae	<i>Aloysia citriodora</i> Palau	Cidron
Melastomataceae	<i>Axinaea macrophylla</i> (Naudin) Triana	Tuno esmeraldo
Asteraceae	<i>Baccharis prunifolia</i> Kunth.	Ciro
Ericaceae	<i>Bejaria resinosa</i> Mutis ex L.f.	Pegamosco
Solanaceae	<i>Cestrum buxifolium</i> Kunth	Tintillo
Anacardiaceae	<i>Comocladia dodonaea</i> (L.) Britton	Maiz tostado
Boraginaceae	<i>Cordia cylindrostachya</i> (Ruiz & Pav.) Roem. Y Schult.	Salvio
Euphorbiaceae	<i>Croton hibiscifolius</i> Kunth ex Spreng.	Sangre drago
Asteraceae	<i>Diplostegium rosmarinifolium</i> (Benth.) Wedd.	Romero negro
Sapindaceae	<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.	Hayuelo
Verbenaceae	<i>Duranta mutisii</i> L.f.	Espino
Escalloniaceae	<i>Escallonia myrtilloides</i> L. F.	Rodamonte
Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	Eucalipto

Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult	Cucharo
Cunoniaceae	<i>Weinmannia tomentosa</i> L.f.	Encenillo
Fagaceae	<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.	Roble
Ericaceae	<i>Vaccinium meridionale</i> Sw	Agraz
Lamiaceae	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Romero

### 3.15.2 Arbustal denso

Se encuentra compuesto y dominado por arbustos los cuales, formando dosel irregular, siendo el área representada por más del 70 % del total de la unidad representada, con algunos elementos arbóreos dispersos, dicha formación vegetal no ha tenido intervención o la intervención ha sido selectiva.

Tabla 23. Clasificación taxonómica de arbustal denso

Familia	Nombre científico	Nombre común
Araliaceae	<i>Oreopanax incisus</i> (Willd. Ex Schult.) Decne. & Planch.	Mano de oso
Adoxaceae	<i>Viburnum triphyllum</i> Benth.	Ruque
Elaeocarpaceae	<i>Vallea stipularis</i> L. F.	Raque
Podocarpaceae	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> (pilg.) C.N. Page	Pino patula
Leguminosae	<i>Acacia dealbata</i> Link	Acacia Forrajera
Papaveraceae	<i>Bocconia frutescens</i> L.	Trompeto
Melastomataceae	<i>Centronia mutisii</i> (Bonpl.) Triana	Tuno
Clusiaceae	<i>Clusia multiflora</i> Kunth	Gaque
Winteraceae	<i>Drimys granadensis</i> L.f.	Canelo Simarron
Verbenaceae	<i>Duranta mutisii</i> L.f.	<i>Duranta mutisii</i>
Fagaceae	<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.	Roble
Lamiaceae	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Romero
Podocarpaceae	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> (pilg.) C.N. Page	Pino patula
Asteraceae	<i>Smallanthus pyramidalis</i> (Triana) H.Rob	Arboloco
Cunoniaceae	<i>Weinmannia tomentosa</i> L.f.	Encenillo
Salicaceae	<i>Xylosma spiculifera</i> (Tul.) Triana & Planch.	Corono

## **4. Capítulo IV. Análisis de las relaciones entre el régimen de caudal y el ecosistema del Río Tejar mediante HEC EFM (Ecosystem Functions Model)**

### **4.1 Aplicación del modelo HEC – EFM**

El proceso de aplicación de EFM consta de tres fases: análisis estadístico, modelación hidráulica y uso de Sistemas de Información Geográfica para especializar los resultados. Las interfaces de usuario en EFM apoyan la fase estadística donde se identifican los regímenes de flujo y aspectos del ecosistema (relaciones funcionales) a ser investigados. Posterior a ello, los resultados de la fase estadística se ingresan al modelo hidráulico HEC RAS que permiten generar capas de profundidad, velocidad y otras características hidráulicas del río, finalmente para especializar los resultados se emplean herramientas de información geográfica.

Esta investigación involucró el análisis estadístico de las relaciones entre el régimen de flujo y el ecosistema del Río Tejar. Para ello, se emplearon las series de tiempo diarias de nivel y caudal de la estación Puente de Chocontá. Las relaciones funcionales del régimen de caudal y el ecosistema fluvial se obtuvieron a través la inspección en campo de la zona de estudio y documentos como el Plan de Ordenamiento Territorial, informes técnicos e informes de laboratorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

### **4.2. Procesamiento y análisis de datos**

Se empleó HEC-EFM en la versión 5.0 para analizar el régimen de flujo del río e investigar las relaciones del ecosistema. Para el análisis de flujo del Río Tejar, se utilizó la serie de tiempo diaria de caudal y nivel de la estación Puente de Chocontá, se almacenó en HEC-DSS y se importó a HEC-EFM. El análisis de las series de caudal implicó verificar la consistencia y número de registro de datos, en consecuencia, al realizar una revisión de la información a partir de las curvas de calibración para los diferentes datos, se evidencian inconsistencias, por lo cual, solo se empleó la información del año 2011 a 2019, limitando el análisis para una serie de tiempo más corta.

Para el análisis de esta información se requiere comprender la forma en que el régimen de caudal cambia temporal y espacialmente y examinar los aspectos del flujo en términos de magnitud, duración, estacionalidad y variabilidad. En este sentido, existen limitaciones para el análisis de las relaciones funcionales ya que los datos de caudal se registran diariamente mientras que los hidrogramas en la cuenca son horarios.

Por otra parte, a través de la inspección en campo, se identificaron elementos del ecosistema y su ubicación para la evaluar las relaciones entre la disponibilidad del hábitat y el régimen de caudales. En el capítulo 3 de diagnóstico se expusieron previamente los elementos que influyen en la dinámica del río tales como la naturaleza del río, la forma y el patrón del canal, la cobertura ribereña, especies dominantes y su relación con factores bióticos y abióticos.

### 4.3 Relaciones funcionales

Las relaciones funcionales son fundamentales para los análisis realizados en EFM, ya que vinculan las características de los regímenes de flujo con elementos del ecosistema a través de consultas estadísticas y geográficas, que permiten reflejar las conexiones entre hidrología y ecología, ya sea por respuestas bióticas o procesos relacionados con la dinámica de flujo (Hickey, Huff, & Dunn, 2015).

Los resultados en EFM son de carácter más cualitativo que cuantitativos, sin embargo, algunos de los indicadores se traducen en aumentos en el área terrestre o acuática y a través de la combinación de las herramientas SIG se pueden determinar lugares de restauración potencial.

La información sobre el historial de vida de las especies es fundamental para construir las relaciones funcionales, ya que proporcionan información sobre el momento de las etapas de vida y las condiciones necesarias para su mantenimiento (por ejemplo, la época de desove o reproducción de peces) y se puede interpretar en términos estadísticos simples a través de la fecha de inicio y finalización, así como relacionarla con la dinámica de flujo.

Las relaciones funcionales, analizadas estadísticamente (*Figura 34*) se definen como combinaciones de cuatro parámetros básicos: 1) temporada, 2) duración, 3) tasa de cambio y 4) exceso porcentual (para frecuencias de flujo o duraciones de flujo). Los primeros tres guían cómo EFM pasa de un régimen de flujo completo a resultados (uno por año hidrológico; cada uno es una medida de desempeño para relación en ese año); y el cuarto informa cómo los resultados estacionales se utilizan para determinar un "resultado estadístico" (uno por período de registro; una única medida de rendimiento para todo el régimen de flujo) para cada relación individual.

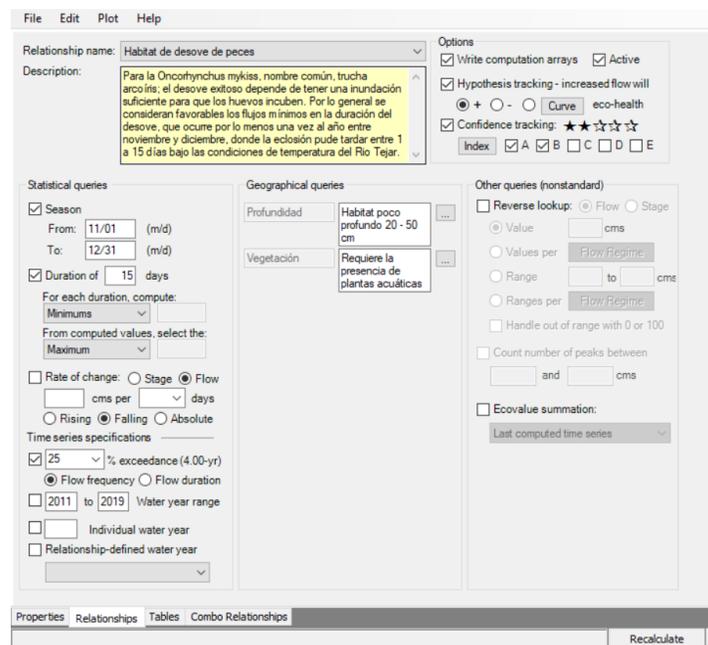


Figura 34. Ventana de relaciones funcionales de HEC EFM.

Los índices se utilizaron para agrupar las relaciones que tienen requisitos comunes y para observar el efecto neto de los cambios en el régimen de flujo. Después de importar el régimen de flujo y desarrollar relaciones, HEC-EFM realiza los cálculos estadísticos y analiza las series de tiempo de nivel y caudal para los criterios especificados y produce valores de caudal y nivel para cada relación. Para el caso de estudio se desarrollaron las relaciones funcionales descritas a continuación:

Tabla 24. Relaciones funcionales para el Rio Tejar

Consultas estadísticas		Hábitat de desove de peces	Biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos	Condiciones críticas del hábitat	Crecimiento de árboles ribereños	Inundación de árboles ribereños	Búsqueda de la salud del cuerpo de agua
<b>Temporada</b>	Fecha de inicio	01 Nov	01 Sep	01 Ene	10 Marzo	03 Oct	15 May
	Fecha final	31 Dic	30 Oct	15 Feb	20 Abril	31 Dic	15 Sep
<b>Duración</b>	Intervalo	15	1	15		15	1
	Estadísticas del intervalo	Mínimos	Medio	Mediana	Medio	Mínimos	Mediana
	Resultado estacional	Máximos	Máximos	Mínimo	Máximos	Máximos	Máximo
<b>Tasa de cambio</b>	Tasa de umbral				0.2 por 2 días		
<b>Exceso porcentual</b>	Intervalo (días)	25%	50%	25%	20%	25%	✓
	Frecuencia de flujo						

A continuación, se realiza una breve descripción de las variables empleadas en las relaciones funcionales descritas en la *Tabla 24*.

#### 4.3.1 Hábitat de desove de peces:

El desove de peces, en este caso la especie *Oncorhynchus mykiss (trucha arcoiris)*, identificada durante la vista en campo, requiere que se inunden las áreas de la llanura aluvial durante su temporada de desove, que alcanza su punto máximo durante los meses de noviembre y diciembre, bajo las condiciones de temperatura del Rio Tejar (18 a 21°), estas zonas permanecen inundadas el tiempo requerido para que los adultos accedan a las áreas para la incubación de huevos ( 3 a 7 días) y luego proporcionar un espacio para el desarrollo de alevines (10 a 15 días). La duración se estableció para un periodo de 15 días con el propósito de considerar tanto la incubación como la cubierta larvaria, para calcular una serie de tiempo de mínimos (para asegurar inundación) y luego los máximos de esos mínimos (el flujo más alto que permite un desove exitoso) como el resultado estacional. Adicionalmente, se utilizó una consulta de exceso de porcentaje con una frecuencia de flujo del 25% de los años, ya que el desove no ocurre todos los años sino hasta que el pez alcanza la edad de adulto que está dada entre los 3 a 5 años (Figura 35), presenta las características establecidas para esta relación funcional.

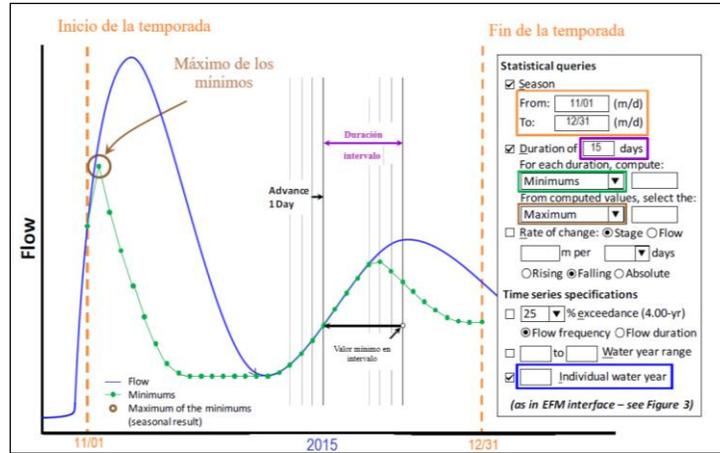


Figura 35. Relación funcional para el desove de peces, por año hidrológico.  
 Fuente. Adaptado del manual HEC – EFM (US Army Corps of Engineers , 2013)

#### 4.3.2 Vegetación riparia

Los cordones protectores de márgenes de río tienen la finalidad de reducir la erosión fluvial en las márgenes, aumentar la infiltración y la capacidad de campo, y disminuir las avenidas y la evaporación. El cordón protector, se comporta como una barrera al aporte de sedimentos hacia los cuerpos de agua y un multiplicador del almacenaje de agua en el subsuelo. En el capítulo de diagnóstico se definieron las especies que en la actualidad habitan la ribera del Río Tejar.

En consecuencia, se estableció la relación para los árboles ribereños con un periodo de germinación de diciembre a febrero, después de la germinación, la supervivencia de las plántulas es función de la tasa de recesión. Si el caudal del río disminuye por debajo del caudal medio mínimo  $0.2614 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 7 días, el crecimiento de las raíces de las plántulas no podrá mantenerse y morirán. Establecer árboles ribereños requiere de un flujo que garantice estas condiciones por lo menos el 10% de los años, en promedio.

Una vez se importan los regímenes de flujo y se desarrollan las relaciones funcionales, EFM ejecuta los cálculos estadísticos de cada relación funcional. Para determinar la frecuencia de flujo en las relaciones funcionales en cada temporada se evalúa la duración y la tasa de cambio, y los demás parámetros definidos. Esto produce una medida del comportamiento de los aspectos del ecosistema en años individuales, luego esos resultados se clasifican y se consultan con el porcentaje de excedencia, y finalmente se produce un solo valor de flujo y nivel para cada relación funcional como se observa en la Figura 36.

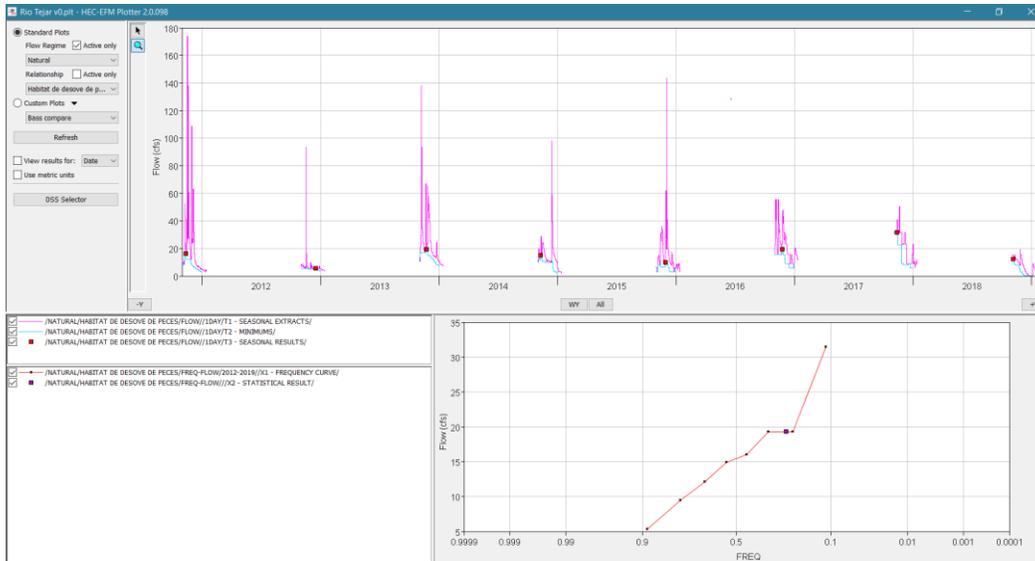


Figura 36. Representación gráfica de los resultados de HEC EFM.

Fuente: Autora 2020

#### 4.4 Análisis hidráulico

Se desarrolló un modelo hidráulico con el propósito de emplear los resultados estadísticos de flujo obtenidos en HEC EFM. Las salidas hidráulicas obtenidas de HEC RAS son capas de profundidad y velocidad del agua y otras variables de importancia ecológica como el esfuerzo cortante y el perímetro mojado.

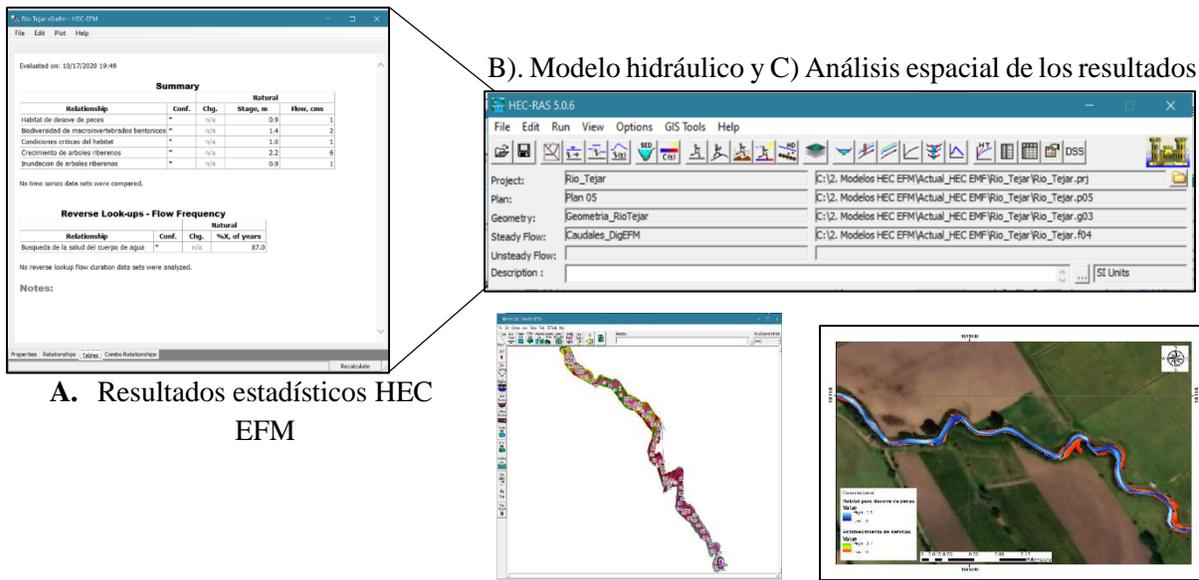


Figura 37. Transiciones en el proceso EFM donde los resultados estadísticos (A) ingresan al modelo hidráulico del río (B) y los resultados del modelo hidráulico se importan a un Sistema de información geográfico para el análisis espacial (C).

## 4.5 Análisis espacial

Para desarrollar las operaciones espaciales del modelo hidráulico se emplean HEC-GeoRas y HEC RAS Mapper, que tienen un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento previo y posterior de datos geoespaciales. Los datos del perfil de la superficie del agua se emplearon con un modelo digital de terreno para calcular profundidad, velocidad y los polígonos de límites de la llanura de inundación.

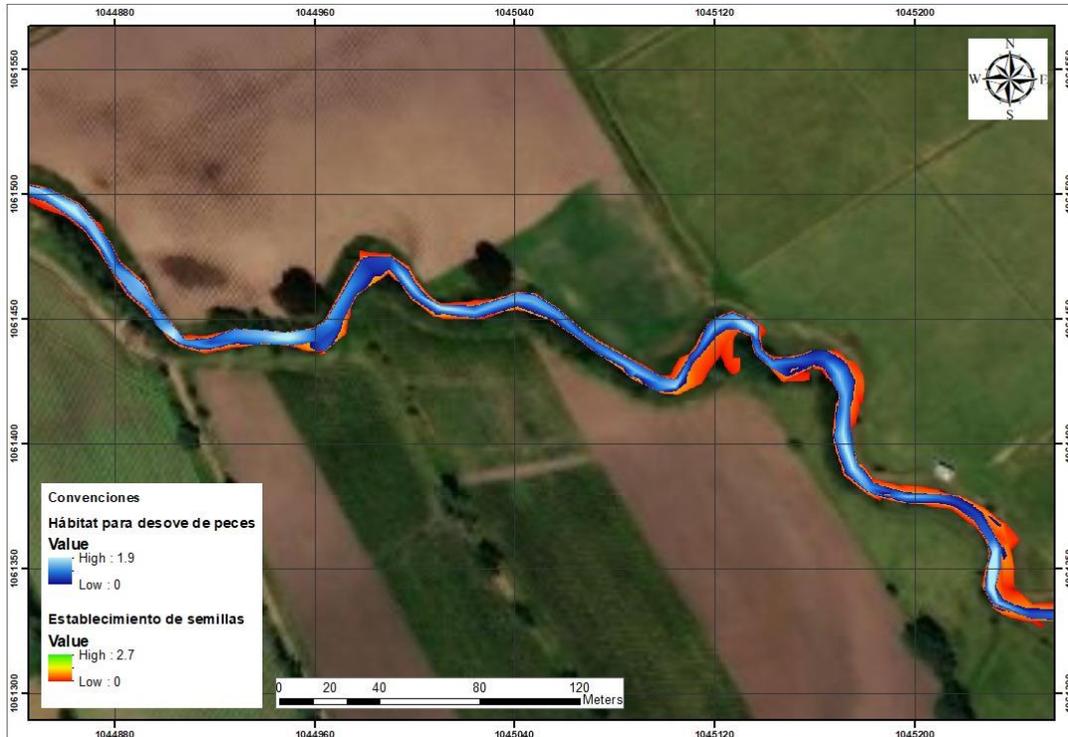


Figura 38. Resultados de la fase de diagnóstico empleando HEC EFM en el río Tejar  
Fuente: Autora 2020

Los resultados estadísticos obtenidos en HEC EFM, son una medida para cada relación funcional y régimen de flujo, estos resultados permiten comparar alternativas de forma simple e identificar cual es la más apropiada para cumplir con los objetivos de restauración.

Los resultados espaciales del establecimiento de semillas, permiten identificar zonas potenciales para la restauración de los ecosistemas riparios, a través de vegetación nativa, y fortalecer las funciones ecológicas y los servicios ecosistémicos, como son aumentar la calidad y cantidad de agua, reducir los sedimentos que llegan al cauce, controlar y regular el flujo del agua, crear nuevos espacios para el hábitat de macro y microinvertebrados, restablecer corredores biológicos de flora y fauna, recuperar las interacciones bióticas, aumentar la conectividad y contribuir al mejoramiento paisajístico.

El análisis de las relaciones funcionales a través de EFM es un indicador de la ubicación del hábitat adecuado para la restauración de ecosistemas. A partir de estos indicadores futuros cambios en el cauce podrán ser generados y evaluados para conservar su funcionalidad para las nuevas condiciones de drenaje.

## **5. Capítulo V. Análisis de las relaciones entre el régimen de caudal y el ecosistema del río Tejar mediante Iber Habitat**

### **5.1 Aplicación del modelo Iber Habitat**

La caracterización y cuantificación del Hábitat Potencialmente Útil (HPU) para peces se basa en modelos numéricos de simulación hidráulica diseñados para la gestión y preservación de ríos. Para su determinación el modelo Iber Habitat emplea información de curvas de idoneidad para la especie, *Oncorhynchus mykiss* (*trucha arcoíris*), en su estadio alevín, juvenil y adulto, así como el uso de modelos de simulación hidráulica, en este caso el modelo bidimensional IBER, que permite incorporar variables tanto hidráulicas como hidrobiológicas.

Este modelo permite obtener valores de variables hidráulicas (velocidad, profundidad) y variables hidrobiológicas (curvas de idoneidad) para diferentes escenarios. El objetivo de este estudio es aplicar el módulo de IBER, denominado Aptitud física del hábitat, que permite incorporar curvas de preferencia de cualquier especie acuática y etapa de desarrollo para el cálculo de la distribución espacial y temporal.

### **5.2 Curvas de idoneidad**

Las curvas de idoneidad son funciones de transformación normalizadas que relacionan las variables del medio fluvial con el uso que los peces hacen del espacio. (Sanz , Bladé , Palau, Querol, & Ramos, 2019). Se obtienen mediante campañas de campo, para el caso de estudio, se empleó la información de las curvas de idoneidad desarrolladas por el Centro Nacional de Investigación de Humedales Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU, que a través de modelos del índice de idoneidad del hábitat (HSI) ayudan a identificar variables del hábitat de la trucha arcoíris en sus diferentes estadios (alevín, juvenil y adulto). Las curvas relacionadas a continuación presentan la información del índice de Idoneidad evaluado entre 0 y 1, donde 0 es el más desfavorable y 1 es el más apropiado para las diferentes variables evaluadas, en este caso se evaluará la velocidad, profundidad y el sustrato requerido para los diferentes estadios de la trucha arcoíris en su ciclo de vida. A continuación, se muestran las curvas de idoneidad determinadas para la especie *Oncorhynchus mykiss* (*trucha arcoíris*) para sus tres estadios de vida.

Curvas de idoneidad, *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris), estadio alevín. Fuente (Natural Wetlands Research Center U.S. Fish and Wildlife Service, 1984)

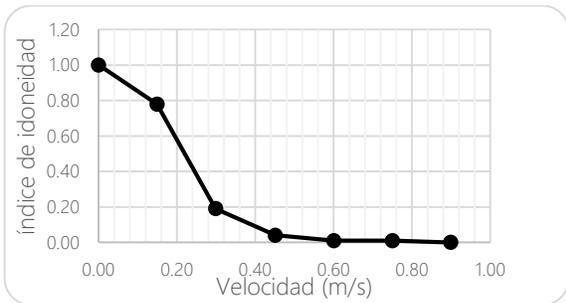


Figura 39. Curva de idoneidad, estadio alevín, velocidad

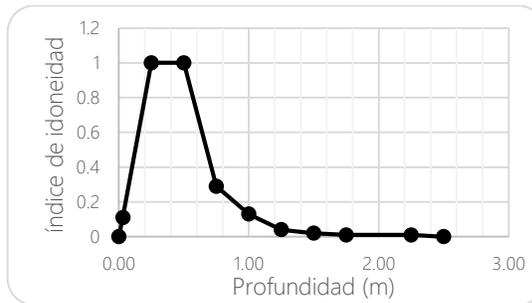


Figura 40. Curva de idoneidad, estadio alevín, profundidad

Curvas de idoneidad, *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris), estadio juvenil. Fuente (Natural Wetlands Research Center U.S. Fish and Wildlife Service, 1984)

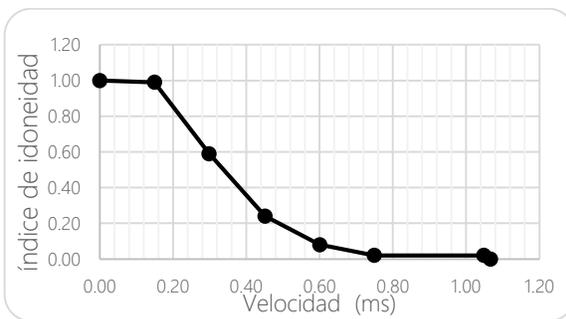


Figura 41. Curva de idoneidad, estadio juvenil, velocidad

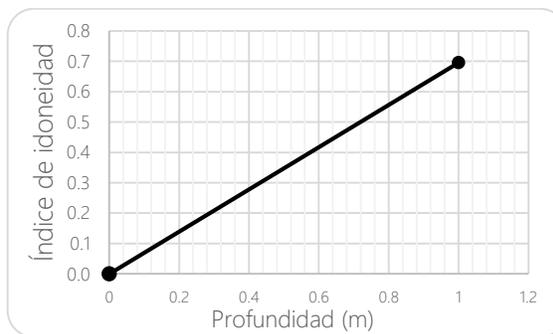


Figura 42. Curva de idoneidad, estadio juvenil, profundidad

Curvas de idoneidad, *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris), estado adulto (Natural Wetlands Research Center U.S. Fish and Wildlife Service, 1984)

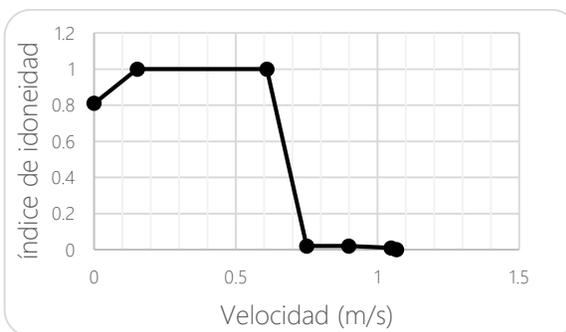


Figura 43. Curva de idoneidad, estadio adulto, velocidad



Figura 44. Curva de idoneidad, estadio adulto, profundidad

### 5.3 Aplicación del modelo IberHabitat

Con base en la información del capítulo de diagnóstico, se seleccionaron las diferentes variables y parámetros a incluir para el desarrollo del modelo. De este modo, de acuerdo con la inspección en campo se evidenció que la fauna íctica presente en el Río Tejar corresponde a la especie: trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Para su análisis se registraron los datos de las curvas de idoneidad presentadas en el numeral 5.1, en los estadios alevín, juvenil y adulto, considerando las variables de profundidad (Ch) y velocidad (Cv). Adicionalmente, para el desarrollo del modelo se emplearon 12 caudales entre ellos los caudales mínimos, medios y máximos de la serie temporal.

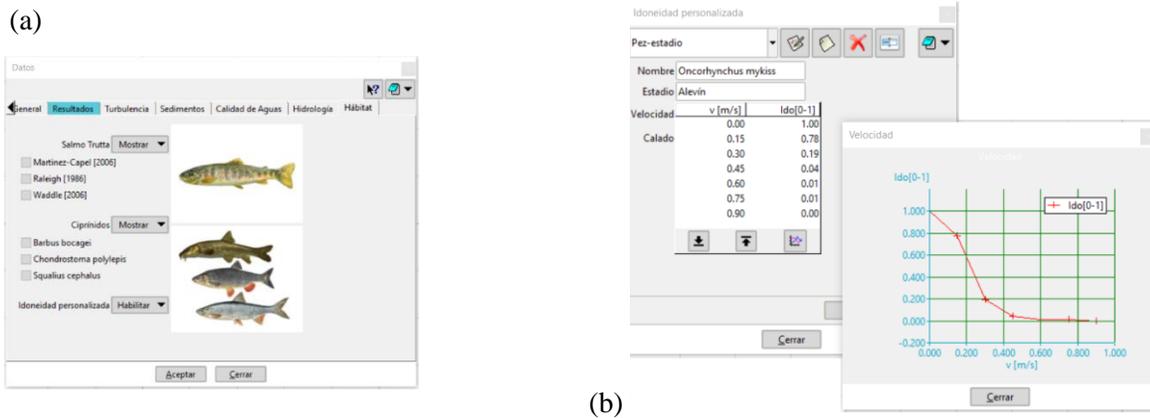


Figura 45. Interfaz gráfica del módulo de hábitat. Incluye una base de datos con curvas de idoneidad de diferentes autores, tanto salmónidos (*Salmo trutta*) y como ciprínidos (a) así como la posibilidad de incorporar curvas de idoneidad definidas por el usuario (b).

Fuente: Autora 2020

#### 5.3.1 Resultados del modelo Iber Habitat en la etapa de diagnóstico.

A través de la integración del módulo ecológico IberHabitat, se obtienen resultados que evalúan la disponibilidad del hábitat para el desarrollo de servicios ecosistémicos, dentro de la interfaz de pos procesamiento. De este modo, se evaluaron los diferentes estadios del pez, empleando en el modelo la opción de Caudal escalonado, que permite mejorar los tiempos de simulación, ya que el modelo inicia en un nuevo escenario de caudal una vez se alcanza la condición de equilibrio entre los caudales de entrada y salida. Es decir, las condiciones hidráulicas de un caudal  $Q_i$  al final del cálculo son tomadas como condición inicial del caudal  $Q_{i+1}$ , siendo  $Q_i < Q_{i+1}$ . De esta manera, las condiciones finales de  $Q_i$  son más cercanas al régimen estacionario de  $Q_{i+1}$ , por lo que se requiere menor tiempo de cálculo (Sanz, Bladé, Palau, Querol, & Ramos, 2019).

En las Figura 46 a Figura 51 se observan los resultados asociados a los diferentes estadios de la especie de estudio, se evidencian diferencias significativas entre ellos en términos de velocidad y profundidad, es de precisar que las condiciones entre los estadios juvenil y adulto son similares.



Figura 46. Diagnóstico, C<sub>v</sub> estadio alevín

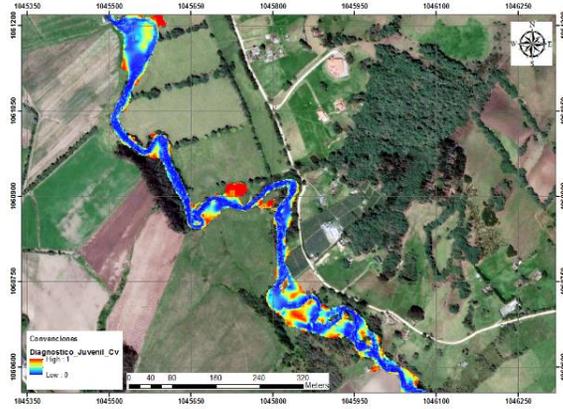


Figura 47. Diagnóstico, C<sub>v</sub> estadio juvenil

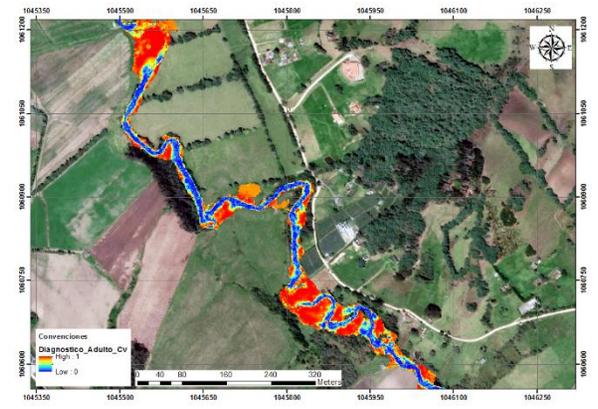


Figura 48. Diagnóstico, C<sub>v</sub> estadio adulto

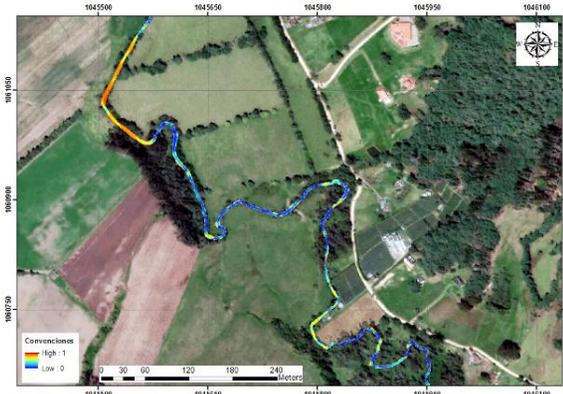


Figura 49. Diagnóstico, Ch estadio alevín

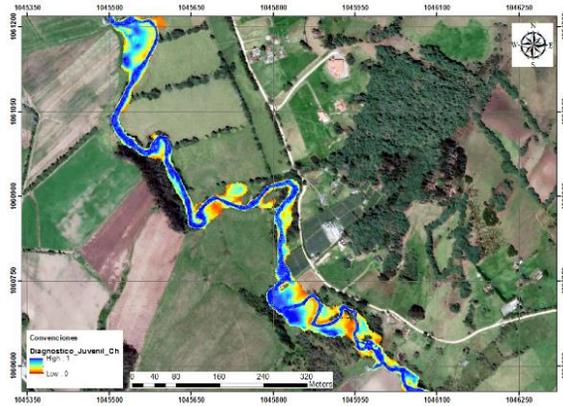


Figura 50. Diagnóstico, Ch estadio juvenil

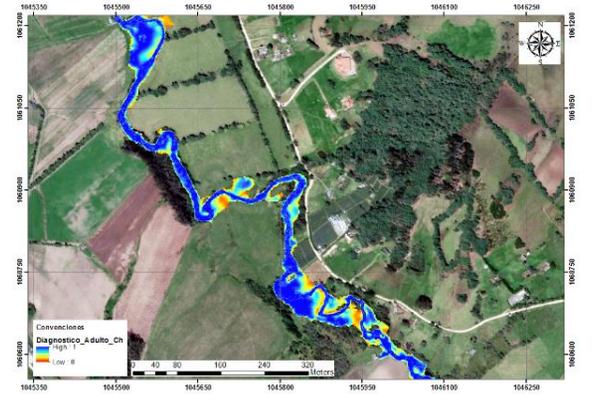


Figura 51. Diagnóstico, Ch estadio adulto

El tramo de estudio presenta distribuciones de idoneidad del hábitat físico diferentes para cada uno de los estadios de la especie evaluada. En las figuras 46 a 51 se observa la distribución espacial de los tramos para Cv (velocidad). Para el estadio alevín las velocidades son bajas, característica que favorece el crecimiento del pez.

Tabla 25. Rangos de idoneidad

Índice C	Criterio
0.0 -0.3	Condiciones insuficientes
0.3 -0.5	Condiciones mínimas exigibles
0.5 -0.8	Condiciones optimas
0.8 -1.0	Condiciones excelentes

Los valores del hábitat potencialmente útil (HPU) resultantes son asociados a los caudales escalonados evaluados, las mejores condiciones de hábitat potencialmente útil se dan para caudales bajos comprendidos entre (0.5 a 1 m<sup>3</sup>/s) con área mojada del 4%.

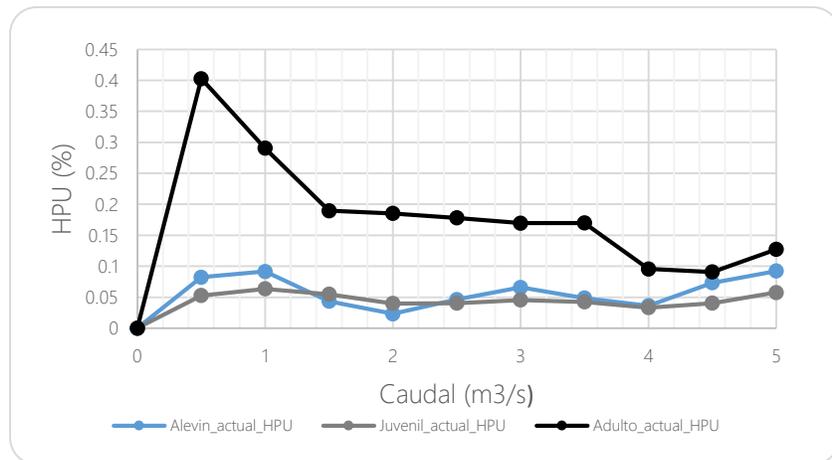


Figura 52. Hábitat potencialmente útil (HPU), fase de diagnóstico Rio Tejar  
Fuente: Autora 2020.

## 6. Capítulo VI. Resultados de la fase de diagnóstico

En este capítulo se describen los resultados obtenidos al evaluar los criterios de valoración ambiental descritos en el numeral 2 del presente documento junto con los resultados de la aplicación de los modelos HEC EFM e Iber Habitat.

En relación con los procesos hidráulicos e hidrológicos se evidencia que la estación Puente de Chocontá cuenta con un buen registro de datos, sin embargo, al revisar la información en detalle existen inconsistencias en los registros ya que no hay una relación apropiada entre los datos de nivel y caudal, lo que incidió en el número de datos a emplear en el modelo HEC EFM. Por otra parte, al analizar los registros de caudal a través del software IHA se evidencia que predominan las condiciones con caudal bajo con una representación de registros del 65%, seguidas de pulsos de caudal alto 15%, por su parte, los caudales extremadamente bajos representan el 11% de los registros y las pequeñas y grandes inundaciones el 2 y 7% de datos evaluados respectivamente. Esta caracterización resulta clave para enfocar los criterios de diseño que permitan favorecer las condiciones para las comunidades acuáticas durante los caudales bajos y extremadamente bajos.

En cuanto a las condiciones de drenaje del Río Tejar, la cuenca es propensa a fenómenos de desbordamiento durante crecientes, situación que debe ser controlada dada la posible extensión del casco urbano en la zona de la ronda del río, por lo cual los resultados obtenidos permiten orientar acciones a través del diseño para la planificación del territorio ante el desarrollo urbano.

En relación con las características morfológicas, el Río Tejar, es un río meándrico que presenta un continuo trabajo de erosión y deposición de materiales influenciados por el régimen de caudal, durante la visita realizada a la zona de estudio se identificó que el material erosionado se deposita aguas abajo, afectando la calidad del agua por el aporte de sedimentos junto con la disponibilidad del hábitat para las comunidades acuáticas.

En cuanto a la información hidrobiológica se identificaron diferentes especies de macroinvertebrados y peces a partir de literatura, además durante una visita realizada a la zona se logró la captura de un alevín de la especie *Oncorhynchus mykiss*, nombre común trucha arcoíris y algunos macroinvertebrados, información insumo para el desarrollo de los modelos Iber Hábitat y HEC EFM. En relación con los requerimientos de calidad del agua que exige la especie se empleó como insumo la información de los resultados obtenidos del monitoreo y análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que realiza la CAR en la zona de estudio y se relacionan a continuación:

Tabla 26. Evaluación de las características de calidad del agua para la especie de estudio

Parámetro	Valor promedio	Clasificación
Oxígeno (ppm)	6.5	Óptimo
Temperatura (° C)	13	Ideal para crecimiento e incubación (alevín 10-12 ° C)
Potencial de hidrogeno ( pH)	6.5	Óptimo
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> / L)	60	Óptimo
Nitratos (mg N-NO <sub>3</sub> / L)	100	No favorable
Nitritos (mg N-NO <sub>2</sub> / L)	0.055	Óptimo

Nitrógeno amoniacal (mg N-NH <sub>3</sub> / L)	0.012	Óptimo
--	-------	--------

En relación con la cobertura vegetal presente en la zona se evidencia la presencia de herbazal y arbustal denso, donde predominan especies como el Laurel, Arrayan, Acacia y Aliso. Es de precisar que existen tramos en los cuales la cobertura vegetal está ausente y se presentan procesos erosivos que conllevan a la pérdida de las márgenes del río, con la consecuente inclusión de materia orgánica y disminución del hábitat para el desarrollo de especies.

Al aplicar el modelo HEC EFM y analizar el comportamiento del régimen de flujo para diferentes relaciones funcionales se evidencia que las áreas para desove de peces y para la implantación de semillas son limitadas a lo largo del tramo.

Por su parte, los resultados obtenidos a partir de Iber Habitat indican índices de idoneidad en el rango insuficiente para las variables de velocidad y profundidad, para los diferentes estadios del pez (alevín, juvenil y adulto). En consecuencia, se evidencia que a través del diseño se deben plantear estrategias para mejorar estas características y fortalecer la capacidad de resiliencia del río.

## **7. Capítulo VII. Diseño propuesto para la restauración ecohidráulica del Río Tejar**

Los sistemas fluviales son dinámicos, cambian temporal y espacialmente en respuesta a su hidrología y geomorfología, las interacciones de estos dos procesos son determinantes en las comunidades bióticas (bacterias, plantas y animales). En este sentido, para lograr proteger tanto a las especies que en el habitan como mantener y mejorar servicios ecosistémicos que proveen los ríos, es necesario incorporar características particulares en los proyectos de restauración desde el diseño que generen sinergia para lograr la mejora de los diferentes elementos que componen la dinámica del río. Con el propósito de definir la restauración ecohidráulica del Río Tejar, se definen los criterios relacionados a continuación, con base en los resultados obtenidos de la fase de diagnóstico.

### **7.1 Ajuste longitudinal**

El perfil longitudinal generalmente muestra el efecto de erosión y deposición durante largos periodos de tiempo. En periodos de tiempo más cortos, los perfiles del lecho pueden volverse localmente más o menos empinados o graduales, y pueden exhibir agradación (deposición de sedimentos) o degradación (profundización del canal), ya que la potencia de la corriente y el transporte de sedimentos están condicionados a los cambios de caudal. Los impactos ecológicos derivados del cambio de la pendiente longitudinal generalmente están relacionados con cambios en la velocidad del agua o transporte de sedimentos.

## 7.2 Ajuste lateral y control de la erosión

La erosión de los bancos es el resultado de procesos que pueden agruparse en procesos hidráulicos (eliminación de sedimentos mediante el flujo del agua) o procesos geotécnicos (colapso, hundimiento o deslizamiento de secciones del talud debido a fuerzas gravitacionales que exceden las fuerzas de resistencia). Los efectos de la erosión se intensifican cuando el banco no cuenta con vegetación, cuando esto ocurre el banco superior se socava, resultan geometrías de tipo voladizo, y los bancos finalmente caen en el canal, este fenómeno ocurre en algunas zonas del Río Tejar y se describe en el capítulo de diagnóstico. El diseño propuesto considera el análisis de los esfuerzos cortantes que pueden afectar la estabilidad de los taludes.

El impacto de la erosión de los bancos puede conducir a la deposición de arcilla y limo que es especialmente dañino para los hábitats de desove de peces y los hábitats de macroinvertebrados bentónicos que viven en los cantos de grava. Estos eventos ocurren generalmente durante inundaciones o caudales altos y desencadenan un episodio de cambio local rápido en la región circundante de avulsión.

Las zonas de pantanos y meandros, propician hábitats de baja energía, las curvas de los meandros proporcionan sustrato para especies de plantas pioneras, mientras que la erosión puede derribar bosques ribereños más pequeños e induce el ingreso de material vegetal en la corriente.

### 7.2.1 Transporte de sedimentos.

Los regímenes de flujos altos clasifican y transportan los sedimentos, por lo tanto, son de vital importancia para el desarrollo de especies acuáticas. Por lo general, los sedimentos gruesos (grava y guijarros más grandes) que se encuentran a lo largo del eje mayor velocidad y profundidad, en cambio, los sedimentos más finos se depositan a lo largo de las márgenes de los canales. Los lechos de los canales a menudo presentan una capa superficial; de partículas gruesas (armadura) que solo tienen un diámetro de uno o dos granos, con una mezcla más heterogénea de tamaños de sedimentos debajo. La distribución del tamaño de los sedimentos del lecho o la textura del sedimento es uno de los aspectos más dinámicos de un sistema fluvial, que cambia rápidamente en respuesta a cambios en otras variables (pendiente del lecho del cauce, descarga o cantidad de madera grande).

Los organismos bentónicos como insectos o y plantas pequeñas (perifiton) que viven en la superficie de los sedimentos son sensibles a los cambios de tamaño del sedimento, la porosidad del sedimento y la frecuencia del movimiento del lecho. La biota de las regiones con sustratos de grano fino natural es menos sensible a que la biota de regiones con sustratos de grano más grueso. Los peces, por su parte, son más sensibles a los cambios en los tamaños de las partículas, ya que el desove se realiza en superficies con grava, y requieren un sistema aireado para la supervivencia de los huevos y el crecimiento larvario.

## 7.3 Procesos ecológicos.

El flujo de energía y la dinámica de nutrientes en los ecosistemas acuáticos ocurre en todas las dimensiones y está muy influenciado por las dimensiones físicas del cauce. A su vez, estos procesos influyen fuertemente

en la estructura comunitaria de los ecosistemas fluviales y los procesos ecológicos a lo largo de su red longitudinal. En pequeños arroyos de cabecera, los canales son estrechos y poco profundos.

En paisajes boscosos, las entradas de radiación solar al canal son, por lo tanto, generalmente muy pequeñas y las entradas de materia orgánica del ecosistema terrestre son relativamente grandes. Las comunidades de invertebrados acuáticos están dominadas por organismos que trituran las entradas terrestres más grandes (hojas, ramas) o por recolectores que se alimentan de las partículas finas transportadas desde el ecosistema terrestre o creadas por la trituración de partículas grandes en partículas más pequeñas en el ecosistema. Dado que los arroyos se hacen más grandes a medida que fluyen río abajo, los canales generalmente se vuelven más anchos y profundos. Las aberturas en el dosel ribereño sobre el arroyo aumentan las entradas de radiación solar, que provoca un aumento de la producción de algas y plantas acuáticas vasculares, reduciendo los aportes relativos de materia orgánica de origen terrestre. Como resultado, los invertebrados acuáticos están dominados por organismos que raspan las algas del lecho del río y recolectores que se alimentan de pequeñas partículas de materia orgánica. El cambio en el gradiente longitudinal de los arroyos es también el factor principal que impulsa los flujos de intercambio hiporreicos esta zona es reconocida como un ecotono donde el agua del canal se mezcla con el agua subterránea (Amaya Toro, 2016). Este cambio crea ambientes físicos, químicos e hidrológicos únicos en arroyos y zonas ribereñas, proporcionando una diversidad de hábitats para muchos macroinvertebrados especialmente adaptados (Stanford y Ward 2001).

Por otra parte, es importante resaltar que la madera en los ríos proporciona estructura y materia orgánica que crea y mejora la diversidad del hábitat, y es una fuente de alimento para muchos organismos ribereños y acuáticos (Boyer, Berg y Gregory 2003). Esta aumenta la rugosidad del canal y la complejidad del hábitat, desencadena la formación de islas y forma presas que atrapan hojas, ramas y sedimentos finos. La materia orgánica en partículas finas (partículas de menos de 1 mm de diámetro) retenidas por grandes trozos de madera proporciona alimento para insectos y otros invertebrados acuáticos.

Corrientes de cabecera pequeños y empinados con entrada de madera a menudo contienen una serie de piscinas escalonadas formadas por troncos que atraviesan el canal y atrapan piezas más pequeñas de material leñoso y hojas. Por tanto, en muchos arroyos y ríos en todo el mundo, abundancia y diversidad de peces dependen de la acumulación de madera.

Los procesos de ingreso de madera en los ríos son complejos ya que involucran variables específicas del sitio (tamaño, especie, densidad, y condición de los árboles ribereños, geometría del banco y erosión) y eventos estocásticos (muerte de árboles, derribo de árboles, altos caudales, fallas de bancos). La madera sumergida continuamente resiste la descomposición durante siglos, pero la madera sujeta a humedecimiento y secado alternativos puede desintegrarse y descomponerse en menos de una década, con tasas exactas que dependen de las especies y los factores climáticos regionales.

#### 7.4 Diseño de canal de dos etapas

Para su elaboración se siguieron los lineamientos descritos en el Manual Nacional de Ingeniería de diseño de restauración de arroyos, elaborado por el Departamento de Agricultura de Estos Unidos, este diseño incorpora bancos que funcionan como llanuras de inundación e intenta restaurar o crear algunos procesos de canales aluviales naturales. Este enfoque de dos etapas proporciona un rendimiento físico y ecológico

mejorado. El canal de descarga que forma proporciona el transporte de sedimentos necesario, mientras que el canal de la llanura de inundación proporciona el transporte de inundación de diseño. Al anidar el canal de descarga que forma el canal dentro del canal más grande, el canal es más estable y requiere menos mantenimiento que canales diseñados para una única sección trapezoidal.

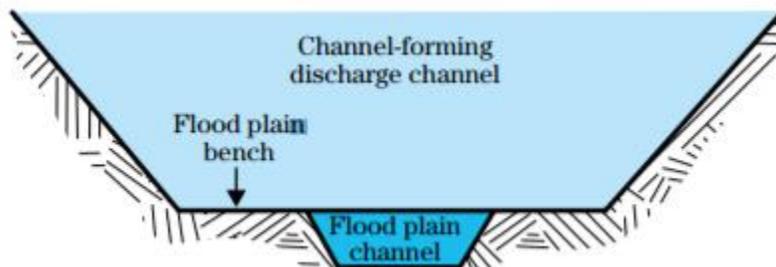


Figura 53. Diseño conceptual para el diseño de un canal de dos etapas  
Fuente: (USDA, 2007).

La mayor ventaja de los canales de dos etapas es la capacidad de transportar sedimentos de forma más eficaz. Adicionalmente, el canal de dos etapas también tiene el potencial de crear y mantener un mejor hábitat que un diseño trapezoidal convencional. Durante los periodos de bajo flujo, el diseño del canal de dos etapas permite mantener una profundidad de la lámina de agua para las especies que así lo requieran.

La hierba en los bancos puede proporcionar algo de corriente cubierta y sombra, que beneficia a algunas especies de macroinvertebrados bentónicos. El sustrato en el canal de banca llena mejora a medida que la forma de dos etapas aumenta, el transporte de sedimentos y su clasificación se hace a través de los depósitos finos en los bancos y el más grueso que forma la cama. Si su dimensionamiento es adecuado puede reducir o incluso hasta eliminar los procesos de mantenimiento que se realizan a los canales convencionales de gran escala. La parte superior debe transportar la descarga que forma el canal y debe tener un tamaño adecuado para evitar que los flujos de inundación de diseño rebasen los márgenes de la zanja e inunden la tierra circundante. Para desarrollar un diseño de un canal de dos etapas es necesario inicialmente dimensionar el canal de banca llena, el cual transportará la mayor parte del sedimento en el canal, por lo cual es una característica clave del diseño (USDA, 2007).

## 7.5 Ecosistema Acuático

De acuerdo con el componente de diagnóstico, se encontró que la Ictiofauna del Río Tejar corresponde al salmónido, *Oncorhynchus mykiss*, nombre común, trucha arcoiris, con el propósito de articular el diseño a las condiciones que propicien su desarrollo se empleó como referencia el Manual de restauración del hábitat de salmonidos de California.

El diseño propuesto, define la integración de piscinas escalonadas a lo largo del Río Tejar, con el propósito de que el agua que se sumerge en cada paso forme pequeños pozos entre los pasos, que favorezcan la formación de hábitats para peces y macroinvertebrados. Esta forma del lecho disipa la energía de la corriente a medida que el agua fluye sobre el escalón y se sumerge en la piscina receptora.

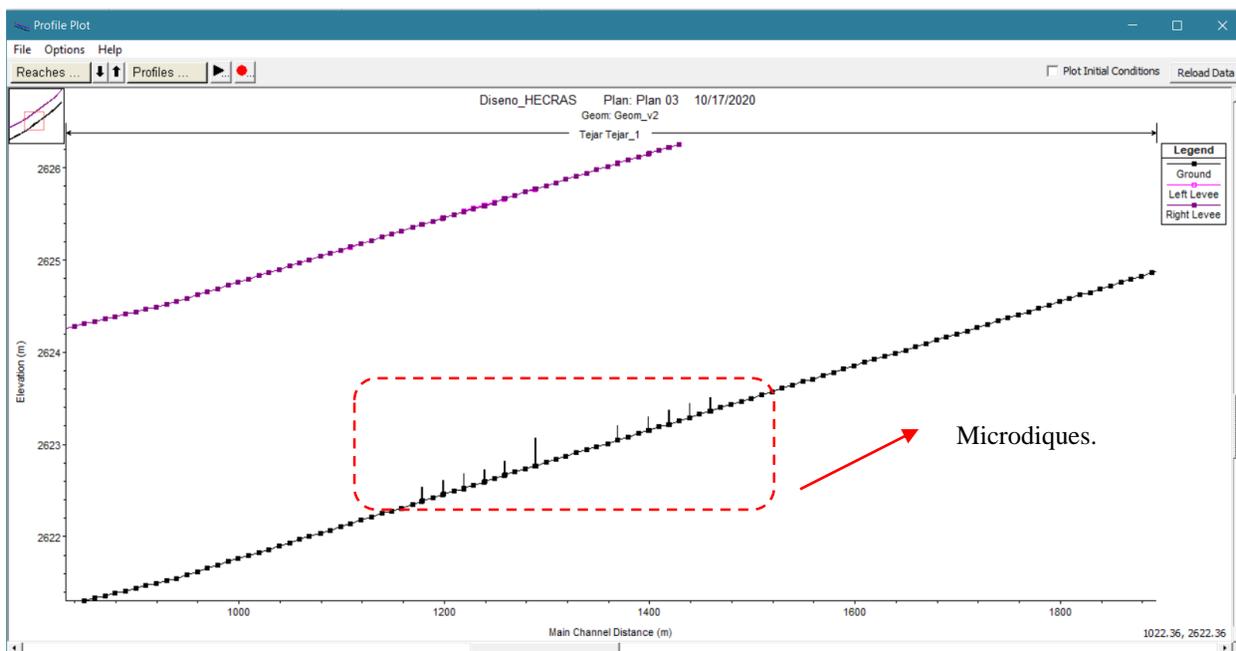


Figura 54. Inclusión de microdiques para el diseño de restauración.  
Fuente: Autora, 2020.

El espaciamiento entre escalones varía entre 0.5 y 2 anchos de canal, y el espaciamiento se hace más cercano a medida que aumenta la pendiente del canal.

La altura del escalón ( $H$ ), medida desde la profundidad máxima de la piscina hasta la parte superior del escalón, está estrechamente relacionada con el tamaño de las partículas que forman el escalón (Chin 1999; Chartrand y Whiting 2000). En este trabajo el tamaño medio de la roca que forma el escalón es aproximadamente igual a la altura del escalón, con esta configuración se busca que el canal se mantenga en condiciones estables.

Para efectos de la investigación, esta configuración se denominará como subunidad, que consiste en una serie de escalones espaciados e intercalados por pequeñas piscinas. En la parte inferior de la serie de pasos hay una subunidad de piscina grande. En flujos altos, el agua se acelera a medida que baja los escalones, y la gran piscina en la parte inferior de los escalones disipa la energía del flujo y ralentiza el agua. La piscina grande también proporciona un hábitat para los peces durante los flujos altos, cuando las piscinas más pequeñas son demasiado turbulentas. La *Figura 55*, describe la configuración descrita y empleada para el diseño de la restauración del Río Tejar.

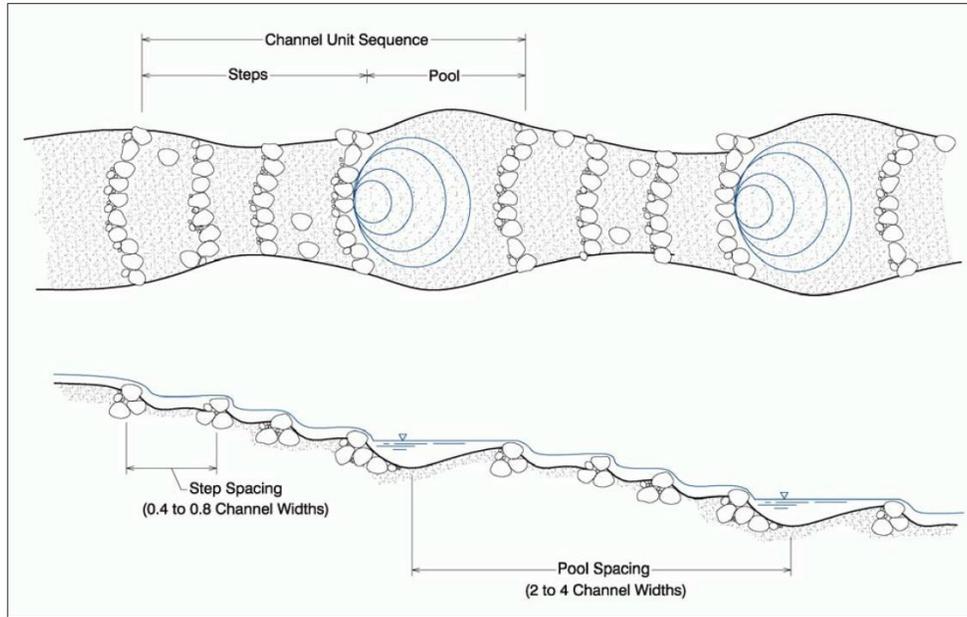


Figura 55. Secuencia de canales de grupos escalonados que incluye grupos más grandes, como se describen (*University of California, 2009*)

### 7.8 Diseño, establecimiento y mantenimiento de la zona de protección

El componente ecosistémico está asociado con las funciones ecosistémicas del cuerpo de agua y los componente bióticos y abióticos de la ribera siendo su vegetación un elemento fundamental. El aporte de hojarasca proveniente de la vegetación riparia se considera como la fuente principal de energía para el desarrollo de redes alimenticias en ríos de montaña, debido a la baja producción primaria autóctona que se presenta por la limitación de luz causada por la cobertura de la vegetación (Vannote, Minshall, Cummins, & Sedell, 1980). Esta condición hace que la materia orgánica en los ríos de orden bajo determine la estructura de las comunidades acuáticas.

La ronda hídrica, en este caso denominada zona de protección, permite mejorar la calidad del agua a través de la eliminación de productos químicos antes de que estos lleguen a la superficie, para ello es necesaria la combinación correcta de árboles, arbustos y pastos nativos. Un área de amortiguamiento debidamente cuidada también puede moderar las inundaciones, ayudar a recargar los suministros de agua subterránea, prevenir la erosión del suelo y preservar el hábitat. El sistema de amortiguación diseñado incluye múltiples especies establecidas de forma paralela al Río Tejar, y plantaciones que permitan estabilizar el terraplén del río.

Para la configuración del diseño de la zona de amortiguación ribereña propuesta, se establecen tres zonas de vegetación, cada una plantada paralela al río, la *Figura 56* presenta un esquema de esta configuración.

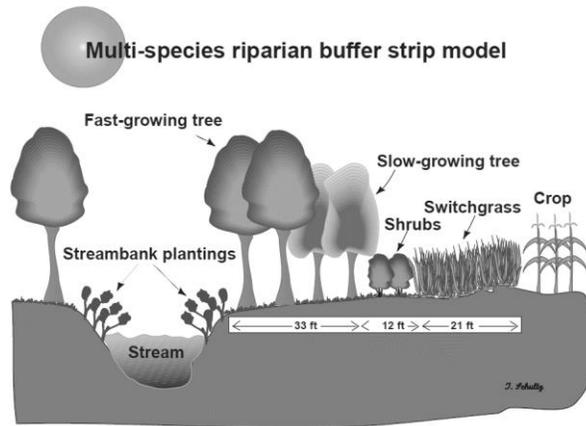


Figura 56. Configuración del modelo de franja de protección ribereña de múltiples especies  
Fuente. (Schultz, Wray, Isenhardt, & Rodriguez, 1997).

La zona más cercana al arroyo es una franja de árboles de 9 metros de ancho como mínimo (cuatro a cinco filas). La zona media es una zona de arbustos de un mínimo de 3 metros de ancho (una o dos filas). Lo más alejado del arroyo, junto a la tierra de cultivo, es una franja mínima de pastos nativos de 6 -7 metros de ancho.

Esta combinación de árboles, arbustos y pastos ayuda a proteger el río más que plantar una sola especie. Los árboles y arbustos proporcionan sistemas de raíces perennes y almacenamiento de nutrientes a lo largo de la rivera del río. Los arbustos proporcionan una mayor densidad de tallos que permite reducir la escorrentía superficial. El diseño se puede modificar para adaptarse al paisaje y las necesidades de quienes habitan en cercanía a la ronda hídrica, sustituyendo arboles por arbustos o expandiendo la zona de pastos. Es importante resaltar que cuando se limita o disminuye la zona de árboles, la franja de protección es menos efectiva que una con una zona de árboles amplia, la franja de protección es menos efectiva que una con una zona de árboles amplia. El ancho de la franja de protección también se puede adaptar para enderezar los límites de labranza a lo largo de arroyos o cursos de agua serpenteantes.

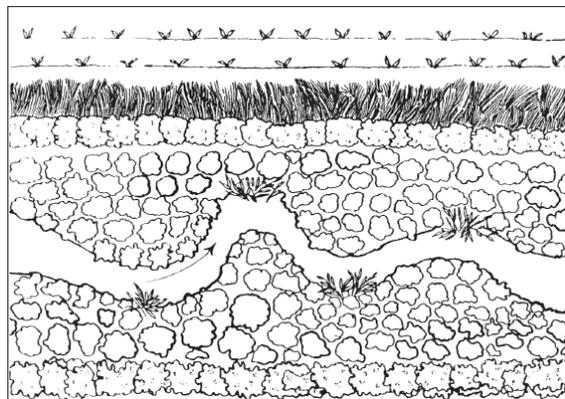


Figura 57. Uso de zonas de protección para enderezar los límites de la labranza  
Fuente (Schultz, Wray, Isenhardt, & Rodriguez, 1997).

- **Zona de árboles**

En esta zona se recomiendan cuatro o cinco hileras de árboles. Los árboles más cercanos al arroyo en esta zona (filas uno y dos y posiblemente tres) se seleccionan por su capacidad para desarrollar rápidamente raíces profundas que pueden aumentar la estabilidad del banco. Las mejores opciones son las especies terrestres de fondo adaptadas al área que tienen una tasa de crecimiento rápida como la acacia forrajera, el cucharo y el agraz. La especie debe ser tolerante a las condiciones húmedas. En el área exterior de la zona de árboles (filas tres, cuatro y cinco), maderas duras como el roble, pino patula y mano de oso. Si el nivel freático está al menos a un metro bajo tierra durante la mayor parte de la temporada de crecimiento, se deben plantar especies de madera dura que requieran un buen drenaje. En los sitios de drenaje deficiente, se deben seleccionar especies de madera dura más tolerantes a las condiciones de humedad.

- **Zona de césped (junto a tierras de cultivo)**

La zona de pasto se encuentra en el exterior de la franja de protección más cercana al campo de cultivo. Se recomienda el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), ya que se ha demostrado ser ideal para la conservación del suelo y la humedad. Estas plántulas están adecuadas para poder soportar sequías extremas debido a su alto contenido de sales de sabia en sus hojas, así como inundaciones por largos periodos, aproximadamente de tres meses o más después de establecer esta barrera en el terreno, crecen en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad. Cuando son incorporadas en un terreno en orden de hileras simples, se crean unas barreras que son muy efectivas en mitigar y disipar aquellas aguas de escorrentía que pasan con libre acceso, reduciendo la erosión, conservando la humedad y junto a ello atrapando sedimentos. Aunque cualquier barrera puede hacer eso, el pasto Vetiver, debido a sus características morfológicas y fisiológicas únicas, lo pueden hacer mejor que otros sistemas. (Soto, 2011).

Las características particulares del sistema radical de esta planta abundante y fibrosa pueden explorar hasta más de tres metros de profundidad; el sistema de raíces extremadamente profundo, masivo y denso amarra el suelo y al mismo tiempo impide que sea separado por flujos de agua de alta velocidad. Contribuyen en el mejoramiento de algunas características físicas del suelo. Por ejemplo, la incorporación del Vetiver en suelos con alta compactación ha permitido una leve reducción de la densidad aparente, incrementos importantes en la conductividad hidráulica, aumento del espacio poroso total y microporosidad.

En la *Figura 58*, se presenta un esquema gráfico de la zona de protección propuesta que incluye la vegetación riparia compuesta por diferentes especies descritas en el capítulo de diagnóstico y los elementos puestos en según la configuración descrita en este capítulo, que permiten reducir las condiciones de erosión del río, el aporte de nutrientes, fortalecer las conexiones entre los ecosistemas acuáticos y terrestres, apoyar los procesos de mitigación de inundaciones y contaminación del Río Tejar por la presencia de agroquímicos. Para el caso de estudio se determina un ancho de franja inundable de 10 metros hacia cada costado, con lo cual se preservan las relaciones ecosistémicas para una esta franja inundable.



Figura 58. Representación gráfica del diseño propuesto, incluye zona de protección  
Fuente. Autora 2020.

La conectividad entre las zonas de ribera y el cauce influye en aspectos como la estabilización de márgenes, la retención de sedimentos la protección y regulación ante inundaciones, funciona como filtro de nutrientes y pesticidas, sombra, fuente de materia orgánica, hábitat y corredor ecológico.

## 7.9 Aplicación de criterios de diseño

A continuación, se listan los componentes técnicos que serán abordados en este capítulo para llevar a cabo la restauración del cauce del río Tejar en una longitud aproximada de 3 Km.

### 7.9.1 Reconfiguración del alineamiento

Aunque existen diversas metodologías para el análisis del comportamiento meándrico de los cauces, éstas se encuentran restringidas a determinadas condiciones asociadas a los grados de libertad del mismo. Las formas meándricas que adoptan ciertos cauces aluviales de baja pendiente y para los cuales Leopold (1994) estableció unas relaciones geométricas no tienen total aplicabilidad para el cauce de estudio. En la Figura 59 se observan los parámetros adoptados por Leopold para la caracterización geométrica de meandros en cauces.

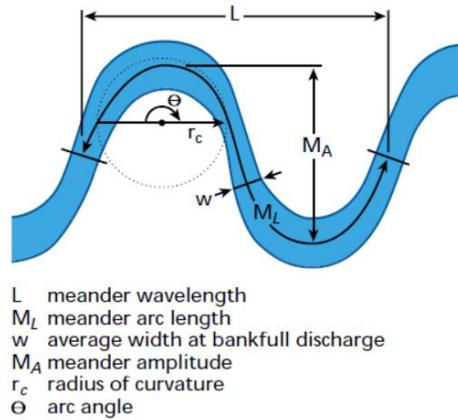


Figura 59. Caracterización geométrica de meandros en cauces

Fuente: Autora 2020.

La restauración y manejo de los cauces requiere de un entendimiento de los factores que interactúan entre el cauce y la cuenca, transporte de sedimentos de fondo y suspensión, pendiente de drenaje, conformación física y geológica del sustrato y la vegetación riparia presente en bancas y zona inundable. A partir del conocimiento de los factores anteriores, es posible determinar de manera cualitativa y cuantitativa las potenciales inestabilidades del cauce y los posibles procesos morfológicos futuros del río.

Los procesos de ajuste afectan la totalidad del sistema fluvial y están compuestos por fenómenos de degradación y agradación, así como los cambios en la geometría en planta, ensanchamiento o estrechamiento de sección, así como cambios en la magnitud y tipo de cargas de sedimento. (SCR, 2001)

El río Tejar presenta unas condiciones de drenaje significativamente intervenidas, esto se evidencia en la presencia de tramos rectos que no obedecen a la naturaleza del cauce. En las Figura 60 y Figura 61 se muestra una comparación de un cauce para el cual aplican las ecuaciones de Leopold y el río Tejar.



Figura 60. Planimetría natural

Fuente: Autora 2020.



Figura 61. Planimetría modificada

Fuente: Autora 2020.

Para la restauración del alineamiento en el cauce del río Tejar se seguirán algunos de los criterios de reconformación, partiendo de que las metodologías propuestas en la literatura no son totalmente aplicables.

Con el fin de revisar el efecto de las crecientes sobre las zonas de alta curvatura, se generaron las manchas de velocidades máximas y se revisó el comportamiento en los meandros. Se evidenció una redistribución de velocidades producto de las fuerzas centrífugas, producto de la inercia de la masa de fluido. Se determina entonces la necesidad de recuperar un alineamiento antecedente, con el fin de reducir el efecto de estas fuerzas en las bancas. En la Figura 62 se muestra un detalle del comportamiento de las velocidades para la condición actual y el alineamiento propuesto para la reducción de esfuerzos cortantes.

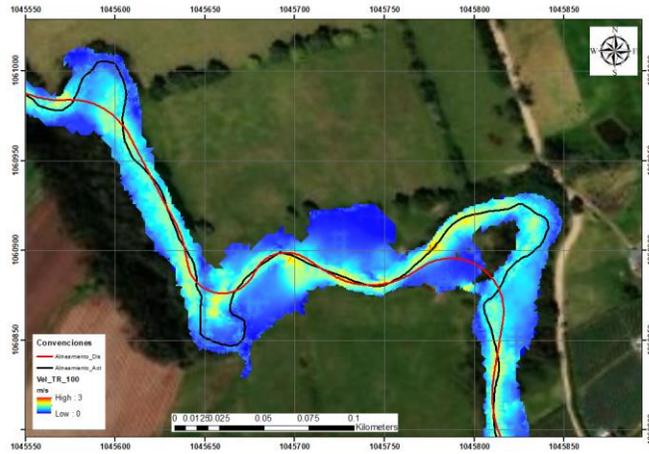


Figura 62. Mancha de velocidades para la condición actual y rectificación propuesta  
Fuente: Autora 2020.

La reconformación del alineamiento para estabilizar la dinámica del cauce y mejorar las condiciones de drenaje, comprende entonces la rectificación del alineamiento original a unas condiciones antecedentes y conservando en lo posible el alineamiento original. La rectificación se realiza mediante la integración de curvas circulares simples con alineamientos rectos, reduciendo de esta manera el radio de curvatura de los meandros más críticos e inestables. En la Figura 63 se muestra la comparación del alineamiento actual y el propuesto para el sitio de proyecto.

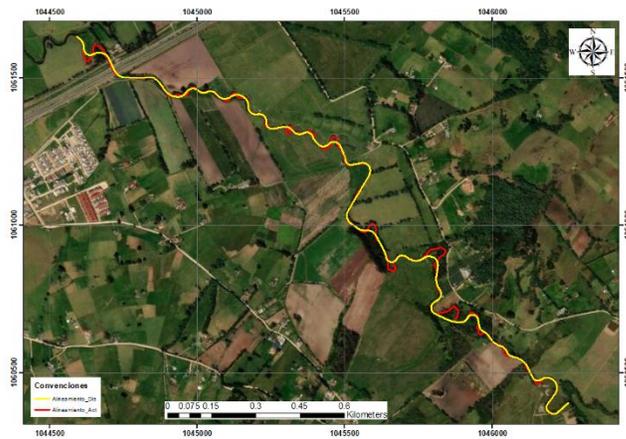


Figura 63. Comparación entre el alineamiento actual y el alineamiento propuesto para el proyecto.  
Fuente: Autora 2020.

Para la reconfiguración se han propuesto un total de 55 curvas circulares, cuyos radios de curvatura varían según las condiciones del alineamiento. En el plano se muestra el alineamiento junto a las características geométricas de cada una de las curvas propuestas para la rectificación del alineamiento en el sitio de estudio.

### 7.9.2 Sección Transversal de diseño

La sección de diseño a proponer para la restauración del cauce debe tener las siguientes características:

- Genere una reducción en las láminas asociadas a aguas máximas.
- Permitan la ocurrencia de planicies de inundación controladas
- Propicien la recuperación del hábitat acuático (biotopos), así como sus especies asociadas.
- Generen un entorno para la restauración del bosque ripario
- Reduzcan la inestabilidad longitudinal y transversal de las bancas del cauce
- Se encuentre dentro de la ronda hídrica y no sea invasiva para los pobladores, siendo armónica con el entorno.

Una vez revisada bibliografía asociada a las secciones óptimas para llevar a cabo restauraciones de cauces aluviales, se determinó que la sección más óptima corresponde la sección tipo doble nivel (two stage Channel) (NRCS, 2007). Las características de esta sección se muestran a continuación:

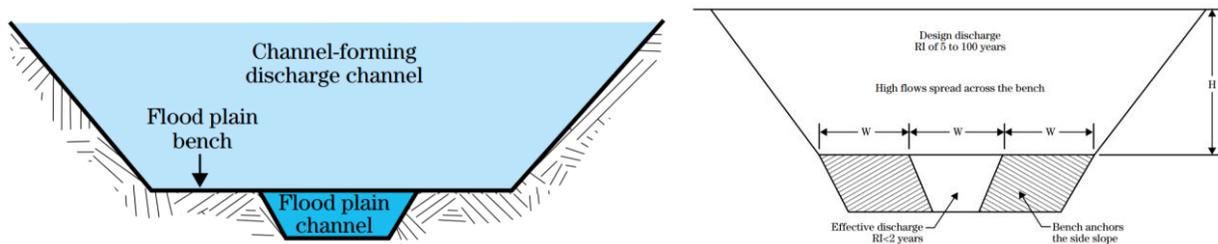


Figura 64. Características geométricas de la sección tipo doble nivel (Two stage channel) (NRCS, 2007).

Los beneficios de este tipo de secciones transversales están asociados a la mejora en las condiciones de drenaje y las funciones ecológicas del cauce. Dentro de los beneficios a la vez también se encuentra el aumento en la estabilidad del cauce y la necesidad de un menor mantenimiento. Por otro lado, la construcción de una sección amplia y continua reduce el potencial erosivo de la corriente para flujos altos debido a la reducción de los esfuerzos cortantes en la berma de inundación.

El diseño de la zona inundable ha sido analizado previamente en el capítulo de diagnóstico, en el cual se hace una revisión de las condiciones necesarias para el restablecimiento del corredor del bosque ripario a lo largo del cauce de estudio y de la necesidad del aporte de nutrientes por parte del sedimento en suspensión del cauce a este corredor de protección. En la Figura 65 se muestra la sección de diseño propuesta a implementar en el cauce.

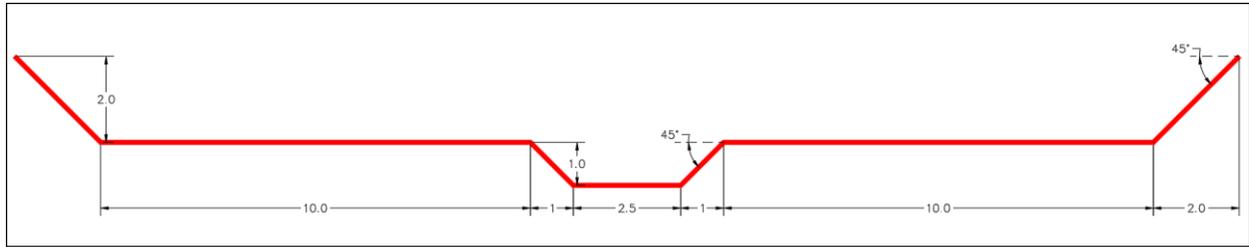


Figura 65. Sección de diseño propuesta a lo largo del corredor del cauce  
Fuente: Autora 2020.

### 7.9.3 Perfil de diseño del Cauce

La rectificación del cauce no sólo requiere la implementación de una sección y un alineamiento de diseño. Es necesario también rectificar los fondos con el fin de que, en condiciones de crecientes, estas sean transportadas adecuadamente hacia aguas abajo. Para el cauce del río Tejar se proponen cuatro pendientes longitudinales, las cuales mantienen un régimen de drenaje del tipo subcrítico en el cauce, así como la reducción de las velocidades de flujo en el sistema. En la Figura 66 se observan las pendientes de diseño propuestas en el cauce del río Tejar.

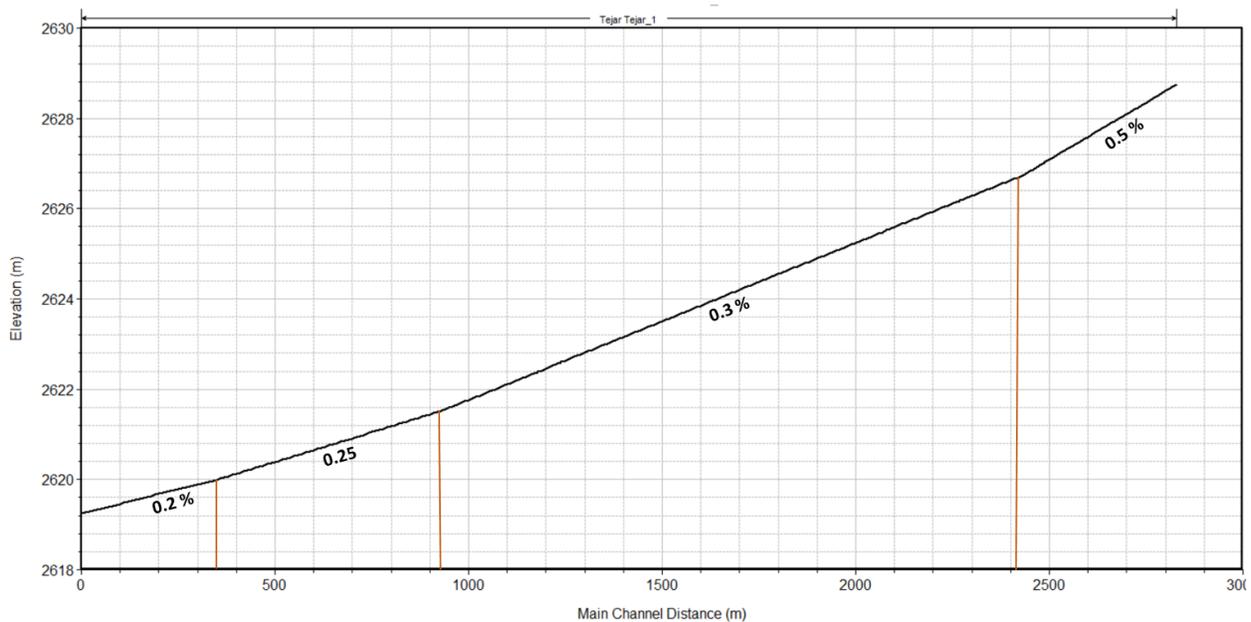


Figura 66. Pendientes de diseño, Rio Tejar  
Fuente: Autora 2020.

Estas pendientes serán posteriormente evaluadas hidráulicamente mediante análisis de transporte de sedimentos para la totalidad del cauce de estudio, con el fin de asegurar un óptimo drenaje en condiciones de crecientes.

### 7.9.4 Superficie de diseño del cauce

Una vez establecido el alineamiento y la pendiente de diseño y teniendo en cuenta que a lo largo del alineamiento del cauce no se presentan afluencias significativas de otras cuencas, se propone una única sección de diseño continua. Posteriormente utilizando herramientas GIS se realiza una extrapolación de los parámetros para construir la superficie de diseño. En la Figura 67, se observa la superficie de diseño generada para el sitio de estudio.

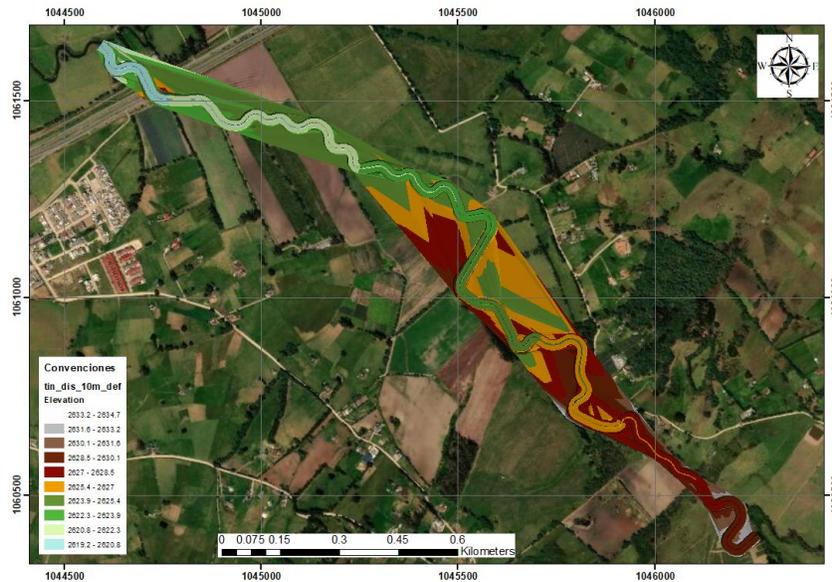


Figura 67. Superficie de diseño, Río Tejar

Fuente: Autora 2020

Por otra parte, esta superficie contempla las condiciones de cortes o rellenos exteriores a las bancas, con el fin de empalmar al terreno existente, asegurando de esta manera la continuidad y la integración del diseño con el terreno existente. En la Figura 68, se observa el detalle de la superficie de diseño y el empalme con el terreno existente.

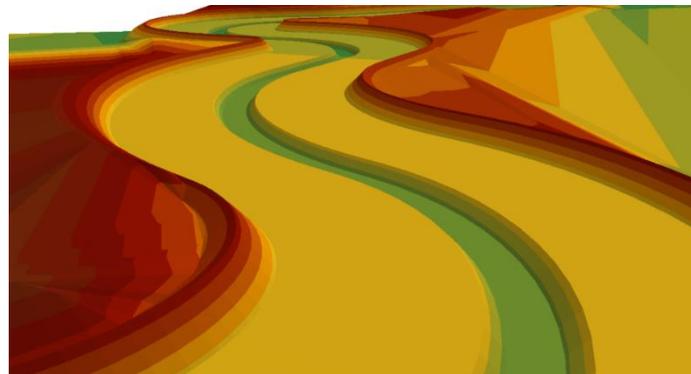


Figura 68. Superficie de diseño y empalme con el terreno existente

Fuente: Autora 2020.

### 7.9.5 Análisis de estabilidad longitudinal para las condiciones de diseño

La pendiente actual del cauce presenta una discontinuidad provocada por los continuos fenómenos de erosión y deposición. Estas condiciones hacen que se presenten continuos cambios de régimen de flujo, así como zonas de mayor erosión lateral y de fondo, esto debido a que el cauce tiende a buscar su equilibrio. El cauce de estudio no presenta influencia de formaciones rocosas que propicien la reducción de los grados de libertad del mismo. En la Figura 69, se muestra el perfil longitudinal y la lámina de agua asociada a un periodo de retorno de 100 años.

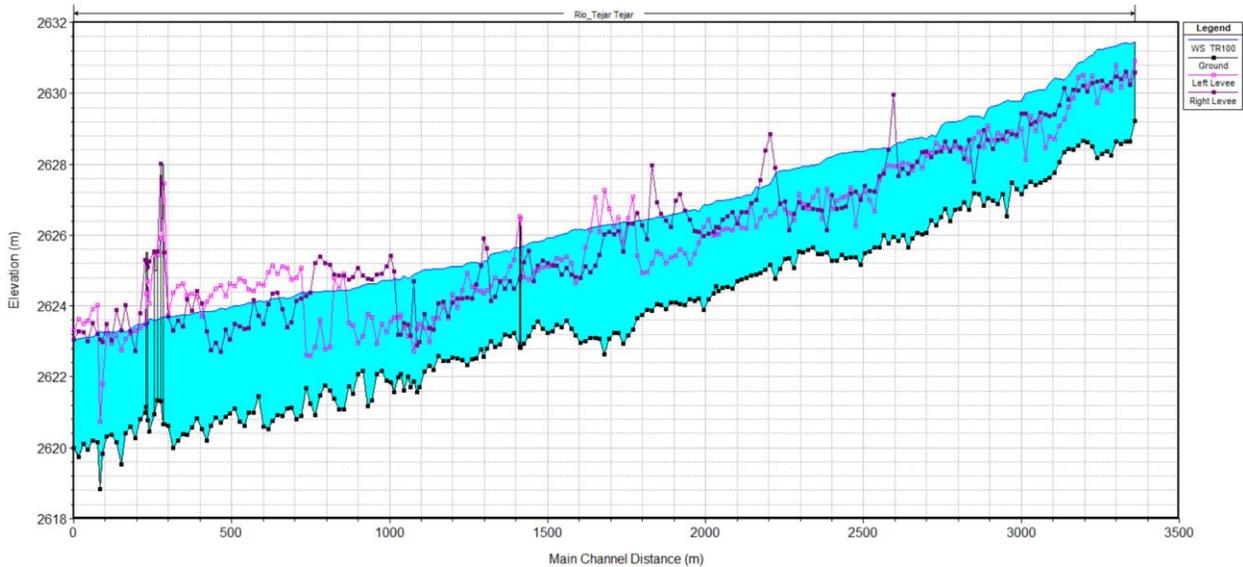


Figura 69. Perfil longitudinal del cauce del Rio Tejar

Fuente: Autora 2020.

Estas condiciones suponen mayores erosiones laterales futuras de las bancas y desplazamientos en planta del alineamiento, con el fin de lograr el equilibrio dinámico del drenaje.

Con el fin de hacer una revisión de la capacidad de arrastre y deposición del cauce para las condiciones futuras, se realiza un análisis de transporte de sedimentos en el cauce utilizando la superficie propuesta. A continuación, se describirán los métodos de cálculo empleados para este análisis.

### 7.9.6 Caudales de diseño para el modelo de transporte de sedimentos

A partir de los modelos hidrológicos en los cuales se estimaron hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno y las curvas granulométricas producto de muestras de lecho de los cauces, se puede realizar una modelación de transporte de sedimentos mediante un flujo cuasipermanente el cual resulta ser más estable debido a que se compone de una serie de flujos permanentes variantes en el tiempo, calculándose por lo tanto un cambio en el lecho para cada paso de tiempo mediante las ecuaciones de Exner. Se establece entonces el caudal de diseño como tres hidrogramas para un periodo de retorno de 100 años, seguido del hidrograma para un periodo de retorno de 50 años partiendo de que la segunda creciente presenta una muy

baja probabilidad de ocurrencia, y finalmente una creciente para un periodo de retorno de 20 años, la cual puede producir una variación significativa del lecho del cauce.

### 7.9.7 Capacidad de transporte de sedimentos del río Tejar

La capacidad de transporte de sedimentos de una corriente se encuentra comprendida por la carga de fondo y la carga en suspensión, las cuales deben ser calculadas mediante diferentes ecuaciones según sea el caso. Los resultados de estas estimaciones pueden ser usados para el estudio de procesos erosivos y pérdidas de lecho en las corrientes en estudio, por otro lado, se pueden usar para desarrollar las curvas de sedimentos o sedimentogramas, las cuales pueden ayudar a predecir los procesos fluviales encontrados en cauces naturales.

El transporte de sedimentos se compone de las cargas de fondo, en suspensión y de lavado, definidas a continuación:

Carga en Suspensión: Es la parte del sedimento total transportado que es mantenido en suspensión por turbulencia en largos periodos de tiempo sin contacto con el lecho del cauce. La velocidad de movimiento de estas partículas es prácticamente la misma del cauce principal del río.

Carga de Fondo: Es el sedimento en casi continuo contacto con el fondo, el cual presenta movimiento mediante rodamiento, deslizamiento o saltando.

Carga de Lavado: Es la parte de la carga en suspensión que está compuesta de partículas de tamaños menores que aquellos encontrados en cantidades apreciables en el material del lecho. Se encuentra en suspensión casi permanente y se encuentra transportado a través de la corriente sin depositación. La descarga de la carga de lavado a través de un tramo depende sólo de la tasa en la cual estas partículas están disponibles en el área de drenaje y no de la capacidad de transporte del flujo.

#### 7.9.7.1 Iniciación de movimiento de fondo

La iniciación del movimiento de las partículas en el lecho depende de las características hidráulicas en la región cercana al lecho, por lo tanto, las características de flujo en esta región son de importancia primaria. Dado que la determinación de la velocidad actual en el nivel del lecho es difícil, los esfuerzos cortantes tienen mayor prevalencia, aunque no exclusiva, en la determinación del punto de movimiento incipiente. Los esfuerzos cortantes en el lecho son representados como se muestra a continuación.

$$\tau_b = \gamma RS \quad (11)$$

Donde:

$\tau_b$ : Esfuerzos cortantes

$\gamma$  : Peso unitario del agua  
 $R$  : Radio hidráulico  
 $S$  : Pendiente de energía

Otro factor que desempeña un papel importante en la iniciación y suspensión continua de las partículas son las fluctuaciones turbulentas en el nivel del lecho. Unas medidas de las fluctuaciones turbulentas cerca al lecho pueden ser representadas por las velocidades de corte.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad \text{o} \quad u_* = \sqrt{gRS} \quad (12)$$

Donde:

$u_*$ : Velocidad Cortante de Fondo

Adicionalmente el tamaño, forma, características de rugosidad y velocidad de caída de las partículas representativas en el cauce tienen una significativa influencia en la habilidad de ser puestas en movimiento, de mantenerse en suspensión y de ser transportadas. EL tamaño de la partícula es frecuentemente representado por el diámetro medio de las partículas (dm). Por conveniencia, la forma es típicamente representada como una esfera perfecta, pero en algunos casos puede ser corregida por un factor de forma. La rugosidad es una función del tamaño de la partícula.

En general, una ecuación típica para el transporte de múltiples tamaños de sedimentos puede ser representada como de muestra a continuación:

$$g_{si} = f(D, V, S, B, d, \rho, \rho_s, sf, d_i, p_i, T) \quad (13)$$

Donde:

$g_{si}$  : Tasa de transporte de sedimento del tamaño  $i$ .  
 $D$  : Profundidad de flujo.  
 $V$  : Velocidad media del canal.  
 $S$  : Pendiente de energía.  
 $B$  : Ancho efectivo del canal.  
 $d$  : Diámetro representativo de partícula.  
 $\rho$  : Densidad del agua.  
 $\rho_s$  : Densidad de las partículas de sedimentos.  
 $sf$  : Factor de forma de partícula.  
 $d_i$  : Diámetro geométrico medio de las partículas en el tamaño de clase  $i$ .  
 $p_i$  : Fracción del tamaño de partícula  $i$  en el fondo.  
 $T$  : Temperatura del agua.

### 7.9.7.2 Velocidad de caída

La suspensión de una partícula de sedimento es iniciada una vez la velocidad cortante en el lecho se acerca a la misma magnitud que la velocidad de caída de la partícula. La partícula se mantendrá en suspensión tanto como los componentes verticales de la turbulencia del fondo excedan la velocidad de caída.

Para el análisis de todos los puntos se utilizó la ecuación de Van Rijn la cual utiliza factores de forma ( $sf$ ) de 0.7 correspondientes a arenas y areniscas propias de la zona. El factor de forma corresponde a la ecuación mostrada a continuación.

$$sf = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (14)$$

Donde:

$a$ : Longitud de la partícula a lo largo del eje más largo y perpendicular a los otros dos ejes.

$b$ : Longitud de partícula a lo largo del eje intermedio, perpendicular a los otros dos ejes.

$c$ : Longitud de la partícula a lo largo del eje más corto perpendicular a los otros dos ejes.

- Método Van Rijn

Van Rijn aproximó las curvas de la US Inter-agency Committee on Water Resources (IACWR) para la velocidad de caída usando partículas no esféricas con un factor de forma de 0.7 en agua a temperatura de 20 °C. Se usan tres ecuaciones, dependiendo del tamaño de partícula.

$$\omega = \frac{(s-1)gd}{18\nu} \quad 0.001 < d \leq 0.1 \text{ mm} \quad (15)$$

$$\omega = \frac{10\nu}{d} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 0.1 < d < 1 \text{ mm} \quad (16)$$

$$\omega = 1.1[(s-1)gd]^{0.5} \quad d \geq 1 \text{ mm} \quad (17)$$

Donde:

$\omega$ : Velocidad de caída de partícula

$\nu$ : Viscosidad cinemática

$s$ : Gravedad específica de partículas

$d$ : Diámetro de partículas

### 7.9.7.3 Información Granulométrica

Dado que el análisis de transporte de sedimentos depende de las granulometrías del lecho del cauce, se tomaron dos muestras del lecho del cauce, las cuales fueron posteriormente tamizadas. Esta información es ingresada al modelo Hec-Ras como un porcentaje de material que pasa por los tamices de diferentes diámetros. En la Figura 70, se observa la curva granulométrica usada para el análisis del cauce del río Tejar

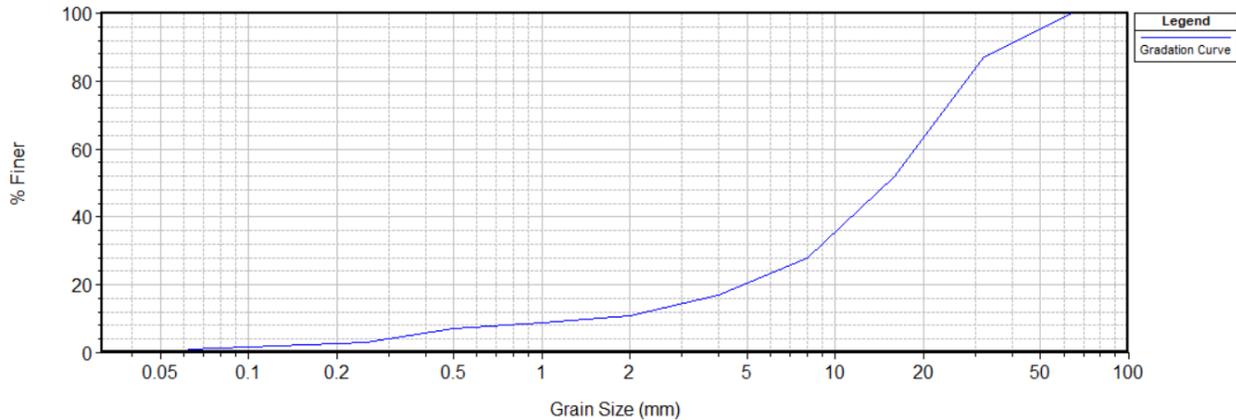


Figura 70. Curva granulométrica calculada en el Río Tejar

Fuente: Autora 2020.

La tasa de transporte es muy sensible a la distribución granulométrica, particularmente a los tamaños más finos, por lo que debe tenerse especial precaución a las ecuaciones de transporte a usar en el modelo hidráulico.

### 7.10. Transporte de sedimentos de fondo

Se han desarrollado diferentes funciones de transporte de sedimentos para condiciones distintas, por lo tanto, se pueden esperar resultados distintos a partir del uso de una función u otra. Normalmente las funciones de transporte de sedimentos predicen tasas de transporte para diferentes casos de parámetros hidráulicos en régimen permanente y propiedades de sedimentos. Para el caso en estudio se tomaron las ecuaciones de Wilcock and Crowe, las cuales aplican a cauces con presencia de arenas y gravas, y se explicarán a continuación:

- *Ecuación de Wilcock and Crowe*

Este método se basa en la teoría de que el transporte es principalmente dependiente del material que se encuentra en contacto directo con el flujo. Esta ecuación cuantifica el efecto del contenido de arenas en el transporte de gravas. Esta metodología calcula la **función de ocultamiento**, la cual reduce el potencial transporte de partículas pequeñas, debido a que la arena se anida entre las gravas mayores, lo cual reduce los esfuerzos cortantes del lecho.

La **función de transporte de gravas** cuantifica el efecto del contenido de arena en el transporte de gravas. Mientras los clastos gruesos reducen los esfuerzos cortantes en el transporte de partículas finas, el transporte de gravas se incrementa con el contenido de arenas. La ecuación de cálculo de los esfuerzos cortantes se muestra a continuación:

$$\tau^*_{rm} = 0.021 + 0.015e^{-20FS} \quad (18)$$

En donde  $\tau^*_{rm}$  es el esfuerzo cortante de referencia y FS es el porcentaje de contenido de arenas. A medida que el contenido de arenas se incrementa, el esfuerzo cortante de referencia disminuye, disminuyendo el transporte total.

- **Flujo Cuasipermanente**

El flujo cuasipermanente se compone de un hidrograma continuo con una serie de perfiles discretos de flujo permanente. Este tipo de flujo presenta mayor estabilidad que la matriz de solución de las ecuaciones de Saint Venant para flujo no permanente, con un hidrograma aproximado representado por una serie de flujos permanentes que no representa un volumen finito. Para el caso de estudio se generaron los hidrogramas a partir del análisis hidrológico y se discretizaron en intervalos de 10 minutos para un intervalo de cálculo de 5 minutos.

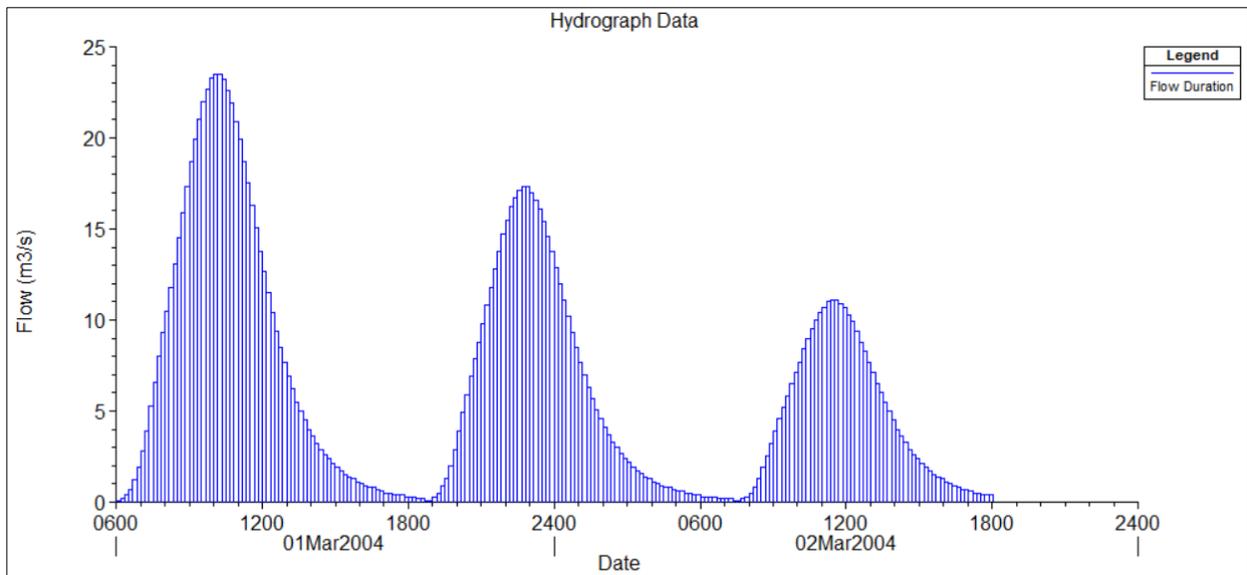


Figura 71. Hidrogramas del Rio Tejar

Fuente: Autora 2020.

- **Ecuación de Continuidad en el Transporte de Sedimentos**

Se resuelve la ecuación de continuidad para la modelación hidráulica, también conocida como ecuación de Exner.

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (18)$$

Donde:

$B$  : Ancho del canal

$\eta$  : Elevación del canal

$\lambda_p$ : Porosidad de la capa activa

$t$ : Tiempo

$x$ : Distancia

$Q_s$ : Carga de sedimento transportada

Como la mayoría de las ecuaciones de continuidad, la ecuación de Exner indica que la diferencia entre el sedimento entrando y dejando un volumen de control debe ser almacenada o removida del almacenamiento. La única característica de la ecuación de Exner es que el almacenamiento de sedimento es realizado en el fondo en una mezcla multifásica con agua, requiriendo porosidad para trasladar cambio de masa en cambio de volumen. La ecuación de Exner traslada la diferencia entre las cargas de entrada y salida en cambio de fondo, erodando o depositando sedimento.

### 7.10.1 Cálculo de la capacidad de transporte

En el costado derecho de la ecuación de continuidad, el gradiente de sedimentos a través del volumen de control, compara el sedimento de entrada con el sedimento de salida. El sedimento de entrada corresponde al volumen de sedimento de control

- **Efecto de las condiciones de transporte de sedimentos en la sección de diseño**

Una vez realizadas las modelaciones usando las fórmulas anteriormente citadas y usando la información tomada en campo, se procedió a verificar los cambios en el lecho para las condiciones de diseño, con el fin de determinar los efectos del transporte de sedimentos en las secciones propuestas. En la Figura 72, se observa la comparación de los perfiles actuales y posteriores al tránsito de crecientes con transporte de sedimentos.

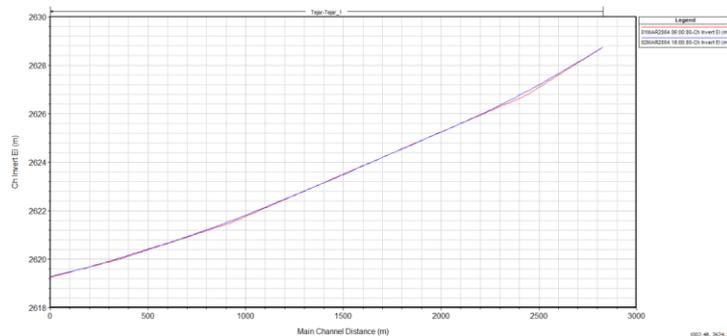


Figura 72. Comparación de perfiles respecto a los efectos de transporte de sedimentos

Fuente: Autora 2020.

Debido a que los perfiles propuestos tienen pendientes que oscilan entre el 0.2 y el 0.5% se espera el proceso de agradación en el cauce, principalmente en las zonas de cambios de pendiente, sin embargo, las agradaciones esperadas no son significativas. El perfil propuesto, por lo tanto, presenta óptimas condiciones para la reducción de los procesos erosivos, propiciando la estabilidad longitudinal del cauce. En la Figura 73, se observa una sección típica en la cual se presentan procesos de agradación.

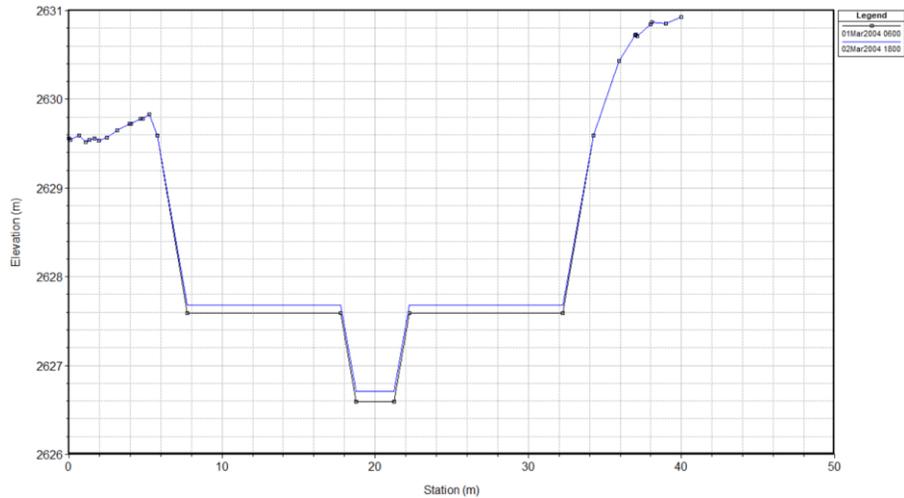


Figura 73. Sección típica con procesos de agradación

Fuente: Autora 2020.

Finalmente, en la Figura 74, se muestra la evolución temporal del lecho a lo largo del periodo de simulación en la sección 2394.

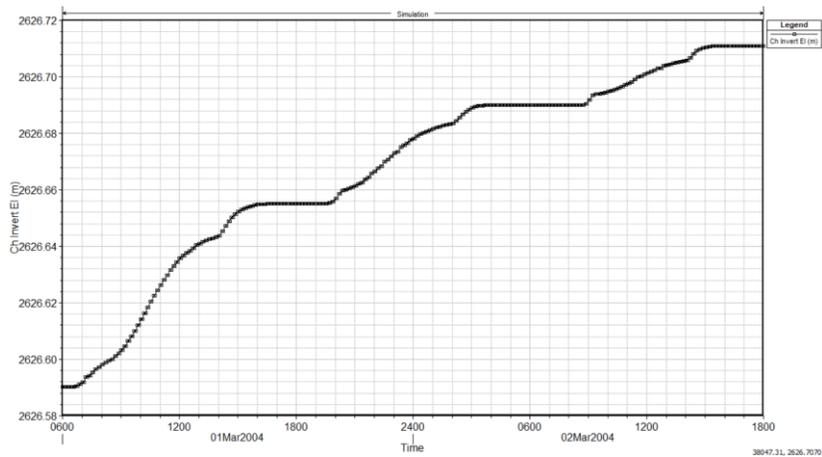


Figura 74. Evolución temporal del fondo del cauce, sección 2394.

Fuente: Autora 2020.

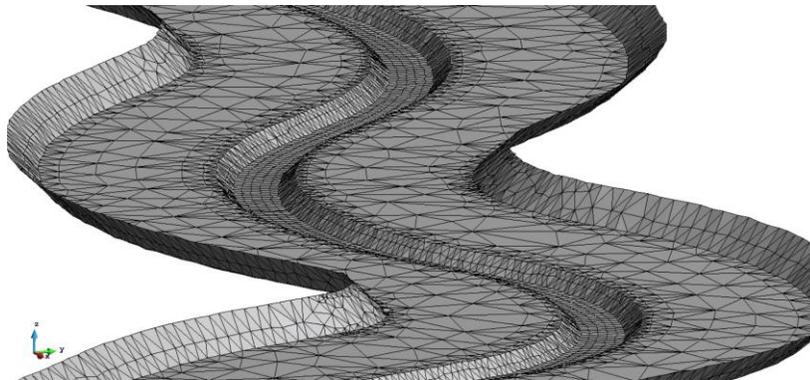
## 7.11 Verificación hidráulica de las condiciones de diseño

Una vez verificada la estabilidad longitudinal y lateral de la sección de diseño frente a los esfuerzos cortantes, los cuales se encuentran asociados al transporte de sedimentos a lo largo del tramo de estudio, se realiza la verificación hidráulica mediante el uso del modelo bidimensional Iber para los caudales de diseño asociados a un periodo de retorno de 100 años.

### 7.11.1 Malla de cálculo en condición de diseño

Debido a que para la condición de diseño la geometría presenta un comportamiento homogéneo, con pendientes y anchos continuos, la construcción de una malla tipo RTIN puede llevar a altos costos computacionales debido a la cantidad de elementos que se pueden generar y la posición de los nodos de los mismos, la cual no estaría alineada. Con el fin de optimizar tiempos de cómputo se ha construido una malla del tipo híbrida, la cual se encuentra compuesta por elementos estructurados y no estructurados, siendo los estructurados asignados al cauce de aguas menores y los no estructurados asignados a la zona de berma inundable.

Debido a las curvaturas que sufre el cauce de aguas mínimas, se estableció un tamaño de los elementos para esta zona de 0.5 metros, mientras que en la zona no estructurada se establecieron tamaños entre uno y tres metros. En la Figura 75 se muestra un detalle de la malla de cálculo generada para la superficie de diseño.



*Figura 75. Malla de cálculo tipo híbrida para la superficie de diseño*

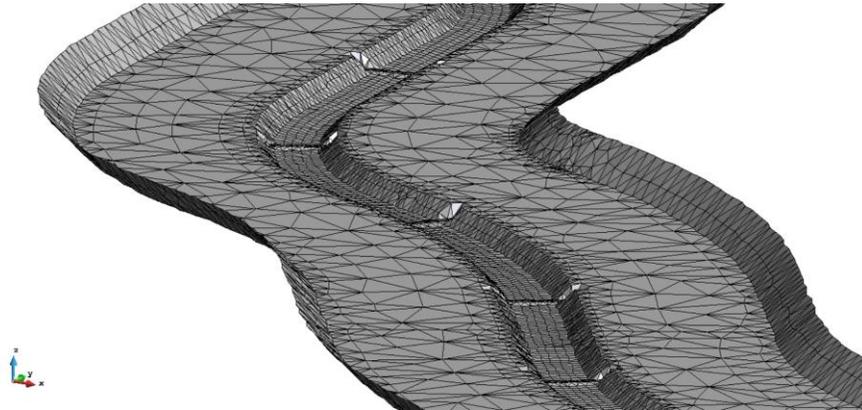
Fuente: Autora 2020.

- **Inclusión de microdiques en la malla**

A partir de los análisis realizados en el Capítulo 6, en los cuales se establece la necesidad de incluir microdiques longitudinales y uniformemente espaciados a lo largo de tres tramos en el sitio de estudio, con el fin de propiciar las zonas de desove y habitabilidad principalmente para el Alevín, se incluirán estas estructuras dentro del modelo hidráulico 2D mediante la modificación de la malla de cálculo.

Para incluir estas estructuras dentro de la malla se utilizó la herramienta Dique dentro del modelo, el cual permite modificar las celdas en tamaño y elevación mediante datos asignados por el usuario. El resultado

final son elementos con una sobre elevación de 0.2m y 0.5m, sobre los cuales se resuelven las ecuaciones de Saint Venant. En la Figura 76 se muestran los micro diques incluidos en la malla de cálculo.



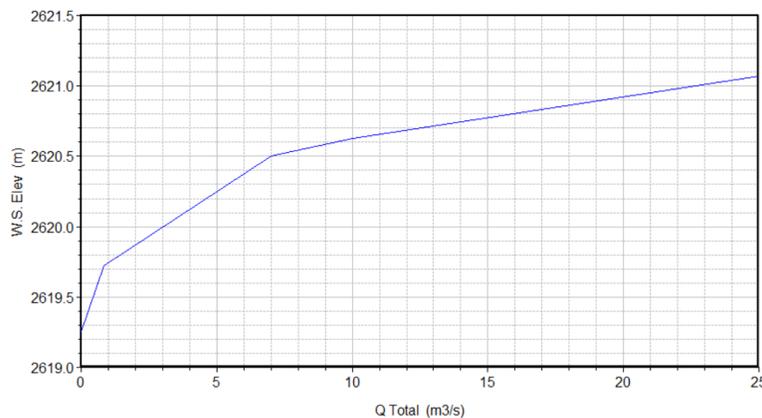
*Figura 76. Inclusión de microdiques en la malla de calculo*

Fuente: Autora 2020.

No se esperan mayores efectos para las condiciones de caudales máximos debido a la magnitud de caudal, sin embargo, para caudales mínimos el efecto esperado es la reducción de las velocidades y flujo tipo vertedero en las zonas de inclusión de las estructuras.

- **Condiciones de Frontera**

Para el modelo de diseño, las condiciones de entrada asociadas a caudales pico para un periodo de retorno de 100 años se mantuvieron, mientras que las condiciones de salida, las cuales corresponden a curvas de gasto fueron modificadas debido al cambio en la relación caudal – profundidad producto de la inclusión de la sección de diseño. En la Figura 77 se muestra la curva de gasto asignada como condición de salida para el modelo de diseño.



*Figura 77. Curva de gasto, condición de frontera de salida*

Fuente: Autora 2020.

### 7.11.2 Revisión de velocidades y niveles

Una vez asignadas las condiciones de frontera al modelo hidráulico, así como las rugosidades propias de un cauce restaurado, se realiza la ejecución del modelo hidráulico y generación de resultados espacializados en el cauce de estudio. Se realizará una comparación de las velocidades de la *Figura 78* con las condiciones de diseño, para lo cual se mostrarán a continuación las dos figuras.

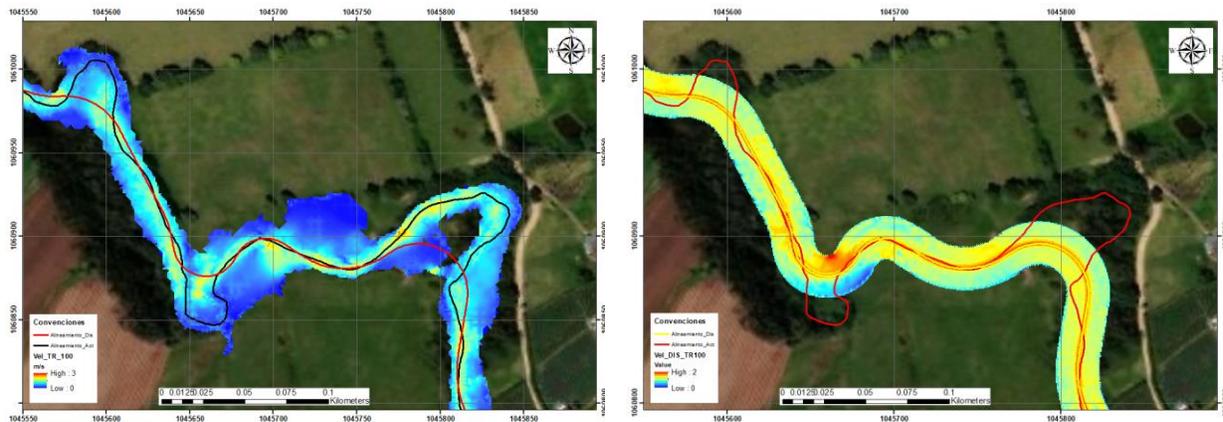


Figura 78. Comparación de velocidades máximas asociadas a un TR 100 años entre la condición actual y la condición de diseño  
Fuente: Autora 2020.

Se evidencia un comportamiento homogéneo de las velocidades, así como una reducción significativa de la velocidad media en el cauce. Se encuentra que para crecientes máximas las velocidades asociadas son cercanas a 1 m/s, reduciéndose por lo tanto los esfuerzos cortantes en el cauce de diseño.

Por otro lado, las elevaciones máximas de la lámina de agua son menores a 2 m, como se muestra en la Figura 79.

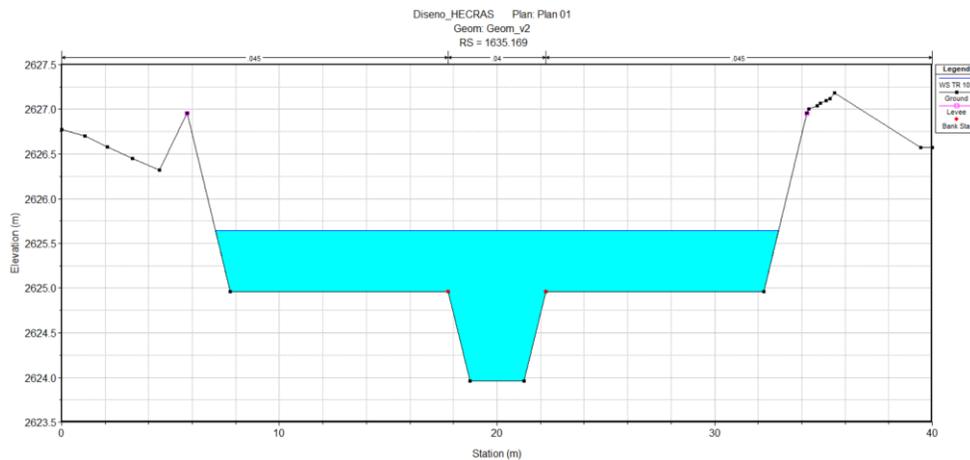


Figura 79. Sección transversal de diseño típica del Rio Tejar  
Fuente: Autora 2020.

Los esfuerzos cortantes para la sección de diseño se encuentran entre los 20 y los 30 N/m<sup>2</sup>, siendo apropiados para la reducción de los procesos erosivos, sin embargo, propician la sedimentación del lecho del cauce.

Finalmente, con el propósito de verificar la funcionalidad hidráulica integral del cauce de estudio para las condiciones de diseño, se generó la mancha de inundación asociada a un periodo de retorno de 100 años para la totalidad del cauce. En la *Figura 80* se muestra la mancha asociada a un periodo de retorno de 100 años para la condición de diseño.



Figura 80. Mancha de inundación TR 100 años en la condición de diseño

Fuente: Autora 2020.

Se observa que para crecientes máximas esta sección presenta óptima funcionalidad permitiendo a la vez desbordamientos controlados y zonas de amortiguación a lo largo de su alineamiento. Una vez verificada esta condición, se realiza la verificación hidráulica de los demás componentes con el fin de asegurar la restauración integral del cauce.

## 8. Capítulo VIII. Resultados de la modelación aplicando el diseño propuesto.

En este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir del uso de los modelos Iber Habitat y HEC EFM aplicados en la configuración del diseño propuesto para la restauración ecohidráulica del Río Tejar.

### 8.1 Resultados de la modelación empleando HEC EFM para la fase de diseño

Para analizar la respuesta del modelo HEC EFM empleando el diseño propuesto, se utilizaron los mismos criterios de la fase de diagnóstico, en lo que refiere a relaciones funcionales y resultados estadísticos. En consecuencia, se obtienen resultados con diferencias significativas para las relaciones funcionales de hábitat para desove de peces y establecimiento de semillas en términos espaciales.

En las figuras 81 y 82 se presentan en detalle los resultados obtenidos para las fases de diagnóstico y diseño. Se observa que el diseño planteado establece zonas continuas y homogéneas a lo largo del cauce para el transporte, depósito y fertilización de semillas, mientras que para la condición inicial estos sectores son localizados y de menor área. Es importante resaltar que, en relación con el hábitat, el análisis se realizó

para el estadio alevín que a lo largo del tramo presenta condiciones favorables para su desarrollo en términos de velocidad y profundidad.

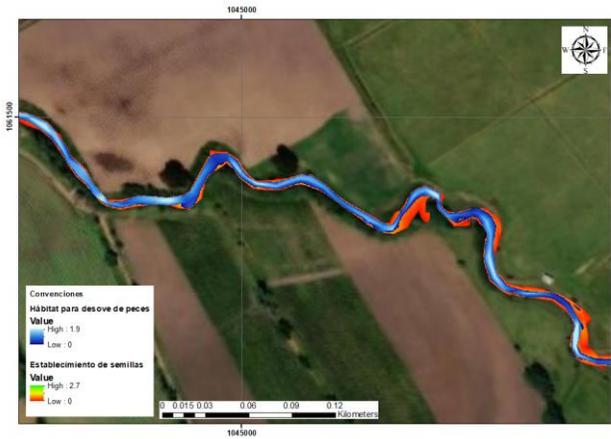


Figura 81. Zonas de fertilización y desove de peces fase de diagnóstico – HEC EFM

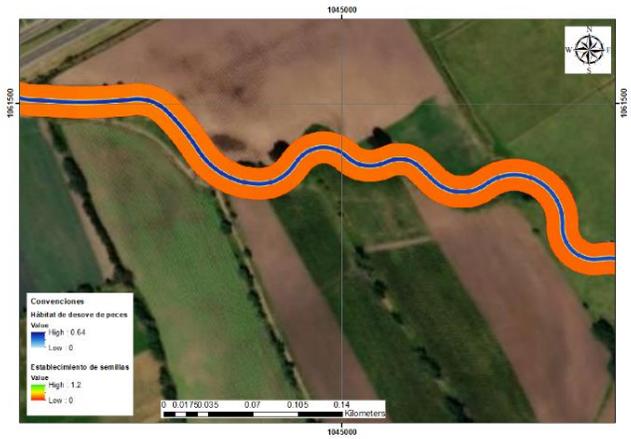


Figura 82. Zonas de fertilización y desove de peces fase de diseño – HEC EFM

Las relaciones funcionales descritas en la Figura 83, muestran el comportamiento temporal del régimen de flujo y las etapas de desarrollo para la vegetación riparia y el desove de peces y desarrollo de macroinvertebrados, en la cual se evidencia que en los flujos altos, correspondientes a los meses de junio a agosto, permiten el desarrollo y crecimiento de especies acuáticas y de los organismos bentónicos como los insectos y las plantas pequeñas (perifiton) que viven en la superficie del río Tejar.

Para los 4 primeros meses del año se evidencia que la condición de caudal bajo, es dominante. Se presentan condiciones que propician los factores limitantes para las diferentes especies acuáticas, ya que se ve reducido el hábitat potencialmente útil y la disponibilidad de alimentos. En relación con la química del agua, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno disuelto pueden cambiar y transformarse en fuentes de gran presión para muchos organismos. Estas condiciones pueden causar la mortalidad de peces y macroinvertebrados. Ante esta situación, el diseño propuesto considera una geometría tipo doble nivel tipo trapecoidal, la cual favorece el mantenimiento del flujo, incluso en condiciones de caudal bajo o extremadamente bajo.

Para las relaciones funcionales propuestas, HEC EFM generó resultados estacionales y estadísticos útiles para la toma de decisiones fundamentales para el proyecto de restauración del río Tejar, ya que permite puntualizar acciones en el territorio, a través de los sistemas de información geográfica. Dentro de sus limitaciones se encuentran aspectos relacionados con la sensibilidad de los resultados del análisis frente a cambios en la duración de las temporadas y en general a los datos de entrada de las relaciones funcionales ecosistémicas. Para reducir la incertidumbre de dichos resultados, las medidas a corto plazo, se pueden correlacionar con datos en campo tomados en la misma escala de tiempo.

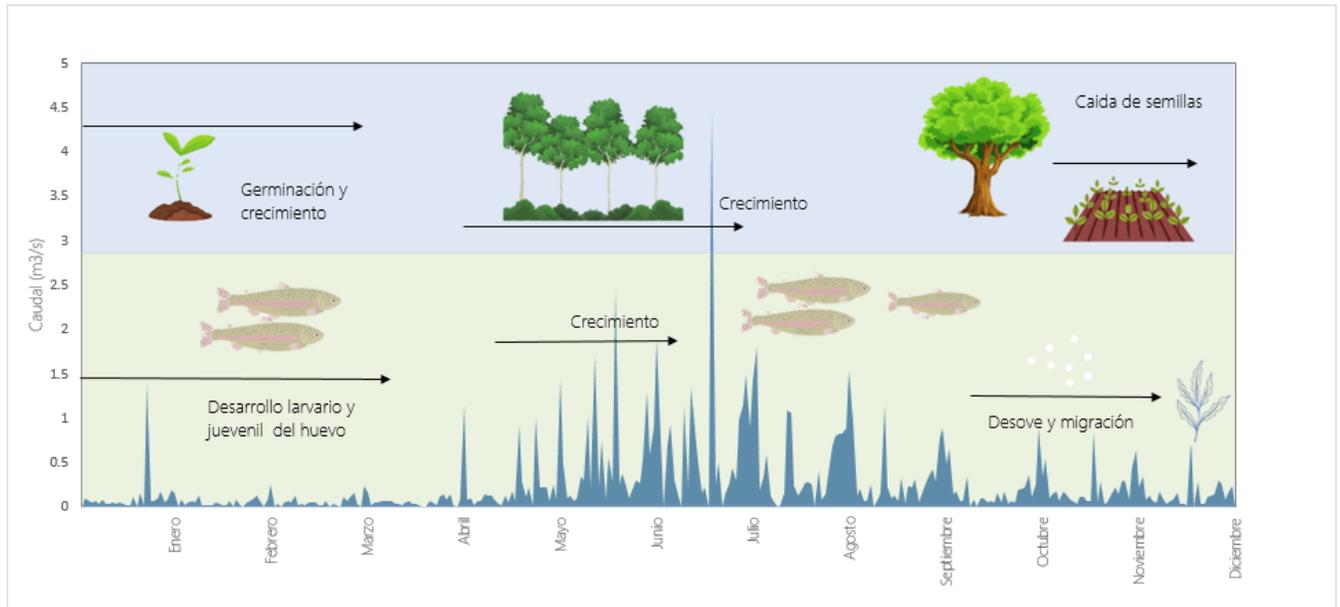


Figura 83 . Relaciones Funcionales, Río Tejar  
Fuente. Autora 2020

Es importante resaltar que los resultados estadísticos obtenidos son una medida de desempeño único para cada relación y régimen de flujo. En este sentido, se pueden crear diferentes relaciones para evaluar varios elementos del ecosistema, sin embargo, es importante priorizar las alternativas y definir criterios que permitan asociar elementos con el régimen de flujo, de lo contrario las respuestas del modelo no serán comparables y no será fácil definir cuál de ellas es la más efectiva para lograr los objetivos de restauración.

Para el caso de estudio se priorizaron las relaciones funcionales para el estadio larvario y alevín de la trucha arcoíris y la vegetación riparia, las relaciones funcionales restantes hacen referencia a la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos y a los periodos de inundación de árboles ribereños. Las áreas resultantes del análisis indican los sitios potenciales de restauración o los beneficios producidos en el ecosistema por la puesta en operación de alguna alternativa, estos pueden ser útiles para la planificación de costos en los proyectos de restauración.

## 8.2 Resultados de la modelación empleando IberHabitat para la fase de diseño

Los resultados obtenidos a través de la modelación representan adecuadamente la heterogeneidad hidráulica en el tramo de estudio, para los diferentes estadios, en particular favorece las condiciones de caudal mínimo para el desove y el desarrollo del estadio alevín y especies de macroinvertebrados presentes en el río. La conformación de la sección tipo doble nivel permite mantener condiciones estables a lo largo del río Tejar, en lo relacionado con la velocidad y profundidad de flujo requeridos para las diferentes funciones ecosistémicas. Al evaluar la funcionalidad del diseño propuesto en relación con las características de las curvas de idoneidad (velocidad y profundidad) se evidencian resultados favorables, las velocidades del modelo oscilan 0.15 y 0.5 m/s a las cuales se les atribuye un índice de idoneidad de 1 (condición más favorable)

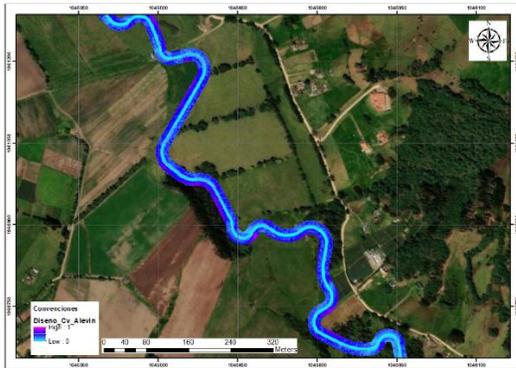


Figura 84. Mapa de idoneidad, Cv estadio alevín

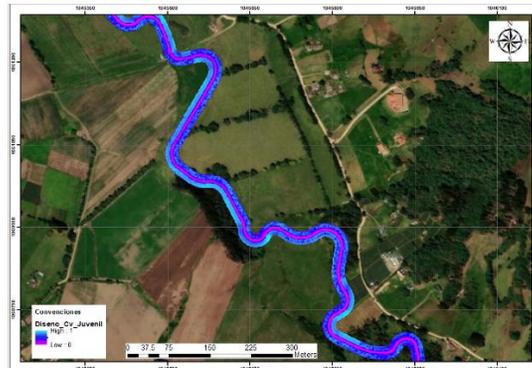


Figura 85. Mapa de idoneidad, Cv estadio juvenil

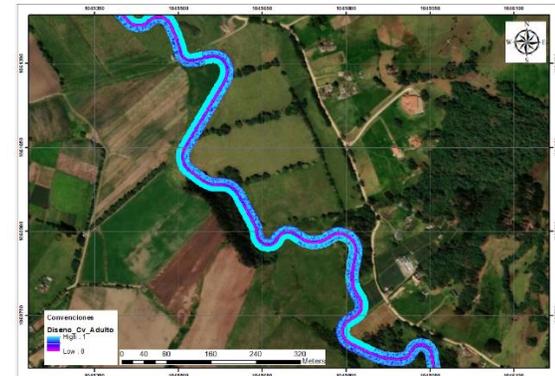


Figura 86. Mapa de idoneidad, Cv estadio adulto

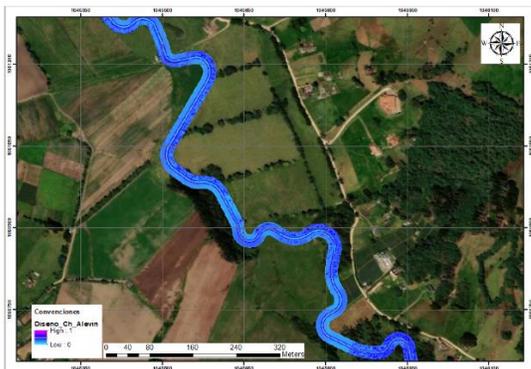


Figura 87. Mapa de idoneidad, Ch estadio alevín

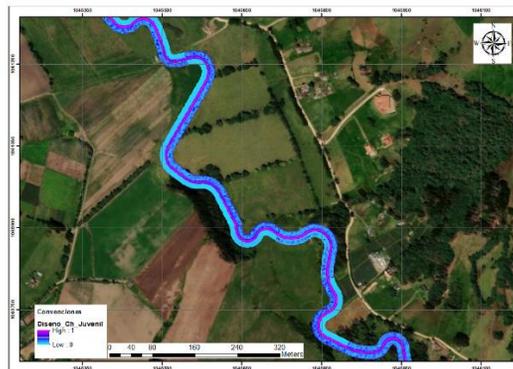


Figura 88. Mapa de idoneidad, Ch estadio juvenil



Figura 89. Mapa de idoneidad, Ch estadio adulto

En las Figura 84 a la Figura 89, se observan los mapas de idoneidad para la profundidad (Ch), velocidad (Cv) y la combinación de ambos (C) para un tramo del Río Tejar, que permiten analizar los efectos de la disponibilidad del hábitat físico para los diferentes estadios de la especie de estudio, así como los caudales más favorables. Este índice se evalúa en una escala de 0 a 1, donde 0 representa la condición más desfavorable y 1 la condición más apta para la variable estimada.

Los resultados de la aplicación del modelo Iber Habitat en la fase de diseño, presentan diferencias significativas para los diferentes caudales evaluados, en consecuencia se evidencia que el diseño propuesto es favorable, ya que en promedio el Habitat potencial útil para los diferentes estadios aumenta en el 50% frente a la condiona actual como se observa en la Figura 90 y Figura 91.

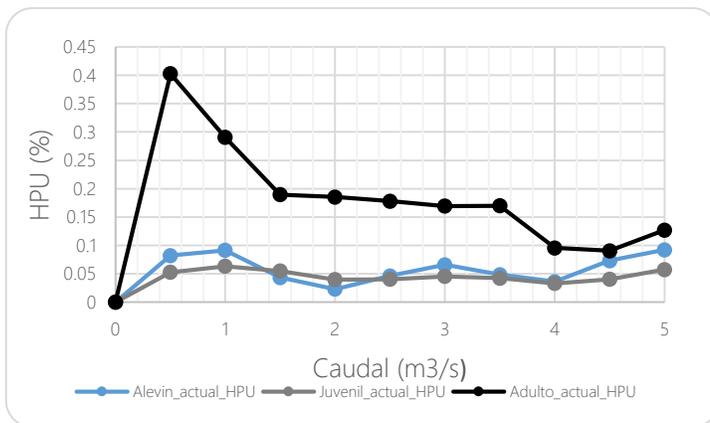


Figura 90. Hábitat potencial útil (HPU), fase de diagnóstico Río Tejar.  
Fuente: Autora 2020.

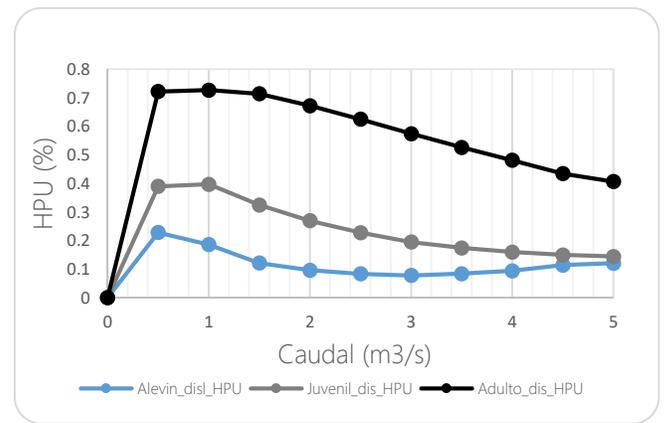


Figura 91. Hábitat potencial útil (HPU), fase de diseño Río Tejar.  
Fuente: Autora 2020.

En las Figura 90 y Figura 91, se observa que para los diferentes estadios las condiciones en las cuales existe un hábitat potencialmente útil mayor se da entre los caudales comprendidos entre 0.5 y 1 m<sup>3</sup>/s tal y como ocurre en la fase de diagnóstico. En la Figura 92, se observa un esquema general de la aplicación de los criterios de diseño en un tramo del Río Tejar, como parte clave de esta configuración se encuentra el canal de doble nivel, que influye en las condiciones críticas que pueden presentarse durante los regímenes de caudal bajo o extremadamente bajo, esta configuración favorece el mantenimiento del flujo a lo largo del río, garantizando a su vez áreas para la habitabilidad de especies como peces, en su estadio larvario o alevín y especies de algas y macroinvertebrados. Al analizar las características del diseño y verificar su funcionalidad con respecto a las curvas de idoneidad en la cual se definen las velocidades promedio para cada uno de los estadios del pez, oscilan entre 0.1 y 0.8 m/s, que de acuerdo con las curvas de idoneidad presentadas previamente para los diferentes estadios son favorables para el desarrollo de la especie de estudio. Adicionalmente estas velocidades favorecen el crecimiento de algas y vegetación en la superficie del sustrato.

En relación con las variables físicas, químicas y biológicas, los ríos de montaña, como es el caso del río Tejar, se ven altamente influenciadas por la precipitación y el caudal, este último, tiene una gran influencia en el ciclo de nutrientes, que permite almacenarlos o exportarlos aguas abajo. Los incrementos en el caudal regulan el procesamiento de la materia orgánica en el río por el transporte del material y la deriva de especies. Así, las diferencias en el caudal tienen efecto en la dinámica de los nutrientes en todas las escalas de tiempo: entre días, meses e incluso entre los diferentes años (Zapata & Donato, 2005). En el río Tejar las variaciones de caudal son constantes, durante la primera parte del año predominan los caudales bajos y extremadamente bajos. Hacia los meses de abril a agosto, el régimen de caudales se modifica a pulsos de caudal, y durante los meses de junio y julio se evidencian grandes y pequeñas inundaciones.

Por otra parte, al analizar los valores de velocidad del río Tejar, desde los resultados del modelo IberHabitat, se evidencia que en algunos tramos las velocidades oscilan entre 0.95 a 2 m/s, estos son moderadamente altos y promueven bajas densidades algales. En velocidades de la corriente más bajas la abundancia total es alta y se promueve el desprendimiento de la película algal con el consecuente reinicio del ciclo de producción.

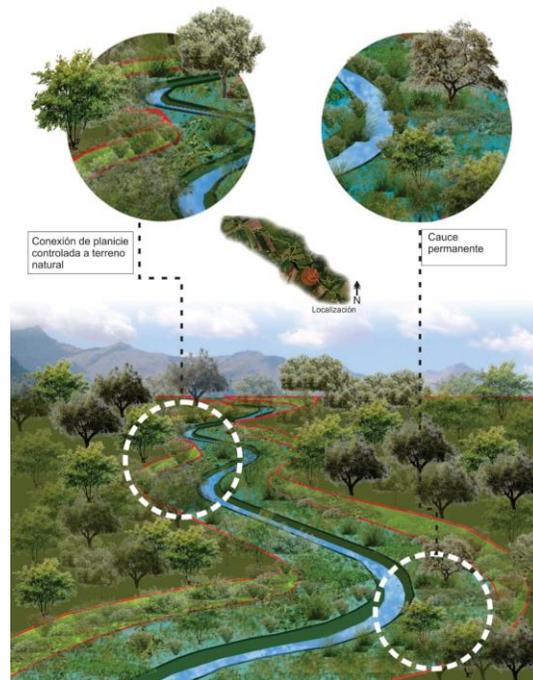


Figura 92. Esquema del diseño de la restauración del Río Tejar.

Fuente: Autora 2020.

### 8.3 Comparación entre el modelo Iber Habitat y el modelo HEC EFM

Para la elección de los modelos ecohidráulicos no existe una regla general que defina cuál es el más apropiado, esto depende en esencia de la disponibilidad de la información y de los objetivos a evaluar, en esta investigación se eligieron los modelos Iber Habitat y HEC EFM por su accesibilidad y eficiencia. En términos generales, uno de los componentes más importantes para la aplicación de cualquier modelo numérico es el levantamiento topográfico que en este caso presenta una escala apropiada para el desarrollo

del modelo ecológico, de igual modo, los datos recolectados en campo, corresponden a la misma escala espacial del modelo, lo que favorece su capacidad predictiva. A continuación, se presenta un breve resumen de las diferencias generales entre el modelo bidimensional Iber Habitat y el modelo HEC EFM

Tabla 27. Esquema comparativo de los modelos Iber Habitat y HEC EFM

Variable	Iber hábitat (Modelo bidimensional)	HEC EFM (modelo unidimensional)
Estabilidad numérica	La integración de un modelo biológico en Iber, proporciona un modelo hidrodinámico 2D que utiliza el método de volúmenes finitos con probada robustez y estabilidad. Adicionalmente este tipo de modelos permite generar una mayor resolución espacial y campos de velocidad más exactos.	HEC EFM genera resultados estadísticos que luego son empleados para la modelación hidráulica en el modelo unidimensional HEC RAS que presenta un análisis limitado en comparación con los modelos bidimensionales ya que las variables se evalúan en una sección y en una dirección, lo cual incide en el aumento de la incertidumbre de los resultados ya que no considera la heterogeneidad morfológica e hidrodinámica, y puede sobreestimar la variabilidad lateral y subestimar la variabilidad longitudinal.
Análisis de régimen de caudales	<p>Iber hábitat incorpora el método de caudal escalonado que permite reducir significativamente los tiempos de cálculo del modelo, y a su vez permite evaluar la respuesta del ecosistema ante los diferentes escenarios de caudal en un mismo modelo y en una misma simulación</p> <p>Los modelos 2D permiten realizar un análisis a escala de mesohabitat, que es una escala más realista y adecuada para la disponibilidad del hábitat físico de los peces</p>	<p>Dentro de las limitaciones presentadas por EFM se encuentra que el software analiza únicamente los datos diarios de caudal y nivel, por lo cual los resultados no serán sensibles a la dinámica ecológica impulsada por fluctuaciones en otra escala de tiempo, a menos que, dichas fluctuaciones estén o puedan de alguna manera estar representadas dentro de las series tiempo diarias.</p> <p>HEC EFM no conecta las secuencias de eventos para periodos de tiempo superiores a un año, lo que limita su aplicabilidad para evaluar procesos ecosistémicos como la dinámica de crecimiento de una población que incluya como requerimiento de años secos y húmedos.</p>
Caracterización del hábitat	<p>Emplea curvas de idoneidad para incorporar las variables del medio fluvial con el uso que los peces hacen del espacio.</p> <p>La elaboración de las curvas de idoneidad requiere de un estudio especializado que permita definir las características apropiadas para desarrollo de la especie, en caso de que esta información no sea confiable, atribuye incertidumbre al modelo.</p>	Emplea relaciones funcionales, que vinculan las características de las series de tiempo hidrológicas e hidráulicas (caudal y nivel) con elementos del ecosistema mediante la combinación de temporada, duración, tasa de cambio y excedencia porcentual

	Su aplicación está limitada al análisis de Ictiofauna, no permite evaluar las respuestas de otros elementos del ecosistema.	
Resultados espaciales	<p>Genera resultados en términos de profundidad y velocidad para cada uno de los estadios evaluados, los resultados representan adecuadamente los complejos patrones hidrodinámicos resultantes de morfologías heterogéneas.</p> <p>Permite conocer la distribución espacial y temporal de la Idoneidad del Habitat Físico y el hábitat potencial útil.</p>	Luego del procesamiento de datos a través del modelo hidráulico, se emplean las herramientas de los sistemas de información geográfica, que permiten identificar espacialmente las zonas potenciales para la restauración.

En la Figura 93, se observan los resultados de los modelos Iber Habitat y HEC EFM, la parte superior corresponde el modelo HEC EFM, para la condición de diseño del estadio alevín, caracterizada por bajas profundidades y velocidades. Simultáneamente en la parte inferior de la figura, se observan los resultados de Índice de idoneidad del pez en su estadio alevín obtenidos a partir de la aplicación del modelo Iber Habitat.

Es importante precisar que existen diferencias significativas entre los dos modelos, a partir de HEC EFM se obtiene información estadística que se emplea como insumo para el análisis de flujo a través de la modelación hidráulica y luego se espacializan esos resultados a través de sistemas de información geográfica. Una ventaja importante del software EFM está relacionada con su versatilidad para evaluar los sistemas fluviales, ya que permite relacionar otros elementos, tales como la vegetación riparia, la salud del cuerpo hídrico, el establecimiento de macroinvertebrados y en general, las relaciones funcionales establecidas. Por su parte, Iber Habitat, desarrolla su análisis a partir de la información de las curvas de idoneidad, que asigna un índice para las características de profundidad y velocidad para la especie de estudio (pez) lo cual limita el análisis de otras especies del ecosistema que están condicionados por la variación de los regímenes de flujo.

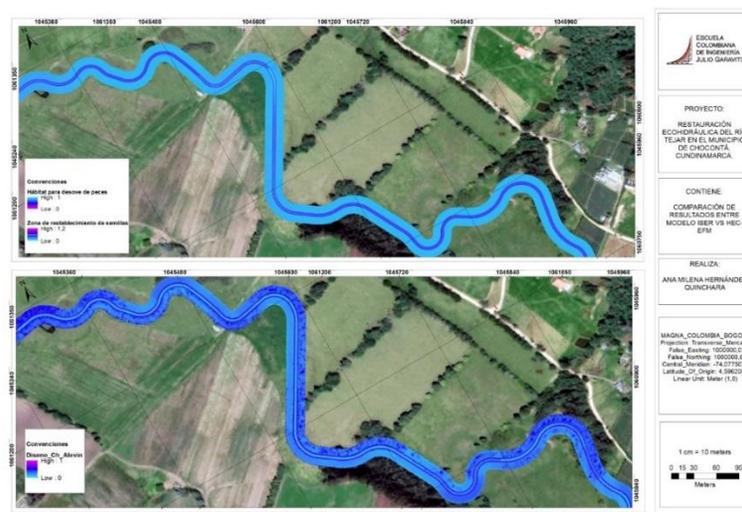


Figura 93. Comparación de resultados entre el software Iberhabitat y HEC EFM  
Fuente. Autora 2020

Es importante precisar que el resultado comparable para este par de modelos está relacionado con la relación funcional de desove para peces y el estadio alevín que son los factores que se evaluaron bajo las mismas condiciones.

Tabla 28. Comparación de resultados cuantitativos Iber Habitat y HEC EFM para el estadio alevín

Variable	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad (m/s)		Efecto de los microdiques (aumento de la lámina de agua)	Habitat potencial útil
		Min	Máx.		
IberHABITAT	1.5	0.2	1.7	38%	50%
HEC EFM	1	0.4	1.2	40%	30%

La *Tabla 28*, presenta los resultados generales para la condición de alevín, evidenciando que los modelos tienen resultados similares, sin embargo el modelo Iber Habitat resulta ser más preciso. Al evaluar el régimen de caudal para el estado alevín a través del software HEC EFM se obtienen resultados estadísticos, de acuerdo con esto se evidencia que la condición más favorable corresponde a un caudal entre 1m<sup>3</sup>/s a 1.5 m<sup>3</sup>/s, el diseño planteado asegura esta condición de caudal incluso en las condiciones más desfavorables de caudal bajo y extremadamente bajo, garantizando áreas de habitabilidad de las diferentes especies. En relación con las velocidades obtenidas en la fase de diseño se observa una reducción del 35% en comparación con el escenario actual, lo cual favorece las condiciones para la fase de reproducción de la trucha arcoíris, el aumento de las comunidades algales y la disponibilidad de alimentos de toda la cadena trófica. Por último, se evidencia que en el modelo Iber Hábitat representa con mayor precisión el comportamiento de flujo ante los micro diques con un aumento de la lámina de agua del 40% en comparación con la condición actual.

## 9. Capítulo IX. Conclusiones

I. De acuerdo con la caracterización y la definición de los criterios de valoración ambiental determinados durante la fase de diagnóstico de esta investigación, se identificaron los elementos a ser integrados en el diseño de la restauración ecohidráulica, con el propósito de mejorar y fortalecer los servicios ecosistémicos que actualmente provee el Rio Tejar. Dentro de estos elementos se definió una geometría para la sección de diseño, denominada sección de tipo doble nivel, que permite mejorar las características de estabilidad del cauce y establecer espacios apropiados para el desarrollo de especies acuáticas, en particular la especie *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arcoíris) en sus diferentes estadios.

Por otra parte, se definieron criterios para mejorar el hábitat potencialmente útil para la especie de estudio a través de la configuración del diseño, que integro microdiques, a fin de simular las características de fondo del lecho para la recreación de pozos y zonas aptas para el crecimiento de la especie en su estadio más crítico (ova, estadio larvario y alevín).

Adicionalmente, se realizaron recomendaciones en relación con la configuración del corredor ripario que delimita el Río Tejar, para que, a través de este, se mejoren no solo las características paisajísticas de la zona, sino también permita fortalecer relaciones ecosistémicas. Al analizar los resultados espaciales de las relaciones funcionales establecidas en HEC EFM se evidencian las zonas potenciales para la restauración de la vegetación riparia a lo largo del río Tejar.

II El caudal es una variable determinante para el desarrollo de diferentes servicios ecosistémicos, para efectos de esta investigación, el caudal se dividió considerando que existen condiciones dinámicas en los sistemas fluviales de las cuales no puede apartarse esta variable, en consecuencia, se analizaron las diferentes relaciones ecosistémicas considerando los caudales bajos, extremadamente bajos, pulsos de caudal, grandes y pequeñas inundaciones.

Al emplear el modelo unidimensional HEC EFM y el modelo bidimensional Iber hábitat, se evidencian resultados similares del caudal apropiado para el desarrollo del pez en su estado alevín el cual corresponde a  $1m^3/s$ . A través del modelo Iber hábitat se evaluó que el diseño propuesto permite mejorar las condiciones para la especie de estudio ya que el Hábitat potencial útil aumento en un promedio del 50% para los diferentes estadios en comparación con la condición actual.

A través de Iber Hábitat se determinó que el Hábitat Potencial Útil (HPU) total para la trucha arcoíris no supera en ninguno de los estadios y caudales evaluados el 7% del área total mojada, a partir de lo cual se infiere un posible intervalo de caudal óptimo entre 0.5 a  $1.5 m^3/s$ . Adicionalmente, se observa que en cada uno de los estadios en desarrollo del pez el HPU no aumenta de forma continua con el caudal, sino que presenta un máximo para un caudal determinado y decrece para valores superiores a este.

La incorporación de microdiques en el diseño resulta favorable ya que permiten establecer pozos y zonas aptas para el crecimiento de la especie en su estadio más crítico (ova, estadio larvario y alevín) durante condiciones de caudal bajo y extremadamente bajo.

A partir de las condiciones de diseño se evidencia que las velocidades disminuyeron a lo largo del tramo de estudio en relación con la condición actual, y oscilan entre **0.1 y 0.8 m/s**, estas velocidades favorecen el desarrollo de macroinvertebrados, peces y algas a lo largo del río.

A partir de los resultados de los modelos propuestos es posible identificar zonas potenciales para la restauración, a través del modelo HEC EFM se determinaron los sitios para la germinación de semillas para la protección de las márgenes del río. Los modelos Iber Hábitat y HEC EFM permiten planificar y evaluar la respuesta de la implementación de acciones a corto y mediano plazo para mejorar las condiciones de habitabilidad y las funciones ecosistémicas de los sistemas fluviales con resultados favorables.

III. Los modelos Iber Hábitat y HEC EFM permitieron evaluar apropiadamente la relación entre el caudal y su respuesta en el ecosistema, para las métricas hidrológicas e hidromorfología asociadas y definidas para la restauración de las funciones del ecosistema.

Iber Hábitat es una herramienta útil para la modelación hidráulica y adicionalmente permite evaluar la respuesta del ecosistema ante la variación de flujo, cuenta con una interfaz amigable para el usuario y tiene ventajas sustanciales frente a los modelos 1D, además de ser un software libre, sin embargo presenta limitantes para su uso, entre ellas la demanda en el tiempo computacional para las modelaciones, además

de la no inclusión de otras variables ecosistémicas (vegetación riparia, macrófitos y macroinvertebrados) que son determinantes para evaluar el Hábitat potencial útil.

En términos generales al comparar los resultados de la modelación en HEC EFM en la fase de diagnóstico y diseño se evidencian leves diferencias, para ello, se evaluó la condición más crítica que compromete el estadio alevín. Tanto para el modelo Iber Hábitat como para HEC EFM la geometría de la sección de doble nivel garantiza el hábitat potencialmente útil para la especie.

A través del modelo HEC EFM se evaluaron características adicionales del hábitat como la vegetación riparia, al comparar los resultados espaciales de la condición actual y de diseño se observan diferencias significativas en términos de los lugares potenciales para establecimiento de vegetación.

En términos cualitativos, la caracterización de los ecosistemas es diferente, por lo cual los resultados del modelo IBER y HEC EFM no son numéricamente comparables para todas las variables, sin embargo, se pueden emplear de forma simultánea los dos modelos con el propósito de fortalecer el análisis en los aspectos que Iber hábitat no está en la capacidad de evaluar, tales como las relaciones funcionales (vegetación riparia) propuestas para el modelo HEC EFM.

IV. A través de los criterios de diseño se propusieron medidas estructurales para la restauración del río Tejar, como resultado se evidencia que el diseño propuesto responde satisfactoriamente para los diferentes escenarios evaluados, en particular a lo que refiere a las condiciones de limitantes para los primeros estadios del pez (ova, larvario y alevín). Los criterios de diseño aplicados en esta investigación resultan favorables y pueden ser replicados para la planificación y gestión de otros sistemas hídricos de montaña.

## **10. Capítulo X. Recomendaciones.**

- Los modelos Iber Hábitat y HEC EFM pueden emplearse para la planificación de proyectos hidroeléctricos que modifiquen la dinámica de flujo, estas herramientas permiten evaluar las respuestas del ecosistema ante cambios eventuales del flujo y proponer alternativas que se articulen al diseño para mitigar los efectos potenciales de su implementación. Para ello se recomienda que el operador garantice no solo los caudales mínimos que se presentan en el río sino un régimen de caudal variable que permita mantener las relaciones funcionales en el ecosistema.

En relación con lo anterior, los desarrollos a futuro de este tipo de proyectos pueden concentrarse en la optimización de los objetivos de conservación. Esto debe articularse desde políticas públicas que establezcan metodologías que permitan evaluar diferentes escenarios para optimizar la operación de embalses y a su vez logren mantener los servicios ecosistémicos en la zona, siendo los procesos hidrológicos y ecosistémicos las variables de decisión.

- Se identificó que en el país los estudios relacionados con la modelación del hábitat empleando modelos bidimensionales son incipientes, por lo cual se recomienda emplear HEC EFM junto con Iber Hábitat aplicando para este último, los módulos de calidad del agua a fin de evaluar con mayor precisión todos los factores que inciden en el crecimiento y desarrollo de especies en los ecosistemas hídricos.

- Desde el diseño se pueden incorporar características particulares que generen sinergia para lograr la mejora de los elementos que componen la dinámica de los sistemas fluviales, en este sentido, los resultados del uso de la sección de doble nivel propuesta ofrecen ventajas en relación con una sección trapezoidal (comúnmente empleada) debido a que esta configuración requiere de menor mantenimiento y permite el transporte de sedimentos y el desarrollo de inundaciones de forma controlada. Para verificar la estabilidad de taludes a lo largo del tramo, se recomienda realizar estudios más detallados de suelo, sin embargo, de acuerdo la información bibliográfica y los resultados obtenidos se recomiendan las características de la sección propuesta con ángulos de 45°, que permiten el establecimiento de vegetación riparia y el desarrollo de los procesos ecosistémicos que se desarrollan entre el río y su llanura de inundación.
  
- La erosión de los bancas es el resultado de los procesos hidráulicos y los procesos geotécnicos que ocurren constantemente en el Río Tejar, a través de esta investigación se proponen medidas para su manejo en la zona denominada zona de protección, se formula un configuración entre árboles, arbustos y pastizales en una franja aproximada de 10 metros, se recomienda emplear especies nativas, esta configuración garantiza que el dosel permita la entrada de luz al cuerpo hídrico que es fundamental para los procesos de crecimiento de las especies a lo largo del río. Para su implementación se recomienda integrar a la comunidad, bajo un esquema de gobernanza del agua, en el cual sean actores activos en la protección y cuidado del cuerpo hídrico.
  
- De acuerdo con lo anterior, la gobernanza del agua permite articular acciones para el cumplimiento del objetivo común de protección a los recursos hídricos, que permite a su vez proteger la salud, aumentar la calidad de vida y garantizar las condiciones ambientales no solo del cuerpo hídrico sino de las comunidades que habitan y se abastecen del mismo. De este modo se pueden gestionar de forma colectiva e integral cada uno de los componentes planteados en esta investigación, lo que permite elevar el nivel de sinergia entre los actores involucrados, en este caso la comunidad, la academia y las entidades territoriales. La gobernanza del agua consiste entonces en un proceso relacional multinivel que permite, identificar, fortalecer y coordinar esfuerzos a fin de viabilizar y regular estrategias para el funcionamiento del sistema hídrico, y de este modo alcanzar conjuntamente objetivos comunes que permitan mejorar las condiciones actuales del río Tejar y prevenir efectos adversos producto de inundaciones en la zona.
  
- Involucrar a la comunidad dentro del proyecto de restauración del río Tejar, permite el empoderamiento ciudadano lo cual garantiza el entendimiento, la viabilidad y la ejecución de las acciones definidas colectivamente para la consecución de los objetivos comunes de restauración que benefician en el corto y largo plazo las condiciones del ecosistema.

## Bibliografía

- Agencia de noticias Universidad Nacional. (05 de 02 de 2014). Trucha arcoiris esta depredando peces nativos. *El Espectador*.
- Allan , J. (1995). Stream ecology. Structure and function of running waters. *Chapman & Hall*, 388.
- Amaya Toro, L. S. (2016). *Identificación de la zona hiporreica en un río sinuoso de montaña. Caso de estudio - Quebrada Aguas Claras, La Calera, Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Andrey, K. (2019). *Advances in hydroinformatics SimHydro 2019 - Models for extreme, Situations and Crisis Management* . Moscow: Springer Water.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., & Puertas, J. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica de flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1-10.
- CAR. (2012). *Inventario de peces y crustáceos en tres fuentes hídricas de la jurisdicción de la CAR*. Bogotá.
- CAR. (2015). *Diagnóstico por erosión* . Bogotá.
- CAR. (2018). *Biodiversidad, Río Bogotá*. Obtenido de Generalidades del Río Bogota: [https://www.car.gov.co/rio\\_bogota/vercontenido/4](https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/4)
- Castellanos , L., & Donato , J. (2004). Disturbios naturales y sucesión de diatomeas en un río Andino (Tota, Boyacá, Colombia). *Acta Biologica Colombiana* .
- Castro, A., Forero, E., & Guillot, G. (2004). *Algunos aspectos bioecologicos de la trucha arcoiris en el embalse Pantano Redondo, Cundinamarca*. Bogotá.
- Cea , L. (2010). *Modelización matemática en el lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable*. Barcelona : Grupo GLAMA E.T.S.
- Consorcio Huitaca. (2019). *Ajuste a el Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del Río Bogotá, fase de diagnóstico*. Bogotá.
- Darby, S., & Sear, D. (2008). *River restoration managing the uncertainty in restoring physical habitat* . Inglaterra.
- Diez, J. M., & Burbano , L. (2007). Revisión de los modelos Eco-hidráulicos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) en corrientes fluviales. *Avances en recursos hidráulicos* , 74-88.
- Donato, J. C. (2008). *Ecología de un río de Montaña de los Andes Colombianos (Río Tota, Botacá)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .
- Ecoforest Ltda . (2005). *Elaboración del diagnostico, prospectiva y formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá*. Bogotá.

Ecoforest Ltda. (2006). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, Subcuenca Río Alto Bogotá*. Bogotá.

El Espectador. (28 de Junio de 2015). En Alerta roja Cundinamarca por desbordamiento del río Bogotá.

Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Madrid: Fundación BBVA.

Extrategia. (17 de Junio de 2017). Se mantiene control en el Río Tejar para evitar desbordamientos en los predios.

FAO. (2014). *Manual práctico para el cultivo de la trucha arcoíris*. Guatemala .

Gutiérrez , F. (2006). Estado de conocimiento de especies invasoras. Propuesta de lineamientos para el control de los impactos. *Instituto de investigación de los recursos biológicos Alexander Von Humboldt*.

Harper, D., Zalewski, M., & Pacini, N. (2008). *Ecohidrology, Processes Models and Case Studies*. Londres: CAB International.

Hickey, J. T., Huff, R., & Dunn, C. (2015). Using habitat to quantify ecological effects of restoration and water management alternatives. *Environmental Modelling & Software*, 16-31.

Hickey, J., Huff, R., & Dunn, C. (2015). Using habitat to quantify ecological effects of restoration and water management alternatives. *Environmental Modelling & Software*, 16 -31 .

IDEAM. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El niño y La niña en Colombia*. Bogotá.

IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá .

Katuva, J. M. (2014). Water allocation assessment: A study of hydrological simulation on MKuramudzy River Basin. *University of Nairobi*, 85.

Lancaster, J. (1999). Small - scale movements of lotic macroinvertebrates with variations in flow. *Freshwater Biology*, 605-619.

Maddock, I. (2005). *Ecohydraulics and integrated approach*. Union Kingdom: Wiley blackwell.

MADS. (2015). *Plan Nacional de restauración. Restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*. Bogotá.

MADS. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. Bogotá.

Magdaleno, F. (2018). Flows, ecology and people: is there room for cultural demands in the assessment of environmental flows ? *Water Science and Technology*, 1777-1781.

MAVDT. (2008). *Resolución 848 de 2008* . Bogotá.

MAVDT. (2010). *Política Nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Bogotá.

- Mojica, J., Castellanos, C., & Usma, S. (2020). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales*. Bogotá : Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia.
- Mojica, J., Oviedo, S., & Álvarez, R. (2012). *Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia*. Bogotá.
- Mora, M. F., & Barrera, J. I. (2015). *Catálogo de especies invasoras del territorio CAR*. Bogotá D.c: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca -CAR.
- Municipio de Chocontá. (2007). *Plan de desarrollo del municipio de Chocontá "Chocontá: Empresa de todos"*. Cundinamarca.
- Natural Wetlands Research Center U.S. Fish and Wildlife Service. (1984). *Habitat suitability information: Rainbow trout*. US. Department of the interior.
- NRCS. (2007). *Stream Restoration Design National Engineering Handbook, Chapter 10, Two-stage Channel Design*. Washington, DC.
- Parker, T. W., & Haswell, W. (1987). *Zoología cordados*. Barcelona: Reverté .
- Parra, E. (2012). *Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales*. Medellín.
- Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 194-205.
- Ramirez, J. (2015). *Propuesta metodológica para la valoración ambiental de corrientes hídricas desde la perspectiva de la restauración fluvial*. Manizales.
- Ramos, M., Castellet, E., Ibars, A., & Querol, D. (2019). IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume. *Revista Iberoamericana del Agua*, 2529-8968.
- Rodríguez Díaz, H. A. (2010). *Hidráulica Fluvial, fundamentos y aplicaciones socavación*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rodríguez, G. M. (1992). *Técnicas de evaluación cualitativa de madurez Gonádica en peces*. México: AGT Editor.
- Salamanca, D. (2020). *Inducción a la maduración sexual y desove de Oncorhynchus mykiss "Trucha arcoiris" por el fotoperiodo en el CIPBS - Chucuito, Una Puno*. Puno, Perú.
- Sanz, M., Bladé, E., Palau, A., Querol, D., & Ramos, A. (2019). IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del hábitat físico y del Hábitat Potencial Útil para peces, Aplicación en el río Eume. *Revista Iberoamericana del Agua*, 1-10.
- Schultz, R., Wray, P., Isenhardt, T., & Rodriguez, C. (1997). *Buffer strip design, establishment, and maintenance*. Agriculture and Natural Resources, Iowa State University.

- Soto, J. A. (2011). El pasto vetiver: una alternativa para la conservación y el desarrollo de sistemas sostenibles en Venezuela. *Revista Iberoamericana de Sostenibilidad*.
- Stalnaker, C., Lamb, B., & Henriksen, J. (1995). The Instream Flow Incremental Methodology. *Biological Report 29*.
- Stewart, J., Bruce, L., & Wharton, G. (2003). Linking form and function: towards an eco-hydromorphic approach to sustainable river restoration. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 439-450.
- The Environment Agency, Regional Water Resources. (2000). The use of PHABSIM in the management of water resources and fisheries in England and Wales. *Ecological Engineering*, 154.
- The Nature Conservancy. (2011). *Manual del usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica*. Versión 7.1.
- Universidad de Talca. (2007). *Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule*. Chile.
- University of California. (2009). *California salmonid stream habitat restoration manual*. Los Ángeles: Agrivulture and natural resources.
- US Army Corps of Engineers. (2013). *HEC-EFM Ecosystem Functions Model*. California: Hydrologic Engineering Center.
- USDA. (2001). *Stream corridor restoration, principles, processes, and practices*. National Engineering Handbook.
- USDA. (2007). *Stream Restoration Design National Engineering Handbook, Chapter 10, Two - Stage Channel Design*. Washington.
- Vannote, R. G., Minshall, G., Cummins, K., & Sedell, J. (1980). The river continuum concept. *Fish Aquatic Science*, 130-137.
- Villalba, A. (2009). *Hábitos alimenticios de la trucha arcoiris, Oncorhynchus mykiss (Salmoniforme: Salmonidae) en el parque forestal Embalse del Sisga*. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Webster, J. R., Benfield, E. F., & Ehrman, T. P. (1999). What happens to allochthonous material that falls into streams? A synthesis of new and published information from Coweta. *Freshwater Biology*, 687-705.
- Zapata, A., & Donato, J. (2005). *Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de corriente en un río Tropical de montaña (Río Tota - Colombia)*. Bogotá.