



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA

TESIS

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA
Y MODELACIÓN ECO-HIDRÁULICA PARA DETERMINAR EL
RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN CAUCES INTERMITENTES.**

PRESENTA

Ing. Isaí Gerardo Reyes Cedeño

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL EN
EL ÁREA DE AMBIENTAL**

TUTOR:

M. en I. Jorge Antonio Rodríguez Martínez

COMITÉ TUTORAL:

Dra. María Antonieta Gómez Balandra

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez

Aguascalientes, Ags., 31 de julio de 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

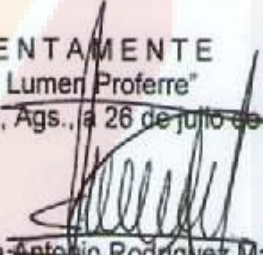
M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

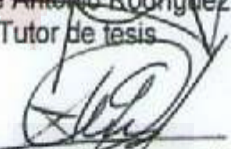
Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO** con ID 140830 quien realizó la tesis titulada: **PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA Y MODELACIÓN ECO-HIDRÁULICA PARA DETERMINAR EL RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN CAUCES INTERMITENTES**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

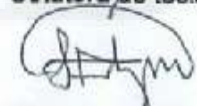
Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 26 de julio de 2018.


M. en Ing. Jorge Antonio Rodríguez Martínez
Tutor de tesis


Dra. María Antonieta Gómez Balandra
Cotutora de tesis


Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
Asesor de tesis

- c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Construcción y Estructuras
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Geotecnia e Hidráulica
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico



Oficio: CCDC-D-253-2018
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE


Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA Y MODELACIÓN ECO-HIDRÁULICA PARA DETERMINAR EL RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN CAUCES INTERMITENTES", presentado por el sustentante: Isai Gerardo Reyes Cedeño con ID: 140830, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 31 de julio de 2018

"SE LUMEN PROFERRE"


M. en Fil. Omar Vázquez Gloria

Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p. - Dr. Ricardo Arturo López León - Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p. - Dr. Miguel Ángel Soto Zamora - Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. - M. Jorge Antonio Rodríguez Martínez - Tutor de tesis.
✓ c.c.p. - Ing. Isai Gerardo Reyes Cedeño - Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. - Lic. Delia Guadalupe López Muñoz - Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico recibido durante dos años y, por otra parte, a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), mi *alma máter*, por abrirme las puertas para estudiar este posgrado.

Agradezco al M. Jorge Rodríguez por la paciencia, consejos y atenciones prestadas inclusive en horas extras durante estos dos años, nada de esto hubiera sido posible sin su ayuda.

Agradecer a los miembros de mi comité tutorial, primero, a la Dra. María Antonieta Gómez por las atenciones durante el curso que tomé en el IMTA y las observaciones realizadas en cada borrador de tesis enviado.

Por otra parte; al Dr. Sergio Martínez por su valiosa asesoría para el desarrollo de la tesis, desde el tiempo de dedicación hasta las correcciones en la etapa hidrológica e hidráulica de esta investigación.

De una manera especial, agradezco a mis padres y mi hermana Cristi, por siempre creer en mí y ser ese motor que mueve mi vida; no me bastaría ni con mi vida misma gratificarles todo lo que hacen por mí.

A mi novia Grecia, que en todo este tiempo fue la inspiración que necesitaba en los momentos de estrés y que incluso me ayudó cuando la carga académica era muy pesada... gracias amor.

Gracias Dios por brindarme la paciencia necesaria y poner en mi camino tan bonita etapa de formación en la que crecí no sólo en el ámbito académico, sino como persona.

DEDICATORIAS

Para los dos grandes pilares en mi vida: José Martín y Coco, les dedico todo el esfuerzo aplicado en este trabajo, en reconocimiento a todo su sacrificio para que yo llegara hasta este punto.

Para mi papá Toño y mi mamá Licho, por siempre cuidar de mí, verme como a un hijo, y enseñarme que el trabajo duro, paciencia y humildad son una constante que día a día debe ser ejecutada.

De una manera especial, para mi sobrino Luis Antonio, quien me enseñó que no hay mayor fuerza que pueda sacar adelante a una persona, que la voluntad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Objetivo General	19
1.3 Objetivos Particulares.....	19
1.4 Alcances	20
1.5 Definición del Problema	21
1.6 Hipótesis.....	22
1.7 Planteamiento de campaña experimental	22
1.8 Narrativa por capítulos	25
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	28
2.1 Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)	28
2.2 Modelación Eco-hidráulica.....	30
2.3 Investigaciones respecto a cauces intermitentes	33
2.4 Marco Legal en México y otros Países sobre Caudal Ecológico	34
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	37
3.1 Caudal Ecológico y Metodologías para su Determinación	37
3.2 Régimen hidrológico	39
3.3 Indicadores de alteración hidrológica.....	39
3.3.1 EFC (Componentes de caudal ecológico).....	40
3.3.2 RVA (Análisis de Rango de Variabilidad).....	41
3.4 Serie sintética de gastos	43
3.4.1 Método de la Curva N de escurrimiento	44
3.5 Método Tennant Modificado.....	46
3.6 Tipo de corrientes en cauces naturales	48
3.6.1 Corrientes intermitentes.....	49

3.7 Clasificación de flujo en canales50

3.8 Modelación numérica de ríos.....51

 3.8.1 Régimen permanente gradualmente variado.....52

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA55

 4.1 Caracterización espacial56

 4.2 Caracterización hidrológica57

 4.3 Caracterización hidráulica.....60

 4.4 Caracterización ambiental62

CAPÍTULO V: RESULTADOS65

 5.1 Bloque espacial.....65

 5.1.1 Delimitación de la zona de estudio.....65

 5.1.2 Objetivo ambiental66

 5.1.3 Ubicación de zonas de importancia ambiental68

 5.1.4 Parámetros geomorfológicos69

 5.2 Bloque hidrológico.....72

 5.2.1 Series sintéticas de gastos72

 5.2.2 Régimen variable natural (años medio, seco y húmedo)74

 5.2.3 Propuesta de caudal ecológico-IHA75

 5.2.4 Propuesta de caudal ecológico-Tennant Modificado83

 5.2.5 Propuesta de caudal ecológico-WWF.....86

 5.3 Bloque hidráulico88

 5.3.1 Geometría del tramo suburbano.....88

 5.3.2 Modelación del régimen variable natural.....90

 5.3.3 Modelación de propuesta de caudal ecológico-IHA.....92

 5.3.4 Modelación de propuesta de caudal ecológico-Tennant Modificado.....93

 5.3.5 Modelación de propuesta de caudal ecológico-WWF.....94

 5.4 Bloque ambiental95

 5.4.1 Tipificación de flora y fauna95

 5.4.2 Índice de vegetación (NDVI)96

 5.4.3 Estimación de lluvia efectiva98

 5.4.4 Evaluación del estado natural del cauce.....99

 5.5 Interrelación de resultados.....104

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES.....106

- 6.1 Comparación de RHN para año seco, medio y húmedo.106
- 6.2 Comparación de propuestas de caudal ecológico107
- 6.3 Propiedades de corrientes intermitentes111

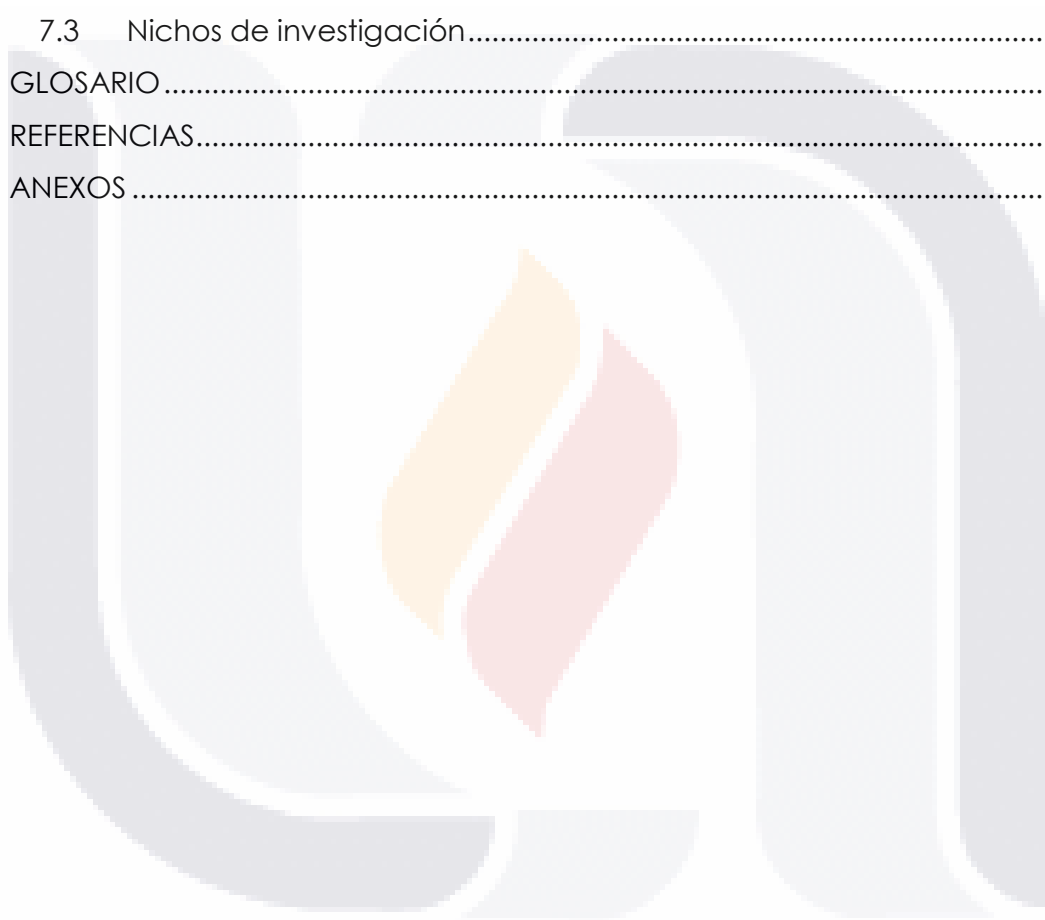
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES.....115

- 7.1 Conclusión general115
- 7.2 Conclusiones particulares.....115
- 7.3 Nichos de investigación.....117

GLOSARIO.....118

REFERENCIAS.....120

ANEXOS133



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la Curva N.....	45
Tabla 2. Régimen de caudal recomendado.....	48
Tabla 3. Objetivo ambiental de la zona de estudio.....	67
Tabla 4. Datos generales de la microcuenca hidrológica.....	69
Tabla 5. Determinación del Número de la curva de escurrimiento.....	71
Tabla 6. Precipitación ponderada de microcuenca de estudio.....	73
Tabla 7. Parámetros de la fórmula de gasto medio anual.....	74
Tabla 8. Determinación de año hidrológico.....	74
Tabla 9. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales análisis RVA.....	79
Tabla 10. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas anuales.....	80
Tabla 11. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales.....	81
Tabla 12. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.....	81
Tabla 13. Determinación de periodos de estiaje y avenida.....	83
Tabla 14. Recomendaciones de porcentajes de caudales ecológicos.....	84
Tabla 15. Estrategia de caudal ecológico por el método Tennant Modificado.....	85
Tabla 16. Criterios de elección de percentil.....	86
Tabla 17. Posición de percentiles.....	86
Tabla 18. Caudal ordinario estacional.....	87
Tabla 19. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA.....	92
Tabla 20. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA.....	93
Tabla 21. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA.....	94
Tabla 22. Tipificación de flora.....	95
Tabla 23. Tipificación de fauna.....	96
Tabla 24. Estimación de lluvia efectiva.....	98
Tabla 25. Cuadro comparativo de régimen de caudal ecológico.....	107
Tabla 26. Comparación de metodologías hidrológicas.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de metodologías para caudal ecológico.....	38
Figura 2. Modelo de caudal natural	40
Figura 3. Análisis de rango de variabilidad.....	41
Figura 4. Propuesta de caudal ecológico	47
Figura 5. Esquema de tareas para la modelación en HEC-RAS	51
Figura 6. Energía entre dos secciones	53
Figura 7. Esquema descriptivo de la propuesta de metodología	55
Figura 8. Diagrama de flujo descriptivo del bloque espacial.....	56
Figura 9. Diagrama de flujo descriptivo del bloque hidrológico	59
Figura 10. Diagrama de flujo descriptivo del bloque hidráulico.....	61
Figura 11. Diagrama de flujo descriptivo del bloque ambiental.....	63
Figura 12. Macro-localización de la zona de estudio	65
Figura 13. Región hidrológica Lerma-Santiago	66
Figura 14. Cuencas hidrológicas del estado de Aguascalientes.....	67
Figura 15. Zonificación de Áreas Naturales Protegidas	68
Figura 16. Red hidrográfica	69
Figura 17. Curva Hipsométrica	70
Figura 18. Zonas de escurrimiento	71
Figura 19. Polígonos de Thiessen.....	72
Figura 20. Hidrograma mensual de tendencia para cada año hidrológico.....	75
Figura 21. Régimen de variabilidad interanual.....	76
Figura 22. Régimen de variabilidad mensual.....	77
Figura 23. Régimen de variabilidad mensual con limite RVA.....	77
Figura 24. Régimen de variabilidad para el mes de julio con limite RVA.....	78
Figura 25. Curva de duración de caudales.....	82
Figura 26. Componentes de caudal ecológico	82
Figura 27. Histograma de caudal ecológico por el método Tennant Modificado	85
Figura 28. Histograma de caudal ecológico por el método WWF.....	87

Figura 29. Tramo suburbano88

Figura 30. Tramo suburbano en planta89

Figura 31. Geometría del tramo suburbano en vista 3D89

Figura 32. Sección 2700 para año seco90

Figura 33. Sección 2700 para año medio90

Figura 34. Sección 2700 para año húmedo91

Figura 35. Modelación tramo aguas arriba para año húmedo91

Figura 36. Sección 2700 método IHA.....92

Figura 37. Sección 2700 método Tennant Modificado93

Figura 38. Sección 2700 método WWF94

Figura 39. NDVI97

Figura 40. Gráfico de mosaico para evaluación de salud arroyo “La Yerbabuena” ..100

Figura 41. Gráfico de línea para evaluación de salud arroyo “La Yerbabuena”101

Figura 42. Gráfico de áreas acumuladas para evaluación de salud arroyo “La Yerbabuena”101

Figura 43. Régimen de caudal mínimo mensual arroyo “La Yerbabuena”102

Figura 44. Evaluación de salud hidrológica para el apéndice C102

Figura 45. Evaluación de salud hidrológica para el apéndice D.....103

Figura 46. Evaluación de salud hidrológica método IHA.....103

Figura 47. Interrelación de resultados104

Figura 48. Esquema de corriente intermitente en periodo de estiaje111

Figura 49. Esquema de corriente intermitente en periodo de avenida.....112

Figura 50. Perfil del cauce principal con propuesta IHA113

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

BBM	Metodología holística de construcción de bloques (Building Block Methodology)
CNA	Comisión Nacional del Agua
EFC	Componentes de caudal ecológico (Environmental Flow Components)
ELOHA	Límites ecológicos de alteración hidrológica (Ecological Limits of Hydrologic Alteration)
EMA	Escorrentamiento Medio Anual
HAT	Herramienta de evaluación hidrológica (Hydrologic Assesment Tool)
HEC-RAS	Centro de Ingeniería Hidrológica- Sistema de Análisis de Ríos (Hydrologic Engineering Center- River Analysis System)
IFD	Índice de desviación de flujo (Index of Flow Deviation)
IHA	Indicadores de alteración hidrológica (Indicators of Hydrologic Alteration)
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
NDVI	Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
QGIS	Quantum GIS
RAMSAR	Convención y registro de humedales de importancia internacional
RHN	Régimen Hidrológico Natural
RVA	Régimen de variabilidad
SIATL	Simulador de flujos de agua de cuencas
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TNC	Conservación natural (The Nature Conservancy)
WWF	Foro Mundial para la naturaleza (Worl Wildlife Found)

RESUMEN

Se adaptó una metodología para determinar el régimen de caudal ecológico en corrientes de orden intermitente con base en indicadores de alteración hidrológica y modelación eco-hidráulica, aplicada al arroyo “La Yerbabuena” del estado de Aguascalientes. La campaña experimental se dividió en cuatro bloques: espacial, hidrológico, hidráulico y ambiental. En la etapa espacial se generaron mapas de los principales rasgos geomorfológicos, los cuales ayudaron a determinar las series sintéticas de gastos diarios y mensuales. En la etapa hidrológica, se relacionó la metodología IHA contra los procedimientos de los apéndices C y D en la NMX-AA-159-SCFI-2012; y se encontró un umbral similar para épocas de estiaje y de avenida. Se encontraron ventajas adicionales con la estrategia IHA, en la que se pueden estimar los periodos más largos de sequía de 320 días en la época de pre-impacto, y en la de post impacto fue de 330 días. Además, IHA permite asignar una clasificación para cada registro de caudal diario, obteniendo que el componente de mayor frecuencia en la microcuenca analizada, es el gasto extremadamente bajo que funciona como caudal base en zonas de retención cuya topografía fue afectada por la presencia de infraestructura. En el bloque hidráulico, con la modelación unidimensional se observaron tirantes máximos con la estrategia de caudal IHA de hasta 0.20 m, dependiendo las secciones, con velocidades hasta 0.86 m/s, en tramos con pendientes pronunciadas del gradiente de energía. En la etapa ambiental, con el software FlowHealth se evaluó la salud hídrica de las propuestas de caudal ecológico, obteniendo que la estrategia IHA se aproxima más al nivel de referencia mínimo mensual que establece el programa. Por último, comparando la estimación de lluvia efectiva anual de 0.003 m³/s con el caudal ecológico anual (0.045m³/s), se concluye que es un gasto suficiente para la subsistencia de la vegetación riparia del cauce.

Palabras clave: caudal ecológico, corriente intermitente, indicadores de alteración hidrológica, salud hidrológica del cauce, modelación unidimensional.

ABSTRACT

A methodology was adapted to determine the regime of environmental flow in intermittent streams, based on indicators of hydrological alteration and eco-hydraulic modeling, applied to the creek "La Yerbabuena" of the state of Aguascalientes. The experimental campaign was divided into four blocks: spatial, hydrological, hydraulic and environmental. In the space stage, maps of the main geomorphological features were generated, which helped to determine the synthetic series of daily and monthly expenses. In the hydrological stage, the IHA methodology was related to the procedures of Appendices C and D in the NMX-AA-159-SCFI-2012; and a similar threshold was found for periods of drought and rainy season. Additional advantages were found with the IHA strategy, in which the longest drought periods of 320 days can be estimated in the pre-impact period, and in the post-impact period it was 330 days. Moreover, it allows assign a classification for each record of daily flow, obtaining that the component of greater frequency in the micro-basin analyzed, is the extreme low flow that works as base flow in retention zones whose topography was affected by the presence of infrastructure. In the hydraulic stage, with one-dimensional modeling, maximum depths were observed with the IHA flow strategy of up to 0.20 m, depending on the sections, with speeds up to 0.86 m/s, in sections with steep slopes of the energy gradient. In the environmental stage, with FlowHealth software it was evaluated the water health of the ecological flow proposals, obtaining that the IHA strategy is closer to the minimum monthly reference level established by the program. Finally, comparing the effective annual rainfall estimate of 0.003 m³/s with the annual ecological flow (0.045m³/s), it is concluded that a sufficient environmental flow is obtained for the subsistence of the riparian vegetation of the channel.

Keywords: environmental flow, intermittent river, indicators of hydrologic alteration, hydrological health of the river, one-dimensional modeling



CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las cuencas hidrográficas representan divisiones naturales del paisaje, son parte importante para la planeación y gestión de los recursos naturales, y su funcionamiento eco-hidrológico se basa en un equilibrio frágil y dinámico, resultado de la interacción entre sus componentes. Respecto al territorio que conforma la cuenca, dentro de éste, se lleva a cabo el ciclo hidrológico, por ello cualquier alteración que sufra modificará la dinámica del mismo (Monk et al., 2008).

Actualmente, la situación de las cuencas hidrográficas nos confronta a establecer una escala geográfica que permita analizar y sintetizar la información disponible, con la finalidad de determinar parámetros para prevenir riesgos naturales que pudieran afectar el entorno (Steinfeld et al., 2006).

Algunos fenómenos alertan continuamente acerca del deterioro provocado por el uso inadecuado de los recursos naturales, como la reducción de la disponibilidad de agua en cuestión de calidad y cantidad, el incremento de desechos de diferentes tipos como industriales y domésticos por mencionar algunos. Por ello la vital importancia de profundizar en conocimientos integrados acerca de la estructura y función de los ecosistemas pertenecientes al estado de Aguascalientes (Sandoval Ramírez, 2016).

El caudal ecológico o régimen de variabilidad natural de un río se define como la duración y cantidad de flujos de agua para mantener la capacidad de recuperación de los ecosistemas de agua dulce y conservar sus especies. (Alonso-EguíaLis et al., 2007; Poff et al., 2010; Rodríguez Torres, 2012).

En México y otras naciones, aspectos como contaminación de suelos y agua, pérdida de biodiversidad, alteración del régimen hidrológico, disminución de agua subterránea y disminución de recursos naturales afectan nuestro vínculo con el medio ambiente (Cotler Avalos et al., 2013).

Al principio, el concepto de caudal ecológico estaba enfocado solamente en la autorización de infraestructura hidráulica o extracciones, como el gasto mínimo que se le permite a la corriente utilizando porcentajes del gasto medio anual (Tennant, 1976).

Una alteración se presenta cuando se aplican fuerzas potencialmente perjudiciales al espacio de hábitat ocupado por una población, comunidad o ecosistema. Éstas fuerzas pueden ser de propiedades físicas, químicas, biológicas o combinadas, que generan un cambio en hábitats naturales y el agotamiento de los organismos y sus recursos (Wood et al., 2008).

Las características de ríos y arroyos están integralmente ligadas con sus respectivas cuencas hidrográficas; el impacto puede ser ilustrado considerando los efectos de la urbanización, donde la magnitud, duración y el tiempo de escurrimiento no están controlados únicamente por la precipitación, sino también por la infiltración al subsuelo, la evaporación y la transpiración de plantas (Martín, 2014).

En los últimos años, alrededor del mundo, la presencia de infraestructura modifica las condiciones del entorno natural de un cauce, como pueden ser la presencia de presas principalmente, además de vertederos, descargas de alcantarillado, o diques, por mencionar algunos; sin embargo, estas construcciones hoy en día deben cumplir con ciertas consideraciones como disponibilidad de agua y presión de uso (Frey & Linke, 2002; Gómez-Balandra et al., 2015; Koch, 2002; Pietrosevoli & Rodríguez Monroy, 2013; Tilt et al., 2009).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los retos que enfrenta hoy en día la sociedad mexicana en cuestión de régimen hidrológico no son sencillos, los caudales ecológicos se calculan para salvaguardar especies dentro de una corriente de agua, y en el país se han realizado distintos esfuerzos de divulgación técnica, así como de aplicación de metodologías e iniciativas para normar ante la creciente necesidad e interés de la determinación de éstos (Gómez-Balandra et al., 2014).

Según diagnósticos realizados por la Comisión Nacional del Agua, el panorama respecto a la hidrografía nacional es que los ríos se utilizan sobre todo para desalojo de desechos incluidos en los drenajes y basura, irrigación en cultivos, pesca, y zonas de recreación, además que se represan para controlar inundaciones y generar energía. Por otra parte, el cambio de uso de suelo para la agricultura y la urbanización trae consigo la alteración a través de la descarga de drenajes urbanos, agrícolas e industriales, por lo que aproximadamente el 44% de cuerpos de agua del país respecto a su hábitat silvestre se ve afectado por la sedimentación y exceso de nutrientes (González Villela & Banderas Tarabay, 2015).

Por ello, resulta muy importante el análisis y generación de políticas ambientales que tengan en cuenta la parte ecológica, social y global de cauces naturales, debido a su importante función de común denominador para la estructura y funcionamiento de la hidrografía del país (Barrios et al., 2011)

Para calcular el caudal ecológico, se tiene a nivel mundial distintas metodologías, las cuales pueden ser: hidrológicas, hidráulicas, hidrobiológicas (simulación del hábitat) y holísticas (Tharme, 2003).

Sin embargo, hay diferentes resultados dependiendo el caso de estudio, por lo que la tendencia internacional en fechas recientes es su regulación, mediante la implementación de normatividad para su aplicación (Barrios Ordóñez et al., 2015).

En México, la norma que regula la determinación de caudales ecológicos es la NMX-AA-159-SCFI-2012, sin embargo, las metodologías que se describen en el documento tienen énfasis en cuencas con importancia ecológica alta y presión de uso moderada, es decir corrientes de tipo perenne, en las que circula agua todo el año; caso contrario de la red hidrográfica del estado de Aguascalientes que es de tipo intermitente, con cauces que solo contienen agua especialmente en épocas de lluvia.

Por lo anterior, la importancia de esta investigación radica en utilizar una metodología en bloque para la determinación del régimen de caudal ecológico para una cuenca hidrológica de la zona, que en su mayoría presenta cauces con corrientes de tipo intermitente, que no está normada como tal en la NMX- 159, compuesta de índices de variación hidrológica y el uso de modelación hidráulica a fin de garantizar un sistema sostenible de ecosistemas y usos de agua.

1.2 Objetivo General

Adaptar una metodología por bloques con base en indicadores de alteración hidrológica y simulación eco-hidráulica, para determinar una propuesta de caudal ecológico en cauces intermitentes.

1.3 Objetivos Particulares

- a) Determinar el régimen de variabilidad por medio de una serie sintética diaria y mensual de caudales, utilizando datos geomorfológicos y técnicas avanzadas de estadística aplicadas en hidrología.
- b) Determinar umbrales de caudal ecológico mensual con la metodología IHA.

- c) Relacionar los resultados obtenidos con metodologías marcadas en la NMX-159 apéndice C y apéndice D, para emitir criterios para corrientes intermitentes.
- d) Evaluar el comportamiento hidráulico de las estrategias de caudal ecológico calculadas, mediante una modelación unidimensional para flujo permanente y gradualmente variado.
- e) Relacionar el régimen de variabilidad con las condiciones de vegetación y urbanización.
- f) Evaluar la salud hídrica de la zona de estudio seleccionada utilizando indicadores de alteración de flujo con el programa FlowHealth.

1.4 Alcances

Para los alcances de esta investigación, se considera que el desarrollo de éstos se podrá cumplir respetando tiempos marcados en el cronograma de trabajo.

- a) El análisis hidrológico se realizará considerando la normatividad vigente establecida por CNA, mediante la utilización de sistemas de información geográfica como QGIS y Google Earth donde se muestre la ubicación de la zona de estudio y sus principales parámetros geomorfológicos.
- b) Por la ausencia de estaciones hidrométricas, para elaborar la serie sintética de gastos diarios y mensuales, se utilizará el método de los polígonos de Thiessen, ponderando las estaciones climatológicas con área de influencia en la zona de estudio determinada.
- c) Para determinar el umbral de variación interanual de caudal ecológico por medio de la metodología de indicadores de alteración hidrológica (IHA), se utilizará el software IHA-RVA-7.1 a partir de un análisis de datos con los registros de precipitación de la estación base.
- d) Con los caudales calculados por el método IHA se realizará una simulación eco-hidráulica utilizando HEC-RAS para analizar el comportamiento del gasto en diferentes escenarios.

- e) Para la caracterización ambiental, asesorado por un biólogo, se llevará a cabo una tipificación de flora y fauna del ecosistema analizado, de manera superficial, considerando los conocimientos que un ingeniero civil domina.
- f) Para determinar el índice de vegetación se utilizarán imágenes satelitales LANSAT-8 procesadas en la calculadora ráster de QGIS.
- g) Para la comparación de las metodologías hidrológicas de la norma y la IHA, se determinará un régimen de caudal ecológico óptimo en base a variables ecológicas, utilizando el programa FlowHealth.

1.5 Definición del Problema

En México, existe la norma NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece diversas metodologías para determinar el caudal ecológico, sin embargo, los apéndices del reglamento, solo se enfocan en corrientes perennes (circula agua todo el año), mientras que las condiciones hidrográficas de algunas cuencas en la parte norte del país y regiones del bajío, presentan cauces intermitentes, es decir, ríos y arroyos que no fluyen permanentemente, con atención generalizada, pese a que se están volviendo más comunes que los ríos perennes.

Por ello se propone la utilización de indicadores de alteración hidrológica (Metodología IHA-RVA), que es una metodología desarrollada por el grupo The Nature Conservancy basada en variaciones anuales de caudal, que permitirá determinar un umbral de caudal ecológico para corrientes intermitentes, además de establecer el grado de alteración debido embalses o presas, así como el cambio en el uso de suelo que modifican el cauce y el ciclo hidrológico natural en la cuenca.

Además, realizando una modelación eco-hidráulica unidimensional del cauce empleando las series sintéticas de los caudales naturales y ecológicos, se podrá determinar en diferentes escenarios los factores y efectos más influyentes en el entorno natural.

Con base en la metodología que se pretende implementar, los resultados se compararán con los obtenidos de los lineamientos de la norma mexicana, tomando como zona de estudio un tramo suburbano del cauce natural del arroyo “La Yerbabuena”.

Esta zona, ha presentado antecedentes de inundaciones en las últimas décadas, por lo que existe una importante alteración hidrológica que será evaluada en esta investigación. Por lo anterior, el presente tema de tesis representará un avance en la prevención y manejo de cauces naturales intermitentes respecto al caudal ecológico, debido a que la norma no contempla alguna metodología para su determinación.

1.6 Hipótesis

“Si la determinación de caudales ecológicos utilizando la metodología IHA-RVA aplicada a corrientes intermitentes reconoce la variabilidad natural y nivel de alteración del régimen, entonces, presentará resultados aproximados a los que resultan en los procedimientos descritos en la NMX-159 apéndice C y D, observando una variación mensual similar al utilizar la modelación unidimensional con HEC RAS”.

1.7 Planteamiento de campaña experimental

La presente investigación dadas sus características se compone de los siguientes bloques:

- a) Espacial de la zona.
- b) Hidrológico.
- c) Hidráulico.
- d) Ambiental.

Considerando la interacción entre ellas, el procedimiento a seguir es el siguiente:

- a) Se determinará una cuenca y un tramo sub-urbano dentro de la misma, que presente una problemática acorde a los objetivos que se busca solventar con la implementación de la metodología integral.
- b) Se caracterizará espacialmente la zona de estudio, utilizando los softwares de Sistema de Información Geográfica como QGIS, Google Earth y la plataforma simuladora de aguas superficiales del INEGI (SIATL) para mostrar la zona de estudio y obtener sus principales rasgos geomorfológicos como lo son área, perímetro, coeficiente de compacidad, relación de elongación, curva hipsométrica, coeficiente de escurrimiento por mencionar algunos.
- c) Para la caracterización hidrológica, se utilizarán bases de datos de precipitación de las estaciones climatológicas de CNA, dentro de la cuenca en cuestión, para poder realizar un arreglo de polígonos de Thiessen, y obtener áreas de influencia para generar una precipitación ponderada de la zona.
- d) Con la serie de precipitaciones base, se obtendrán los caudales diarios y mensuales, considerando el escurrimiento como gasto de aforo, en el cual, se emplearán parámetros geomorfológicos como área drenada, coeficiente de escurrimiento, número hidrológico N, y la precipitación en exceso.
- e) Con la serie sintética de caudales diarios, usando el programa IHA 7.1 se determinará el umbral de caudal ecológico mensual, mediante un análisis paramétrico de dos periodos.
- f) Además, con las series sintéticas de caudales mensuales, se calculará el umbral de caudal ecológico usando las metodologías que marca la norma NMX-159 en sus apéndices C y D.
- g) Una vez terminada la caracterización espacial e hidrológica, se realizará la simulación eco-hidráulica del tramo suburbano seleccionado, donde exista alteración notoria del cauce por desarrollo de infraestructura,

realizando una modelación con los caudales ecológicos calculados para evaluar su comportamiento en diferente régimen.

- h) En la etapa hidráulica, se modelará unidimensionalmente cada umbral de caudal ecológico para flujo permanente y gradualmente variado usando el software HEC-RAS 5.0.3.; además de realizar una simulación numérica para año hidrológico seco, medio y húmedo.
- i) En la caracterización ambiental, se realizará una tipificación de la zona de manera superficial, hasta los alcances de conocimientos que el ingeniero civil domina, para determinar la vegetación y fauna que están presentes en los ecosistemas del tramo suburbano seleccionado. Esto se desarrollará asesorado de un biólogo, o experto en el tema, auxiliados de QGIS para ubicación de usos de suelo y zonas de trascendencia ecológica.
- j) Además, con base en imágenes satelitales LANSAT-8, se determinará el índice de vegetación de la zona para evaluar la calidad y desarrollo de flora, usando la calculadora ráster de QGIS.
- k) Se obtendrá un régimen óptimo de caudal ecológico, usando el programa FlowHealth, en el cual, mediante un análisis de la serie diaria de caudales, establecerá un umbral de caudal ecológico con alto nivel de idoneidad para la prevalencia de los ecosistemas.
- l) Por último, se evaluará con base en los resultados obtenidos en cada bloque, una estrategia de caudal ecológico que sea idónea para mantener el régimen de variabilidad en la zona de estudio.

1.8 Narrativa por capítulos

CAPITULO I

En el capítulo primero, se presenta la introducción general a la tesis. Se define el tema de estudio y se sitúa la definición del problema de investigación que se desarrollará. Enseguida se plantea cuál es el objetivo general de estudio y se definen los objetivos particulares y los alcances del mismo. Por último, se describe la metodología de trabajo y la estructura del mismo.

CAPITULO II

En este segundo capítulo se muestra un panorama general del estado actual del conocimiento situando al lector en el contexto de los estudios referentes a caudal ecológico, particularmente de la metodología IHA y la implementación de simulación eco-hidráulica, que se favorecerán para desarrollar la campaña experimental aplicada a corrientes intermitentes que han sido alteradas por la presencia de infraestructura.

CAPITULO III

En el capítulo tercero, se presentan conceptos, fórmulas y modelos que serán aplicados para el desarrollo de la metodología de la presente investigación, y que favorecerán al lector en familiarizarse con el tema. Se abordan temas desde definiciones y aspectos generales del caudal ecológico, además de principios básicos de la metodología de alteración hidrológica y modelos empleados para la simulación numérica.

CAPITULO IV

Se muestra de manera detallada la metodología que se empleará en la investigación, considerando cuatro etapas de desarrollo: espacial, hidrológica, hidráulica y ambiental; además de las herramientas y modelos matemáticos a utilizar para el desarrollo de la campaña experimental.

CAPITULO V

En este capítulo se presentan los resultados de la metodología o campaña experimental planteada en el apartado anterior, agrupándose en 4 bloques, partiendo del bloque espacial, que incluye la delimitación de zonas de estudio y tramos suburbanos; bloque hidrológico, que incluye los resultados de la propuesta de caudal ecológico por el método IHA, además de los métodos Tennant modificado y WWF que pertenecen al apéndice C y D respectivamente de la NMX-159; el bloque hidráulico que contiene la parte de la modelación unidimensional de cada una de las 3 propuestas con el software HEC-RAS 5.0; y por último el bloque ambiental que contiene los resultados de la tipificación de flora y fauna riparia de la zona de estudio, además de una evaluación del caudal con el software FlowHealth que ayudarán a formular las recomendaciones de cada zona analizada.

CAPITULO VI

Contiene las discusiones de los puntos más significativos de los resultados obtenidos en la campaña experimental, en que resalta la comparación de la metodología IHA con las metodologías establecidas por la norma, evaluando a través de la modelación unidimensional y estableciendo cual es la que mejor se ajusta a las condiciones de una corriente de tipo intermitente.

CAPITULO VII

El último capítulo contiene las conclusiones recabadas mediante el análisis de resultados de una manera puntual, estableciendo recomendaciones para manejar el régimen de variabilidad en cada zona de estudio y evaluando si se cumplieron o no con la hipótesis planteada al inicio de la investigación.



CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)

La metodología IHA-RVA (con sus siglas en inglés), se ha aplicado en diversos casos en el mundo, tiene diferentes enfoques, sobre todo, para recomendaciones de caudales ecológicos. Esta metodología se apoya del software IHA 7.1 incluyendo parámetros hidrológicos para establecer rangos de variables ambientales (The Nature Conservancy, 2011; Palma Raymundo, 2013). Existen investigaciones recientes de caudal ecológico utilizando esta metodología que favorecieron para el desarrollo de la campaña experimental que se presentan a continuación.

Como lo trabajó Rodríguez (2012), que procesó datos para caracterizar el río Verde en Oaxaca, obteniendo como conclusiones respecto a las variaciones del régimen de caudal, para periodos de interés que comprenden días de máximos y mínimos caudales, que podrían vincularse con procesos naturales de configuración del cauce, además de presentar relación con la disponibilidad del hábitat. Es así como los valores hidrológicos adquieren un amplio valor ambiental, sin embargo, si se requiere mayor profundidad del tema, recomienda realizar estudios específicos en el sitio de interés.

Por otra parte, se tiene una investigación reciente del río Yuna en República Dominicana, donde se estimaron caudales ambientales utilizando el método de análisis en cuestión, en tres puntos de la cuenca; las series de caudales diarios fueron obtenidos mediante la combinación genérica de caudales mensuales y desagregación de diarios. Este estudio concluye que la aplicación de la metodología IHA es una opción recomendable para realizar cálculos de caudales ecológicos cuyos resultados pueden ser utilizados para elaborar un programa de operación de embalses (Bautista de los Santos, 2014).

Además, recientemente se realizó una investigación por parte del IMTA para el río Mezcalapa, dicha investigación se complementó bajo metodologías hidrológicas e hidráulicas, utilizando serie de datos de 19 y 35 años para régimen natural y alterado respectivamente, identificando rasgos físicos y su relación con los procesos ambientales, obteniendo valores hidrológicos a través de la modelación hidráulica que se relacionan con el desarrollo del ecosistema (Domínguez-Sánchez et al., 2015).

No obstante, en EUA, se han realizado diversas investigaciones como la de Hersh & Maidment, (2006) que trabajó para determinar el grado de alteración de los principales ríos de Texas utilizando dos software el IHA y el HAT (Hydrologic Assessment Tool), concluyendo que el software IHA es el más adecuado para evaluar la alteración hidrológica y cuantificar los efectos de la construcción de presas y otros proyectos de desarrollo de la gestión del agua.

En el 2006, en Honduras se aprobó la construcción de una presa hidroeléctrica en el río Patuca, aguas abajo del río se extiende uno de los mayores desiertos de Centroamérica, hogar de miles de indígenas que viven en decenas de comunidades a lo largo del río, debido a que la gente y los ecosistemas aguas abajo dependen de la vitalidad del río. Los resultados obtenidos respecto a los efectos de alteración hidrológica no afectarán considerablemente en los meses de febrero a mayo, no obstante, en agosto para el periodo de post-impacto los caudales medios mensuales bajarían aproximadamente un tercio por la operación de la presa (Opperman, 2011).

Otra investigación, en el río Middle Fork en Virginia Estados Unidos, obtuvo inferencias sobre un análisis RVA, en el cual los flujos mensuales de julio a diciembre muestran grandes valores del umbral de variabilidad caso contrario en los meses de febrero a mayo (Opperman, 2006)

Un estudio realizado en el río Colorado, por Richter et al., (1998), demostró que mantener el régimen de variabilidad hidrológica en un arroyo es importante para la prevalencia de ecosistemas aledaños al cauce principal. Mediante una evaluación de la alteración hidrológica para diferentes periodos de año desde 1895 a 1995 encontraron periodos pre impacto y post impacto a la alteración, corroborando la hipótesis de que el río ha presentado una importante perturbación en sus características naturales.

En un estudio de Jiaojiang en la provincia de Zhejiang, China, Gippel et al., (2009) señalaron, para flujos diarios, una correspondencia cercana entre el flujo del percentil 25 y el flujo base del percentil 50 (separado del flujo total usando un filtro digital recursivo y asumiendo el flujo como flujo base cuando el índice de flujo base excedió 0,9).

La misma observación se realizó en un estudio de caudales ambientales del río Taizi, Gippel et al., (2011), por lo tanto, el flujo del percentil 25 puede aproximarse a las condiciones medias del flujo de base, lo que lo haría una base razonable para las recomendaciones de flujo de base en condiciones hidrológicas promedio.

2.2 Modelación Eco-hidráulica

La modelación eco-hidráulica es el resultado de la aplicación de simulación hidráulica de variables con significancia biológica, que por lo general suele ser la profundidad, velocidad y sustrato. (Hernández et al., 2008)

Hoy en día, se cuenta con herramientas que visualizan el flujo en 1D y 2D; donde el primero caracteriza el cauce mediante un conjunto de celdas, dentro de las cuales la profundidad y la velocidad se mantienen invariables para un caudal; y el segundo permite una descripción mejorada de los fenómenos hidráulicos complejos, con velocidad considerable (García Rivera, 2013).

La determinación de caudales ecológicos en ríos implica la composición de los modelos anteriormente descritos, ajustando las particularidades ecohidráulicas de un tramo fluvial en concreto, que cuantifican el hábitat potencialmente útil para una o varias especies en estudio (Díez Hernández & García Rivera, 2013).

Para modelar el flujo ambiental usando el software HEC-RAS, Migone (2013), estableció una metodología para calcular el caudal ecológico en estuarios, aplicándolo al río Aysen. Al final de la investigación, establece que el caudal mínimo cumple con las restricciones de salinidad y tiempo de permanencia.

Por otra parte, la modelación que presenta Ochoa et al., (2016) del tramo medio del río Ctalamochita, en Argentina, basa su modelo unidimensional en las ecuaciones de Saint-Venant, usando HEC-RAS, pero aplicándolo a encontrar zonas de inundación y compararlo con la modelación numérica obtenida con el programa IBER.

La modelación numérica en ríos y arroyos, en conjunto con las herramientas SIG, permite combinar datos georreferenciados para llevar a cabo un mejor manejo de datos mediante una discretización espacial 1D y 2D. En su investigación Castellet et al., (2014), presentan ecuaciones y esquemas numéricos que sirven como base para el desarrollo de la investigación enfocado al comportamiento del caudal ecológico.

Además, Guarniz Muñoz (2014) realizó una comparación de modelos unidimensionales y bidimensionales usando IBER y HEC-RAS, señalando que las principales diferencias es que cada uno utiliza esquemas de cálculo distintos para resolver ecuaciones de Saint-Venant, de volúmenes finitos y esquema de diferencias finitas, que requiere una discretización espacial.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

En el estudio de cuantificación y caracterización de escurrimientos que realizó Díaz (2015), del río Tercero (Ctalamochita) parte del río Carcarañá de Argentina, con secciones a cada 50 m , presentó variaciones debido a aportaciones de descargas industriales.

Un análisis de sistemas de flujos en ríos y para este caso, cauces intermitentes, requiere el análisis de un flujo no permanente que permita simular las condiciones reales del tránsito de crecidas originadas por lluvia o tiempos de estiaje o decadencia como se investigó en Mohames & Hamad, (2008).

La aplicación de modelos unidimensionales ha sido empleada en estudios como el del río Jhelum, principal afluente de problemas de inundación del valle de Cachemira en India. Se realizó un análisis unidimensional para diferentes tiempos de retorno, entre los cuales, para 50 y 100 años se encontraron inundaciones en el área de estudio (Ahmad et al., 2016).

El nuevo HEC-RAS versión 5 tiene capacidad para realizar simulaciones en 2D, la simulación provee información adicional como profundidad de agua, velocidad y variación del flujo, estudios como el que realizó Moya Quiroga et al., (2016) permitió analizar la inundación que se presentó en la Amazonia Boliviana, identificando zonas expuestas a tal amenaza.

Pese a que, en la mayoría de las simulaciones citadas, son aplicadas a riesgos por inundación, una simulación unidimensional del régimen de variación de caudal ecológico, determinando su relación con la alteración hidrológica a través del tiempo puede generar resultados de mayor claridad y veracidad en esta investigación.

2.3 Investigaciones respecto a cauces intermitentes

Investigaciones de propuestas de caudal ecológico en corrientes intermitentes son escasas, sin embargo, en el caso de México, y otros países con red hidrográfica similar, existen zonas de estudio en las que, la metodología y consideraciones en el análisis de resultados favorecen al desarrollo de esta investigación.

Tal es el caso de una propuesta de caudal ecológico en la cuenca del río San Pedro Mezquital, en Nayarit, en la cual por el método establecido por WWF y Río Arronte, se determinó el régimen de caudal ecológico y un volumen de reserva, esta zona presenta variables climatológicas parecidas a las de Aguascalientes, que puede funcionar como punto de comparación para la adaptación que se pretende realizar de una serie sintética de gastos diarios (Reyes-González et al., 2009).

La investigación realizada por Delso et al., (2017) aplicada en la cuenca Guardiania de Sur Iberia, favoreció para conocer patrones de comportamiento de cauces intermitentes, y compararlos con los que pertenecen a red hidrográfica del estado de Aguascalientes. Propone una metodología basada en la variabilidad inter o intra anual y la integración de éstos con fines ecológicos.

Por otra parte, Sadid et al.,(2017) estudió características de la cuenca hidrográfica del río Madin , tales como: geología, cobertura y uso de suelo; determinando periodos de sequía o estiaje, que influyen en el transporte de sedimentos suspendidos y en las condiciones de escorrentía del cauce.

2.4 Marco Legal en México y otros Países sobre Caudal Ecológico

El caudal ecológico fue un concepto que surgió en los años 70's en E.U.A.; estados como California, y Texas presentan criterios para su estimación, fundamentados en el documento "Water Resources of the United States" , con base en principios de restauración de ríos, asociado con el avance en el ámbito industrial los últimos años y la sobre-explotación a la que han sido sometidos diferentes cuerpos de agua (Hall, 2004)

Puntualizando en estados como Washington, se ha favorecido al cálculo de caudales ecológicos sobre la base de distintos modelos de evaluación, según la situación, utilizando métodos como Tennant, RVA (Range of Variability Approach), y, sobre todo, los últimos años se emplea la metodología IFIM-PHABSIM. Por otra parte, en estados como California, utilizan la metodología RVA combinada con procesos estadísticos de indicadores de alteración hidrológica (Carroll et al.,2004).

En Chile, por su parte aprobaron un reglamento para la determinación del caudal mínimo, los organismos involucrados fueron los Ministerios de Obras Públicas (MOP) y del Medio Ambiente (MMA), dicha normativa establece el caudal necesario para que una fuente de agua superficial pueda mantener la biodiversidad de la zona (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales realizó un estudio del agua donde se determinó que el caudal mínimo ecológico debe ser el 25 % del caudal mensual (multianual) más bajo del río en estudio (IDEAM, 2015).

Respecto a Brasil, el caudal ecológico está reglamentado desde 1997 establece que el caudal ecológico no puede ser inferior al 80% del menor valor promedio mensual medio en ese lugar en todo el periodo de observaciones disponibles. Además, países como España y Francia, establecen rangos específicos para reserva (Villanueva Uré & Alata Rey, 2011)

En nuestro país, las alianzas con la WWF y la fundación Río Arronte marcaron el inicio de la legislación para la determinación de caudal ecológico. Actualmente, el país se rige por la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 que define los procedimientos y especificaciones técnicas para determinar el caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua (Secretaría de Economía, 2012)

Existen normas como la NOM-011-CONAGUA-2015 que establece las especificaciones y la metodología que es necesaria para determinar la disponibilidad media de aguas nacionales, así como la Ley de Aguas Nacionales que define el caudal ecológico como el uso para conservación ecológica de un volumen mínimo que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio de ecosistemas (CNA, 2015)

El término caudal ecológico los últimos años ha tomado importancia en el país, e inclusive equipos de investigación del IMTA han destacado la relevancia de la preservación de hábitat de flora y fauna de cuencas hidrográficas del país (González Villela & Banderas Tarabay, 2015).

Sin embargo, en la revisión de las metodologías mencionadas tanto en artículos extranjeros como regionales que maneja la NMX-159, son procedimientos aplicables para corrientes perennes. Por esta razón, se destaca la importancia de esta investigación, enfocada a cauces intermitentes que son los de prevalencia en el estado de Aguascalientes, para generar un desarrollo sustentable y evitar un desequilibrio de recursos ambientales en cauces naturales de nuestra región.



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presentan conceptos, fórmulas y modelos que serán aplicados para el desarrollo de la campaña experimental, que favorecerán al lector en familiarizarse con el tema.

3.1 Caudal Ecológico y Metodologías para su Determinación

Es común en cualquier referencia bibliográfica, encontrar terminología refiriéndose al caudal ecológico como caudal ambiental, caudal de reserva o inclusive caudal de mantenimiento como lo muestran en su estudio Kintz et al., (2009). Sin embargo, para efectos de esta investigación el término que se utilizará será caudal ecológico, como lo mencionan en su artículo Castro Heredia et al., (2006), sugieren ésta terminología por tener connotaciones claras para el público en general y para los técnicos, políticos y gestores del agua.

La ley de aguas nacionales, establece que el uso ambiental del agua o caudal ecológico es el caudal necesario en cuerpos receptores que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio del ecosistema (Diario Oficial de la Federación, 2016).

La norma mexicana define el caudal ecológico como la cantidad, calidad y régimen del flujo necesario para mantener componentes, procesos y funciones en ecosistemas acuáticos, además de considerar sinónimos el caudal ambiental y flujo ambiental (Secretaría de Economía, 2012).

El funcionamiento ecológico de un río está relacionado con su hidrología, por lo que una alteración en sus principales atributos como duración, frecuencia o magnitud de los caudales puede afectar la integridad del río. (Aguilera & Pouilly, 2012).

Aunque existe una amplia gama de metodologías para calcular caudales ecológicos (figura 1), el principio del cálculo consiste en saber el papel que desempeñan los componentes del Régimen Hidrológico Natural (RHN) en cuestión de estructura y funcionamiento (Salinas-Rodríguez, 2011).

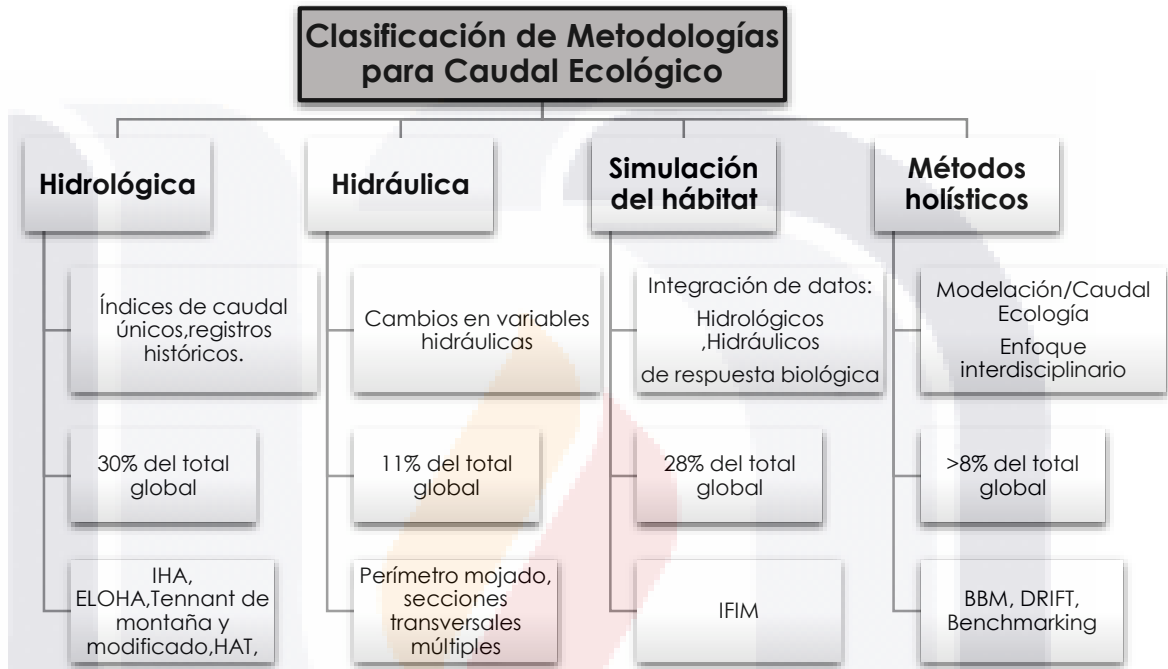


Figura 1. Clasificación de metodologías para caudal ecológico
Fuente: (Tharme, 2003; Rodríguez Torres, 2012)

Los procedimientos hidrológicos, a excepción de la metodología IHA-RVA, manejan un análisis estadístico simple, ya que determinan caudales por probabilidades de ocurrencia de ciertos eventos de estiaje o recurrencia de caudales bajos. Se subestima el carácter complejo de los sistemas ambientales, además de que los flujos mínimos crean efectos inmediatos que difieren los efectos prolongados para mantener estos flujos (Mesa, 2009).

Las tendencias actuales han presentado abandono progresivo de los métodos hidrológicos simples, y buscan mayor fundamentación en el ámbito ecológico, con una tendencia a la fusión con métodos ecohidrológicos (Palau, 2003; Castro Heredia et al., 2006).

3.2 Régimen hidrológico

La definición del régimen hidrológico, de acuerdo con los conceptos mostrados en la NMX-159, se basa en una variabilidad intra o inter anual que presenta una tendencia de evolución natural del río o cuerpo de agua a analizar; no son tan evidentes las alteraciones antropogénicas (Secretaría de Economía, 2012).

El régimen hidrológico determina un vínculo entre rasgos geomorfológicos y su relación con el ecosistema. La alteración a este régimen ha provocado en corrientes perennes la extinción de comunidades de flora nativa, generado por la presencia de infraestructura en el cauce principal (Vélez Flórez, 2009).

Por todo lo anterior, según Ward & Tockner (2001) y Dudgeon et al., (2006) en sus investigaciones, la alteración del régimen es una amenaza constante a la sustentabilidad de ríos; y afecta de diferentes maneras:

- Pérdida de biodiversidad de especies nativas de flora y fauna.
- Conectividad longitudinal y lateral de las riberas.
- El caudal es el determinante principal del hábitat físico en los ríos, mediante el análisis cuenca (dimensiones del cauce) o en un segmento (condiciones hidráulicas sobre un tramo).

3.3 Indicadores de alteración hidrológica

La investigación de Richter et al., (1998), establece una metodología llamada "índices de alteración hidrológica" (IHA) por sus siglas en inglés, con base en 33 atributos intra-anales de relevancia ecológica. El método considera series de tiempo disponibles de varios años, aunque la opción más general es elegir 20 años, por lo que la diferenciación entre el régimen natural y el alterado consta del cálculo de parámetros interanuales generados por medidas de dispersión y tendencia (Callejas Fernández, 2012).

Los Indicadores de Alteración hidrológica se componen de 67 parámetros estadísticos, divididos en dos grupos, los parámetros IHA y los parámetros de los componentes de caudal ecológico EFC, como lo indica en su manual The Nature Conservancy (2011). Éstos, se clasifican en 5 categorías, por condición hidrológica y significancia ambiental para cada parámetro como se muestra en los anexos 1 y 2 del documento. Cada grupo de parámetros IHA se describirá a continuación:

3.3.1 EFC (Componentes de caudal ecológico)

El software IHA permite el cálculo de parámetros para 5 tipos de componentes de caudales ecológicos, donde se genera un hidrograma que se divide en caudales bajos, caudales altos e inundaciones, como se muestra en la figura 2.

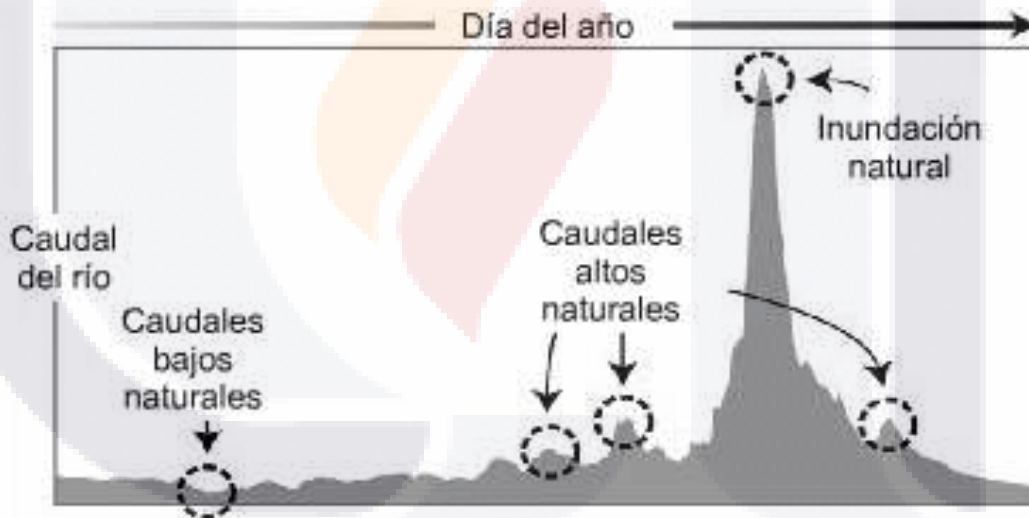


Figura 2. Modelo de caudal natural
Fuente: The Nature Conservancy (2011)

Esta clasificación se derivó de investigaciones ecológicas donde se infiere, respecto a la hidrografía de ríos, que puede tener patrones repetitivos que son ecológicamente relevantes para prevalecer la integridad del cauce y sus ecosistemas (Vélez Flórez, 2009). La categorización estándar que realizó The Nature Conservancy (2011) muestra los siguientes componentes:

- **Caudales extremadamente bajos (Extreme Low Flows).** Generalmente en condiciones de sequía, son los caudales más bajos durante todo el año.
- **Caudales bajos (Low Flows).** Es la condición que prevalece en la mayoría de los cauces, se asocia con un nivel base del río durante el año.
- **Pulsos de caudal alto (High-Flow Pulses).** Son caudales que están por encima del flujo base debido a la influencia de escorrentía causada por precipitación, pero no sobrepasa los márgenes del cauce.
- **Pequeñas inundaciones (Small Floods).** Evento en el que el agua sobrepasa los bordes del cauce, sin embargo, son los de menor magnitud en contraste con grandes inundaciones.
- **Grandes inundaciones (Large Floods).** Eventos de mayor magnitud de caudal alto, en el cual el agua sobrepasa las planicies de inundación.

3.3.2 RVA (Análisis de Rango de Variabilidad)

El análisis RVA, es un método que permite cuantificar el rango de variabilidad natural de las diferentes estadísticas del caudal y el grado en el cual este parámetro ha sido alterado. Solamente se puede aplicar a los 33 parámetros de IHA para un análisis de 2 periodos, uno de pre-impacto y el otro de post-impacto, como se observa en la figura 3 (The Nature Conservancy, 2011).

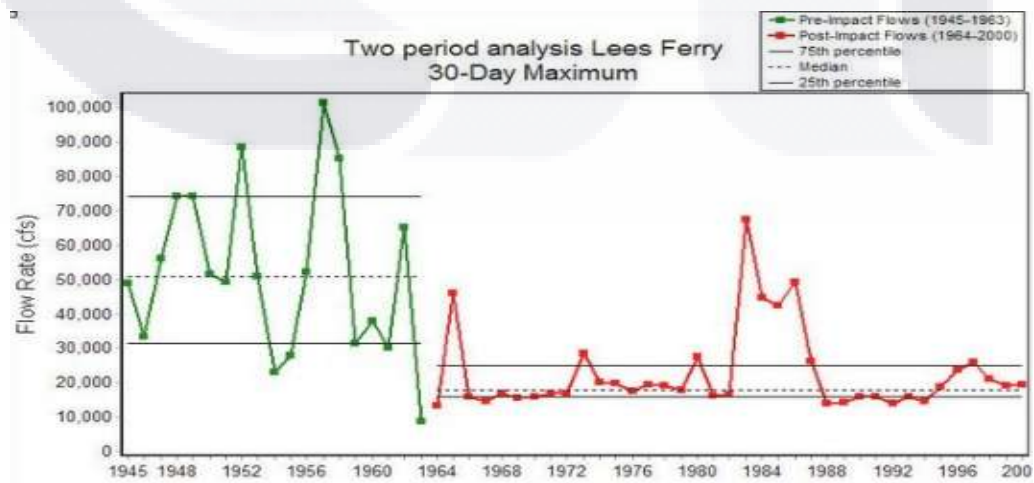


Figura 3. Análisis de rango de variabilidad
Fuente: The Nature Conservancy (2011)

Esta variación puede usarse para establecer metas de caudal ecológico, para delimitar valores cercanos a la distribución de magnitudes no alteradas (Palma Raymundo, 2013). Este rango contempla aspectos ambientalmente fundamentales para la conservación de ecosistemas dependientes del régimen hídrico (Richter et al., 2003).

La metodología consta de varias etapas como lo investigó Vélez (2009):

1. Caracterización del régimen hídrico natural.
2. Determinación de restricciones para cada uno de los parámetros.
3. Líneas guías de manejo basadas en resultados de RVA.
4. Sistema de monitoreo de efectos ecológicos.
5. Al término de cada año de calculan los 33 parámetros de IHA y se verifica el cumplimiento con el RVA.

El trabajo de Richter et al., (1998) recomienda que el umbral de variabilidad natural oscile entre los percentiles 25 y 75, que en una distribución normal corresponde a cumplir con un intervalo de más/menos una desviación estándar, permitiendo evaluar la asignación de caudales ecológicos.

The Nature Conservancy (2011), señala que el software IHA, permite calcular los parámetros IHA como estadísticas paramétricas (media/desviación estándar) o no paramétricas (percentil).

La configuración predeterminada es la no paramétrica, debido a la naturaleza sesgada en la mayoría de las series de datos, sin embargo, en situaciones de frecuencia de inundaciones o promedio de caudales mensuales pueden ser preferibles las estadísticas paramétricas.

Por último, el análisis de RVA divide los valores de los parámetros en tres categorías, dependiendo los percentiles seleccionados y calcula un factor de alteración hidrológica (HA) que cuantifica el cambio desde el periodo anterior al impacto al periodo posterior a éste (Vélez Flórez, 2009). La fórmula para obtener HA es la siguiente:

$$HA = \frac{(FO - FE)}{FE}$$

Donde:

FO: Frecuencia observada

FE: Frecuencia esperada

Es importante mencionar, que el criterio para dividir las épocas pre y post-impacto es el de desarrollo de asentamientos humanos en la zona de estudio. Un valor positivo de alteración hidrológica significa que la frecuencia de los valores ha aumentado entre el periodo anterior al impacto y el periodo posterior al impacto; mientras que un valor negativo significa que la frecuencia de los valores ha disminuido.

3.4 Serie sintética de gastos

Para cuencas hidrográficas cuyos cauces naturales carecen de información hidrométrica, tal vez debido a la poca importancia de sus caudales, es necesario estimar los escurrimientos ocurridos a escala anual y mensual, con el objeto de poder realizar una propuesta de umbral de caudal ecológico para los fines de esta investigación. Para la estimación del volumen de escurrimiento, puede partir de la siguiente expresión:

$$Ve = CPeA$$

donde:

V_e : Volumen de escurrimiento en m^3

A : Área drenada de la cuenca hidrológica en m^2

P_e : Precipitación en exceso en mm

C : Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

3.4.1 Método de la Curva N de escurrimiento

Un método que explica Martínez (2011) generalmente aplicado a cuencas no aforadas (sin estación hidrométrica). Este método relaciona el área de la cuenca, con el tiempo de concentración y la precipitación en exceso.

Para el cálculo de la precipitación en exceso, y el análisis de avenidas máximas Martínez (2011) utiliza la siguientes fórmulas:

$$P_e = \frac{(P - \frac{5080}{N} + 50.8)^2}{P + \frac{20320}{N} - 203.2}$$

donde:

P_e : Precipitación en exceso en mm.

N : Número de la curva de escurrimiento para la condición media de humedad de la cuenca

P : Precipitación en mm.

Por otra parte, el valor de N está dado por la siguiente ecuación, en la que se considera un potencial máximo de retención S_r que varía debido a cambios de uso de suelo y pendiente del terreno (Neitsch et al., 2000).

$$N = \frac{25400}{S_r + 254}$$

La investigación realizada por el US Soil Conservation Service para determinar los valores de la curva N , como se muestra en la tabla 1, extraída de McCuen (2016), indica para distintos usos de suelo los siguientes valores:

Tabla 1. Valores de la Curva N.

Descripción del tipo de suelo	Condición Hidrológica Estiaje	N para los grupos de suelo hidrológico			
		A	B	C	D
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes	Pobre	55	73	82	86
	Media	44	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Matorral	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Bosque o selva	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Buena	25	55	70	77
Zona agrícola	-	59	74	82	86
Áreas de bosques herbáceos	Pobre		80	87	93
	Media		71	81	89
	Buena		62	74	85
Bosques de <i>Quercus-álamos</i>	Pobre		66	74	79
	Media		48	57	63
	Buena		30	41	48
Bosques de <i>Juniperus</i>	Pobre		75	85	89
	Media		58	73	80
	Buena		41	61	71
Selva-pastos	Pobre		67	80	85
	Media		51	63	70
	Buena		35	47	55

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub-horizontes de roca sana, suelos muy impermeables.

Fuente: McCuen, (2016)

En los últimos años, softwares como HEC-HMS y SWAT incluyen en sus opciones el método de la curva N para calcular escurrimientos directos, usando incrementos de tiempo y sus respectivos parámetros hidrológicos; además, mediante un modelo distribuido permiten calcular láminas escurridas de eventos de 24 horas. Finalmente, el gasto de escurrimiento medio en un día, está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Ve}{tiempo}$$

dónde:

Q : Caudal medio diario a la salida de la cuenca (m^3/s).

Ve : Volumen de escurrimiento en m^3

el tiempo estará en segundos transcurridos en un día

3.5 Método Tennant Modificado

Se conoce también como método de Montana, divide el año en dos periodos que son húmedo y seco, de los cuales a cada uno se le asigna un porcentaje adecuado del caudal medio interanual (Secretaría de Economía, 2012).

Para cada uno de los periodos secos y húmedos, o mejor conocidos en la NMX-159 apéndice C, de estiaje y avenida, respectivamente, se aplica el método de Montana modificado, donde su desarrollo y cálculo adaptado a México por el IMTA para la evaluación de impacto ambiental por obras hidráulicas ha generado resultados favorables (García Rodríguez et al., 1999).

De acuerdo con la NMX-159 todos los valores de caudales medios mensuales (C_{mi}) que se encuentren por encima del valor del Escurrimiento Medio Anual (EMA), se consideran periodos de avenida.

El régimen de caudal ecológico mensual se determina a partir del año medio de lluvia con los porcentajes propuestos para la determinación de régimen de caudal ecológico mensual $\% C_{mi}$ de cada periodo dentro del año, conforme a la TABLA C.1 para un objetivo ambiental seleccionado dependiendo el tipo de cuenca y generando la propuesta que se observa en la figura 4 (Secretaría de Economía, 2012).

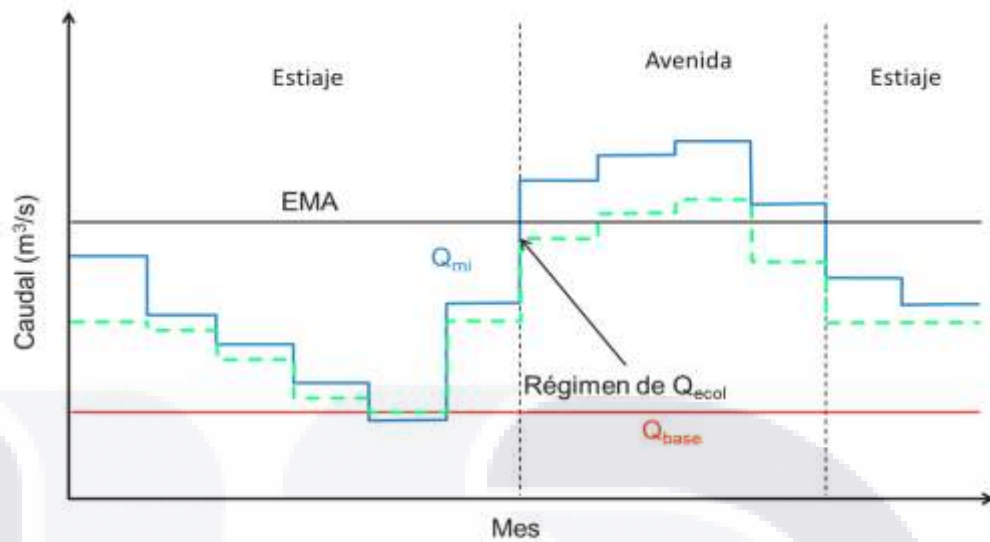


Figura 4. Propuesta de caudal ecológico
Fuente: Secretaría de Economía (2012)

Para el régimen de caudal ecológico anual, este es determinado a partir de la selección de un año tipo (seco, medio o húmedo), cabe señalar que para ambos periodos (estiaje y lluvias) el valor del caudal ecológico nunca debe ser mayor al caudal medio mensual (Q_{mi}) ni menor al caudal base (Q_{base}).

En la investigación de Santacruz de León (2009) se menciona que el método Tennant establece los siguientes criterios de acuerdo con la tabla 2:

1. El 10% del caudal medio anual es el mínimo recomendable para mantener un hábitat que permite en un corto plazo la sobrevivencia del hábitat de la cuenca, debido al estado ecológico de la cuenca.
2. El 30% del caudal medio anual es el recomendable para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia del hábitat de la cuenca.
3. El 60% del caudal medio anual es recomendable para generar un ambiente excelente para la mayoría de las especies de la cuenca.
4. El 200%, equivale a considerar el flujo de las avenidas para la limpieza del cauce.

Tabla 2. Régimen de caudal recomendado

Estado ecológico	Régimen de caudales recomendado	
	Octubre-marzo (semestre seco)	Abril-septiembre (semestre húmedo)
De descarga o máximo	200%	
Gama óptima de variación	60%-100%	
Excelente	40%	60%
Muy buena	30%	50%
Buena	20%	40%
Débil o degradante	10%	30%
Pobre o mínimo	10%	10%
Degradación alta	0%-10% del caudal medio	

Fuente: (Tennant, 1976; Duabily & Méndez, 2006)

3.6 Tipo de corrientes en cauces naturales

La red de drenaje de una cuenca es el sistema de cauces por los que escurre el agua de manera temporal o permanente, entonces, de acuerdo con el tiempo en que circula el agua sobre corrientes, éstas se pueden clasificar (Linsley, et al., 1982; Martínez Martínez, 2011).

- a) *Perennes*: llevan agua siempre excepto en sequías extremas.
- b) *Intermitentes*: tienen agua especialmente en época de lluvias.
- c) *Efímeras*: contienen agua cuando llueve o inmediatamente después.

3.6.1 Corrientes intermitentes

Las corrientes intermitentes son ríos y arroyos que no fluyen permanentemente, y constituyen una gran proporción de las corrientes de aguas interiores del mundo, actualmente están recibiendo una atención generalizada (Leigh et al., 2016).

Datry et al., (2014) en su libro, señala que los ríos que naturalmente cesan de fluir, se encuentran en cada continente, incluso aún más comunes que los ríos perennes, y reciben el término de intermitentes.

Una estimación conservadora es que los ríos intermitentes constituyen más del 30% de la longitud total y la descarga de la red global de ríos, además, la extracción de agua y el embalsamiento han causado que muchos ríos que antes eran perennes se volvieran intermitentes, incluyendo grandes ríos como el Nilo, el Indo, el Amarillo, el Amu, el Syr Darya, Río Grande y Colorado. En un futuro próximo, el número de ríos intermitentes aumentará en las regiones en las que se produzca un severo secado climático o apropiación del agua (Döll & Zhang, 2010).

Los patrones de flujo temporal o intermitente siguen siendo poco estudiados, a pesar de su amplia distribución y su importancia para las prácticas de gestión y conservación de ríos. Delso et al., (2017) señala que, para conocer y caracterizar los patrones de flujo en este tipo de corrientes, se debe conocer, especialmente de las épocas de cese o estiaje, lo siguiente:

- Frecuencia
- Duración
- Magnitud

Los ríos y arroyos de condiciones intermitentes presentan una gran estacionalidad, aumento en transporte de sedimentos y afectación de condiciones de hábitat natural. Por otra parte, la principal razón de la existencia hoy en día de sistemas fluviales intermitentes es la presión antropogénica sobre ecosistemas de agua dulce (Conallin et al., 2017; Sadid et al., 2017).

Particularmente, en el estado de Aguascalientes, la mayoría de su red hidrográfica es de condición intermitente, como lo describe Guzmán-Colis et al., (2011) señalando que los cauces secos conducen aguas pluviales por corto tiempo después de las épocas de lluvia. Además, los principales arroyos reciben aporte de varias microcuencas, de aguas residuales crudas y tratadas de los diferentes sectores de la población.

3.7 Clasificación de flujo en canales

La clasificación del flujo canales, dependiendo las variables a analizar, como lo muestran en sus investigaciones Sotelo Ávila (2002) y Lluén Chero (2015) que se presenta a continuación:

1. Respecto al tiempo:
 - a) Permanente $\frac{\partial y}{\partial t} = 0$
 - b) No permanente $\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0$
2. Respecto al espacio
 - c) Uniforme $\frac{\partial y}{\partial s} = 0$
 - a) Variado $\frac{\partial y}{\partial s} \neq 0$
3. Respecto al número de Reynolds (laminar, transición, turbulento), que la mayoría de los flujos en la práctica son turbulentos.
4. Respecto al número de Froude (Subcrítico, crítico, supercrítico).

El tipo de flujo clasificado con respecto al tiempo que más comúnmente se utiliza es el permanente, sin embargo, la simulación que el programa HEC-RAS puede realizar en canales se resume en el siguiente esquema:

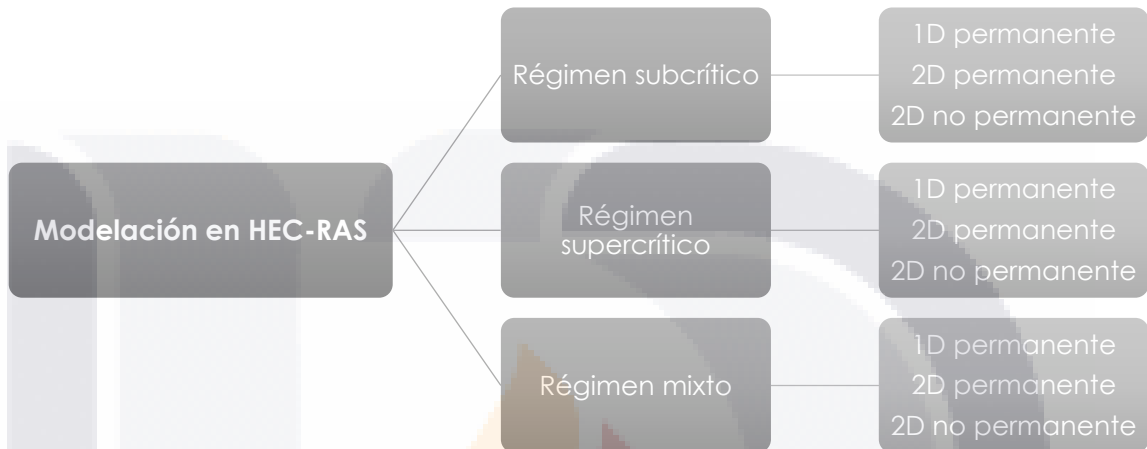


Figura 5. Esquema de tareas para la modelación en HEC-RAS
Fuente: (Lluén Chero, 2015)

3.8 Modelación numérica de ríos

La modelación numérica en cauces naturales consiste en conocer variables hidráulicas a partir de ecuaciones obtenidas de una serie de hipótesis, el modelo matemático que se adapte, siempre busca ser una aproximación a la realidad para la solución del fenómeno a analizar (Castellet et al., 2014).

Del tipo de régimen en función del tiempo ya sea flujo permanente o no permanente, se describirán los siguientes dos modelos matemáticos:

1. Régimen permanente gradualmente variado
2. Régimen no permanente gradualmente variado

3.8.1 Régimen permanente gradualmente variado

Para análisis con la finalidad de obtener niveles y velocidades de agua en ríos, la aproximación más utilizada es flujo unidimensional y régimen permanente gradualmente variado.

Las hipótesis básicas para la adecuación de los modelos son considerar un caudal de circulación constante en todo el tramo de estudio, un fondo fijo y no erosionable, movimiento unidimensional y una curvatura de superficie libre pequeña (Sotelo Ávila, 2002). Entonces, la expresión matemática base para este caso de aplicación, es la ecuación de conservación de la energía o Bernoulli.

Ecuación de la conservación de la energía

$$\frac{d}{dx} \left(z + y + \alpha \frac{v^2}{2g} \right) = -I$$

donde:

x : abscisa positiva en dirección del flujo

z : superficie del fondo o factor de la sección

y : tirante

v : velocidad media de la sección

g : aceleración de la gravedad

α : coeficiente de Coriolis

I : pendiente motriz determinada mediante la fórmula de Manning dada por la ecuación

$$I = \frac{n^2 \cdot v^2}{Rh^{\frac{4}{3}}}$$

n : coeficiente de Manning

v : velocidad media de la sección considerada

Rh : radio hidráulico

Ecuación de la energía entre dos secciones

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + IL + \sum \lambda \frac{v^2}{2g} + \Delta H$$

donde:

λ : coeficientes de pérdidas localizadas

ΔH : pérdidas por ensanchamiento o estrechamiento del cauce

La ecuación expresa la conservación de la energía del flujo debe de ser igual en la sección 1 y 2 más la energía perdida entre ambas, como se observa en la figura 6.

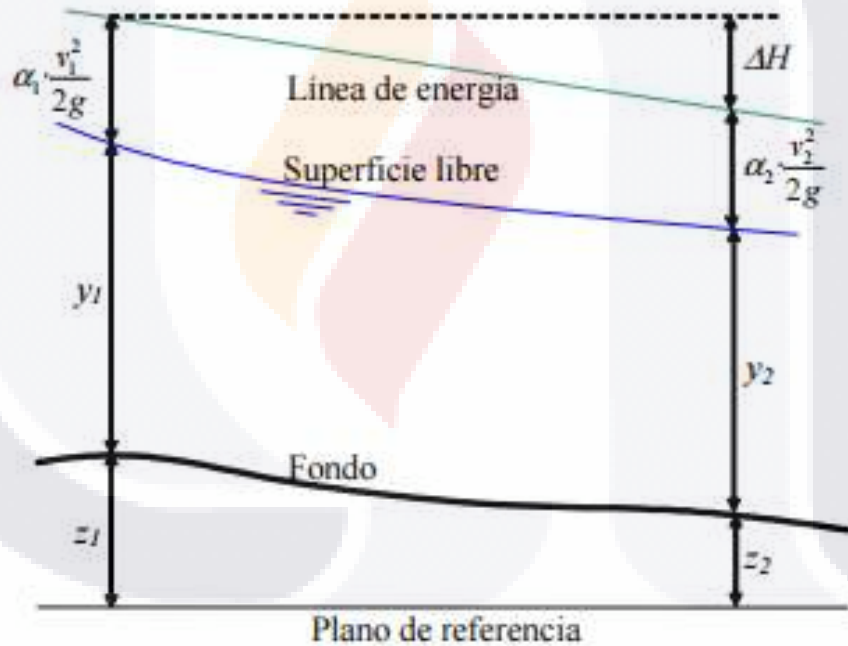


Figura 6. Energía entre dos secciones
Fuente: (Sotelo Ávila, 2002)

Con esto se completa la revisión de conceptos y modelos matemáticos que favorecen al desarrollo de la campaña experimental que se muestra a detalle en los siguientes apartados.



CAPÍTULO IV
METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

En este capítulo se describirá de manera detallada la metodología empleada con base en la revisión de estado actual del conocimiento y fundamentos teóricos que se emplearon para establecer un régimen de alteración hidrológico. Además, se mencionarán las herramientas y modelos matemáticos que favorecerán el logro de los objetivos planteados.

Como se mencionó en el primer capítulo, la metodología se divide en 4 bloques: espacial, hidrológico, hidráulico y ambiental, las cuales se explicarán a continuación en la siguiente figura, que incluye los principales objetivos a determinar en la campaña experimental.

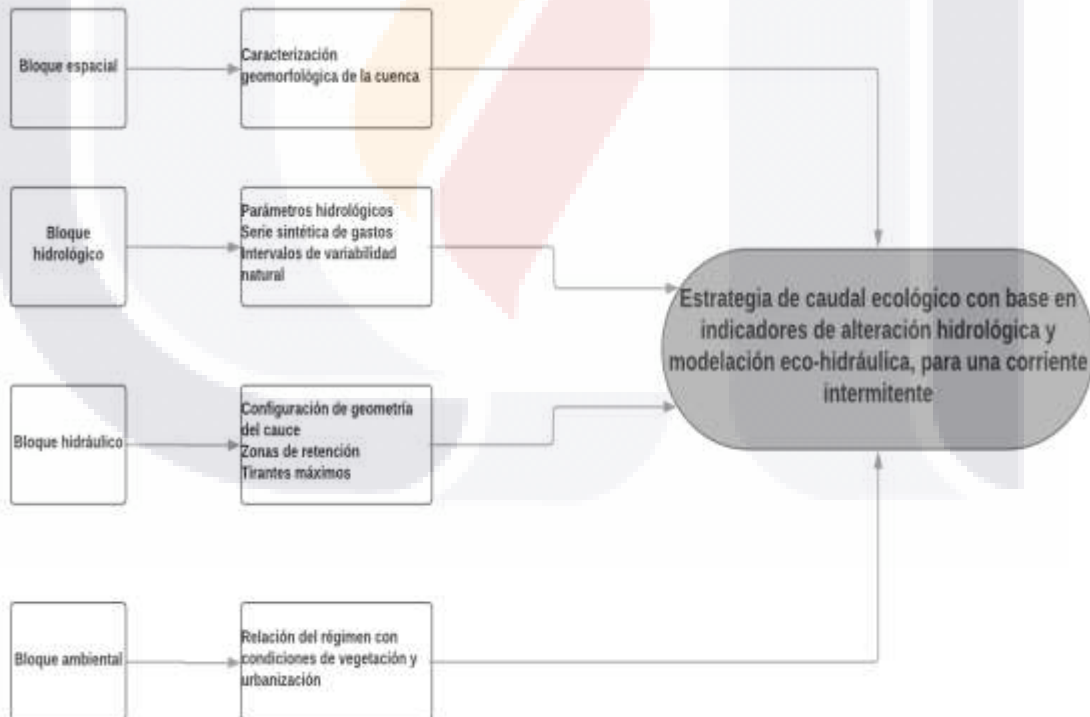


Figura 7. Esquema descriptivo de la propuesta de metodología

4.1 Caracterización espacial

De acuerdo con el tramo suburbano seleccionado, para la caracterización espacial se realizará el procedimiento que se muestra en la figura 8, que se compone de la delimitación de la microcuenca de estudio y la obtención de su geomorfología.

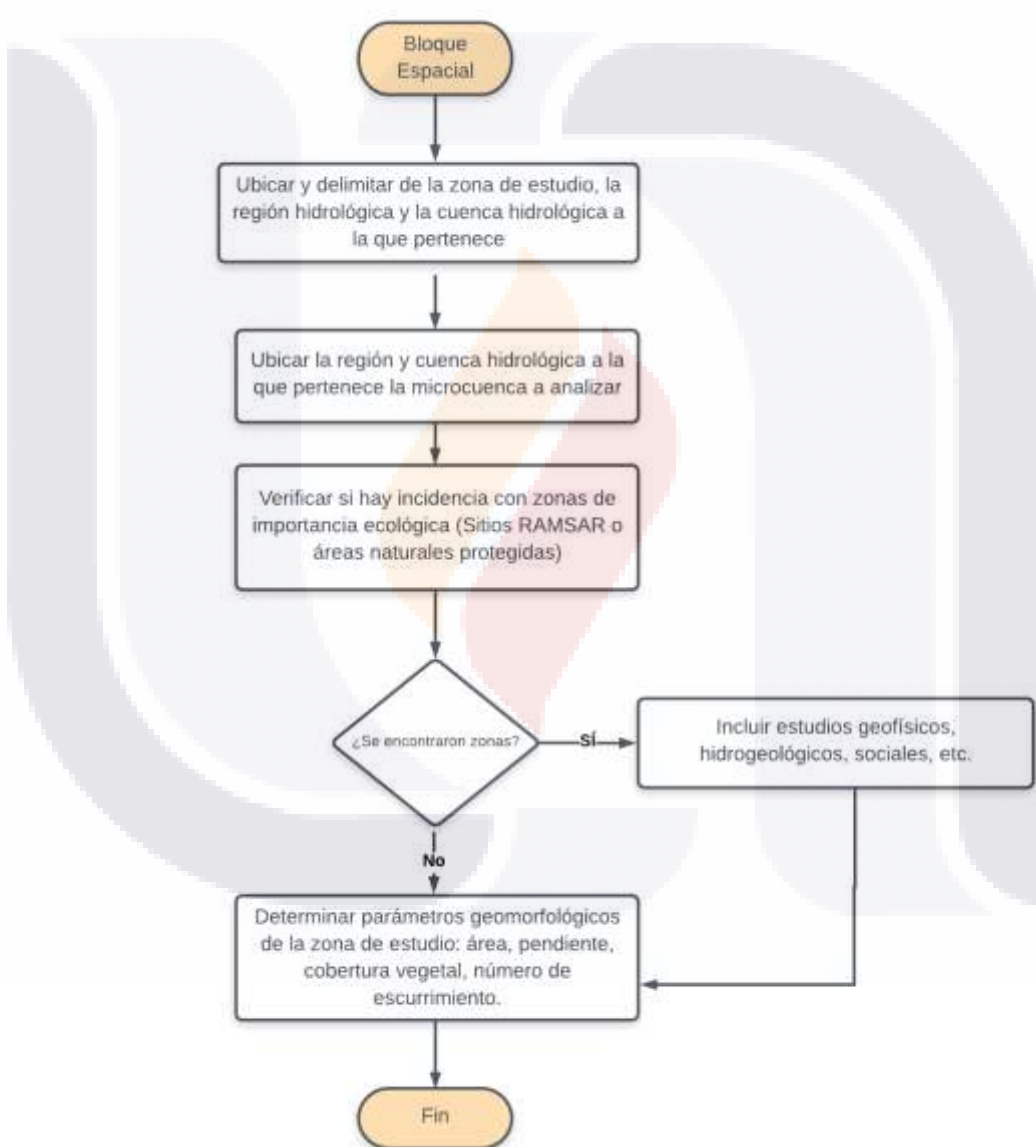


Figura 8. Diagrama de flujo descriptivo del bloque espacial
Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart

4.2 Caracterización hidrológica

La metodología que se empleará en la fase hidrológica de la investigación consta de la elaboración de series sintéticas de gastos mensuales y diarios cumpliendo con los criterios que marca la NMX-159 en su apéndice A con base en su objetivo ambiental, para al final determinar un umbral de caudal ecológico utilizando la metodología IHA y relacionarlo con los procedimientos de la NMX-159 apéndice C y apéndice D, para emitir criterios para corrientes intermitentes.

El procedimiento por seguir es el siguiente (figura 9):

1. Seleccionar el objetivo ambiental en base a su importancia ecológica del tramo suburbano por analizar.
2. Para determinar las precipitaciones de manera ponderada, se utilizará el criterio de los polígonos de Thiessen para establecer la estación con mayor área de incidencia.
3. Empleando fórmulas del método de la curva de escurrimiento, se determinarán las precipitaciones en exceso, usando los valores de precipitación calculados anteriormente.
4. Con las precipitaciones en exceso, se determinarán las series de caudales diarios y mensuales, usando el área drenada de la cuenca de estudio, el coeficiente de escurrimiento y el tiempo en segundos.
5. Los caudales diarios, se utilizarán en el software IHA 7.1, para establecer el rango de variabilidad anual (RVA).
6. Los datos se importarán mediante un archivo csv (delimitado por comas) que contiene la serie sintética de gastos diarios, definiendo el año hidrológico que comienza a partir del 1 de enero.
7. Para la estructura del análisis, se empleará un análisis paramétrico de dos periodos, por el criterio de la presencia de asentamientos humanos, se señaló el año 1992 como fecha de impacto dadas las condiciones de circulación del flujo del cauce.

8. Se obtendrá el cuadro de datos en formato editable xls, que contendrá los resúmenes de datos anuales, por periodo, cuadro RVA y cuadro EFC de componentes de caudal ecológico.
9. Para los gráficos, se obtendrán el régimen de variación interanual, posteriormente un régimen de variabilidad mensual, y después el límite de RVA, es decir, valores a partir de la media de +/- una desviación estándar ya que la capa de distribución mensual está muy concentrada. Para realizar la propuesta del umbral de caudal ecológico se utilizará como apoyo las tablas de grupo 1 y 2, para el análisis RVA.
10. Con el método Tennant, para la determinación de periodos de estiaje y avenida dentro de años secos, medios y húmedos, todos los valores de caudales medios mensuales (Cmi) que se encuentren por encima del valor del Ecurrimiento Medio Anual (EMA) serán considerados para el periodo de lluvias (avenida). Aplicando el porcentaje de acuerdo con la tabla 2, considerando la importancia ecológica y el tipo de régimen, se establecerán los caudales ecológicos para cada mes del año.
11. Para el método WWF, se determinará el umbral de caudal ecológico utilizando el régimen ordinario de caudales, mediante el análisis de percentiles de la serie histórica de gastos mensuales.
12. Se compararán los resultados obtenidos con la metodología IHA, respecto a los apéndices C y D de la NMX-159 que utilizan el método Tennant modificado y WWF respectivamente.
13. Las estrategias de caudal ecológico mensual obtenidas con las tres metodologías serán modelados en la siguiente fase experimental.

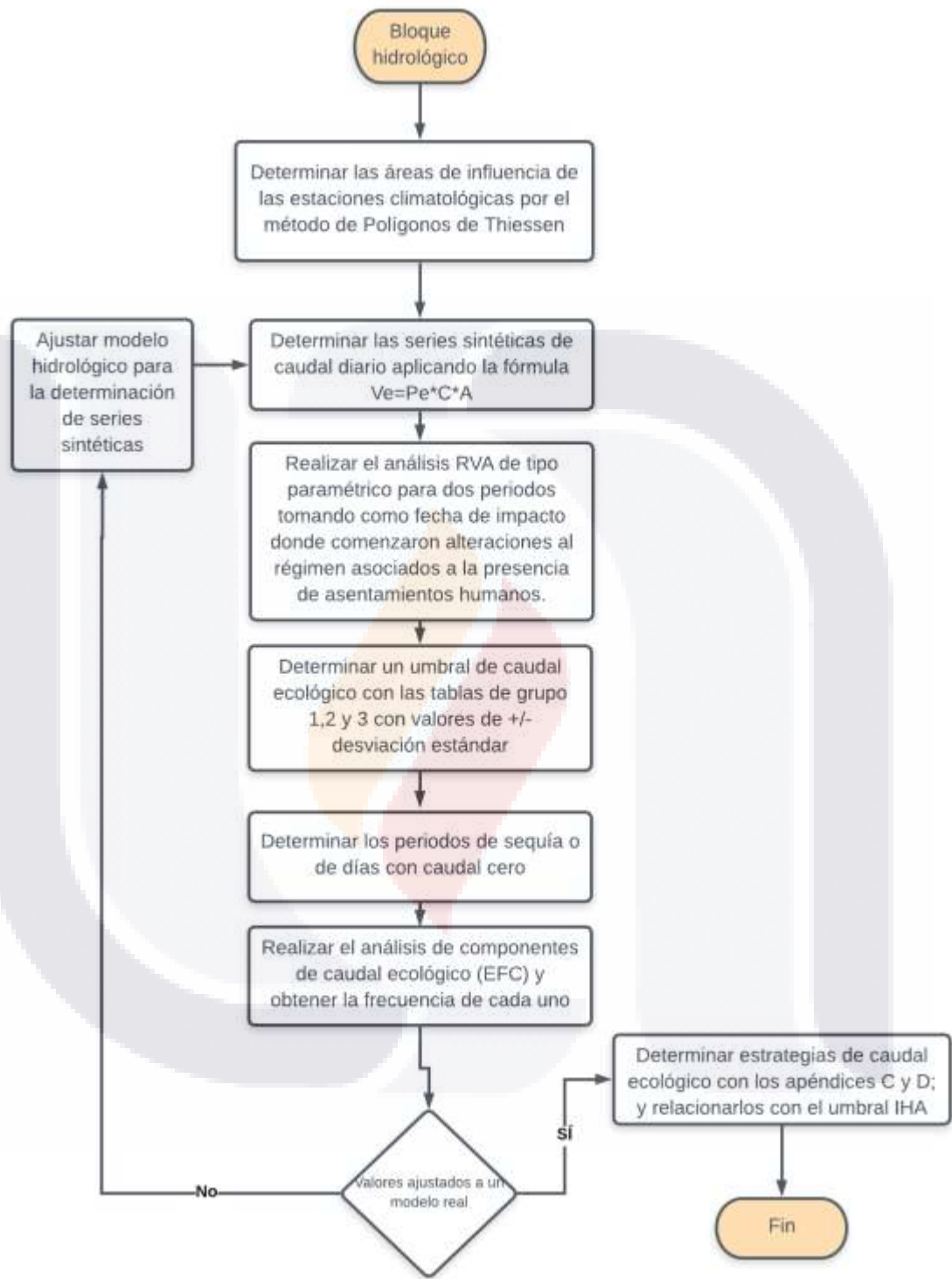


Figura 9. Diagrama de flujo descriptivo del bloque hidrológico
 Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart

4.3 Caracterización hidráulica

Para la evaluación hidráulica de la metodología que se pretende implementar, se utilizará el programa HEC-RAS 5.0 y se evaluarán los siguientes escenarios utilizando las ecuaciones mencionadas en el marco teórico que se describe a continuación y se muestra en la figura 10.

1. Obtener topografía del tramo seleccionado de estudio, esta topografía consta de secciones transversales.
2. Se importará la geometría obtenida en archivos formato csv, realizando una función espejo en cada una de las secciones considerando el flujo aguas arriba hacia aguas abajo. Esto debido a que CivilCAD arroja secciones transversales en sentido contrario.
3. Cada sección será configurada con los datos de entrada, delimitando ancho del cauce principal y sus respectivos márgenes, coeficientes de rugosidad y contracción.
4. Los caudales ecológicos obtenidos con el software IHA se modelarán en una dimensión usando las fórmulas de conservación de la energía para régimen permanente gradualmente variado.
5. Los caudales ecológicos obtenidos con la NMX-159 apéndice C y D, se modelarán en una dimensión usando las fórmulas de conservación de la energía, para régimen permanente gradualmente variado.

Es importante mencionar, que, en cauces naturales, es muy difícil encontrar flujo de agua entre secciones con régimen supercrítico, aunque el programa HEC-RAS permite resolver la ecuación de la energía para ambos casos, en esta investigación se analizará el comportamiento del caudal ecológico en cada mes con los escenarios mencionados anteriormente.

La modelación unidimensional funcionará como instrumento de evaluación, para comparar la metodología propuesta y las metodologías normadas para tiempos de estiaje y de avenidas.

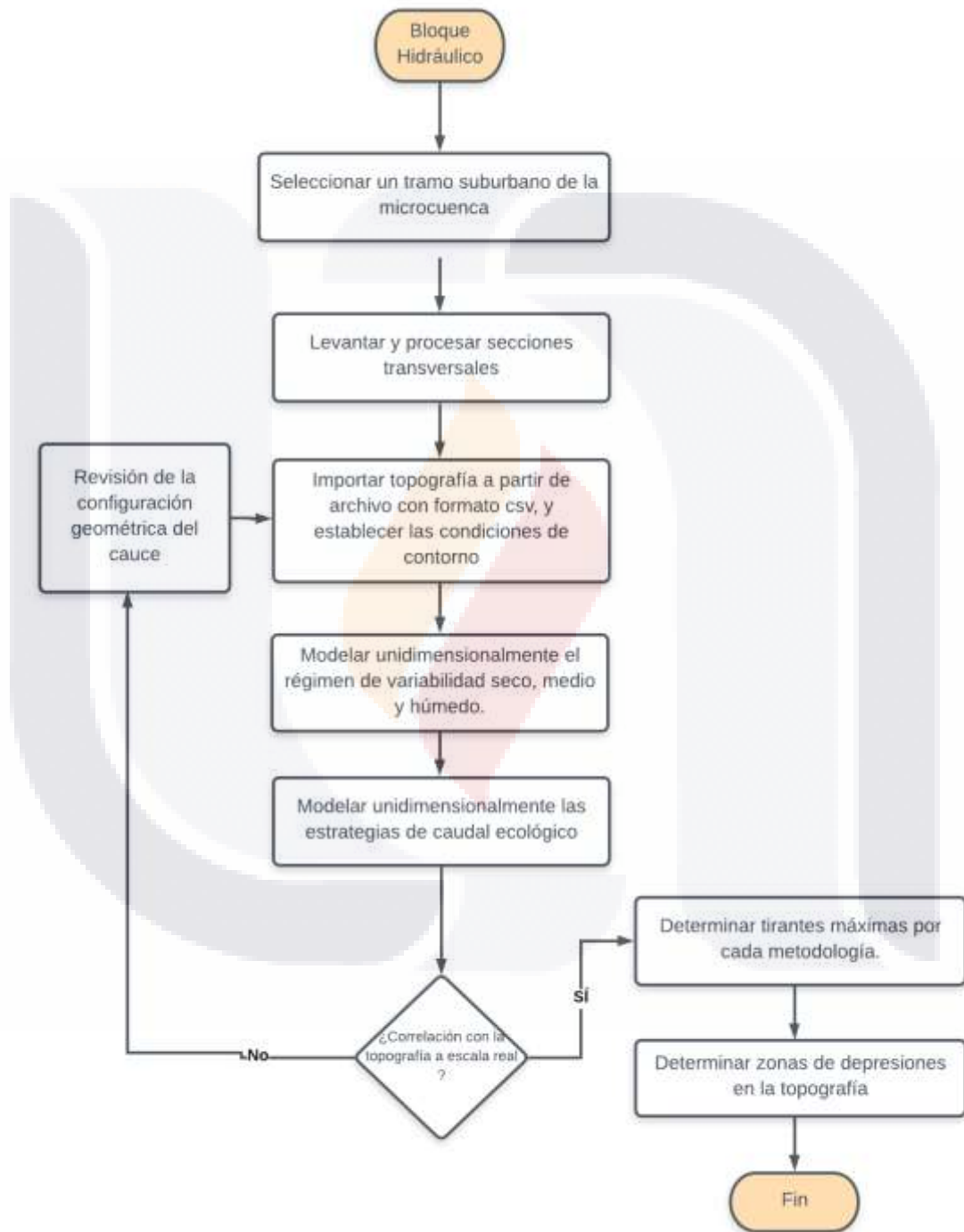


Figura 10. Diagrama de flujo descriptivo del bloque hidráulico
Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart

4.4 Caracterización ambiental

Para la caracterización ambiental (figura 11), se relacionará el régimen de caudal ecológico con las condiciones de vegetación y urbanización realizando lo siguiente:

1. Ubicar zonas de importancia ecológica en el estado, ya sean áreas naturales protegidas, o zonas RAMSAR.
2. Se evaluará en cada cuenca analizada su cobertura de suelo.
3. Se realizará una tipificación de la flora y fauna en cada tramo suburbano, apoyado de un biólogo.
4. Se realizará un análisis de estado de caudal (salud hídrica) con el programa FlowHealth, para determinar un régimen óptimo de variabilidad del cauce.
5. Utilizando imágenes satelitales LANSAT-8, se evaluará el índice de vegetación del tramo suburbano, a partir de la calculadora ráster del programa QGIS, para evaluar la calidad y desarrollo de flora.
6. Se determinará la lluvia efectiva por el método de Prescott y Anderson, para evaluar el umbral de caudal ecológico propuesto.

Con la finalización de este bloque, se determinará con base en los caudales ecológicos obtenidos y modelaciones a diferentes escenarios; si la metodología que se propone es de relevancia, y el régimen de variabilidad de caudal es suficiente para la prevalencia de ecosistemas aledaños a cauces naturales de tipo intermitente.

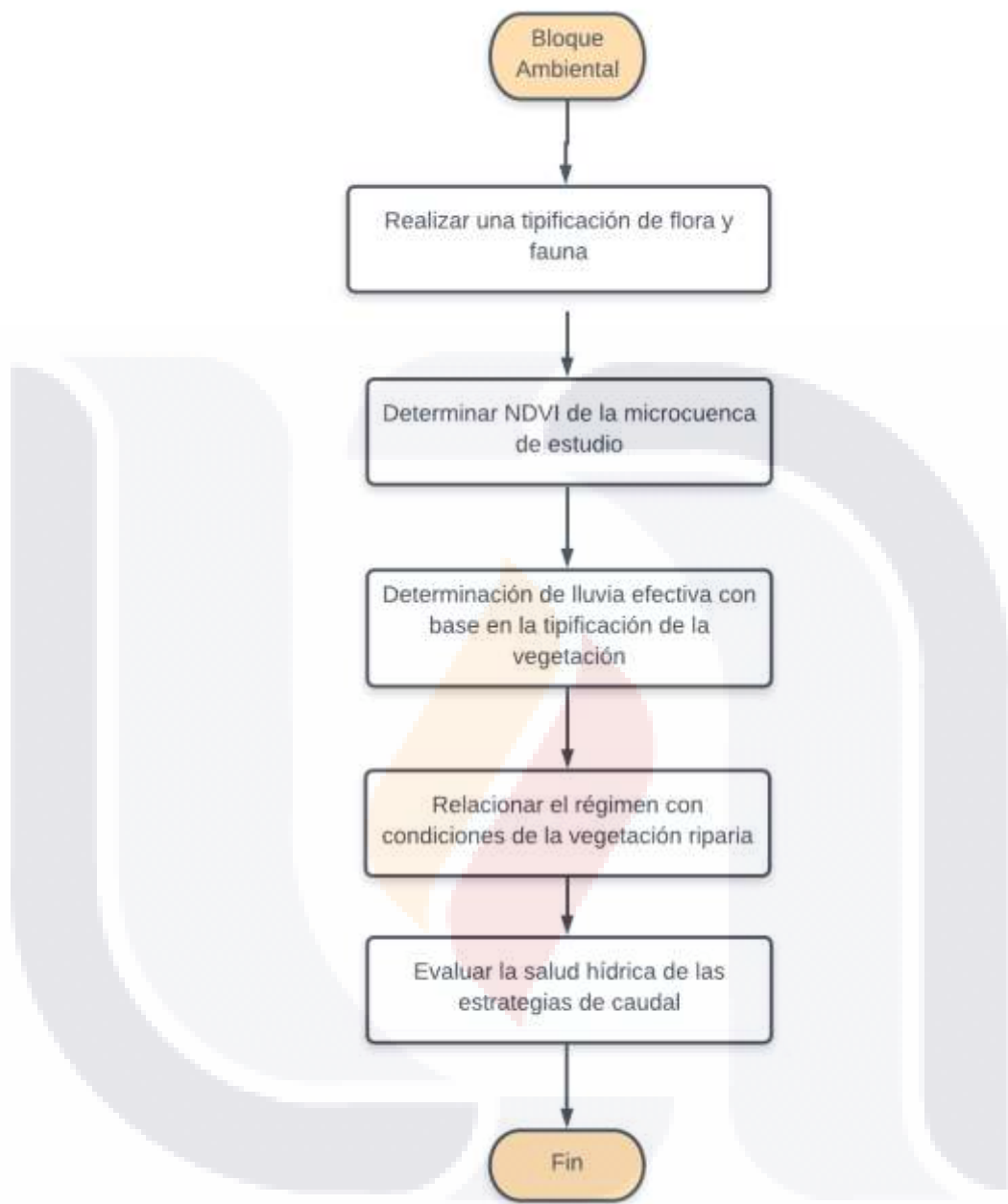


Figura 11. Diagrama de flujo descriptivo del bloque ambiental
Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidchart



CAPÍTULO V

RESULTADOS

CAPÍTULO V: RESULTADOS

En este capítulo, se muestran los resultados por bloque y al final se integra un mapa mental de cómo se interrelacionan entre sí, mostrando las variables más relevantes para corrientes intermitentes.

5.1 Bloque espacial

Los resultados obtenidos del bloque espacial, producto del desarrollo de la metodología mencionada en el capítulo anterior, se desglosan a continuación:

5.1.1 Delimitación de la zona de estudio

La zona de estudio se ubica al poniente de la ciudad de Aguascalientes, es una microcuenca hidrológica con un área de 17.05 km², un perímetro de 23.07 km, una longitud del cauce principal de 11.65 km, con una pendiente de 2%.

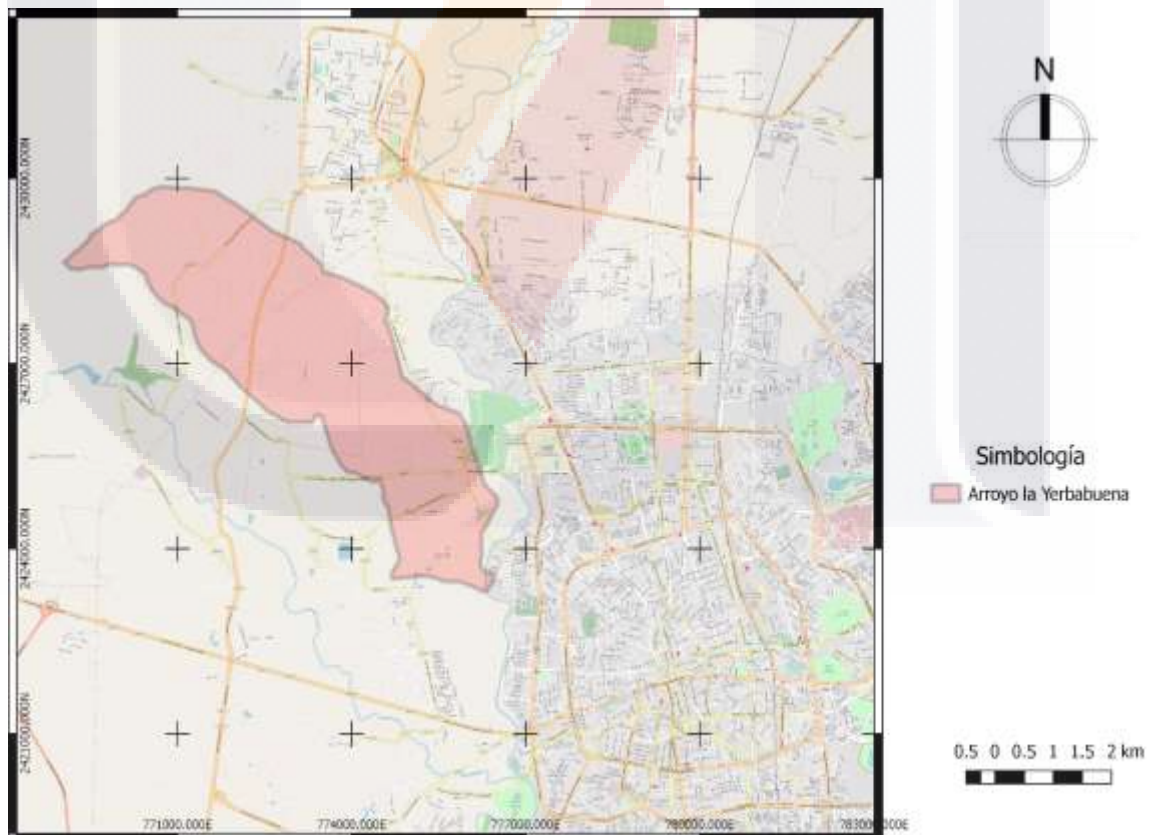


Figura 12. Macro-localización de la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

5.1.2 Objetivo ambiental

Para determinar el objetivo ambiental, de acuerdo con la norma NOM-159, se ubicaron las principales regiones hidrológicas y sus derivaciones que pertenecen al estado de Aguascalientes, que parcialmente pertenece a la región hidrológica Lerma-Santiago (figura 13).

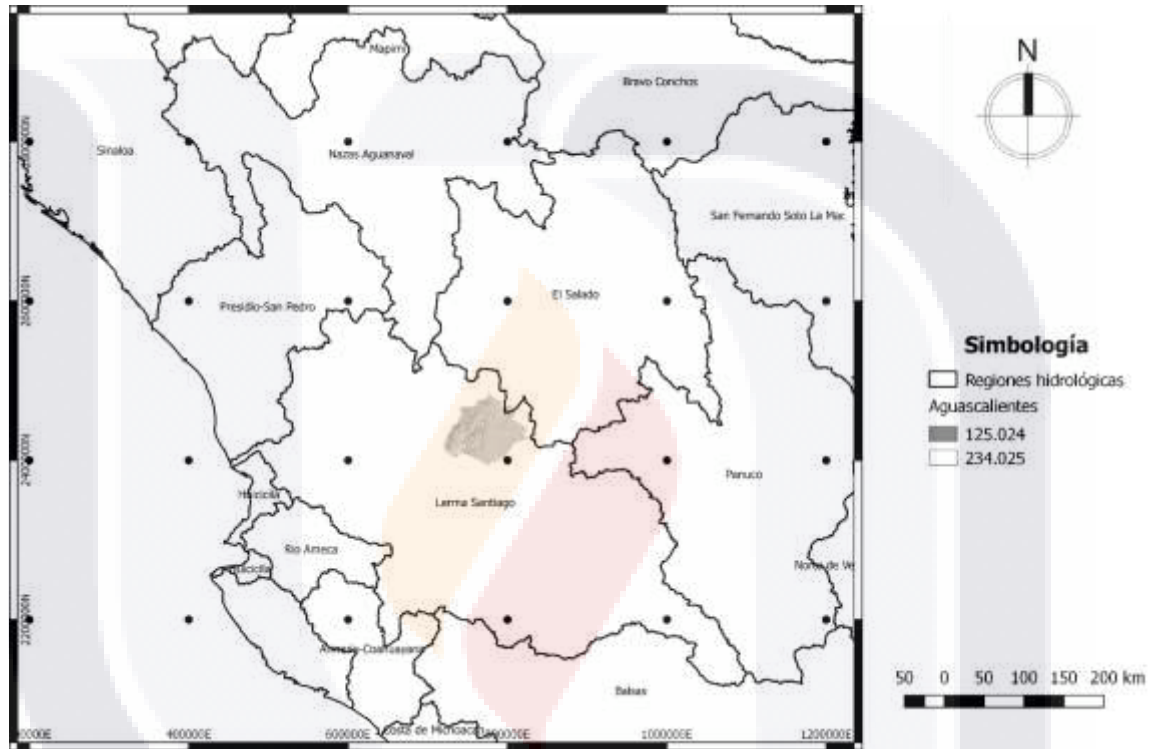


Figura 13. Región hidrológica Lerma-Santiago
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

En Aguascalientes, existen diferentes cuencas hidrográficas, las cuales, mediante el procesamiento de capas vectoriales, se obtiene la microcuenca hidrológica de tipo intermitente a la cual pertenece la zona de estudio, para identificar su objetivo ambiental.

La microcuenca del arroyo “La Yerbabuena” pertenece a la subcuenca hidrológica del río Aguascalientes, como se muestra en la figura 14.

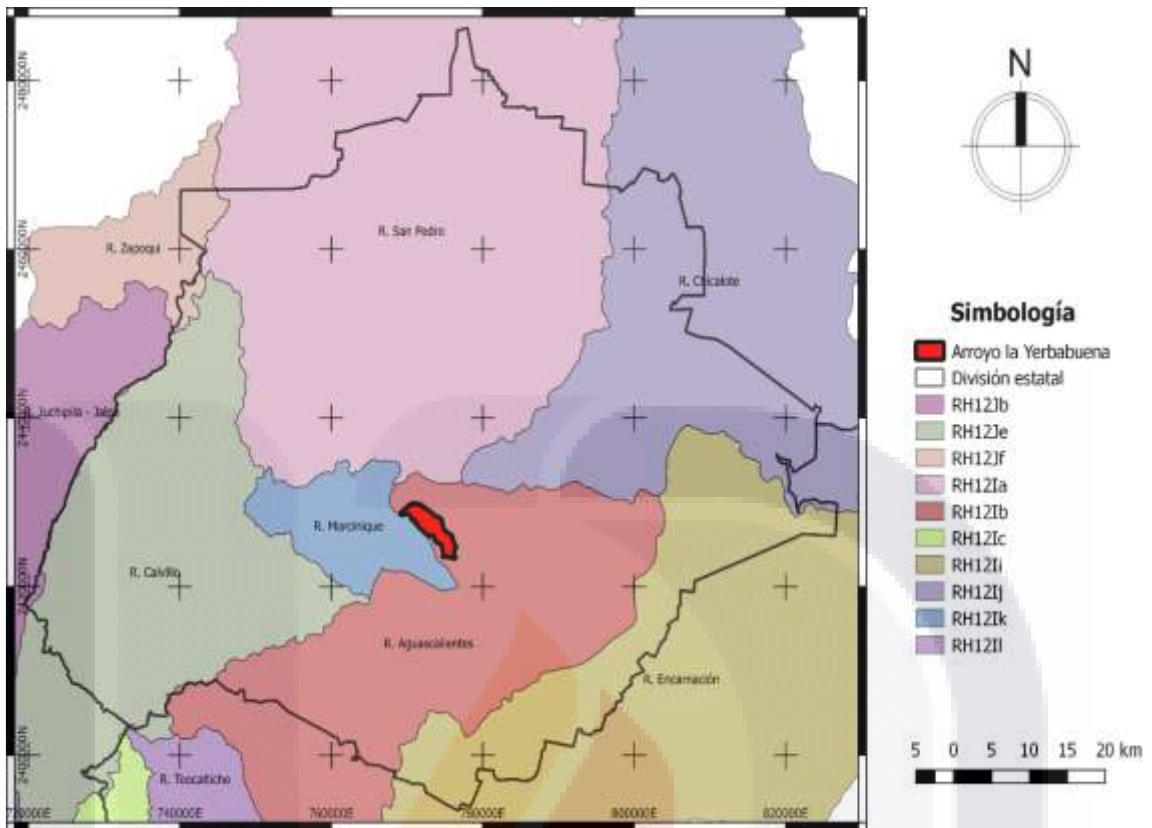


Figura 14. Cuencas hidrológicas del estado de Aguascalientes
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

De acuerdo con la figura 14, la microcuenca elegida para determinar el régimen de variabilidad de caudal ecológico pertenece a la cuenca hidrológica del río Aguascalientes. En el apéndice A de la NMX-159, se presenta una lista de objetivos ambientales para cuencas hidrológicas de México, se obtuvo un objetivo ambiental D, con presión de uso alta, importancia ecológica baja y estado de conservación de calidad deficiente (tabla 3).

Tabla 3. Objetivo ambiental de la zona de estudio

Clave de la región hidrológica	Nombre de la región hidrológica	Nombre de la cuenca con estudio de disponibilidad	Importancia Ecológica	Presión de uso	Estado de conservación deseado	Objetivo ambiental
12	Lerma-Santiago	Río Aguascalientes	Baja	Alta	Deficiente	D

Fuente: (Economía, 2012)

5.1.3 Ubicación de zonas de importancia ambiental

A pesar de que la zona de estudio presenta un objetivo ambiental D, como la metodología a implementar es de tipo holística, como punto de partida, es importante analizar si el tramo de estudio presenta condiciones de conflictividad que requieran una evaluación del objetivo ambiental más detallada.

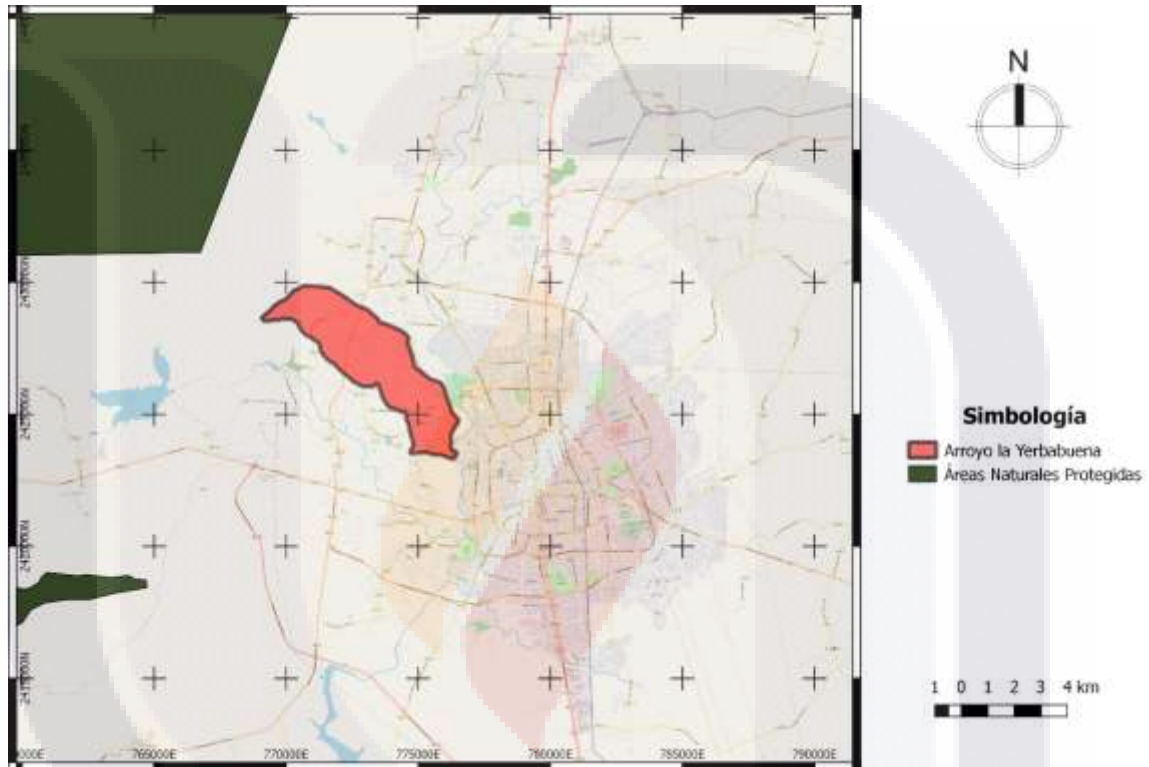


Figura 15. Zonificación de Áreas Naturales Protegidas
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

En la zonificación de áreas naturales protegidas (figura 15), se obtuvo que la microcuenca del arroyo “La Yerbabuena” no presenta área de incidencia y no involucra un análisis ambiental con mayor detalle, que involucrara otros nichos de investigación. Las capas vectoriales que se utilizaron fueron obtenidas del portal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, de las cuales en el estado de Aguascalientes pertenecen al bosque de la Sierra Fría y la zona RAMSAR ubicada al sur de la entidad.

5.1.4 Parámetros geomorfológicos

Los parámetros geomorfológicos que se calcularon son los que se muestran en la tabla 4, fueron obtenidos a través del procesamiento de capas vectoriales y ráster de datos de la red hídrica con QGIS y GRASS (figura 16):

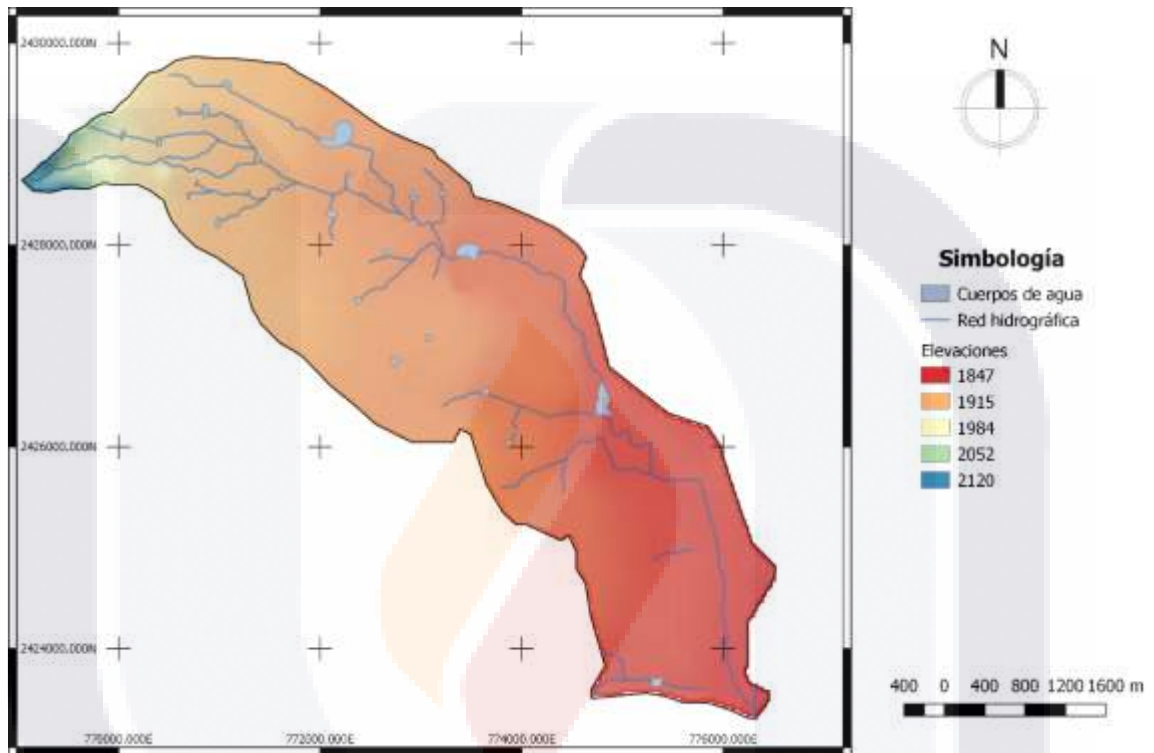


Figura 16. Red hidrográfica
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS y GRASS

Tabla 4. Datos generales de la microcuenca hidrográfica

Parámetro	Unidad
Área (m ²)	17,049,507.18
Perímetro (m)	23,078.35
Longitud del Cauce Principal (m)	11,647.63
Elevación Mínima (msnm)	1,850.00
Elevación del Punto Más Alto (msnm)	2,101.21
Relación - Pendiente del Cauce Principal	0.02

Con los parámetros obtenidos, se determinó el tipo, forma y edad de la cuenca, con la curva hipsométrica, con el fin de conocer las condiciones topográficas de la microcuenca que se muestra en la siguiente figura.

Curva Hipsométrica

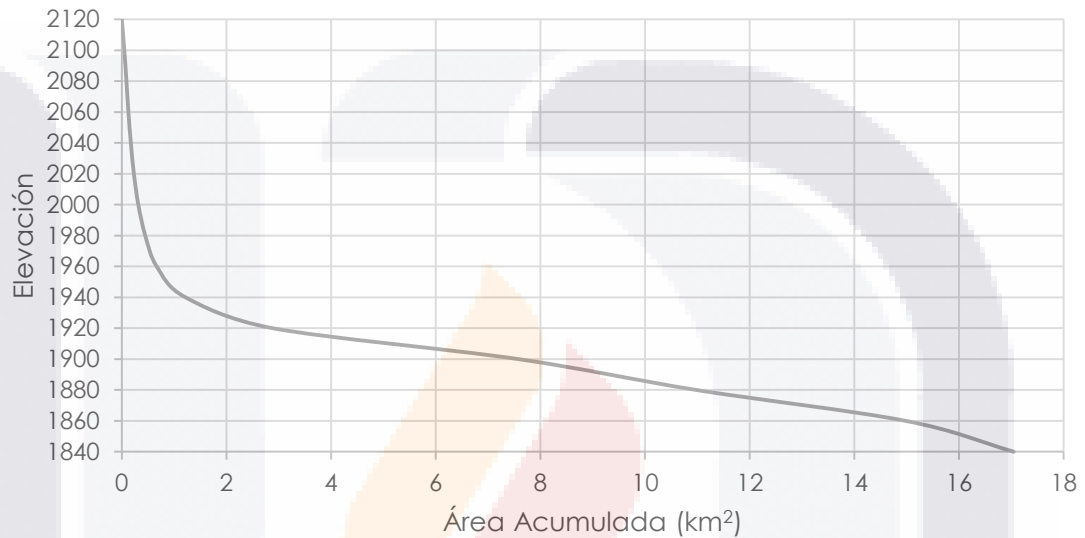


Figura 17. Curva Hipsométrica
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel

Se obtuvo mediante el análisis de parámetros de forma, que la microcuenca de estudio es de tipo alargada y con relieve suave de una pendiente no tan pronunciada. Por otra parte, del análisis de la curva hipsométrica, según su forma, la cuenca es de tipo erosionada o de valle.

Para obtener el número de la curva de escurrimiento, se generó un análisis espacial considerando 5 áreas de escurrimiento en la microcuenca, las cuales son: zonas montañosas, agropecuarias y ganaderas, campestres, rurales, asentamientos humanos y zonas residenciales; a cada una se le asignó un N tomando como base de datos las tablas de Campos Aranda (2010).

Los resultados obtenidos en base al análisis espacial son los siguientes:

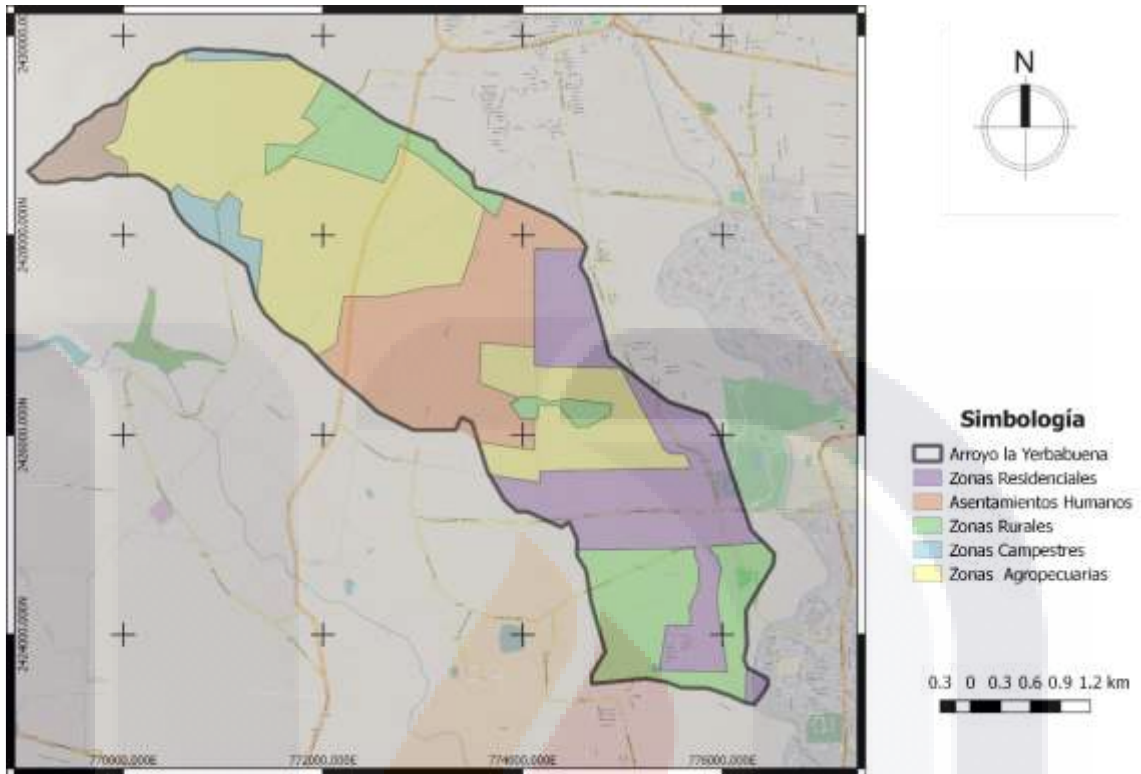


Figura 18. Zonas de escurrimiento
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

Tabla 5. Determinación del Número de la curva de escurrimiento

Tipo de Área	Color	N	Área (m ²)	A _n /A _t	N*(A _n /A _t)
Zonas Montañosas	Café	100	449,500.24	0.03	2.64
Zonas Agropecuarias y Ganaderas	Amarillo	72.00	6,843,940.98	0.40	28.90
Zonas Campestres	Azul	54.00	461,369.93	0.03	1.46
Zonas Rurales	Verde	46.00	2,884,240.13	0.17	7.78
Asentamientos Humanos	Naranja	77.00	3,055,561.56	0.18	13.80
Zonas Residenciales	Morado	77.00	3,354,894.34	0.20	15.15
Totales			17,049,507.18	1.00	70

Se obtuvo un 40% de zonas destinadas al cultivo y ganadería, y aproximadamente 60% para asentamientos humanos, resultando un coeficiente ponderado de 0.34 y un número de curva de escurrimiento N de 70 (tabla 5).

5.2 Bloque hidrológico

En este bloque, se procesaron los parámetros geomorfológicos obtenidos en la etapa de análisis espacial para obtener las series sintéticas de gastos mensuales y diarios. Los resultados se muestran en los siguientes apartados.

5.2.1 Series sintéticas de gastos

Mediante el método de los polígonos de Thiessen, a partir de QGIS (figura 15), se procesaron las áreas de influencia de las estaciones climatológicas del estado, para obtener la precipitación ponderada como se observa en la tabla 6 .

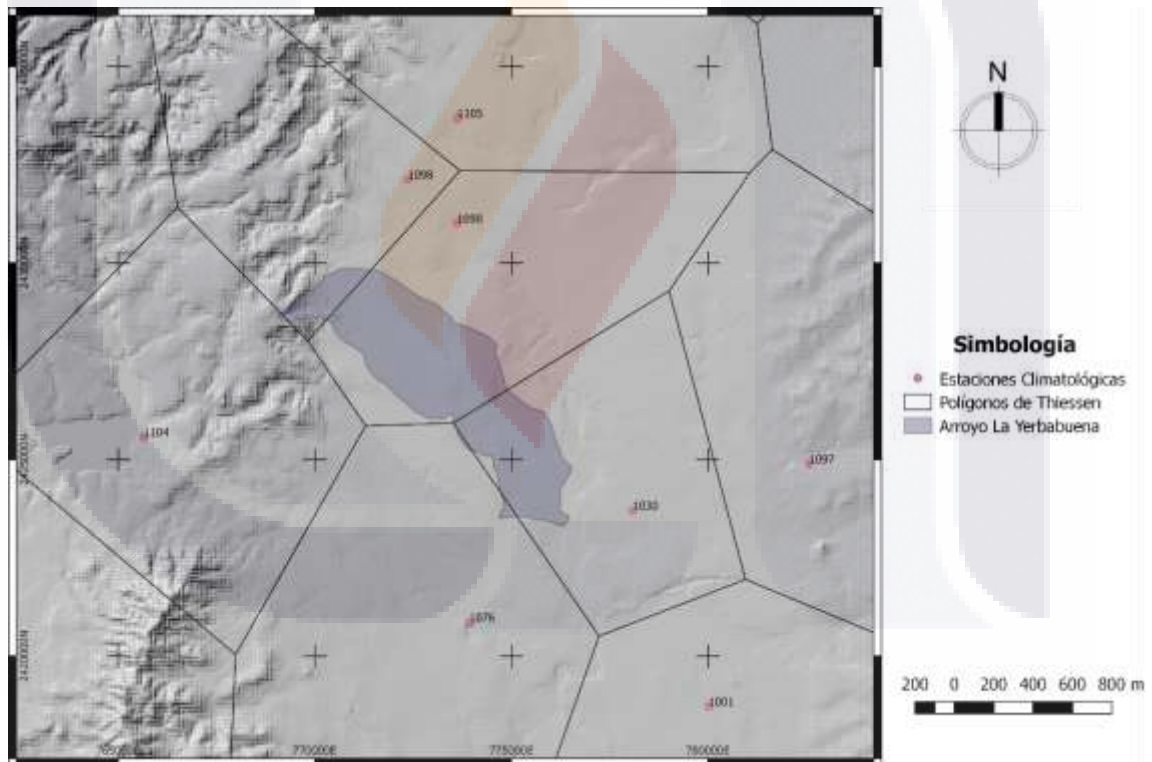


Figura 19. Polígonos de Thiessen
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

Se analizaron las áreas de influencia obtenidas del análisis espacial de los polígonos de Thiessen, utilizando una precipitación promedio de los últimos años, como se observa a continuación:

Tabla 6. Precipitación ponderada de microcuenca de estudio

Año	Jesús María (Est. 1090)	La Posta (Est. 1098)	Aguascalientes (1030)	Abelardo L. Rodríguez (Est. 1104)	Los Negritos (Est. 1076)
2002	57.00	54.20	42.60	44.00	Máx
2003	90.00	31.50	49.60	57.10	43.00
2004	63.00	57.00	62.60	65.90	53.00
2005	65.00	40.10	61.00	49.20	45.00
2006	53.00	46.00	37.20	34.20	41.40
2007	45.10	56.80	103.30	61.50	40.10
2008	40.00	30.00	41.90	38.10	63.00
2009	34.00	30.00	75.00	85.30	54.20
2010	53.00	67.00	40.00	46.30	96.00
2011	19.00	16.50	40.20	62.50	46.00
2012	36.00	42.30	51.00	38.50	56.80
P Media Mensual (mm)	50.46	42.85	54.95	52.96	52.50
Área (km ²)	9.75	1.74	5.09	0.02	0.45
%Thiessen	57.18	10.21	29.85	0.12	2.64
P Media Mensual (mm)	51.08				

Debido a que la estación "Jesús María" (1090) cuenta con mayor cantidad de área de influencia, se utilizará para el análisis de precipitaciones para el cálculo de la serie sintética de gastos. Para procesar las precipitaciones se completó la serie de datos de años faltantes utilizando el método racional deductivo, que se aplica cuando las estaciones auxiliares no cuentan con la totalidad de datos mensuales requeridos. Este método funciona mediante el uso de porcentajes de precipitación mensual, cuya base consiste en suponer que los meses con precipitación desconocida tendrá un porcentaje igual al porcentaje promedio (Campos Aranda, 2010; Martínez Martínez, 2011).

Con la serie de precipitaciones, utilizando la fórmula del número de escurrimiento N, y determinando la precipitación en exceso mensual, se obtuvo la serie de gastos mensuales usando un N de 70 (tabla 7). Con la precipitación en exceso y usando un coeficiente de escurrimiento de 0.34 a condiciones proyectadas a futuro se determinó un gasto mensual por a partir del año 1979 hasta 2013, que son los años completos con los que se cuenta información, cuyos resultados se muestran en el **anexo 3** de la presente investigación.

Tabla 7. Parámetros de la fórmula de gasto medio anual

Número de escurrimiento N	70.000
Área drenada(km²)	16.120
Pendiente media de la cuenca Sc (m/m)	0.020
Coefficiente de escurrimiento C (adimensional)	0.340

5.2.2 Régimen variable natural (años medio, seco y húmedo)

De acuerdo con lo que se indica en la norma, una vez teniendo los gastos mensuales históricos se procedió a determinar los años secos, medios y húmedos con las siguientes consideraciones, tomando respectivamente el valor mínimo, promedio y máximo de los caudales medio mensuales.

Y bajo esta metodología se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 8. Determinación de año hidrológico

Año \ Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Seco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Húmedo	0.26	0.44	0.29	0.31	0.31	1.50	1.67	0.97	2.65	0.32	0.33	0.34
Medio	0.06	0.09	0.06	0.07	0.08	0.19	0.25	0.14	0.17	0.08	0.10	0.06

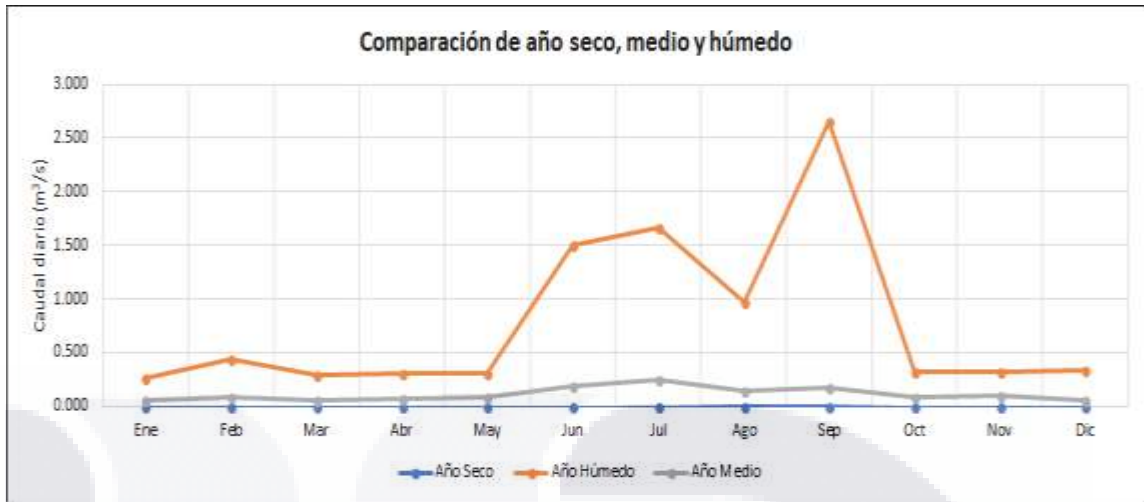


Figura 20. Hidrograma mensual de tendencia para cada año hidrológico
 Fuente: Elaboración propia a partir de excel

5.2.3 Propuesta de caudal ecológico-IHA

Con la metodología IHA, la serie diaria de caudales se procesó en el programa IHA 7. 1, para un análisis paramétrico de dos periodos. El análisis IHA se realizó de manera paramétrica usando media y desviación estándar, como lo recomienda el manual, para análisis de frecuencia de inundaciones o promedio de caudales mensuales, es preferible elegir este análisis.

Se seleccionó la opción de dos periodos, porque desde la década de los 90's ocurrió un cambio notable en la topografía del arroyo "La Yerbabuena". Los resultados obtenidos se dividen en 7 apartados, que son descritos a continuación.

Es importante destacar, con base en los objetivos de este trabajo, para establecer el régimen de variabilidad natural y la estrategia de caudal ecológico, se utilizaron los parámetros de grupo 1 y 2; ya que son los umbrales de variabilidad que se presentan en el arroyo para condiciones medias o condiciones extremas con periodos de sequía muy prolongados.

Por otra parte, se muestran las tablas de los parámetros de los grupos 3 y 4, además de los parámetros EFC, para conocer las posibles alteraciones hidrológicas encontradas a partir de la fecha de impacto de 1992; y además encontrar los caudales con mayor frecuencia y duración en una corriente intermitente.

Variación intranual

El primer gráfico que se obtuvo fue la variación interanual, que se entiende como el comportamiento histórico del río, con el fin de analizar las variaciones de periodos de avenida y estiaje (figura 21).

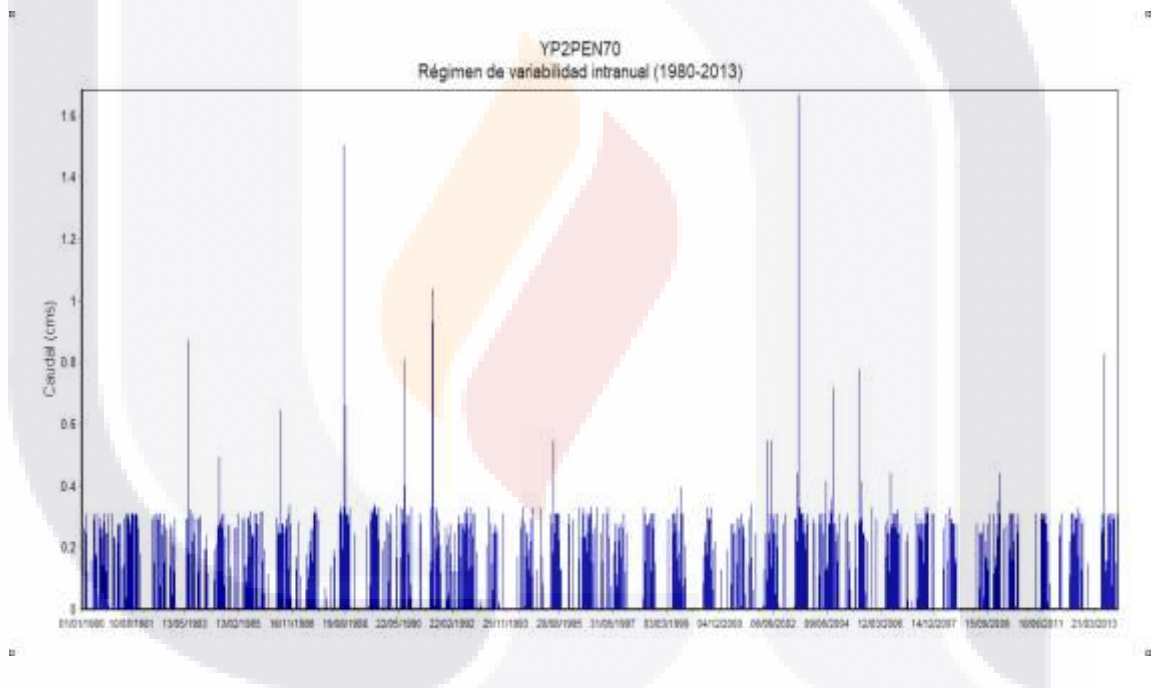


Figura 21. Régimen de variabilidad interanual
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Variación mensual

Después del análisis de variabilidad intranual, se obtuvo un gráfico que muestra la variación de época de lluvias a lo largo del año a escala mensual, a partir del cálculo de valores medios de caudal, con periodos de lluvias que comienzan desde junio hasta septiembre, como se observa a continuación:

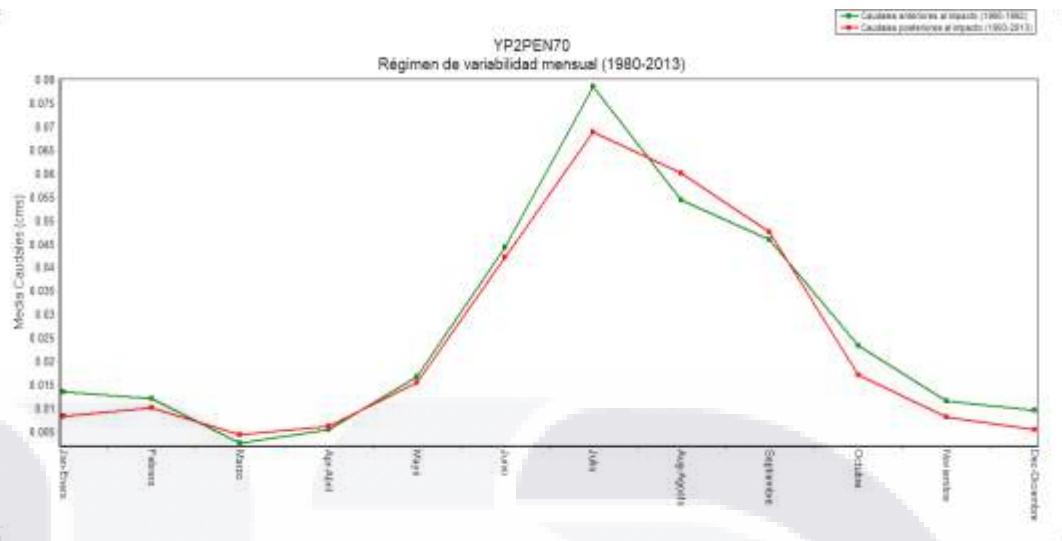


Figura 22. Régimen de variabilidad mensual
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Después, se obtuvo el umbral de caudal ecológico con el régimen de variación mensual, el cual considera valores máximos y mínimos que no excedan los límites de +1 o -1 del valor de desviación estándar, como se muestra en la figura 23.

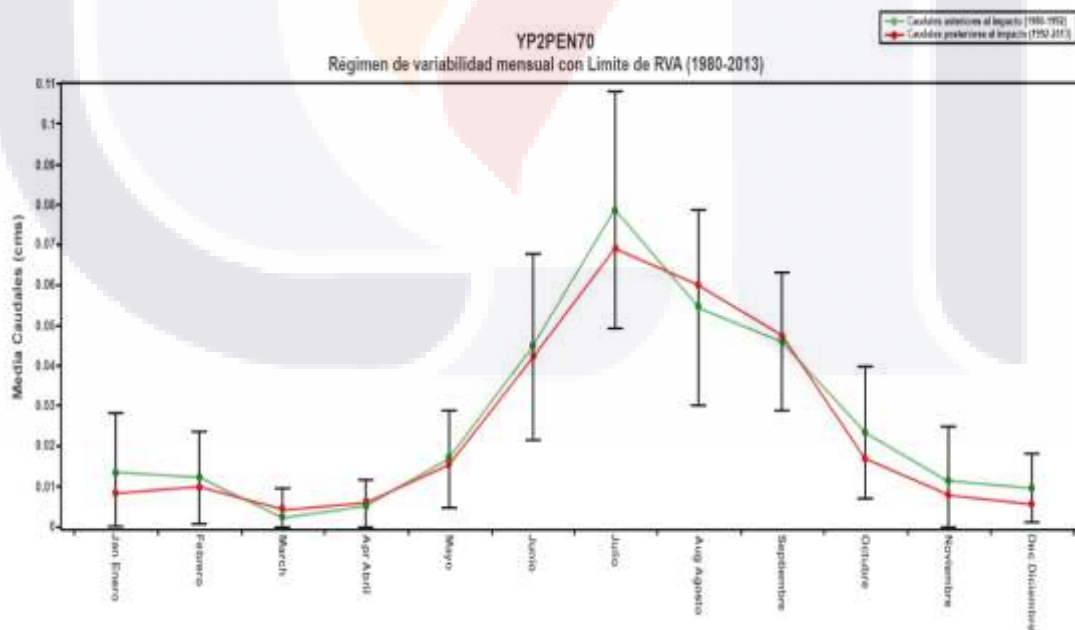


Figura 23. Régimen de variabilidad mensual con limite RVA
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Se obtuvo un umbral de caudal ecológico con valores mínimos para época de estiaje de 0.010 m³/s y de 0.108 m³/s para temporada de avenidas, usando como fecha de impacto el año 1992, año en el que comenzaron a desarrollarse asentamientos humanos en la zona. Para establecer con mayor precisión el valor mensual de caudal ecológico, se desarrolló el hidrograma de variabilidad por cada mes, como se muestra en la siguiente figura, para el mes de julio se presenta un cambio significativo en los límites de variabilidad, observando una disminución de caudal.

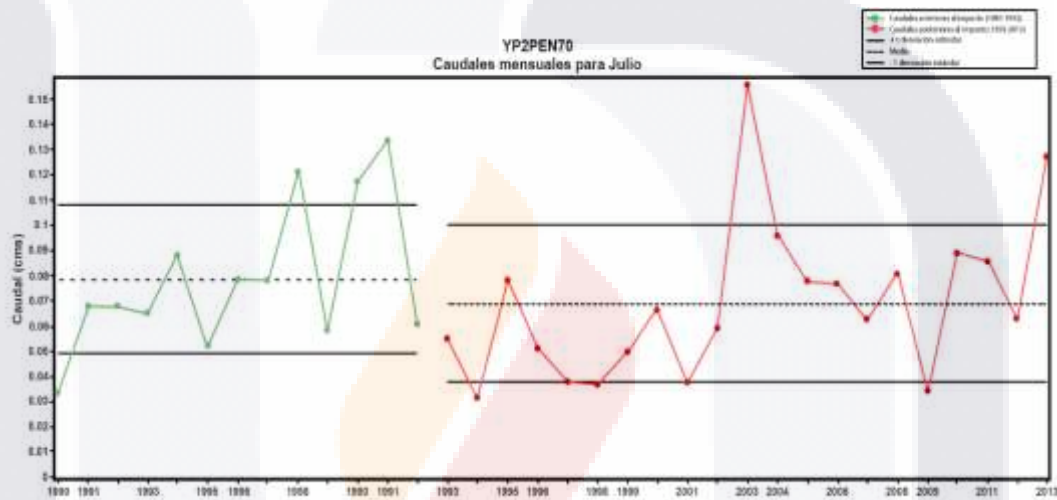


Figura 24. Régimen de variabilidad para el mes de julio con limite RVA
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

En esta parte se muestra el valor de la media para cada mes calendario, que forman parte del grupo 1 de los parámetros IHA. Con este análisis de parámetros, se pudo realizar la propuesta de caudal ecológico, tomando después de algunas iteraciones, los límites altos de RVA, con caudales que oscilan con valores mínimos a partir de 0.018 m³/s a 0.108 m³/s. En la tabla 9, se muestran en la columna AH (Alteración hidrológica) los valores de alteración hidrológica obtenidos considerando los cambios en los regímenes de variabilidad pre impacto y post-impacto, considerando que el impacto de acuerdo con el criterio de asentamientos humanos comenzó en el año 1992.

El grado de alteración de la cuenca fue positivo para los meses de enero, abril, junio, octubre y noviembre, indicando que la frecuencia de valores de caudal que oscilan entre el umbral de +/- una desviación estándar de la media, ha aumentado entre el periodo anterior a 1992 y el posterior al mismo.

Por otra parte, en las columnas de Cv; se muestra el coeficiente de variación para épocas pre y post impacto; cuyos valores más altos corresponden al aumento o disminución de caudales, como se muestra para los meses de marzo, abril, noviembre y diciembre.

Tabla 9. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales análisis RVA

Pre-impacto periodo: 1980-1992					Post-impacto periodo: 1993-2013				Límites de RVA		AH
Mes \ Parámetro	Media	Cv	Mín.	Máx.	Media	Cv	Mín.	Máx.	Bajo	Alto	(media)
Enero	0.014	1.062	0.000	0.044	0.008	1.338	0.000	0.033	0.000	0.028	0.069
Febrero	0.012	0.949	0.000	0.036	0.010	1.623	0.000	0.054	0.001	0.024	-0.558
Marzo	0.003	2.712	0.000	0.026	0.004	2.841	0.000	0.056	0.000	0.010	-0.071
Abril	0.005	1.116	0.000	0.017	0.006	1.955	0.000	0.053	0.000	0.012	0.013
Mayo	0.017	0.726	0.000	0.039	0.015	0.872	0.000	0.046	0.005	0.029	-0.226
Junio	0.044	0.521	0.010	0.086	0.042	0.304	0.023	0.062	0.021	0.068	0.625
Julio	0.079	0.374	0.033	0.133	0.069	0.452	0.031	0.156	0.049	0.108	-0.037
Agosto	0.054	0.445	0.014	0.101	0.060	0.402	0.019	0.098	0.030	0.079	-0.195
Septiembre	0.046	0.373	0.018	0.082	0.048	0.601	0.001	0.109	0.029	0.063	-0.443
Octubre	0.023	0.700	0.000	0.056	0.017	0.778	0.000	0.049	0.007	0.040	0.083
Noviembre	0.012	1.150	0.000	0.040	0.008	1.707	0.000	0.059	0.000	0.025	0.069
Diciembre	0.010	0.869	0.000	0.023	0.006	1.515	0.000	0.025	0.001	0.018	-0.646

Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Forman parte del grupo 2, de parámetros IHA, mínimos y máximos anuales de media de 1,3, 7, 30 y 90 días, además, la aplicación permitió determinar cantidades de días con caudal cero. Se obtuvo el periodo más largo de sequía, que fue de 320 días en la época de pre-impacto, mientras que en la de post impacto fue de 330.

Tabla 10. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas anuales

Año	1-día mín	3-días mín	7-días mín	30-día mín	90-día mín	1-día máx	3-días máx	7-días máx	30-día máx	90-día máx	días cero
1980	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.311	0.245	0.149	0.071	0.052	312.000
1981	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.311	0.257	0.146	0.080	0.066	312.000
1982	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.311	0.301	0.196	0.080	0.045	326.000
1983	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.874	0.330	0.224	0.103	0.056	320.000
1984	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.493	0.218	0.159	0.094	0.074	309.000
1985	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.317	0.293	0.166	0.085	0.061	306.000
1986	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.645	0.240	0.167	0.102	0.071	311.000
1987	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.238	0.144	0.085	0.062	319.000
1988	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	1.504	0.683	0.348	0.148	0.106	314.000
1989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.338	0.236	0.159	0.101	0.071	320.000
1990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.807	0.414	0.202	0.122	0.073	303.000
1991	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.040	0.416	0.261	0.139	0.081	305.000
1992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.328	0.264	0.151	0.081	0.063	293.000
1993	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.222	0.119	0.064	0.042	327.000
1994	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.214	0.151	0.074	0.048	320.000
1995	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.546	0.290	0.159	0.115	0.074	311.000
1996	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.334	0.328	0.141	0.106	0.070	314.000
1997	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.328	0.223	0.190	0.070	0.039	320.000
1998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.251	0.157	0.074	0.052	327.000
1999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.397	0.190	0.151	0.084	0.057	329.000
2000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.176	0.122	0.074	0.056	327.000
2001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.338	0.249	0.156	0.086	0.054	320.000
2002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.546	0.319	0.236	0.106	0.076	302.000
2003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.668	0.642	0.386	0.167	0.115	298.000
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.718	0.408	0.188	0.122	0.095	287.000
2005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.779	0.320	0.210	0.123	0.073	316.000
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.442	0.245	0.195	0.108	0.083	301.000
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.229	0.170	0.086	0.063	309.000
2008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.236	0.140	0.097	0.068	313.000
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.311	0.223	0.155	0.073	0.044	323.000
2010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.442	0.279	0.195	0.092	0.066	313.000
2011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.311	0.294	0.187	0.098	0.073	330.000
2012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.241	0.201	0.096	0.085	309.000
2013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.826	0.373	0.290	0.144	0.091	292.000

Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

En términos de magnitud y duración de los caudales, es importante tomar en cuenta estos valores, para identificar el valor máximo o mínimo que ha presentado el río, asociado con condiciones de estrés por reducción o aumento del caudal.

Por ello, como la corriente presenta más de 300 días con caudal cero, como se observa en las tablas 10 y 11, es conveniente sólo considerar los indicadores de IHA con flujo mínimo de 90 días para el régimen de variabilidad.

Tabla 11. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Pre-impacto periodo					Post-impacto periodo				Límites de RVA		AH
Parámetro	Media	Cv	Mín.	Máx.	Media	Cv	Mín.	Máx.	Bajo	Alto	(media)
1-día mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3-días mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7-días mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-días mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90-días mínimo	0.003	1.294	0.000	0.009	0.002	2.082	0.000	0.012	0.000	0.006	0.176
1-día máximo	0.585	0.641	0.311	1.504	0.490	0.642	0.311	1.668	0.314	0.960	0.393
3-días máximo	0.318	0.400	0.218	0.683	0.283	0.356	0.176	0.642	0.239	0.445	-0.175
7-días máximo	0.190	0.310	0.144	0.348	0.186	0.326	0.119	0.386	0.150	0.249	0.161
30-días máximo	0.099	0.238	0.071	0.148	0.098	0.264	0.064	0.167	0.076	0.123	-0.257
90-días máximo	0.068	0.223	0.045	0.106	0.068	0.284	0.039	0.115	0.053	0.083	-0.319
# días caudal cero	311.500	0.028	293.000	326.000	313.700	0.039	287.000	330.000	302.800	320.300	-0.437
Caudal base	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Se obtuvo la fecha juliana de cada máximo y mínimo anual de un día para cada año de la serie sintética de gastos, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 12. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Pre-impacto periodo: 1980-1992					Post-impacto periodo: 1993-2013				Límites de RVA		AH
Parámetro	Medias	Cv	Mínimo	Máximo	Medias	Cv	Mínimo	Máximo	Bajo	Alto	(media)
Fecha de caudal mín.	1.000	0.000	1.000	1.000	1.095	0.001	1.000	3.000	1.000	1.000	-0.048
Fecha de caudal máx.	182.200	0.163	2.000	242.000	193.100	0.191	33.000	356.000	122.500	242.000	-0.325

Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Curva de permanencia de caudales

Se obtuvo la curva de permanencia de caudal, que permite analizar la duración de caudales para cada periodo y analizar su probabilidad de excedencia como se muestra en la figura 25 con escala horizontal exagerada.

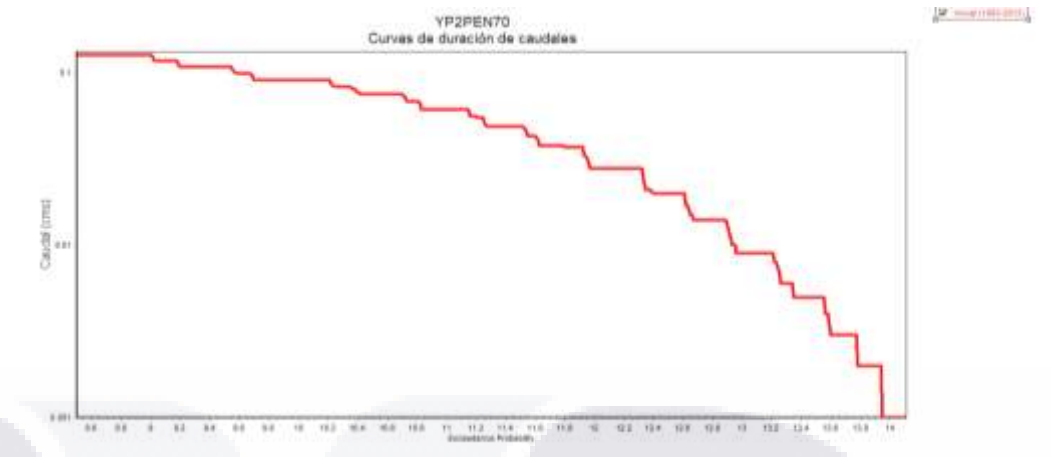


Figura 25. Curva de duración de caudales
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

Componentes de caudal ecológico

Como se mostró en el marco teórico, se obtuvieron los componentes de caudal ecológico para el arroyo “La Yerbabuena”, donde predominan los caudales extremadamente bajos con una frecuencia aproximadamente del 86%, que funcionan como caudal base la mayoría del año hidrológico en una corriente intermitente.

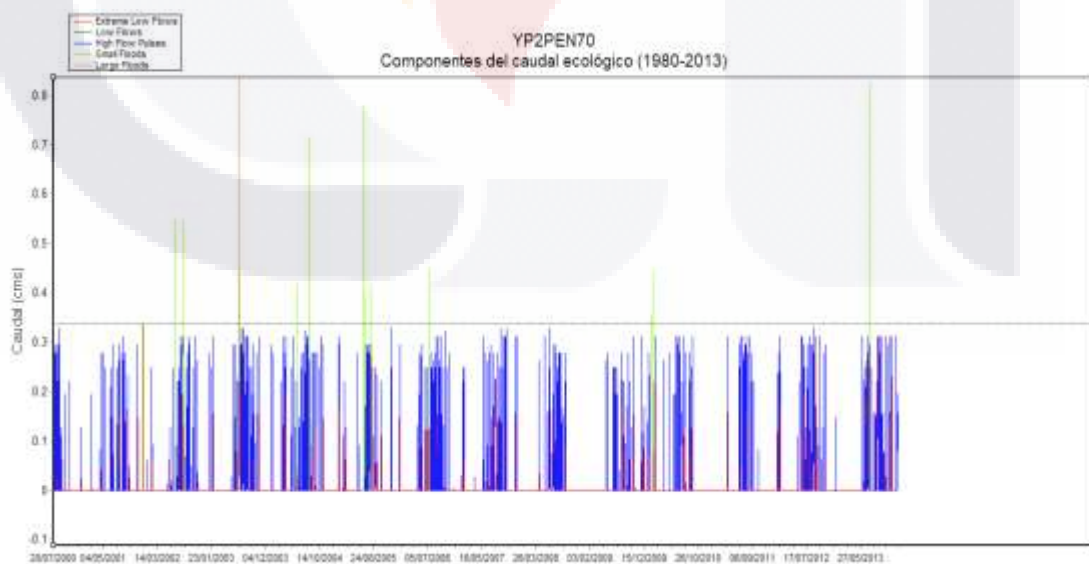


Figura 26. Componentes de caudal ecológico
Fuente: Elaboración propia a partir de IHA 7.1

5.2.4 Propuesta de caudal ecológico-Tennant Modificado

Para la determinación de periodos de estiaje y avenida dentro de años secos, medios y húmedos, todos los valores de caudales medios mensuales (Qmi) que se encuentren por encima del valor del Ecurrimiento Medio Anual (EMA) que es de 0.112 m³/s, se considera periodo de avenida como se muestra en la tabla 13. Entonces se obtuvieron los siguientes periodos:

Tabla 13. Determinación de periodos de estiaje y avenida

EMA	Mes	Qmi (m ³ /seg)	Cmi Año Seco (m ³ /seg)	Periodo	Cmi Año Medio (m ³ /seg)	Periodo	Cmi Año Húmedo (m ³ /seg)	Periodo
0.112	Enero	0.059	0.000	Estiaje	0.059	Estiaje	0.263	Avenida
0.112	Febrero	0.089	0.000	Estiaje	0.089	Estiaje	0.442	Avenida
0.112	Marzo	0.061	0.000	Estiaje	0.061	Estiaje	0.294	Avenida
0.112	Abril	0.066	0.000	Estiaje	0.066	Estiaje	0.311	Avenida
0.112	Mayo	0.083	0.000	Estiaje	0.083	Estiaje	0.311	Avenida
0.112	Junio	0.192	0.000	Estiaje	0.192	Avenida	1.504	Avenida
0.112	Julio	0.252	0.000	Estiaje	0.252	Avenida	1.668	Avenida
0.112	Agosto	0.138	0.001	Estiaje	0.138	Avenida	0.966	Avenida
0.112	Septiembre	0.166	0.000	Estiaje	0.166	Avenida	2.648	Avenida
0.112	Octubre	0.078	0.000	Estiaje	0.078	Estiaje	0.323	Avenida
0.112	Noviembre	0.100	0.000	Estiaje	0.100	Estiaje	0.328	Avenida
0.112	Diciembre	0.059	0.000	Estiaje	0.059	Estiaje	0.335	Avenida

El régimen de caudal ecológico mensual se determina a partir del año medio de lluvia con los porcentajes propuestos para la determinación de régimen de caudal ecológico mensual % Cmi de cada periodo dentro del año, conforme a la tabla 14 para el objetivo ambiental seleccionado. Para el régimen de caudal ecológico anual, Q mi es determinado a partir de la selección de un año tipo (seco, medio o húmedo), cabe señalar que para ambos periodos (estiaje y lluvias) el valor del caudal ecológico nunca debe ser mayor al caudal medio mensual (Cmi) ni menor al caudal base (Q base).

Tabla 14. Recomendaciones de porcentajes de caudales ecológicos

Objetivo Ambiental	Periodo			
	Estiaje		Avenida	
	%EMA	%Qmi	%EMA	%Qmi
A	30	100	60	50
B	20	80	40	40
C	10	60	30	30
D	5	40	10	20

Partiendo de las consideraciones anteriores, se determinará el régimen de variabilidad de caudal ecológico para un año medio de precipitación, conforme lo indica la NMX-159, que se utilizará para época de estiaje 5% de EMA y 40% de Qmi, y para épocas de avenida se aplicará un 10% y 20% de Qmi. Obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Y para determinar el valor de caudal ecológico, se consideró la ponderación de Tennant con base a la tabla 2, la cual considera diferentes porcentajes dependiendo, el estado ecológico de la cuenca, para lo cual por ser de objetivo ambiental D, el estado ecológico que se busca es mínimo, por ser corriente de tipo intermitente.

El porcentaje de caudal medio mensual que se utilizará es de 40% para estiaje y 20% avenidas, teniendo en cuenta que, si el caudal resultará menor, se utilizará el caudal base, y que en tiempo de avenidas no debe rebasar el Cmi histórico medio que ahora se expresa como Qmi. Por lo que se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 15. Estrategia de caudal ecológico por el método Tennant Modificado

Mes	EMA	Qmi	Periodo	%EMA	%Qmi	EMA Estiaje	EMA Avenida	Qmi Estiaje	Qmi Avenida	Qe
Enero	0.112	0.059	Estiaje	5	40	0.006		0.024		0.006
Febrero	0.112	0.089	Estiaje	5	40	0.006		0.036		0.006
Marzo	0.112	0.061	Estiaje	5	40	0.006		0.024		0.006
Abril	0.112	0.066	Estiaje	5	40	0.006		0.026		0.006
Mayo	0.112	0.083	Estiaje	5	40	0.006		0.033		0.006
Junio	0.112	0.192	Avenida	10	20		0.011		0.038	0.038
Julio	0.112	0.252	Avenida	10	20		0.011		0.050	0.050
Agosto	0.112	0.138	Avenida	10	20		0.011		0.028	0.028
Septiembre	0.112	0.166	Avenida	10	20		0.011		0.033	0.033
Octubre	0.112	0.078	Estiaje	5	40	0.006		0.031		0.006
Noviembre	0.112	0.100	Estiaje	5	40	0.006		0.040		0.006
Diciembre	0.112	0.059	Estiaje	5	40	0.006		0.023		0.006

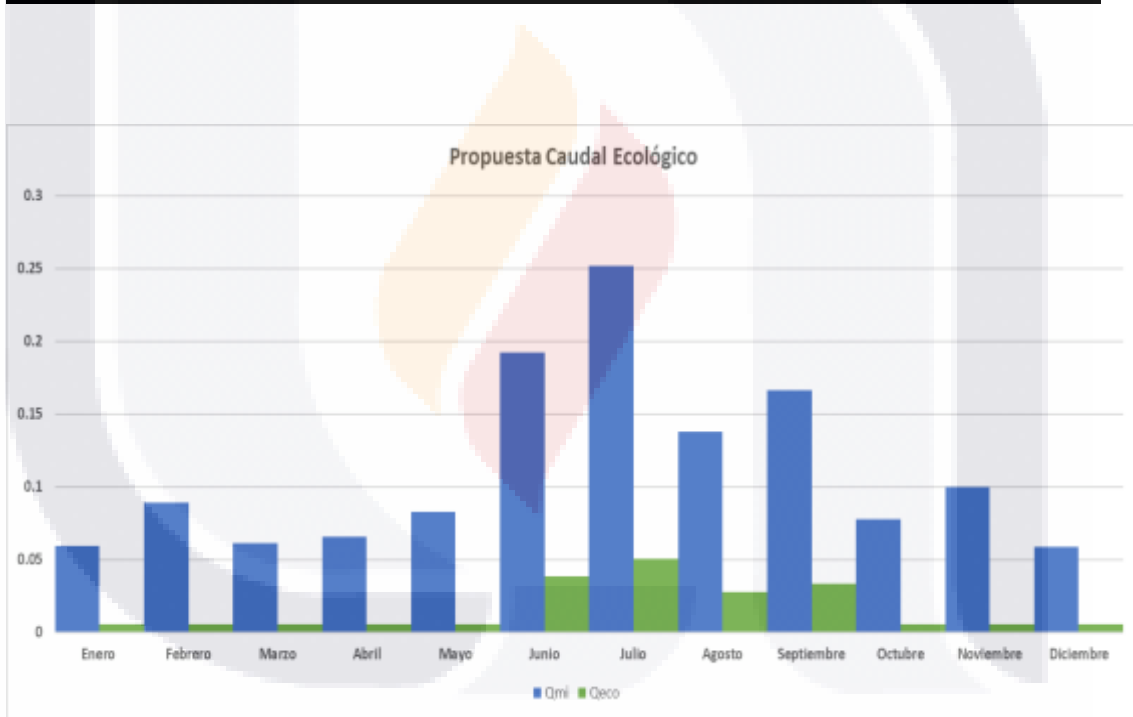


Figura 27. Histograma de caudal ecológico por el método Tennant Modificado
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel

5.2.5 Propuesta de caudal ecológico-WWF

Se utilizó el procedimiento que permite realizar una aproximación hidrológica detallada en base a los caudales medios mensuales históricos y así obtener el régimen de caudales ecológicos ordinarios estacionales para cada condición hidrológica, ya sea muy seca, seca, media o húmeda.

Se organizaron de menor a mayor los registros históricos disponibles, para después calcular para cada mes del año los percentiles 75, 25 y 10 asociando el tipo de régimen de caudales ordinarios estacionales a los percentiles que aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 16. Criterios de elección de percentil

Condiciones hidrológicas	Percentiles
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años húmedos	75
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años medios	25
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años secos	10
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años muy secos	0

Con base en lo anterior, se obtuvieron los percentiles correspondientes a cada régimen de caudal ordinario estacional, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17. Posición de percentiles

Percentil	Condición hidrológica	Posición
0	muy seco	0
10	seco	4
25	medio	9
75	húmedo	26

Tabla 18. Caudal ordinario estacional

Mes \ Año	Húmedo	Medio	Seco	Muy seco
Enero	0.091	0.000	0.000	0.000
Febrero	0.170	0.000	0.000	0.000
Marzo	0.123	0.000	0.000	0.000
Abril	0.099	0.000	0.000	0.000
Mayo	0.127	0.001	0.000	0.000
Junio	0.261	0.006	0.001	0.000
Julio	0.323	0.032	0.000	0.000
Agosto	0.181	0.005	0.002	0.001
Septiembre	0.061	0.005	0.000	0.000
Octubre	0.111	0.003	0.000	0.000
Noviembre	0.181	0.000	0.000	0.000
Diciembre	0.117	0.000	0.000	0.000

Con la propuesta de régimen de caudales ordinarios estacionales, sin multiplicar por su frecuencia de ocurrencia, dadas las condiciones de la zona de estudio, se empleará para modelar la propuesta de caudal ecológico obtenida para un año hidrológico medio.

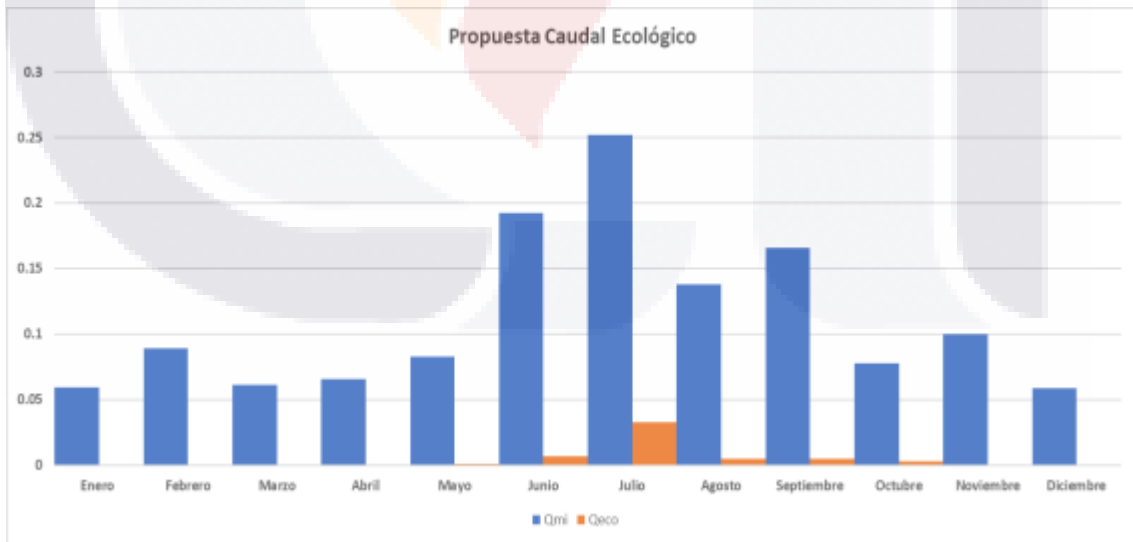


Figura 28. Histograma de caudal ecológico por el método WWF
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel

5.3 Bloque hidráulico

En esta etapa, como instrumento de evaluación, se utilizó la modelación unidimensional con el programa HEC-RAS 5.0.3., en el cual, se modelaron las propuestas de caudal ecológico previamente obtenidas, como se muestran a continuación:

5.3.1 Geometría del tramo suburbano

Para la determinación de la zona a modelar, se procesaron con CivilCAD la topografía del tramo suburbano elegido que corresponde a una parte del cauce principal del arroyo “La Yerbabuena”, que comienza desde la localidad “Tres Arroyos” hasta su descarga o unión con el río San Pedro (figura 29).



Figura 29. Tramo suburbano
Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

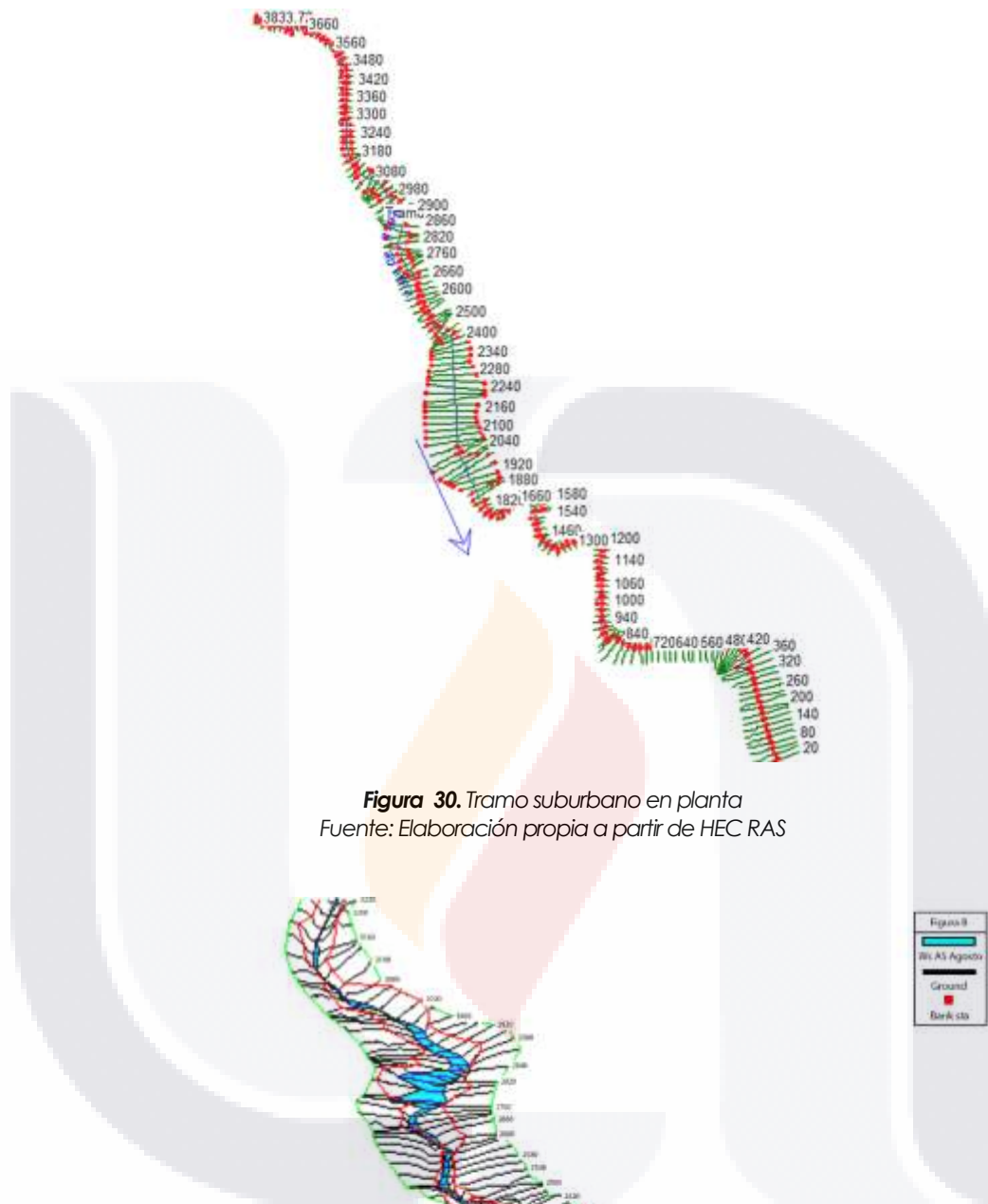


Figura 30. Tramo suburbano en planta
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC RAS



Figura 31. Geometría del tramo suburbano en vista 3D
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC RAS

5.3.2 Modelación del régimen variable natural

Primero, se modelaron regímenes naturales para año seco, medio y húmedo, y se observó lo siguiente:

Año seco

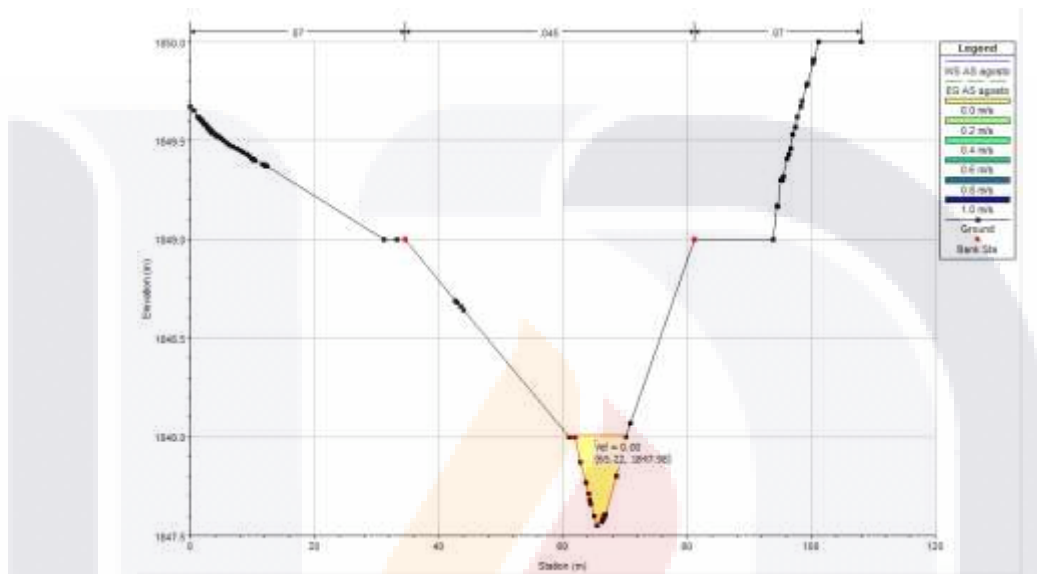


Figura 32. Sección 2700 para año seco
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Año medio

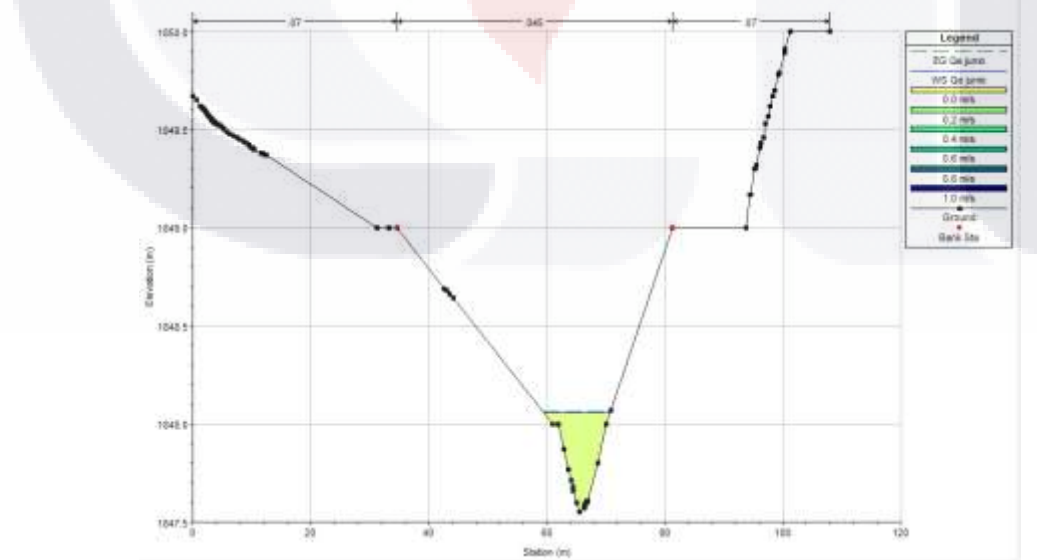


Figura 33. Sección 2700 para año medio
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Año húmedo

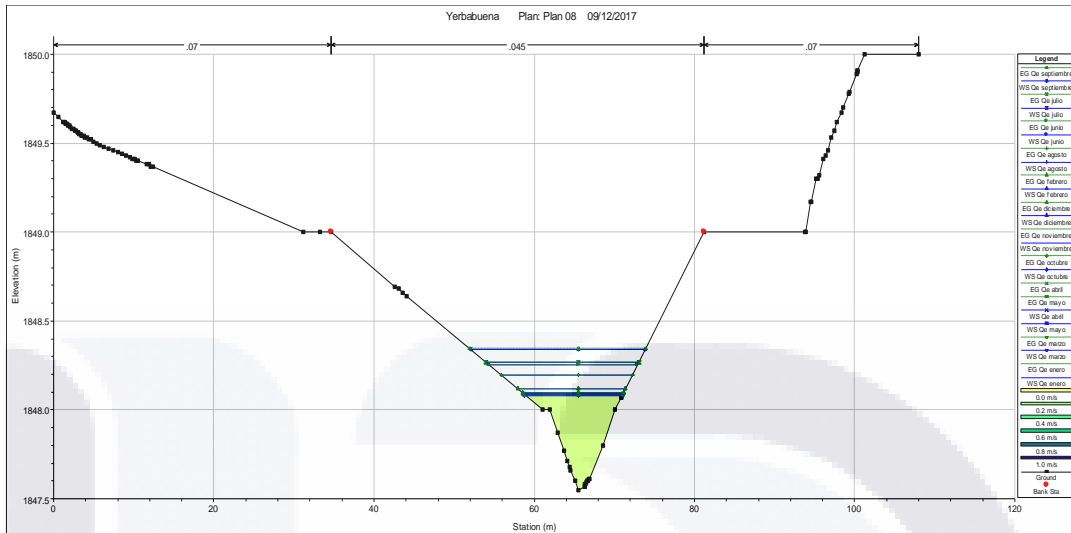


Figura 34. Sección 2700 para año húmedo
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Para año húmedo, los niveles alcanzados para cada mes dentro del año hidrológico, presentaron inundaciones, y niveles de más de un metro a comparación de los años hidrológicos seco y medio. Las comparaciones de valores se muestran en el siguiente capítulo.

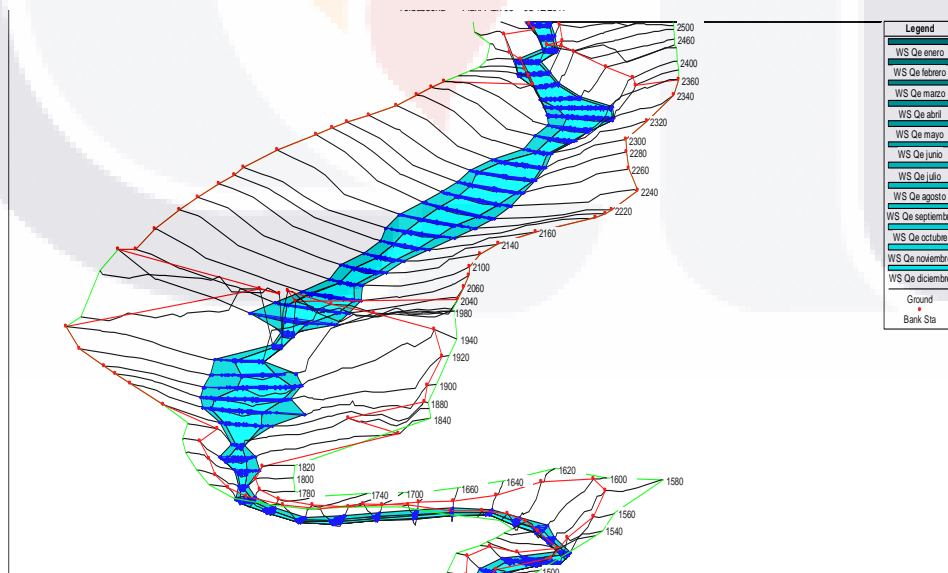


Figura 35. Modelación tramo aguas arriba para año húmedo
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

5.3.3 Modelación de propuesta de caudal ecológico-IHA

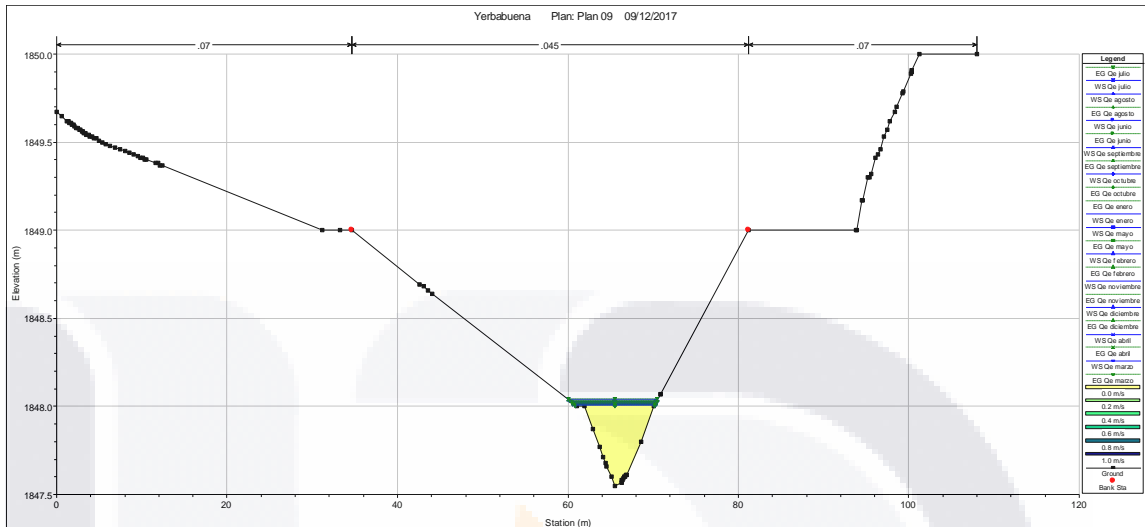


Figura 36. Sección 2700 método IHA
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Tabla 19. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA

Est.	Perfil	Q	Elev. Mín.	Elev. W.S.	Elev. E.G.	Pend.	Vel.	A	T	#Fr.
		(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	adm
2700	Qe ene	0.03	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.24	9.67	0.01
2700	Qe feb	0.02	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.23	9.65	0.01
2700	Qe mar	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.15	9.31	0
2700	Qe abr	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.01	2.17	9.41	0
2700	Qe may	0.03	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.24	9.67	0.01
2700	Qe jun	0.07	1847.55	1848.03	1848.03	0.00	0.03	2.33	10.02	0.02
2700	Qe jul	0.11	1847.55	1848.04	1848.04	0.00	0.04	2.45	10.46	0.03
2700	Qe ago	0.08	1847.55	1848.03	1848.03	0.00	0.03	2.36	10.14	0.02
2700	Qe sep	0.06	1847.55	1848.03	1848.03	0.00	0.03	2.31	9.97	0.02
2700	Qe oct	0.04	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.02	2.25	9.73	0.01
2700	Qe nov	0.03	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.01	2.2	9.53	0.01
2700	Qe dic	0.02	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.01	2.18	9.45	0.01

Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

5.3.4 Modelación de propuesta de caudal ecológico-Tennant Modificado

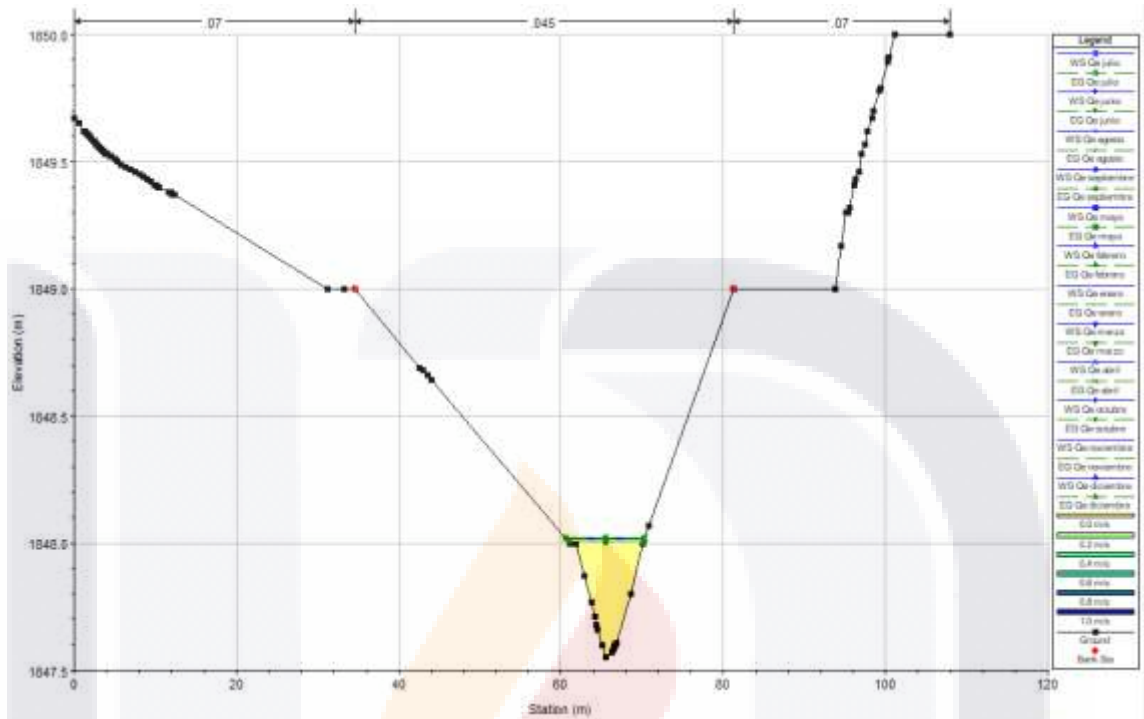


Figura 37. Sección 2700 método Tennant Modificado
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Tabla 20. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA

Est.	Perfil	Q	Elev. Mín.	Elev. W.S.	Elev. E.G.	Pend.	Vel.	A	T	#Fr.
		(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	adm
2700	Qe ene	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe feb	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe mar	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe abr	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe may	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe jun	0.04	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.02	2.25	9.72	0.01
2700	Qe jul	0.05	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.02	2.28	9.83	0.01
2700	Qe ago	0.03	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.24	9.67	0.01
2700	Qe sep	0.03	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.22	9.62	0.01
2700	Qe oct	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe nov	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0
2700	Qe dic	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0	2.14	9.28	0

Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

5.3.5 Modelación de propuesta de caudal ecológico-WWF

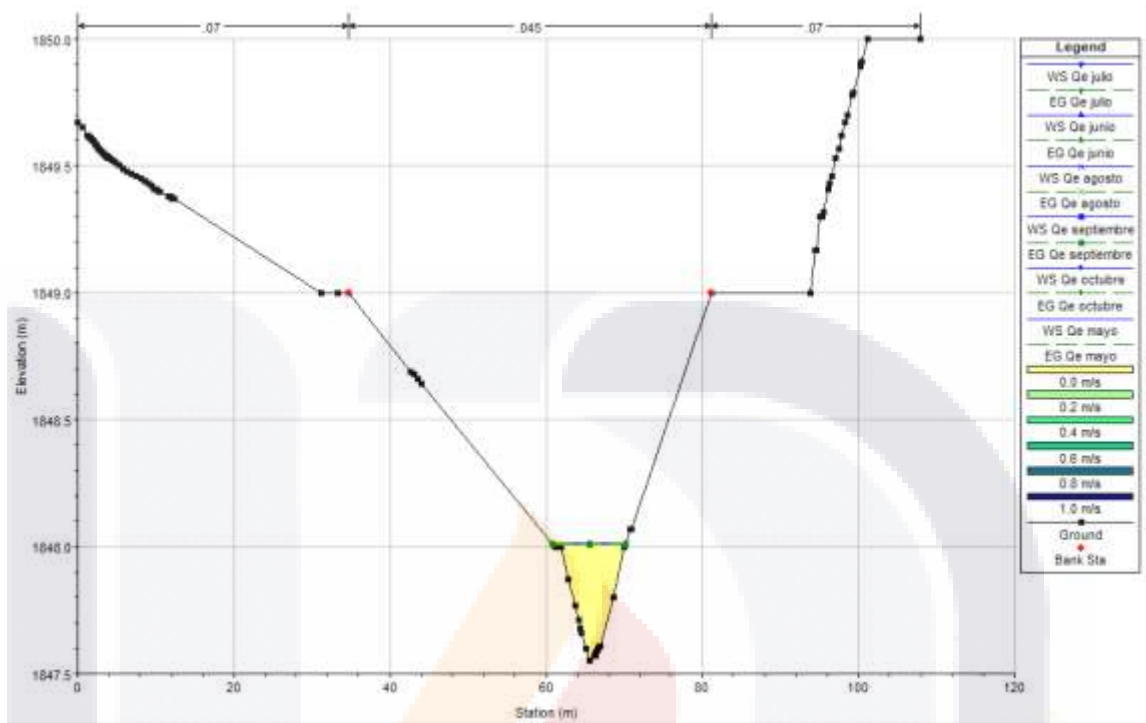


Figura 38. Sección 2700 método WWF
Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

Tabla 21. Análisis hidráulico de propuesta de caudal ecológico-IHA

Est.	Perfil	Q	Elev. Mín.	Elev. W.S.	Elev. E.G.	Pend.	Vel.	A	T	#Fr.
		(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	adm
2700	Qe may	0.00	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.00	2.13	9.26	0.00
2700	Qe jun	0.01	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.00	2.14	9.28	0.00
2700	Qe jul	0.03	1847.55	1848.02	1848.02	0.00	0.01	2.22	9.61	0.01
2700	Qe ago	0.00	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.00	2.14	9.27	0.00
2700	Qe sep	0.00	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.00	2.14	9.27	0.00
2700	Qe oct	0.00	1847.55	1848.01	1848.01	0.00	0.00	2.13	9.26	0.00

Fuente: Elaboración propia a partir de HEC-RAS 5.0.3

5.4 Bloque ambiental

En el bloque ambiental, se eligieron los siguientes parámetros para conjuntar la información y análisis recabados, y llegar a un dictamen final del cauce en cuestión al régimen de variabilidad.

5.4.1 Tipificación de flora y fauna

Para la tipificación de especies en el arroyo, asesorado de un experto en materia ecológica, se obtuvieron las siguientes especies de flora y fauna.

Tabla 22. Tipificación de flora

GÉNERO-ESPECIE	NOMBRE COMÚN
<i>Acacia farnesiana</i>	Huizache
<i>Yucca filifera</i> Chabaud	Palma
<i>Prosopis glandulosa</i>	Mezquite
<i>Ferocactus wislizenii</i>	Biznaga
<i>Gomphrena serrata</i> L.	Betónica, Bolas de hilo, Borreguilla, Betónica, Cabeza de indio, Escobetilla
<i>Dysphania graveolens</i> (Wild.) Mosyakin & Clements	Epazote de zorrillo
<i>Gnaphalium</i> spp.	Gordolobo
<i>Zinnia Angustifolia</i> kunth	Hierba de la pastora, Pastora
<i>Bidens odorata</i> Cav.	Aceitilla, Aceitilla blanca
<i>Grindelia oxylepis</i> Greene	Árnica amarilla
<i>Heterotheca inuloides</i> Cass. var. <i>rosei</i> Wagenkn.	Árnica amarilla
<i>Aster gymnocephalus</i> (DC.)	Árnica morada
<i>Tagetes lunulata</i> Ort.	Cinco llagas, Flor de cinco llagas
<i>Zinnia peruviana</i> (L.) L.	Mal de ojo
<i>Sanvitalia procumbens</i> Lam.	Ojo de gato
<i>Tithonia</i> Desf. ex Juss.	Titonia
<i>Tillandsia recurvata</i>	heno
<i>Cardenche Opuntia imbricata</i> (Haw.) DC.	Cardenche
<i>Opuntia streptacantha</i> Lemaire	Nopal cardón
<i>Opuntia jaliscana</i> Bravo	Nopal chamacuerdo
<i>Opuntia leucotricha</i> De Candolle	Xoconostle amarillo, Duraznillo
<i>Ipomoea murucoides</i>	palo bobo
<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth	Hiedra de flores chiquitas
<i>Dichondra argentea</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	Orejuela de ratón
<i>Lepidium virginicum</i> L.	Chile de pájaro
<i>Cucurbita foetidissima</i> Kunth	Calabacilla loca
<i>Ricinus comunis</i>	higuerilla
<i>Mimosa monancistra</i>	Gatuño
<i>Yucca filifera</i>	Izotal

Tabla 23. Tipificación de fauna

GÉNERO-ESPECIE	NOMBRE COMÚN
<i>Zenaida asiática</i>	Paloma aliblanca
<i>Anas platyrhynchos</i>	Pato mexicano
<i>Charadrius vociferus</i>	Tildio
<i>Hirundo rustica</i>	Golondrina
<i>Anolis nebulosus</i>	Culebra de agua
<i>Spea multiplicatus</i>	Sapo
<i>Rana montezumae</i>	Rana común
<i>Kinosternum integrum</i>	Tortuga terrestre
<i>Sylvilagus audubonii</i>	Conejo
<i>Columbina inca</i>	Torcacita

5.4.2 Índice de vegetación (NDVI)

De acuerdo con la investigación de Suárez et al., (2017), el NDVI es un índice diferencial de vegetación normalizado (Normalized Difference Vegetation Index) que permite generar una imagen que muestra el verdor o biomasa relativa de una zona determinada.

El NDVI se aplica para el monitoreo de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación y pendiente de la superficie. Aprovecha el contraste de las características de dos bandas: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).

El índice de vegetación genera valores que oscilan entre -1,0 y 1, un valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve; por otra parte, los valores cercanos a cero se asocian con zonas rocosas o urbanas. Los valores muy bajos por debajo de 0.1 de NDVI corresponden a áreas de arena o nieve. Los valores moderados de 0.2 a 0.3 representan terrenos con arbustos y prados, mientras que los valores altos de 0.6 a 0.8 indican bosques de zonas templadas y tropicales (Lillesand et al., 2014)

La ecuación para su determinación a través de la calculadora ráster es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

donde:

NIR: Infrarrojo cercano

VIS: Rojo visible

Utilizando imágenes del satélite LANDSAT-8 se obtuvo el mapa de índice de vegetación NDVI que se presenta a continuación:

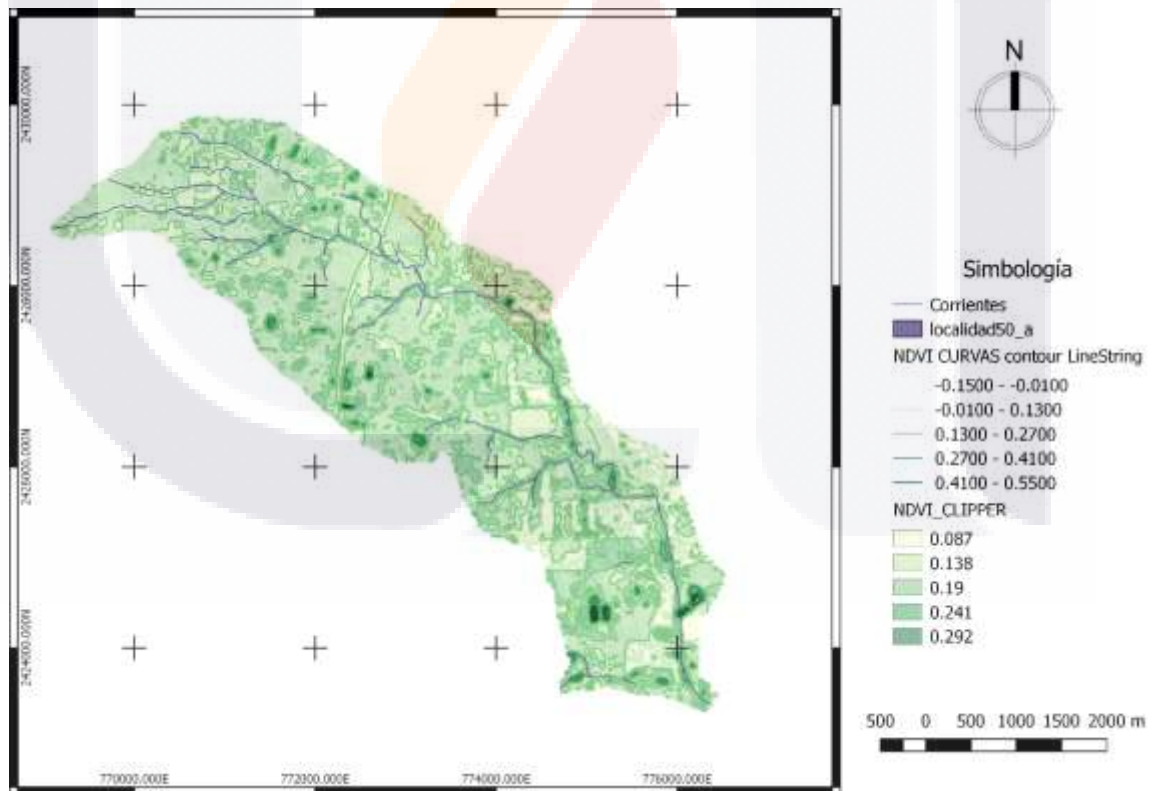


Figura 39. NDVI

Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS

5.4.3 Estimación de lluvia efectiva

Con la tipificación de flora y fauna, aplicando un análisis similar al que realizó Sandoval Ramírez (2016), se decidió para flora silvestre, aproximarlos a los valores de uso consuntivo de la yuca, y con el NDVI, se observó que el ancho o buffer que se le asignará al área de influencia de la flora aledaña al cauce será de 50 m. Obteniendo la precipitación (P), la evapotranspiración (ETP) por el método de Thornthwaite y el uso consuntivo (UC) por el método de Blaney-Criddle, se obtuvo la lluvia efectiva por el método de Prescott y Anderson que se muestra en la tabla 24.

Con los datos obtenidos de P, ETP y UC, como lo describe Martínez (2011), el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Se comienza por el mes inicial.
2. Se considera nula la lluvia efectiva si la mitad de la precipitación mensual es menor o igual a 10 milímetros y se pasa al siguiente mes.
3. Se calcula $0.9ETP^{0.75}$
 - Si $0.9ETP^{0.75} > P$ la lluvia efectiva es igual al menor de 0.8P, ETP y UC.
 - Si $0.9ETP^{0.75} < P$ la lluvia efectiva es igual al menor de 0.5P, ETP y UC.

Tabla 24. Estimación de lluvia efectiva

	Mes	P(mm)	ETP(mm)	UC(mm)	0.5P	0.9ETP ^{0.75}	0.8P, ETP,UC	0.5P, ETP,UC	Lle
Yuca	Enero	19.46	31.97	22.64	9.73				
	Febrero	11.89	40.82	24.81	5.94				
	Marzo	3.29	65.15	58.79	1.64				
	Abril	6.84	92.64	135.07	3.42				
	Mayo	22.11	124.10	165.77	11.06	33.46	17.69		17.69
	Junio	93.84	132.82	171.89	46.92	35.21		46.92	46.92
	Julio	153.32	116.88	160.38	76.66	31.99		76.66	76.66
	Agosto	116.76	109.84	152.22	58.38	30.54		58.38	58.38
	Septiembre	86.91	92.42	113.80	43.46	26.83		43.46	43.46
	Octubre	38.12	73.74	48.90	19.06	22.65		19.06	19.06
	Noviembre	9.52	47.06	36.61	4.76				
	Diciembre	11.82	33.86	28.58	5.91				

Mes	P(mm)	ETP(mm)	UC(mm)	0.5P	0.9ETP ^{0.75}	>P	<P	Lle
						0.8P, ETP,UC	0.5P, ETP,UC	
Junio	93.84	132.82	171.89	46.92	35.21		46.92	46.92
Julio	153.32	116.88	160.38	76.66	31.99		76.66	76.66
Agosto	116.76	109.84	152.22	58.38	30.54		58.38	58.38
Septiembre	86.91	92.42	113.80	43.46	26.83		43.46	43.46

Cobertura	Lle(mm)	%cobertura	Lle por cobertura	Lle total (mm)	Q (m ³ /s)
Cultivo	262.17	0.4	104.87	149.95	0.00277
Vegetación	225.42	0.2	45.08		

El gasto de 0.00277 m³/s sería el gasto que aprovecha al año la flora aledaña al cauce principal por su sistema radicular.

5.4.4 Evaluación del estado natural del cauce

En este apartado, se utilizó la herramienta FlowHealth, desarrollada por Fluvial Systems y Yorh (Desarrolladores de Software) para Australia y como parte del Proyecto “Salud de los Ríos y Caudal ecológico en China”. Se tomaron en cuenta 4 enfoques para la evaluación de salud del río:

1. Clasificación de estrés de flujo (FSR)

FlowHealth analiza series temporales de datos de caudal basados en una comparación con una condición de referencia (es decir, series temporales de caudal de pre-regulación o caudal no regulado modelado). Para cada año de registro FlowHealth calcula los puntajes para 9 subíndices hidrológicos ecológicamente relevantes predefinidos, los cuales cuando adquieren un valor, se les conoce como métricas de caudal.

Un puntaje de 1 significa que está cerca de la condición de referencia y una puntuación de 0 significa que está lejos de la condición de referencia. Las 9 puntuaciones que adquieren las métricas de caudal se combinan para formar una puntuación global de Salud del Caudal para cada año de registro. Los resultados se muestran en forma de gráficos de diferentes tipos, que se presentan a continuación:

Gráfico de mosaico

El gráfico Mosaico muestra las puntuaciones anuales de métricas de caudal para cada año de prueba en 5 clases de desviación. Cada clase se representa como un color. Por otra parte, genera una impresión visual inmediata de las condiciones hidrológicas históricas de un río, incluso para no hidrólogos y especialistas en ríos.

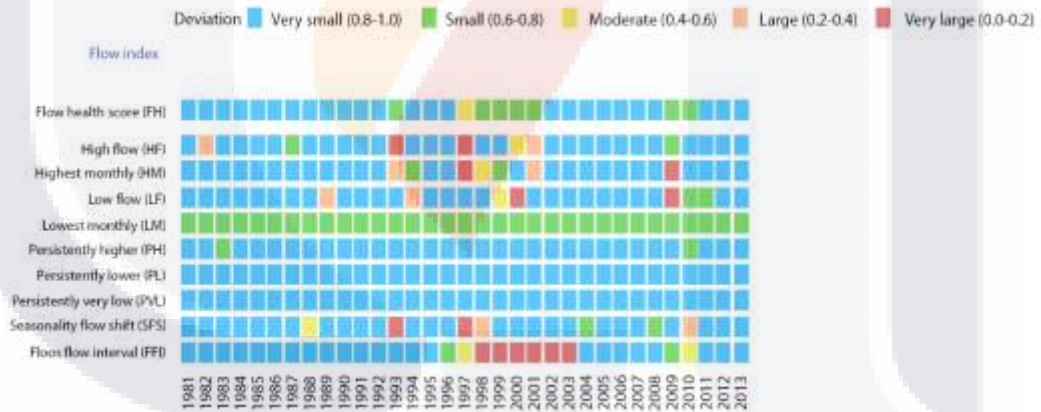


Figura 40. Gráfico de mosaico para evaluación de salud arroyo "La Yerbabuena"
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

Gráfico de línea

El gráfico de líneas muestra la serie de tiempo de los puntajes de las medidas de flujo para cada año de prueba. Puede activar y desactivar los subindicadores usando las casillas de verificación a la izquierda del gráfico (Gippel, Marsh, & Grice, 2012).

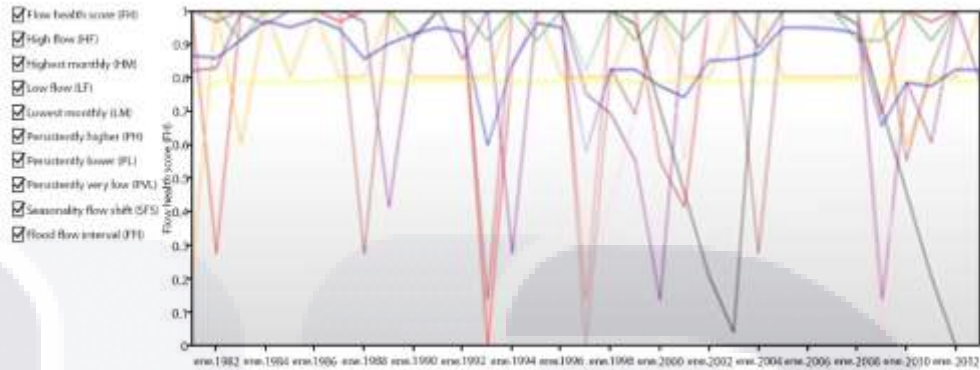


Figura 41. Gráfico de línea para evaluación de salud arroyo “La Yerbabuena”
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

Gráficas sobrepuestas (acumuladas)

El gráfico del área acumulada es otra forma de mostrar la serie de tiempo de las puntuaciones de la medida del flujo. Cada área coloreada representa los puntajes métricos de flujo acumulados para cada año de prueba, para obtener el puntaje combinado de Flujo de salud.

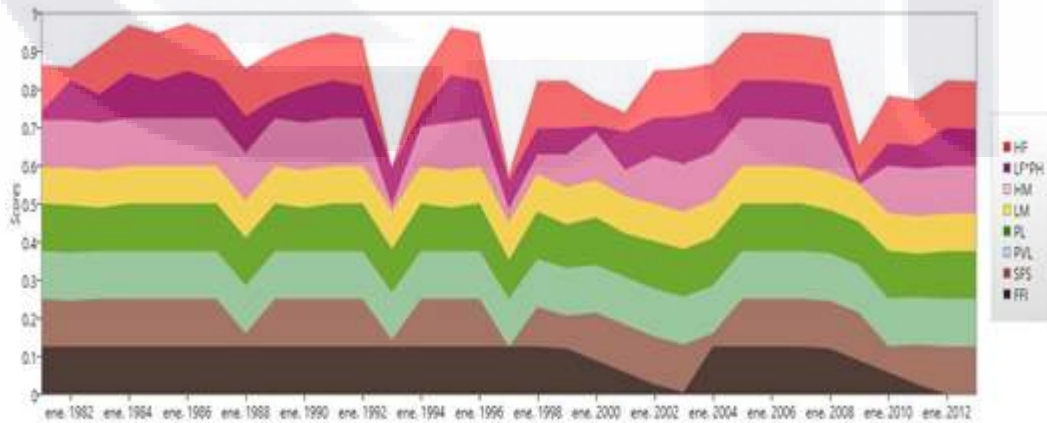


Figura 42. Gráfico de áreas acumuladas para evaluación de salud arroyo “La Yerbabuena”
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

2. Régimen de caudal mínimo mensual

FlowHealth produce automáticamente el régimen de caudal mensual mínimo que logra un puntaje de 1. Este régimen sigue el patrón natural de los caudales de referencia y requiere un porcentaje bastante alto del caudal natural.

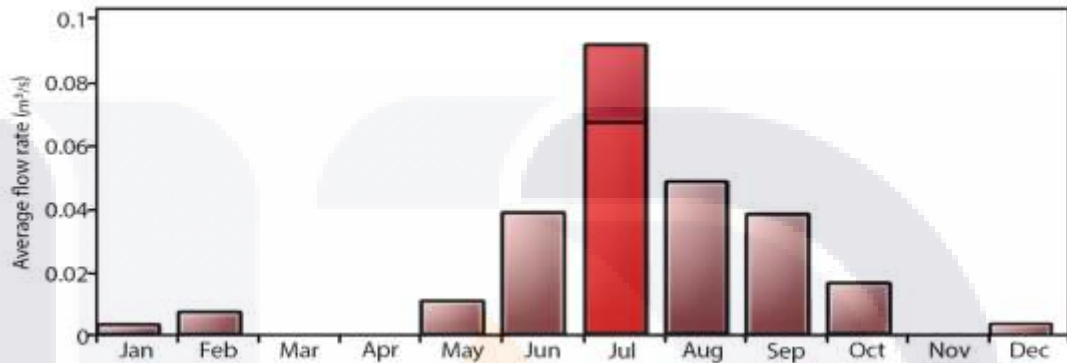


Figura 43. Régimen de caudal mínimo mensual arroyo "La Yerbabuena"
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

3. Evaluación de salud hidrológica de los regímenes de caudal ecológico mencionados.

Los caudales mensuales se pueden establecer simplemente como una proporción del flujo de referencia, por ello se evaluaron las metodologías de la norma contra la metodología que se trata de implementar para corrientes intermitentes.

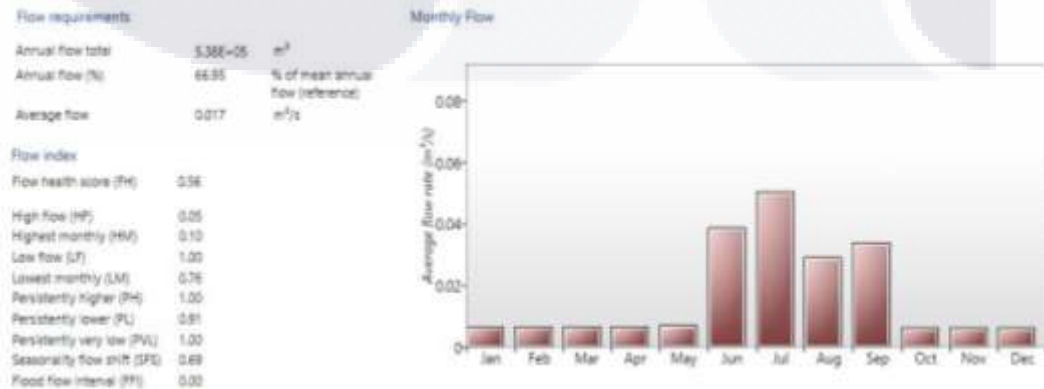


Figura 44. Evaluación de salud hidrológica para el apéndice C
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

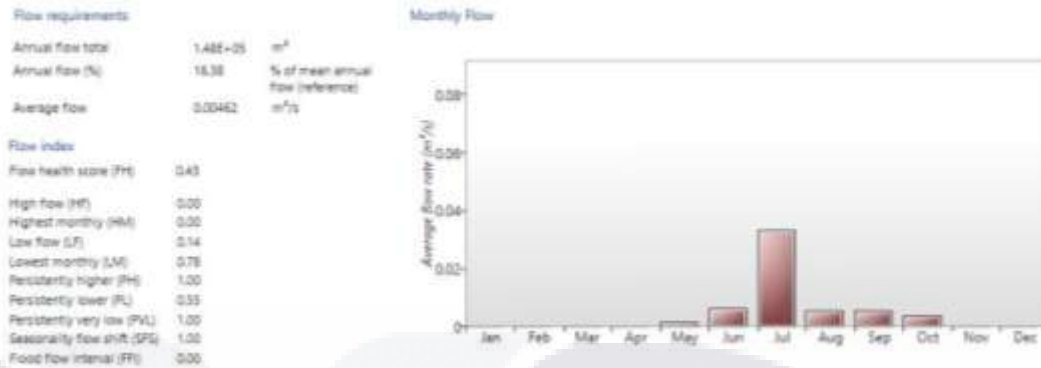


Figura 45. Evaluación de salud hidrológica para el apéndice D
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

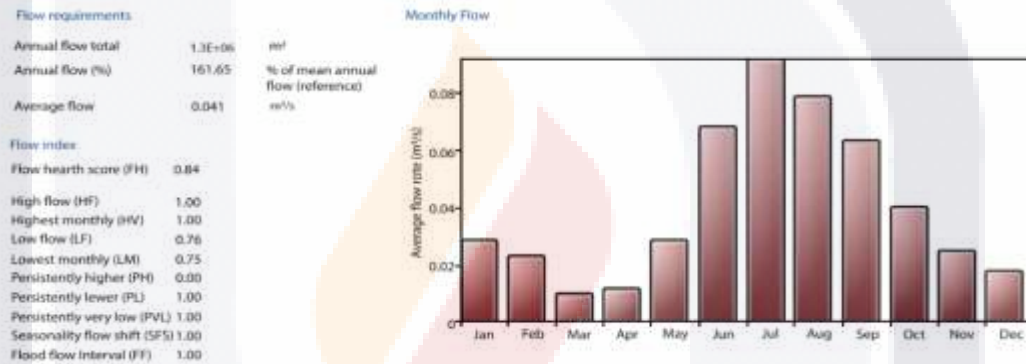


Figura 46. Evaluación de salud hidrológica método IHA
Fuente: Elaboración propia a partir de FlowHealth

Se observó que el análisis hidrológico, para determinar el régimen de caudal ecológico que tiene el mayor puntaje de salud hidrológica, es la metodología IHA utilizando la serie post-impacto (figura 46), donde los gastos en épocas de estiaje se presentarían en las zonas con depresiones, donde la topografía fue afectada producto de la urbanización en la zona.

Por otra parte, respecto a temporada de avenidas, los valores de caudal ecológico adquieren resultados significativos que permiten la recuperación de vegetación y flora aledaña.

5.5 Interrelación de resultados

Por último, en este apartado se muestra el siguiente mapa mental (figura 47), que muestra las variables de mayor relevancia para una corriente intermitente y para calcular su régimen de caudal ecológico. Estas variables que se discutirán en el siguiente capítulo, a fin de emitir criterios para el tipo de corriente analizado, con base en el objetivo general de la investigación.

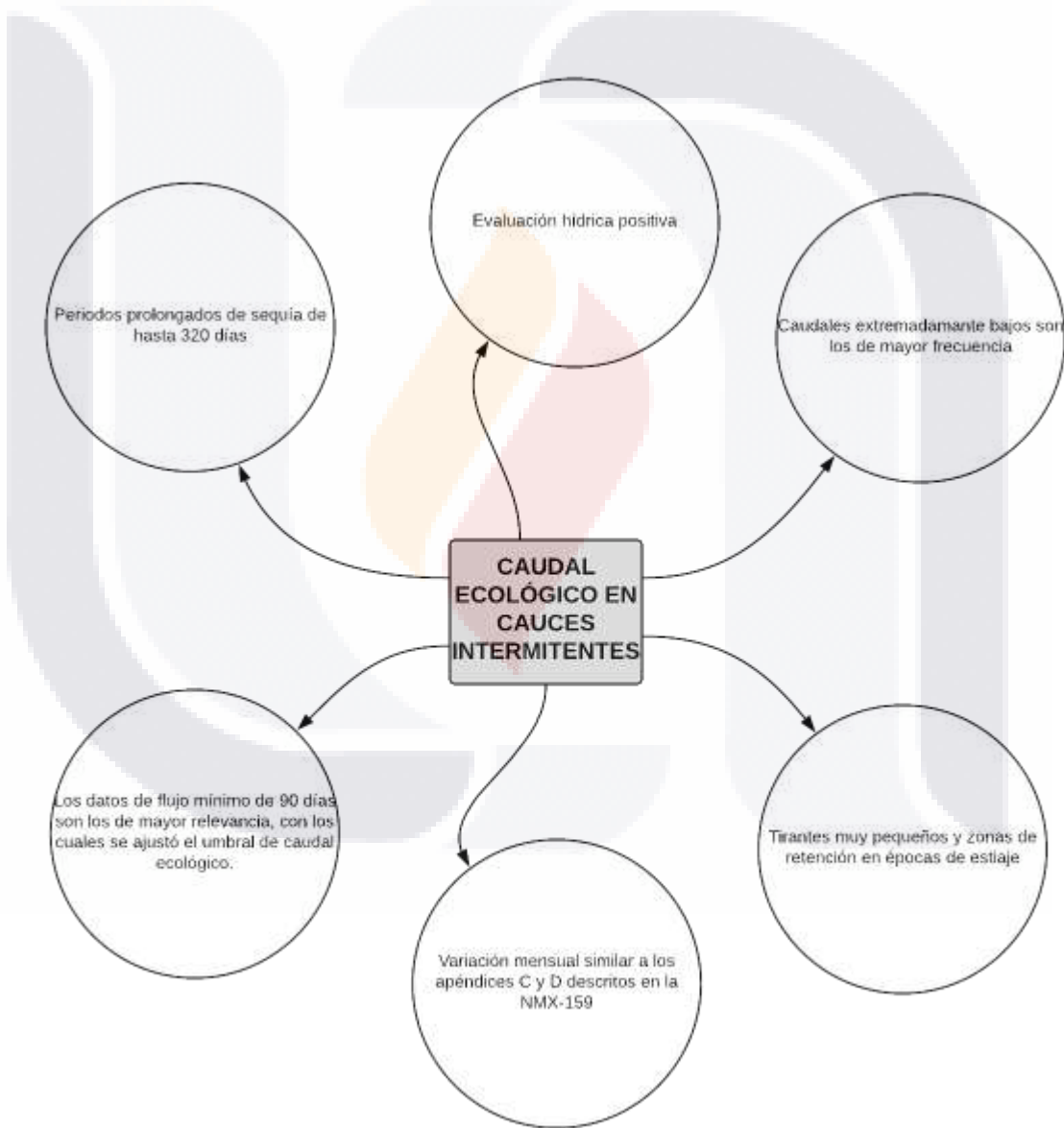


Figura 47. Interrelación de resultados
Fuente: Elaboración propia a partir de Lucidhart



CAPÍTULO VI

DISCUSIONES

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES

En este capítulo se muestra un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, agrupado en tres puntos que se discuten a continuación:

6.1 Comparación de RHN para año seco, medio y húmedo.

De la comparación de los regímenes hidrológicos naturales con la modelación unidimensional para flujo permanente con HEC -RAS, se observó que para el año seco el único mes que pudo modelarse al no presentar caudal cero fue del mes de agosto de 0.01 m³/s, además no presenta tirantes mayores a 0.07 m.

Para el régimen de año medio el caudal alcanza alturas máximas de 0.15m para épocas de estiaje hasta aproximadamente 0.60 m para épocas de avenida o lluvias.

Para el régimen hidrológico húmedo, el caudal medio mensual presenta inundaciones en épocas de lluvia, con alturas que para ciertas secciones el tirante llega hasta el 1.5 m de nivel respecto a la elevación mínima.

El análisis mediante modelación unidimensional permite conocer previamente los regímenes hidrológicos naturales, y para la zona de estudio seleccionada, favoreció conocer el comportamiento hidráulico de los tres tipos de regímenes. Por ello, para las propuestas de caudal ecológico por la NMX-159, se seleccionó el año medio.

En la modelación para año hidrológico húmedo, las secciones que presentan inundaciones o desbordes, comparando con los NDVI obtenidos, la mayoría se presenta en zonas de un bajo índice de vegetación. Por otra parte, periodos de lluvia altos pueden generar capacidad de recuperación de la flora aledaña al cauce.

6.2 Comparación de propuestas de caudal ecológico

Para la evaluación de las propuestas de caudal ecológico para año medio, se utilizaron como instrumentos de evaluación la modelación unidimensional en el programa HEC-RAS y la evaluación de cada régimen con el programa FlowHealth obteniendo las siguientes estrategias de caudal:

Tabla 25. Cuadro comparativo de régimen de caudal ecológico

Cuadro comparativo de caudales ecológicos (m ³ /s)				
Mes	Qmi Año Medio	Apéndice C Qe	Apéndice D Qe	IHA Qe
Enero	0.059	0.006	0.000	0.028
Febrero	0.089	0.006	0.000	0.024
Marzo	0.061	0.006	0.000	0.010
Abril	0.066	0.006	0.000	0.012
Mayo	0.083	0.006	0.001	0.029
Junio	0.192	0.038	0.006	0.068
Julio	0.252	0.050	0.032	0.108
Agosto	0.138	0.028	0.005	0.079
Septiembre	0.166	0.033	0.005	0.063
Octubre	0.078	0.006	0.003	0.040
Noviembre	0.100	0.006	0.000	0.025
Diciembre	0.059	0.006	0.000	0.018
TOTAL	0.112	0.016	0.004	0.042

Enfoque hidrológico

La propuesta de metodología IHA para corrientes intermitentes, cumplió con la hipótesis inicial de la campaña experimental, presentando resultados aproximados a los que resultan en el procedimiento descrito en la NMX-159 apéndice C y D, con una variación mensual similar en la modelación unidimensional con HEC RAS.

Con las propuestas de caudal ecológico, se observó una ventaja adicional del análisis IHA, ya que permite estimar los días con caudal cero (sequía); obteniendo periodos de 320 días en la época de pre-impacto, y en la de post impacto fue de 330 días.

Otra ventaja que permite la metodología IHA, es conocer la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales para 3, 7, 30 y 90 días, donde los datos de mayor relevancia para una corriente de este tipo, son los de flujo mínimo de 90 días, asociados a los periodos tan prolongados de días con caudal cero.

Por otra parte, la ventaja de presentar componentes de caudal ecológico (EFC), basados en la observación de personas especializadas en ecología, permite relacionar hidrogramas de ríos divididos en un conjunto de modelos hidrográficos ecológicamente relevantes, lo que de acuerdo con las tablas de The Nature Conservancy (2011), destacan puntos importantes:

- Los caudales extremadamente bajos con una frecuencia de 85.66%, en periodos de sequía, pueden proporcionar condiciones necesarias para concentrar zonas de encharcamiento que favorecen a algunas especies de predadores y secar áreas bajas de planicies de inundación.
- Se obtuvieron pulsos de caudal alto con una probabilidad de ocurrencia de 13.59 % que favorecen sobre todo la restauración de las condiciones de calidad normal del agua después de caudales bajos prolongados producto de la temporada de sequías.
- En menor frecuencia se obtuvieron pequeñas y grandes inundaciones con frecuencias de 0.64 % y 0.10 %.

Enfoque hidráulico

Se observaron tirantes máximos en la metodología IHA de 0.10 m hasta 0.20 m, dependiendo las secciones, con velocidades hasta 0.86 m/s, en tramos donde se presentan pendientes del gradiente de energía entre 0.03 y 0.06. Los tirantes máximos en el apéndice C, oscilan entre 0.06 m hasta 0.13 m, las velocidades a través de las secciones alcanzan valores de 0.69 m/s, y pendientes entre 0.02 a 0.05 del gradiente de energía relación m/m.

Para el apéndice D, solo se modeló la propuesta de caudal ecológico para épocas de avenida, porque para temporada de sequías los caudales obtenidos eran caudal cero. Los tirantes que se alcanzaron en esta metodología son hasta 0.14 m, en los que las pendientes de los niveles del gradiente de energía son de valores hasta 0.05 m/m.

Enfoque ambiental

Con la evaluación del régimen de variabilidad utilizando FlowHealth, si se propone el método Tennant modificado, se obtiene un 0.56 de puntaje y con el método del apéndice D se obtiene una evaluación de 0.43 a contraste del método IHA, que la evaluación final con FlowHealth es de 0.84.

Además, IHA es la propuesta que mejor se ajusta al régimen óptimo de caudal ecológico propuesto por el programa; y de las tres metodologías es la que establece rangos de caudal ecológico de mayor magnitud y que generan mayores tirantes a través de las secciones del cauce.

Por otra parte, por el método de Prescott y Anderson para determinar la lluvia efectiva, se utilizó un ancho de 50 m alrededor del cauce, pues analizando la imagen de NDVI, se observó la mayor concentración de vegetación a esa distancia.

El gasto final de lluvia efectiva anual de 0.003 m³/s es suficiente para ser abastecido por el caudal ecológico total por la metodología IHA y por las metodologías mencionadas por la norma. Sin embargo, con la metodología IHA se tienen un porcentaje mayor de caudal remanente de 0.037 m³/s para fauna en las inmediaciones del cauce. En la siguiente tabla, se muestra un cuadro comparativo de rasgos cualitativos e inferencias que se obtuvieron con el desarrollo de la presente campaña experimental.

Tabla 26. Comparación de metodologías hidrológicas

Bloque \ Metodología	IHA	Apéndice C	Apéndice D
Hidrológico	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal ecológico promedio de 0.042 m³/s. • Valor mínimo en periodos de estiaje de 0.010 m³/s. • Valor máximo en periodos de lluvia de 0.108 m³/s. • Periodo de sequía 320 días en la época de pre-impacto, y en la de post impacto fue de 330 días. • Se conocen 3, 7, 30 y 90 días con registros mínimos y máximos de caudal a través de medias móviles. • EFC de mayor frecuencia son: extremadamente bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal ecológico promedio de 0.016 m³/s. • Valor mínimo en periodos de estiaje de 0.006 m³/s. • Valor máximo en periodos de lluvia de 0.050 m³/s. 	<ul style="list-style-type: none"> • Caudal ecológico promedio de 0.004 m³/s. • Valor mínimo en periodos de estiaje de 0.000 m³/s. • Valor máximo en periodos de lluvia de 0.032 m³/s.
Hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Tirantes máximos 0.10m a 0.20m. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tirantes máximos 0.06m a 0.13m. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tirantes de 0.14 m sólo en temporada de lluvias.
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Puntaje de evaluación de régimen con Flow Health de 0.84. • Remanente de agua de 0.037 m³/s para fauna aledaña. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puntaje de evaluación de régimen con Flow Health de 0.56. • Remanente de agua de 0.013 m³/s para fauna aledaña. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puntaje de evaluación de régimen con Flow Health de 0.43. • Remanente de agua de 0.001 m³/s para fauna aledaña.

Con lo anterior, se puede constatar que tomando como base hidrológica la metodología IHA, se obtienen resultados satisfactorios para conocer el comportamiento para diferentes periodos de lluvia una corriente de tipo intermitente, con valores con significado ambiental. Los componentes de caudal ecológico de mayor prevalencia son acordes a las condiciones del entorno ecológico observado durante la tipificación de flora y fauna.

6.3 Propiedades de corrientes intermitentes

Con los resultados obtenidos, se analizaron las propiedades de corrientes intermitentes dependiendo la temporalidad de lluvias, ya sea para época de estiaje o de avenida, que permiten resaltar lo siguiente:

Periodo de estiaje

- Se encontraron caudales extremadamente bajos con la metodología propuesta, que se observaron en la visita a campo que se muestra en la memoria fotográfica del anexo 4.
- Los caudales extremadamente bajos, son los de mayor frecuencia, los cuales conjuntamente con el antecedente de humedad del subsuelo relacionada a años precedentes húmedos alimentan al caudal base en zonas de retención generados por la alteración de la topografía y sustrato del cauce natural.
- La escasa conectividad longitudinal, lateral y vertical en las secciones transversales del cauce, genera condiciones para concentrar agua estancada en áreas limitadas para beneficiar a los depredadores.
- Además, debido al descenso drástico del nivel de agua, en zonas donde se pierde conectividad lateral, es muy probable que se encuentren colapsos de las secciones transversales (figura 48).

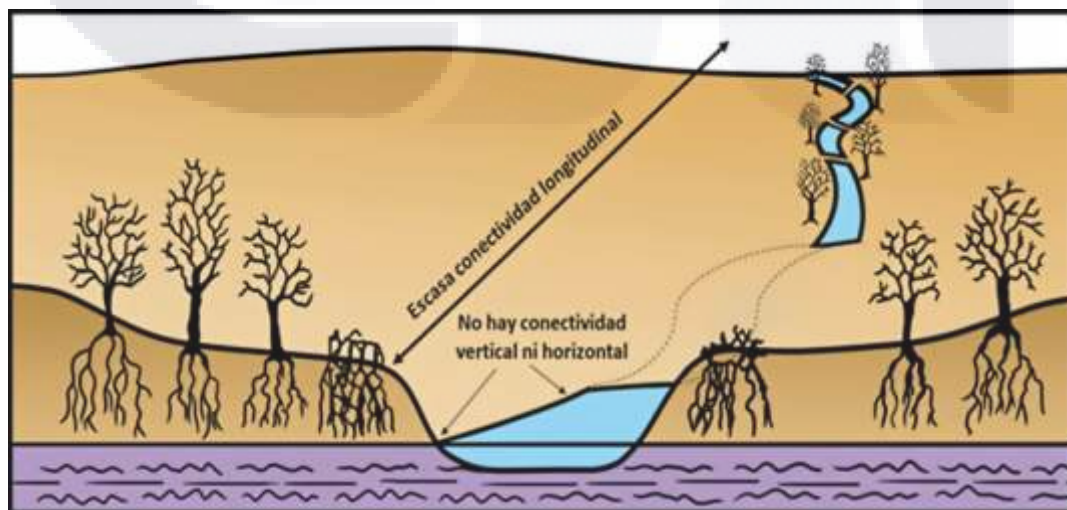


Figura 48. Esquema de corriente intermitente en periodo de estiaje

Periodo de avenida

Para la época de lluvias o avenida se destacan los siguientes puntos encontrados a partir de los resultados:

- Se encontraron gastos que se consideran suficientes para mantener condiciones óptimas de vegetación y brindar una cantidad adicional para la supervivencia de fauna aledaña encontrada.
- Con los caudales encontrados, se observa de acuerdo con la modelación unidimensional, una conectividad lateral y longitudinal del arroyo "La Yerbabuena" como se muestra en la figura 49.
- Se encontraron para esta época de lluvias pulsos de caudal alto, pequeñas y grandes inundaciones, que son de una muy baja probabilidad de ocurrencia, en contraste con los caudales extremadamente bajos que son los de mayor prevalencia en corrientes intermitentes.
- Los pulsos de caudal alto y las inundaciones (pequeñas y grandes) impiden la invasión de vegetación riparia en el cauce, restauran las condiciones de calidad normal del agua después de periodos muy largos de caudales extremadamente bajos, y controlan la distribución y abundancia de plantas en planicies de inundación.

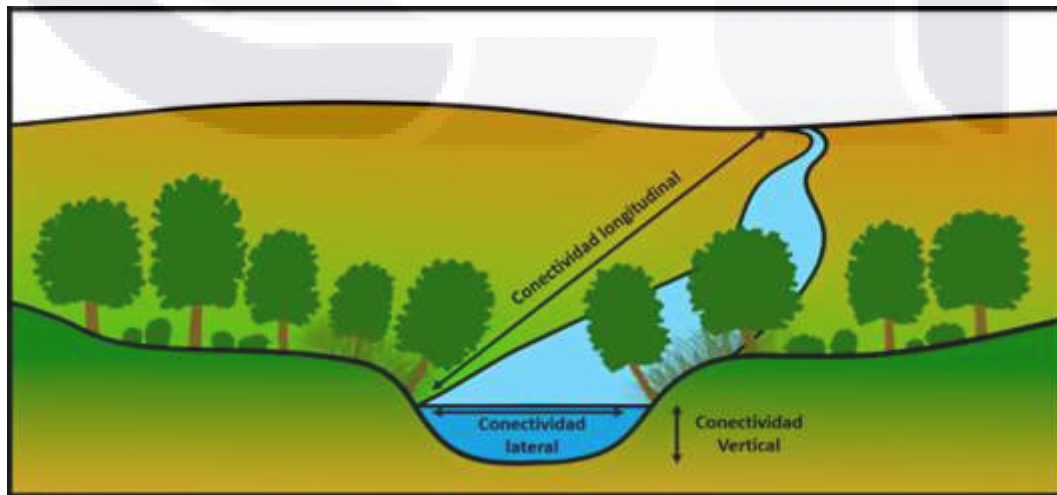


Figura 49. Esquema de corriente intermitente en periodo de avenida

Zonas de depresión en topografía

Se encontraron depresiones a lo largo del tramo suburbano mediante la modelación unidimensional, tanto para épocas de estiaje o de lluvia como se muestra en la figura 50.

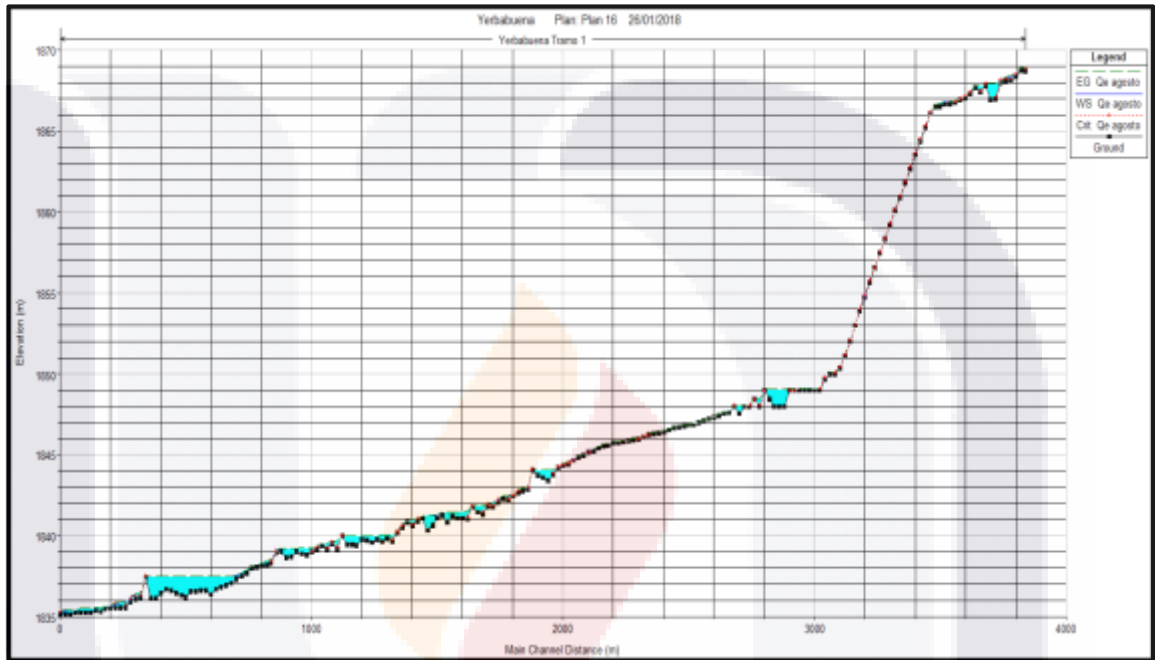


Figura 50. Perfil del cauce principal con propuesta IHA
Fuente: A partir de HEC-RAS 5.0.3

Del análisis correspondiente por cada base hidrológica se compararon los volúmenes obtenidos usando el tirante máximo y el área mojada. (Anexo 4). Obteniendo las siguientes observaciones:

- En tramos de pendiente regular sin zonas de retención, se obtuvieron porcentajes entre 15 a 30 % respecto al escurrimiento medio anual; mayores que los caudales calculados con las metodologías de la NMX-159.
- En las zonas de retención, que pertenecen a tramos revestidos se obtuvieron porcentajes entre 80 a 95 %, asociado con las bajas magnitudes de velocidad y alteración de pendientes.



CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

7.1 Conclusión general

La adaptación de la metodología con base en indicadores de alteración hidrológica y modelación eco-hidráulica aplicada a la cuenca del arroyo "La Yerbabuena" de tipo intermitente, tuvo resultados satisfactorios en los cuales se pudo cumplir con el objetivo general e hipótesis planteada al inicio de la investigación, ya que se conoció el comportamiento de una corriente de tipo intermitente dependiendo su temporada de lluvias.

Además, a través de la evaluación utilizando la modelación unidimensional y el programa Flow Health, se corroboró que la base hidrológica utilizada genera resultados confiables con una variación interanual similar a las metodologías que establece la norma NMX-AA-159-SCFI-2012

La propuesta de metodología cumple con los objetivos que establece la norma NMX-159 en su apartado 5.2.2. pues establece un régimen de caudal considerando un intervalo natural de variabilidad hidrológica, tanto en condiciones ordinarias como en situaciones después de una perturbación.

7.2 Conclusiones particulares

Las conclusiones particulares de la investigación son las siguientes:

1. El régimen de variabilidad se obtuvo utilizando una serie sintética diaria y mensual de caudales utilizando el método de la curva N de escurrimiento para determinar la precipitación en exceso, observando gastos que se asemejan a las condiciones de una corriente de orden intermitente de la región.

2. Se determinó un umbral de caudal ecológico utilizando la base hidrológica de la metodología IHA obteniendo un caudal ecológico promedio de $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ y valores mínimos en periodos de estiaje de $0.010 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo para época de avenida de $0.108 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. La propuesta de la metodología IHA tiene correlación con los procedimientos descritos en los apéndices C y D de la norma, con gastos mínimos y máximos similares, sin embargo, el análisis utilizando indicadores de alteración hidrológica permite conocer los largos periodos de sequía de la corriente intermitente, además de asignar una clasificación para cada registro de caudal diario, obteniendo que el componente de mayor frecuencia en la microcuenca analizada es el gasto extremadamente bajo que funciona como caudal base en zonas de retención cuya topografía fue afectada por la presencia de infraestructura.
4. Se evaluó el comportamiento hidráulico de las propuestas de caudal ecológico, mediante la modelación numérica unidimensional con el programa HEC-RAS obteniendo tirantes mayores con la metodología IHA con valores entre 0.10m a 0.20m dependiendo la sección.
5. Se relacionó el régimen de caudal ecológico con las condiciones de vegetación, observando que el índice de vegetación NDVI de mayor valor, se concentra aproximadamente dentro del área de los 50 m a partir del centro del cauce principal, además, respecto a la lluvia efectiva con un gasto anual de $0.003\text{m}^3/\text{s}$, en contraste con el caudal ecológico promedio, se infiere que los caudales calculados son suficientes para satisfacer las necesidades de la vegetación riparia, e incluso proporcionar un remanente de agua para fauna presente en la zona de estudio.
6. Por otra parte, en la evaluación de salud hídrica de las estrategias de caudal con FlowHealth, se observó que el análisis hidrológico para determinar el régimen de caudal ecológico que tiene el mayor puntaje de salud hídrica, es la metodología IHA con un puntaje de 0.83 muy cercano al nivel de referencia del caudal mínimo mensual que propone el programa.

7.3 Nichos de investigación

Los siguientes temas son tópicos que pueden ser investigados para complementar el estudio y comprender a fondo el comportamiento de una corriente de orden intermitente.

1. El realizar un análisis hidrogeológico de un tramo suburbano de un río o arroyo de tipo intermitente, ayudaría a entender el porcentaje de escurrimiento superficial que es útil para las plantas y el que se genera rumbo al acuífero por la conectividad vertical.
2. Aplicar una modelación unidimensional o bidimensional en una corriente de mayor área de captación y secciones transversales de mayor tamaño para corroborar los resultados obtenidos con la base hidrológica de esta metodología.
3. Implementar un nuevo modelo hidrológico para la determinación de series sintéticas de gastos en donde no existan estaciones hidrométricas, favorecería para encontrar gastos con mayor certeza

GLOSARIO

Alteración hidrológica

Perturbación o cambio de las características del ciclo hidrológico.

Biótico

De los organismos vivos o relacionado con ellos. Factor biológico que es fundamental en un ecosistema e influye en los seres que viven en él.

Cauce intermitente

Río o arroyo natural que tiene agua especialmente en época de lluvias.

Caudal ecológico

Cantidad, calidad y régimen del flujo necesario para mantener componentes, procesos y funciones en ecosistemas acuáticos, además de considerar sinónimos el caudal ambiental y flujo ambiental tienen el mismo significado.

Eco-hidráulica

Enfoque de la hidráulica que permite estimar los efectos del estado fluvial sobre su estado ecológico y para la definición de proyectos de restauración de ecosistemas acuáticos.

Ecohidrología

Interdisciplina que relaciona los procesos del ciclo hidrológico con las repercusiones en los ecosistemas aledaños a cuerpos de agua.

Lluvia efectiva

Cantidad de lluvia que será consumida por los cultivos o evaporada del suelo en la zona ocupada por las raíces de las plantas.

Modelación unidimensional

Simulación numérica que asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos, útil para determinar el nivel máximo del agua.

Ráster

Matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas, en la que cada celda contiene un valor que representa información.

Régimen

Condiciones regulares o duraderas que provocan o acompañan una sucesión de fenómenos determinados.

Régimen hidrológico

Variabilidad intra o inter anual que presenta una tendencia de evolución natural del río o cuerpo de agua a analizar, no son tan evidentes las alteraciones antropogénicas.

Remanente de agua

Reserva o sobrante destinado para cierto consumo.

Tipificación

Clasificación en tipos o clases de un conjunto de cosas.

REFERENCIAS

- Aguilera, G., & Pouilly, M. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías, aplicación en la zona Andina. *Acta Zoologica Lilloana (Tucuman, Argentina)*, 56, 15–30.
- Ahmad, H. F., Alam, A., Bhat, M. S., & Ahmad, S. (2016). One Dimensional Steady Flow Analysis Using HECRAS – A case of River Jhelum, Jammu and Kashmir. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(32). Recuperado de <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/8400>
- Alonso-EguíaLis, P. E., Gómez-Balandra, M. A., & Saldaña-Fabela, M. del P. (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. Jiutepec, Morelos: IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat.
- Barrios, E., Sánchez, R., Salinas-Rodríguez, S., Rodríguez, J., González, I. D., Gomez, R., ... Reyes-González, J. (2011). *Guía para la determinación de caudal ecológico en México*. Alianza WWF–Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP, México. <https://doi.org/10.13140/2.1.4760.8967>
- Barrios Ordóñez, J. E., Salinas Rodríguez, S. A., Martínez, A., López Pérez, M., Villón Bracamonte, V., & Rosales Ángeles, F. (2015). *Programa Nacional de Reservas de Agua en México: experiencias de caudal ecológico y la asignación de agua al ambiente (Technical Notes)*. Inter-American Development Bank. Recuperado de <http://publications.iadb.org/handle/11319/7316>

Bautista-de-los-Santos, Q. M. (2014). Determinación de caudales ambientales en la cuenca del río Yuna, República Dominicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 33–40.

Callejas Fernández, M. A. (2012). Estudio del grado de alteración hidrológica intradiaria por operaciones de las centrales hidroeléctricas de embalse Ralco y Pangué del sistema interconectado central. *Repositorio Académico - Universidad de Chile*. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111255>

Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Printego.

Carroll, G., Reeves, K., Lee, R., & Cherry, S. (2004). Evaluation of potential hydropower sites throughout the United States. En *ESRI User Conference*. Citeseer.

Castellet, E. B., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 71–82.

Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y., & Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y Universidad*, 10(2).

CNA. NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. (2015).

Conallin, J., Wilson, E., & Campbell, J. (2017). Implementation of Environmental Flows for Intermittent River Systems: Adaptive Management and Stakeholder Participation Facilitate Implementation. *Environmental Management*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0922-4>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Cotler Avalos, H., Ríos, E., González-Mora, I., Pineda, R., & Galindo Alcántar, A. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.*

Datry, T., Larned, S. T., & Tockner, K. (2014). Intermittent Rivers: A Challenge for Freshwater Ecology. *BioScience*, 64(3), 229–235.
<https://doi.org/10.1093/biosci/bit027>

Delso, J., Magdaleno, F., & Fernández-Yuste, J. A. (2017). Flow patterns in temporary rivers: a methodological approach applied to southern Iberia. *Hydrological Sciences Journal*, 62(10), 1551–1563.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1346375>

Diario Oficial de la Federación. Ley de Aguas Nacionales (2016).

Díaz, J. M. (2015). Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en el sistema fluvial del río Carcarañá. Recuperado de
<https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1763>

Díez Hernández, J. M., & García Rivera, J. A. (2013). Aplicación IFIM para el estudio de caudales ecológicos del embalse de Ruesga (Palencia). *Congresos - CARGA FINAL*. Recuperado de
http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/14449

Döll, P., & Zhang, J. (2010). Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(5), 783–799. <https://doi.org/10.5194/hess-14-783-2010>

- Domínguez-Sánchez, T. A., Lomelí-Meza, J., Ibáñez-Castillo, L. A., & Gómez-Balandra, M. A. (2015). Determinación de caudal ecológico del río Mezcalapa en base a la norma mexicana NMX-AA-159- SCFI-2012 con consideraciones hidrológicas e hidráulicas. Querétaro, México.
- Duabily, Y. del C. A., & Méndez, C. E. C. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestión*, 3(1). Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/4333>
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D. J., Lévêque, C., ... Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 81(2), 163–182. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>
- Frey, G. W., & Linke, D. M. (2002). Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a reasonable way. *Energy Policy*, 30(14), 1261–1265. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00086-1)
- García Rivera, J. A. (2013). Análisis comparativo de modelos ecohidráulicos 1D y 2D para la evaluación de caudal ecológico. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es:80/handle/10324/4688>
- García Rodríguez, E., González Villela, R., Martínez Austria, P., Athala Molano, J., & Paz Soldán, G. (1999). *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México*. Comisión Nacional del

Agua, Subdirección General de Programación, Gerencia de Estudios para el Desarrollo Hidráulico Integral.

Gippel, C. J., Bond, N. R., James, C., & Wang, X. (2009). An Asset-based, Holistic, Environmental Flows Assessment Approach. *International Journal of Water Resources Development*, 25(2), 301–330.

<https://doi.org/10.1080/07900620902868737>

Gippel, C. J., Marsh, N., & Grice, T. (2012). "Flow Health: Software to Assess Deviation of River Flows from Reference and to Design a Monthly Environmental Flow Regime" Technical Manual and User Guide Version 2.0. International Water Centre.

Gippel, C. J., Zhang, J., Qu, X., Kong, W., Bond, N. R., & Liu, W. (2011). River health assessment in China: comparison and development of indicators of hydrological health. *Water Center*.

Gómez-Balandra, M. A., Saldaña-Fabela, M. del P., & Llerandi-Juárez, R. D. (2015). Environmental Approaches during Planning and Construction Stages of Hydropower Projects in Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 06(10), 1186. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610106>

Gómez-Balandra, M. A., Saldaña-Fabela, M. del P., & Martínez-Jiménez, M. (2014). The Mexican environmental flow standard: scope, application and implementation. *Journal of Environmental Protection*, 5(01), 71.

González Villela, R., & Banderas Tarabay, A. G. (2015). *Metodologías para el Cálculo de Caudales Ecológicos y Ambientales en Ríos Regulados por Presas*.

Guarniz Muñoz, G. (2014). *Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo*. Universidad Privada Antenor Orrego.

Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E. M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. L., & Avelar-González, F. J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(2), 89–102.

Hall, D. (2004). *Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources: Appendix C - Validation Study*. United States: (D. [Idaho N. Idaho National Engineering and Environmental Lab. <https://doi.org/10.2172/1218176>

Hernández, D., Manuel, J., & Obregón Neira, N. (2008). Multidimensional Ecohydraulic Evaluation of Aquatic Habitats in the Preservation of Fluvial Hydrosystems. *Ingeniería y Universidad*, 12(2), 301–323.

Hersh, E. S., & Maidment, D. R. (2006). *Assessment of hydrologic alteration software*. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.

IDEAM. (2015). *Estudio nacional del agua 2014*. IDEAM. Recuperado de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20541>

Kintz, J. R. C., Escobar, Y. C., & Heredia, L. M. C. (Eds.). (2009). *Caudal ambiental: Conceptos, experiencias y desafíos* (1a ed.). Universidad del Valle. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1rfsq72>

Koch, F. H. (2002). Hydropower—the politics of water and energy: Introduction and overview. *Energy Policy*, 30(14), 1207–1213.

[https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00081-2)

Leigh, C., Boulton, A. J., Courtwright, J. L., Fritz, K., May, C. L., Walker, R. H., & Datry, T. (2016). Ecological research and management of intermittent rivers: an historical review and future directions. *Freshwater Biology*, 61(8),

1181–1199. <https://doi.org/10.1111/fwb.12646>

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.

Linsley, R. K., Paulhus, J. L., & Kohler, M. A. (1982). *Hydrology for Engineers* (3 Sub edition). New York: McGraw-Hill Companies.

Lluén Chero, W. E. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Martin, J. L. (2014). *Hydro-Environmental Analysis: Freshwater Environments* (Edición: 1). Boca Raton: CRC Press.

Martínez Martínez, S. I. (2011). *Introducción a la Hidrología Superficial* (Segunda). Aguascalientes, México.

McCuen, R. H. (2016). *Hydrologic Analysis and Design* (4 edition). Boston: Pearson.

Mesa, D. J. (2009). Algunos atributos de los factores a favor y en contra en las técnicas y métodos utilizados para la estimación de Caudales Ambientales en Colombia. *Umbral Científico*, (15).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Migone, U. (2013). Metodología para la determinación del caudal ecológico en estuarios : aplicación en el estuario del Río Aysén. *Repositorio Académico - Universidad de Chile*. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115510>

Ministerio del Medio Ambiente. Reglamento de caudal mínimo (2013).
Recuperado de http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Reglamento_Caudal_Ecologico.pdf

Mohames, K., & Hamad, A. (2008). Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/846>

Monk, W. A., Wood, P. J., & Hannah, D. M. (2008). Examining the Influence of Flow Regime Variability on Instream Ecology. En P. J. W. S. Lecturer, D. M. H. S. Lecturer, & J. P. S. Reader (Eds.), *Hydroecology and Ecohydrology* (pp. 165–184). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9780470010198.ch10>

Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 3(1), 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2000). *Soil and water assessment tool user's manual* (Center at Texas Agricultural Experiment Station.). Texas, Estados Unidos.

Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. M. (2016).

Modelación Hidrodinámica del tramo Medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95–101.

Opperman, J. (2006). *Preliminary IHA Analysis for the Middle Fork Willamette*

River at Jasper OR. Recuperado de

<https://www.conservationgateway.org/Files/Pages/preliminary-iha-analysis.aspx>

Opperman, J. (2011). *Indicators of Hydrologic Alteration Analysis for the Patuca*

River. Recuperado de

<https://www.conservationgateway.org/Files/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>

Palau, A. (2003). *Régimen ambiental de caudales: estado del arte*. Universidad Internacional Menendez Pelayo.

Palma Raymundo, M. L. (2013). *Determinación del caudal ecológico : impacto*

económico en el usuario agrícola de la cuenca Río Yautepec, estado de Morelos. Colegio de Postgraduados (COLPOS). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10521/2208>

Pietrosemoli, L., & Rodríguez Monroy, C. (2013). The impact of sustainable

construction and knowledge management on sustainability goals. A review of the Venezuelan renewable energy sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 683–691.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.056>

Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., ...

Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>

Reyes-González, J., Barrios, E., Gómez, R., Rodríguez, A., González, ignacio,

Escobedo, H., ... Salinas-Rodríguez, S. (2009). *Propuesta de caudal ecológico en la cuenca del río San Pedro Mezquital en Marismas Nacionales y su consideración en el estudio de disponibilidad de aguas superficiales.*

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., & Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14(4), 329–340.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4<329::AID-RRR505>3.0.CO;2-E)

Richter, B. D., Mathews, R., Harrison, D. L., & Wigington, R. (2003). Ecologically Sustainable Water Management: Managing River Flows for Ecological Integrity. *Ecological Applications*, 13(1), 206–224.

[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)013\[0206:ESWMMR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2)

Rodríguez Torres, S. (2012). *Caracterización ambiental y determinación de caudal ecológico en la cuenca del Río Verde, Oaxaca.* Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Sadid, N., Haun, S., & Wieprecht, S. (2017). An overview of hydro-sedimentological characteristics of intermittent rivers in Kabul region of

Kabul river basin. *International Journal of River Basin Management*, 15(4), 387–399. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1321004>

Salinas-Rodríguez, S. (2011). *Guía para la determinación de caudal ecológico en México*. Alianza WWF–Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP, México. <https://doi.org/10.13140/2.1.4760.8967>

Sandoval Ramírez, C. (2016). *Diagnóstico del caudal ecológico requerido para la preservación y conservación de los ecosistemas en el arroyo de la hacienda en la ciudad de Aguascalientes*. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Santacruz de León, G. (2009). Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant.

Secretaría de Economía. NMX-AA-159-SCFI-2012, Pub. L. No.

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5269489&fecha=20/09/2012 (2012).

Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidraulica de Canales*. UNAM.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C.

(2006). Livestock's long shadow. Recuperado de

<http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM>

Suárez, A., Isael, B., Cevallos, M., & Nicolás, L. (2017). Análisis de NDVI

contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos en etapa previa a pastoreo. Recuperado de

<http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/13158>

Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10.

[https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6), 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>

The Nature Conservancy. (2011). Manual de Usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica Versión 7.1 Nature.

Tilt, B., Braun, Y., & He, D. (2009). Social impacts of large dam projects: A comparison of international case studies and implications for best practice. *Journal of Environmental Management*, 90, S249–S257. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.030>

Vélez Flórez, A. J. (2009). *Propuesta metodológica para la evaluación y cuantificación de la alteración del régimen de caudales de corrientes alteradas antrópicamente, caso Urrá I*. Universidad Nacional de Colombia.

Villanueva Uré, V., & Alata Rey, J. E. (2011). *Análisis y propuesta de una metodología para la determinación del caudal ecológico en centrales hidroeléctricas del Perú, aplicación a un caso típico*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/580>

Ward, & Tockner. (2001). Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology.

Freshwater Biology, 46(6), 807–819. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00713.x>

Wood, P. J., Hannah, D. M., & Sadler, J. P. (2008). Ecohydrology and

Hydroecology: An Introduction. En P. J. W. S. Lecturer, D. M. H. S. Lecturer,

& J. P. S. Reader (Eds.), *Hydroecology and Ecohydrology* (pp. 1–6). John

Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470010198.ch1>



ANEXOS

Anexo 1. Parámetros IHA

Grupo de parámetros IHA	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	<p>Valor de la media o la mediana para cada mes calendario</p> <hr/> <p>Subtotal: 12 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos. • Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas. • Disponibilidad de agua para los animales terrestres. • Disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos con pelo. • Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres. • Acceso de depredadores a sitios de anidación. • Influye en la temperatura del agua, niveles de oxígeno y fotosíntesis en la columna del agua.
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	<p>Mínimos anuales, media de 1 día</p> <p>Mínimos anuales, media de 3 días</p> <p>Mínimos anuales, media de 7 días</p> <p>Mínimos anuales, media de 30 días</p> <p>Mínimos anuales, media de 90 días</p> <p>Máximos anuales, media de 1 día</p> <p>Máximos anuales, media de 3 días</p> <p>Máximos anuales, media de 7 días</p> <p>Máximos anuales, media de 30 días</p> <p>Máximos anuales, media de 90 días</p> <p>Cantidad de días con caudal cero</p> <p>Índice de flujo de base de caudal mínimo de 7 días caudal medio anual</p> <hr/> <p>Subtotal: 12 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Equilibrio de organismos competitivos, ruderales y tolerantes a las presiones. • Creación de sitios para la colonización de plantas. • Estructuración de los ecosistemas acuáticos por factores abióticos vs bióticos. • Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat. • Estrés de la humedad del suelo en las plantas. • Deshidratación en los animales. • Estrés anaeróbico en las plantas. • Volumen de intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación. • Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos. • Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación.

<p>3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales</p>	<p>Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día</p> <p>Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día</p> <hr/> <p>Subtotal: 2 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidad con los ciclos de la vida de los organismos. • Predictibilidad del estrés en los organismos. • Acceso a hábitats especiales durante la reproducción. • Indicios para el desove de los peces migratorios. • Mecanismos de comportamiento de ciclos biológicos.
<p>4. Frecuencia y duración de los puntos altos y bajos</p>	<p>Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico</p> <p>Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días)</p> <p>Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico</p> <p>Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)</p> <hr/> <p>Subtotal: 4 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas • Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos • Intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación • Disponibilidad de minerales del suelo • Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas • Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos)
<p>5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas</p>	<p>Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos</p> <p>Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos</p> <p>Cantidad de inversiones hidrológicas</p> <hr/> <p>Subtotal: 3 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes) • Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes) • Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente
<p>Total: 33 parámetros</p>		

Fuente: (The Nature Conservancy, 2011)

Anexo 2. Parámetros EFC

Tipos de EFC	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
<p>1. Caudales bajos mensuales</p>	<p>Valor de la media o la mediana para cada mes calendario</p> <hr/> <p>Subtotal: 12 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionan hábitat adecuado para los organismos acuáticos • Mantienen temperaturas del agua, oxígeno disuelto y química del agua apropiados • Mantienen el nivel freático en las planicies de inundación, y la humedad del suelo para las plantas • Proporcionan agua potable para los animales terrestres • Mantienen los huevos de peces y anfibios en suspensión • Permiten a los peces moverse a áreas de alimentación y desove
<p>2. Caudales extremadamente bajos</p>	<p>Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación</p> <p>Valores de la media o la mediana de eventos de caudal extremadamente bajo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duración (días) • Pico del caudal (caudal mínimo durante el evento) • Momento (fecha juliana del pico del caudal) <hr/> <p>Subtotal: 4 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permiten el reclutamiento de ciertas especies de plantas en las planicies de inundación • Eliminan especies invasoras introducidas de las comunidades acuáticas y riparias • Concentran las presas en áreas limitadas para beneficiar a los depredadores
<p>3. Pulsos de caudal alto</p>	<p>Frecuencia de los pulsos de caudal alto durante cada año hidrológico o estación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valores de la media o la mediana de eventos de pulso de caudal alto: • Duración (días) • Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) • Momento (fecha juliana del pico del caudal) • Tasas de crecimiento y decrecimiento <hr/> <p>Subtotal: 6 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modelan las características físicas del cauce del río, incluidos remansos y rápidos • Determinan el tamaño de los sustratos del lecho de las corrientes • Impiden la invasión de vegetación riparia en el cauce • Restauran las condiciones de calidad normal del agua después de caudales bajos prolongados, arrastrando productos de desechos y contaminantes • Airean los huevos en gravillas de desove, impiden la sedimentación • Mantienen condiciones adecuadas de salinidad en los estuarios

<p>4. Inundaciones pequeñas</p>	<p>Frecuencia de las pequeñas inundaciones durante cada año hidrológico o estación</p> <p>Valores de la media o la mediana de eventos de pequeñas inundaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duración (días) • Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) • Momento (fecha juliana del pico del caudal) • Tasas de crecimiento y decrecimiento <hr/> <p>Subtotal: 6 parámetros</p>	<p>Se aplica a pequeñas y grandes inundaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proporcionan indicios de migración y desove a los peces • Provocan una nueva fase en el ciclo biológico (por ej., insectos) • Permiten que los peces desoven en las planicies de inundación. • Proporcionan nuevas oportunidades de alimentación a los peces y aves acuáticas • Recargan el nivel freático de las planicies de inundación • Mantienen la diversidad de los tipos de bosque en las planicies de inundación mediante inundaciones prolongadas (es decir, diferentes especies de plantas tienen tolerancias diferentes) • Controlan la distribución y la abundancia de las plantas en las planicies de inundación • Depositán nutrientes en las planicies de inundación
<p>5. Grandes inundaciones</p>	<p>Frecuencia de las grandes inundaciones durante cada año hidrológico o estación</p> <p>Valores de la media o la mediana de eventos de grandes inundaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duración (días) • Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) • Momento (fecha juliana del pico del caudal) • Tasas de crecimiento y decrecimiento <hr/> <p>Subtotal: 6 parámetros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mantienen el balance de especies en las comunidades acuáticas y riparias • Crean sitios para el reclutamiento de plantas colonizadoras • Dan forma a los hábitats físicos de las planicies de inundación • Depositán grava y piedras en las áreas de desove • Empujan material orgánico (alimentos) y desechos de madera (estructuras de hábitat) al cauce • Eliminan especies invasoras e introducidas en las comunidades acuáticas y riparias • Esparcen semillas y frutas de plantas riparias • Impulsan movimientos laterales del cauce del río, formando nuevos hábitats (cauces secundarios, meandros abandonados) • Proporcionan a las plántulas acceso prolongado a la humedad del suelo
<p>Total: 34 parámetros</p>		

Fuente: (The Nature Conservancy, 2011)

Anexo 3. Serie de gastos mensuales (m³/s)

Año \ Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1979	0.091	0.005	0.225	0.278	0.000	0.000	0.104	0.966	0.089	0.147	0.147	0.135
1980	0.000	0.158	0.278	0.170	0.007	0.043	0.018	0.026	1.211	0.096	0.127	0.125
1981	0.011	0.248	0.294	0.001	0.259	0.001	0.000	0.181	2.648	0.036	0.127	0.067
1982	0.000	0.000	0.294	0.051	0.009	0.046	0.000	0.278	0.010	0.003	0.000	0.000
1983	0.099	0.000	0.000	0.000	0.000	0.874	0.323	0.002	0.000	0.072	0.194	0.000
1984	0.099	0.242	0.000	0.000	0.002	0.002	0.493	0.001	0.002	0.189	0.278	0.248
1985	0.263	0.311	0.000	0.099	0.087	0.002	0.046	0.220	0.038	0.001	0.317	0.002
1986	0.000	0.117	0.000	0.000	0.147	0.085	0.645	0.009	0.013	0.037	0.091	0.000
1988	0.000	0.000	0.137	0.147	0.000	1.504	0.662	0.005	0.248	0.000	0.000	0.000
1989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.134	0.006	0.015	0.225	0.005	0.028	0.002
1990	0.091	0.091	0.000	0.137	0.117	0.055	0.807	0.141	0.005	0.012	0.000	0.000
1991	0.000	0.147	0.000	0.000	0.000	0.056	1.040	0.001	0.000	0.003	0.000	0.033
1992	0.000	0.170	0.123	0.091	0.006	0.280	0.000	0.259	0.061	0.111	0.181	0.186
1993	0.001	0.000	0.000	0.207	0.220	0.014	0.049	0.037	0.009	0.091	0.170	0.000
1994	0.001	0.000	0.000	0.020	0.127	0.046	0.037	0.091	0.015	0.000	0.000	0.127
1995	0.248	0.170	0.000	0.000	0.091	0.546	0.183	0.201	0.037	0.000	0.009	0.000
1996	0.000	0.294	0.000	0.263	0.038	0.014	0.099	0.005	0.334	0.000	0.328	0.000
1997	0.248	0.000	0.207	0.014	0.075	0.055	0.061	0.004	0.038	0.020	0.127	0.000
1998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.068	0.051	0.007	0.003	0.043	0.000	0.000
1999	0.000	0.000	0.294	0.000	0.311	0.024	0.000	0.081	0.397	0.207	0.000	0.000
2000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.037	0.005	0.001	0.220	0.000	0.049
2001	0.000	0.194	0.003	0.083	0.248	0.001	0.006	0.014	0.021	0.049	0.294	0.335
2002	0.061	0.061	0.000	0.000	0.014	0.546	0.056	0.546	0.021	0.091	0.037	0.000
2003	0.248	0.311	0.000	0.000	0.028	0.442	1.668	0.003	0.009	0.091	0.000	0.000
2004	0.000	0.000	0.091	0.000	0.002	0.417	0.323	0.718	0.021	0.234	0.294	0.000
2005	0.000	0.003	0.127	0.000	0.091	0.779	0.119	0.417	0.020	0.220	0.000	0.248
2006	0.248	0.000	0.000	0.000	0.091	0.006	0.442	0.005	0.020	0.323	0.000	0.005
2007	0.061	0.061	0.000	0.028	0.002	0.261	0.183	0.033	0.000	0.108	0.311	0.311
2008	0.000	0.000	0.000	0.068	0.311	0.004	0.085	0.166	0.021	0.000	0.000	0.000
2009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.248	0.055	0.041	0.078	0.003	0.004	0.038	0.117
2010	0.017	0.442	0.000	0.263	0.278	0.009	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
2011	0.000	0.000	0.000	0.311	0.000	0.005	0.127	0.099	0.005	0.075	0.000	0.000
2012	0.075	0.009	0.000	0.000	0.000	0.067	0.032	0.072	0.104	0.127	0.294	0.006
2013	0.147	0.000	0.000	0.000	0.000	0.091	0.826	0.002	0.012	0.028	0.002	0.000

Anexo 4. Memoria fotográfica de las visitas en campo del arroyo "La Yerbabuena"





Inundación en el bordo Sandoval



Tipificación de flora y fauna



Marca del NAMO en tramo aledaño a la localidad de San Angelo



Alteración del cauce por la presencia de infraestructura