



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**Evaluación del caudal ecológico:  
comparación de metodologías**

**TESINA**

Que para obtener el:

**Grado de especialista**

en

**Hidráulica**

**P R E S E N T A**

Ing. Ilse Rosas Lindero

**DIRECTOR DE TESINA**

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



**Este trabajo (Tesina de Especialidad No. 05) fue desarrollado dentro del Grupo de Enseñanza e Investigación en Ingeniería y Ciencias del Agua (GEIICA). Además de la presente, el asesor ha dirigido 15 tesis de Licenciatura y 6 de Maestría.**

**GEIICA está formado por estudiantes de Servicio Social, tesis de Licenciatura, Especialidad, Maestría y Doctorado y profesores-investigadores del Departamento de Hidráulica, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, quienes comparten el gusto por la enseñanza en las asignaturas que imparten a nivel Licenciatura y Posgrado, la práctica profesional para solventar problemáticas de la mejor manera, desarrollar e impulsar la investigación en el área de la ingeniería y ciencias del agua.**





## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar distintos métodos para evaluar el caudal ecológico en un río “natural” (Río Piaxtla) y otro con alteraciones antropogénicas (Río Culiacán). En la corriente alterada, que cuenta con grandes presas, se desea verificar si aguas abajo de las mismas se cumple con el caudal ecológico, mientras que en la cuenca natural se busca mantener una referencia base que permita entender el funcionamiento del ecosistema, que sirva como modelo para comprender los efectos de las alteraciones en otras cuencas.

Para evaluar el caudal ecológico, en primer lugar, se partió de los registros de las estaciones hidrométricas más representativas de las cuencas, sus características principales y modelos digitales de elevación. Enseguida, se aplicaron distintas metodologías de caudal ecológico, entre ellos los métodos hidrológicos establecidos en la norma oficial NMX-AA-159-SCFI-2012, esto es, los apéndices B y C, un método hidráulico, específicamente el de perímetro mojado, utilizando los programas Hydrocalc y Hec-Ras y un método de simulación de hábitat, el modelo de hábitat en IBER.

Los resultados obtenidos muestran que la cuenca del Río Culiacán se encuentra alterada hidrológicamente, aunque cumple con los caudales ecológicos establecidos. El uso de distintos métodos para determinar el caudal ecológico ofrece una visión completa y detallada sobre el comportamiento del ecosistema, esto permite desarrollar estrategias para la gestión mejor informada, integrando la perspectiva hidrológica, hidráulica y ecológica. En contraste, la cuenca del Río Piaxtla no presenta alteraciones en su régimen hidrológico.

**PALABRAS CLAVES:** Caudal ecológico, simulación de hábitat, ecosistemas acuáticos



## Agradecimientos

*Infinitas gracias*

*A mis padres por creer en mí y darme el apoyo en cada paso de mi vida. Los amo.*

*A mis hermanos por el ánimo y ser lo más importante. Agradezco mucho el tener con quien compartir todos los momentos de mi vida.*

*Al Dr. José Luis Aragón por su mentoría, paciencia y dedicación. Su guía ha sido muy importante en este proceso.*

*Al grupo de investigación GEIICA por el apoyo a lo largo de la realización de este trabajo, en especial a Luis Hernández y Adrián Martínez.*

*A mis sinodales Dra. Adriana Palma Nava, Dr. Diego Pedrozo Acuña, Dr. José Roberto Ávila Carrasco, M.I. Liliana Aguilar Yáñez por sus observaciones y recomendaciones en este trabajo.*

*Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACYT) por la beca recibida.*





**ÍNDICE**

<b>Introducción</b> .....	1
Planteamiento del problema .....	1
Justificación.....	2
Objetivo.....	2
Objetivos específicos .....	2
Descripción del trabajo.....	2
<b>I. Marco teórico</b> .....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Generalidades.....	6
1.3 Desarrollo sostenible.....	8
1.4 Caudal ecológico.....	9
1.4.1 Métodos de caudal ecológico .....	10
1.4.1.1 Métodos hidrológicos .....	11
1.4.1.2 Métodos hidráulicos .....	15
1.4.1.3 Simulación de hábitat .....	16
1.4.1.4 Métodos holísticos.....	18
1.5 Consecuencias de la alteración del régimen de flujo .....	19
<b>II. Zona de estudio</b> .....	21
2.1 Localización .....	21
2.2 Características generales .....	24
2.2.1 Clima .....	26
2.2.3 Uso de suelo y vegetación.....	28
2.3 Información hidrométrica .....	30
2.4 Información hidráulica.....	32
2.5 Usos del agua.....	34
2.6 Especies .....	37
<b>III. Metodología</b> .....	41
3.1 Series de tiempo de caudales medios: diarios, mensuales y anuales.....	41
3.2 Evaluación del caudal ecológico .....	44
3.2.1 Métodos hidrológicos .....	45

3.2.2. Método hidráulico .....	54
3.2.2. Método Simulación del Hábitat.....	59
3.3 Análisis de resultados .....	62
<b>IV. Conclusiones .....</b>	<b>67</b>
V. Referencias.....	69
<b>Anexos .....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1</i> Ciclo hidrológico (USGS, 2019)	7
<i>Ilustración 2</i> Representación de una cuenca exorreica	7
<i>Ilustración 3</i> Clasificación y algunas metodologías para el cálculo de caudales ecológicos (Morales, 2023)	11
<i>Ilustración 4</i> Procedimiento para el apéndice B	13
<i>Ilustración 5</i> Procedimiento para el apéndice C	14
<i>Ilustración 6</i> Aplicación del método hidráulico: perímetro mojado	16
<i>Ilustración 7</i> Herramienta simulación de hábitat en Iber	17
<i>Ilustración 8</i> Datos de entrada en el módulo de simulación de hábitat	18
<i>Ilustración 9</i> Representación de las curvas de idoneidad (Cardona, 2012)	18
<i>Ilustración 10</i> Comparación del estado natural y alterado del ecosistema en los ríos. Adaptado de Calvo (2008). y Richter et al. (2003)	19
<i>Ilustración 11</i> Localización de la zona de estudio, cuenca del río Culiacán.	21
<i>Ilustración 12</i> Municipios de la cuenca del Río Culiacán	22
<i>Ilustración 13</i> Localización de la zona de estudio, cuenca del Río Piaxtla	23
<i>Ilustración 14</i> Municipios de la cuenca del Río Piaxtla	24
<i>Ilustración 15</i> Elevación del terreno en la cuenca del Río Culiacán	25
<i>Ilustración 16</i> Elevación del terreno en la cuenca del Río Piaxtla	26
<i>Ilustración 17</i> Climas en la cuenca del Río Culiacán (arriba) y cuenca del Río Piaxtla (abajo)	27
<i>Ilustración 18</i> Uso de suelo y vegetación en la cuenca del Río Culiacán (arriba) y cuenca del Río Piaxtla (abajo)	29
<i>Ilustración 19</i> Estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Culiacán y cuenca del Río Piaxtla	31
<i>Ilustración 20</i> Derivadora Piaxtla (CONAGUA, 2024)	32
<i>Ilustración 21</i> Presas clasificadas por altura de la cortina (arriba) y volumen del embalse (abajo) en la cuenca del Río Culiacán	33
<i>Ilustración 22</i> Presas clasificadas por tamaño de la cortina en la cuenca del Río Piaxtla	34
<i>Ilustración 23</i> <i>Xenotoca melanosoma</i> (izquierda) y <i>Ictalurus pricei</i> (derecha) (CONABIO, 2024)	38
<i>Ilustración 24</i> <i>Poeciliopsis latidens</i> y <i>Tilapia mossambica</i> (Amador, 2024; CONABIO, 2024)	38
<i>Ilustración 25</i> Condición de las especies de peces en la cuenca Río Culiacán (arriba) y cuenca del Río Piaxtla (abajo)	39
<i>Ilustración 26</i> HydroCalc: ingreso de datos (izquierda) y resultados (derecha) en la EH Puente Sudpacífico (arriba) y EH Ixpalino (abajo)	55
<i>Ilustración 27</i> Modelo Digital de Elevación y geometría en el tramo de cauce del Río Piaxtla (izquierda) y Río Culiacán (derecha)	57
<i>Ilustración 28</i> Sección transversal en la EH 10018 Puente Sudpacífico (arriba) y 10065 Ixpalino (abajo)	58
<i>Ilustración 29</i> MDT y malla para el tramo de estudio en el Río Culiacán	60
<i>Ilustración 30</i> Parámetros ingresados en Iber hábitat	60
<i>Ilustración 31</i> Mapas de máxima idoneidad en el tramo de la EH 10018 Sudpacífico(izquierda) y EH 10065 Ixpalino(derecha)	62
<i>Ilustración 32</i> Campo de tirantes y velocidades en el tramo de la RH 10018 Sudpacífico	64

*Ilustración 33* Mapa de idoneidad para la velocidad (izquierda) y tirante (derecha) en el estadio juvenil de la especie, en el tramo de la RH 10018 Sudpacífico \_\_\_\_\_ 65

*Ilustración 34* Mapa de idoneidad para el tirante (arriba) y la velocidad (abajo) de la especie, en el tramo de la RH 10065 Ixpalino \_\_\_\_\_ 66

*Ilustración 35* Río Culiacán (izquierda) y Río Piaxtla (derecha) \_\_\_\_\_ 74

## Introducción

En nuestro planeta, el agua sigue un proceso cíclico y continuo a través de distintas etapas, proceso conocido como ciclo hidrológico; el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) lo describe de la siguiente forma (USGS, 2019): El agua se mueve entre la atmósfera y la superficie terrestre a través de la evaporación, la evapotranspiración y la precipitación. El agua se mueve a través de la superficie, el deshielo, la escorrentía y el flujo de los ríos. El agua se mueve hacia el subsuelo a través de la infiltración y da lugar al agua subterránea. Bajo tierra, el agua subterránea fluye dentro de los acuíferos. Puede regresar a la superficie a través de la descarga natural de agua subterránea a los ríos, océano y de los manantiales.

Los ríos son parte importante del ciclo hidrológico, actúan como corredores naturales transportando agua desde las partes más altas hasta las zonas más bajas, hasta llegar a una desembocadura en el mar; así cumplen su función de garantizar el suministro de agua a las comunidades y ecosistemas.

En México, muchos ríos se encuentran alterados tanto en la calidad como en la cantidad de agua, esto significa que exista una gran preocupación para conservar y gestionar este recurso. La alteración está estrechamente relacionada con la sobreexplotación para uso humano, la deforestación de la cuenca, los cambios en el uso del suelo y los efectos del cambio climático, que pueden provocar una disminución significativa de los caudales. Abordar estos problemas es importante para preservar la salud de los ecosistemas acuáticos y asegurar el suministro de agua para las personas.

Es relevante mencionar que las alteraciones del flujo natural con la construcción de presas y embalses son modificaciones que pueden afectar negativamente el flujo del río, por lo tanto, es importante encontrar el equilibrio entre la preservación del medio ambiente y garantizar a las comunidades el acceso al agua. Una forma de garantizar la preservación del hábitat acuático es por medio de los caudales ecológicos, refiriéndose principalmente a la cantidad y calidad de agua en un río para asegurar su adecuado funcionamiento.

En el presente trabajo de tesina se abordará la teoría relacionada con el caudal ecológico y se realizará la evaluación de estos en cuencas con régimen del flujo natural y alterado; la comparación de los mismos permitirá comprender cómo estas modificaciones afectan la cantidad y calidad de agua disponible en los ecosistemas acuáticos, resaltando la importancia de conservar los caudales adecuados para preservar el hábitat y garantizar su funcionamiento.

### Planteamiento del problema

La construcción de infraestructura hidráulica ha sido responsable de una marcada disminución en el flujo de agua de los ríos y ha alterado el régimen de caudales líquidos y sólidos, provocando un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos. Aunque se reconoce

la posibilidad de mitigar estos efectos adversos para reducir los riesgos asociados, es crucial determinar y establecer el caudal ecológico como medida para cuantificar la cantidad de agua que puede emplearse para satisfacer las necesidades económicas sin comprometer la integridad de los ecosistemas. Es importante investigar como el caudal ecológico puede ser aplicado en la operación de obras hidráulicas, para medir el impacto que la infraestructura tiene en los ríos y tener medidas de protección adecuadas.

## Justificación

La evaluación del caudal ecológico es de gran importancia para una gestión del agua, que promueva la preservación de los ecosistemas acuáticos en un enfoque sostenible. Mediante este tipo de evaluaciones, se pueden tomar decisiones informadas y equilibrar las necesidades de los seres humanos y ambientales. En los ríos, existe una gran diversidad de flora y fauna, pero desafortunadamente muchas de las especies están en riesgo debido a la contaminación del agua y la degradación de sus hábitats. Los caudales ecológicos son una herramienta importante para identificar la cantidad y calidad necesaria del agua y asegurar la preservación de la biodiversidad. Este tipo de evaluaciones deben ofrecer un análisis integral de los desafíos relacionados con el agua y facilitan el desarrollo de soluciones efectivas.

## Objetivo

Evaluar el caudal ecológico con distintos métodos en ríos naturales y con alteraciones antropogénicas.

## Objetivos específicos

- Emplear métodos hidrológicos, hidráulicos y de simulación del hábitat para la evaluación de caudales ecológicos.
- Realizar una comparación de los resultados obtenidos.

## Descripción del trabajo

La presente tesina consta de IV capítulos. En el capítulo I Marco teórico, se presentan algunos antecedentes históricos de los caudales ecológicos, la evolución a lo largo del tiempo y su importancia en la conservación del ecosistema acuático. Después, se explica detalladamente los métodos utilizados para determinar el caudal ecológico en cualquier zona de estudio, proporcionando una base sólida para comprender la relevancia de la preservación y el desarrollo sostenible.

En el capítulo II Zona de estudio, se describen las características de las cuencas bajo análisis, la cuenca del Río Culiacán, en la cual se encuentra varias presas y, por otro lado, la cuenca del Río Piaxtla, que se mantiene en su estado casi natural. Se detallan su ubicación, algunas características fisiográficas (como área, perímetro, pendiente, etc.) y algunas condiciones ecológicas.

En el capítulo III Metodología, se presenta el análisis de las series de tiempo obtenidas para las estaciones hidrométricas, analizando los caudales medios diarios, mensuales y anuales.

Para determinar el caudal ecológico se aplicaron diferentes métodos: métodos hidrológicos basados en la norma oficial NMX-AA-159-SCFI-2012, el método hidráulico de perímetro mojado y simulación de hábitat.

Finalmente, en el capítulo IV Conclusiones, se presenta la discusión de los resultados procesados permitiendo evaluar el cumplimiento del caudal ecológico en la cuenca alterada y no alterada, aportando un enfoque integral para ayudar a comprender la relación que existe entre los caudales ecológicos y la gestión sostenible.





## I. Marco teórico

En este capítulo, se abordan aspectos teóricos fundamentales para comprender la evaluación de los caudales ecológicos, comenzando con una explicación de los antecedentes del tema, explorando sus orígenes y desarrollo a lo largo del tiempo. A continuación, se presenta una definición clara del caudal ecológico, resaltando la importancia de la conservación. También se describen detalladamente los métodos utilizados para obtener y calcular el caudal ecológico, ofreciendo una visión completa de estas técnicas. Con esta información, se busca proporcionar una base sólida para comprender lo importante que es evaluar caudales ecológicos y la relevancia de la gestión del agua.

### 1.1 Antecedentes

La evolución histórica del caudal ecológico se remonta a los años 40 en Estados Unidos, cuando se empieza a reconocer la importancia de mantener el estado natural de los ríos para preservar la biodiversidad y procesos ecológicos. Sin embargo, es en los años 70 cuando se da un notable avance en el conocimiento sobre este tema, coincidiendo con el desarrollo de normativas ambientales relacionadas con la protección de los cuerpos de agua. Durante esta época, también se comienzan a desarrollar diversas metodologías para determinar y aplicar caudales ecológicos, sentando las bases para su incorporación en la gestión y planificación de los recursos hídricos.

En países como Australia, Inglaterra, Nueva Zelanda y Sudáfrica, se iniciaron estudios centrados en la conservación del hábitat acuático, de importancia para el comercio con valoraciones cuantitativas del caudal. Con el tiempo, estas investigaciones se ampliaron para abarcar la preservación de otras comunidades biológicas, con el objetivo de mantener la integridad del ecosistema en su conjunto.

Tharme (2003) señala que en la actualidad existen aproximadamente 207 metodologías de caudal ambiental registradas en 44 países, distribuidos en 6 regiones del mundo. Entre estos países, Estados Unidos lidera con el desarrollo y aplicación del 37% de estas metodologías. Con el transcurso del tiempo, el concepto de caudal ecológico ha ido evolucionando, y con él, las metodologías utilizadas. Se han desarrollado diversas categorías para diferenciarlas, como las metodologías hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat y holísticas, cada una representando un enfoque distinto. A nivel global, las metodologías hidrológicas son las más aplicadas, con un 30% de representatividad.

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México se posiciona como un líder en el diseño de políticas públicas en América Latina en temas del caudal ecológico y reservas de agua para la protección ecológica. Un ejemplo de ello es que el país cuenta con un marco legal donde establece procedimientos para la determinación del caudal ecológico en las cuencas, publicada en el año 2012 con la

participación de instituciones como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Ecología (INE), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y World Wildlife Fund, Inc. Programa México (WWF México), entre otras. Con ello, el país ha establecido las bases que establecen los términos y condiciones para la determinación de caudales ambientales en ríos.

Además, en los últimos años se ha incrementado la conciencia ambiental debido a la preocupación del cambio climático y los impactos negativos en temas de alteración hidrológica.

En esta línea de trabajo, González (2015) detalla diversas metodologías para la evaluación de caudales ambientales regulados por presas; aborda la importancia del caudal ambiental, explicando los principios básicos y consecuencias ecológicas de la alteración de los regímenes de caudales ambientales. Dentro de las metodologías presentadas para el cálculo de gastos ambientales, se destaca el método de Tennant, la metodología IHA (*Indicators of Hydrologic Alteration*) y en conjunto con el método del perímetro mojado dan lugar al hidroperiodo. Además, explora la evaluación del hábitat, para comprender la interacción entre las variables que determinan el hábitat y las necesidades para preservar la vida de las especies; se necesitan muestreos para evaluar los cambios estacionales a cada cierta distancia de la zona de estudio. Finalmente, destaca que los enfoques holísticos consideran requerimientos múltiples en los componentes del ecosistema, enfocándose en la integración de datos para obtener una comprensión completa y más precisa de la dinámica ambiental.

## 1.2 Generalidades

Antes de adentrar en la evaluación del caudal ecológico, es importante establecer una base de conceptos clave relacionados con la hidrología. La hidrología es fundamental, pues se encarga de estudiar el ciclo del agua en el planeta, comprendiendo sus diversos procesos y componentes clave, la evaporación, la traspiración, la precipitación, la infiltración y el escurrimiento (Ilustración 1). Este último consiste en el movimiento del agua que circula sobre la superficie o debajo de ella (Aparicio, 1989); este proceso se clasifica en escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

Las cuencas hidrográficas forman un papel fundamental en el ciclo hidrológico, ya que recolectan, almacenan y distribuyen agua y funcionan como unidades naturales de drenaje (Ilustración 2). Una cuenca hidrográfica se compone de tres partes: la zona alta o de captación, pertenece a la zona montañosa, la zona media o de almacenamiento tiene la función de unir las aguas del área montañosa en un río principal y por último la zona baja o de descarga que cumple la función de desembocar el agua a un río mayor o en el mar (Ilustración 2).

Las cuencas se clasifican en tres tipos:

- Exorreicas (abiertas); el río principal vierte el agua hacia el mar.
- Endorreicas (cerradas); no tiene salida, normalmente forma un lago.
- Arreicas: todo lo que escurre, se infiltra, no tiene salida a ningún cuerpo de agua.

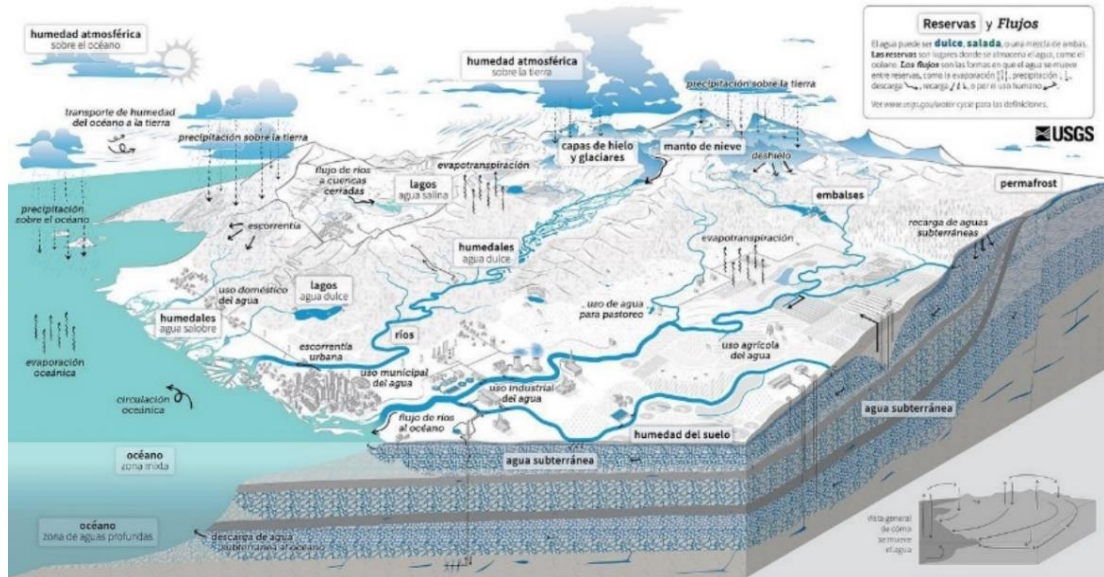


Ilustración 1 Ciclo hidrológico (USGS, 2019)

Las cuencas se delimitan por un parteaguas, y el escurrimiento superficial es transportado por su red de drenaje; a esta cantidad de agua que fluye en un cierto tiempo es conocido como caudal. La red de drenaje es el sistema de cauces por los que escurre el agua de manera temporal o permanente (Martínez, 2017).



Ilustración 2 Representación de una cuenca exorreica

Para medir y cuantificar el caudal en un río, se utilizan sitios de monitoreo conocidos como estaciones hidrométricas. Estas estaciones están equipadas con reglas graduadas colocadas escalonadamente; que en el caso de los ríos permiten estimar la cantidad de agua que

transporta. Personal capacitado registra los niveles de agua en horas ya preestablecidas (CONAGUA, 2017).

México cuenta con un total de 2,070 de estaciones hidrométricas distribuidas en diferentes cuerpos de agua. La información recopilada por estas estaciones está disponible para consulta digital en el catálogo del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS), creado en colaboración entre la CONAGUA e IMTA (CONAGUA, 2016).

Los datos recopilados en las estaciones hidrométricas son importantes para el monitoreo y gestión adecuada de los recursos hídricos. Esta información proporciona las bases para tomar decisiones informadas en la conservación de la biodiversidad.

En el presente trabajo, se emplearán los datos obtenidos de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio, con el objetivo de tomar decisiones informadas y mejorar la gestión del recurso hídrico. Estos datos son fundamentales para comprender la dinámica del agua en la zona y permiten desarrollar estrategias efectivas para lograr preservar los ecosistemas acuáticos y garantizar un uso sostenible del recurso hídrico.

### 1.3 Desarrollo sostenible

El estudio de las cuencas permite identificar los impactos en las mismas a través del cambio de régimen de precipitación, temperatura y escurrimientos, ocasionados por las actividades humanas que posteriormente afectan los ecosistemas y la calidad de los seres vivos.

Es importante comprender que las actividades humanas tienen un impacto significativo en los ecosistemas, generando graves consecuencias debido a la contaminación, el crecimiento urbano, la agricultura y la construcción de infraestructura hidráulica, como presas y embalses. Estas acciones han llevado a consecuencias considerablemente dañinas en los caudales de los ríos. Es por ello, a fines de los años setenta, surgió la necesidad del desarrollo sostenible, con el fin de tener un desarrollo económico y preservación del medio ambiente (Bergh y Joroen, 1996; Gallopín, 2015)

El concepto de desarrollo sostenible es aquel que permite satisfacer las necesidades humanas, sin comprometer las necesidades futuras (Gallopín, 2015). Se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos (SEMARNAT, 2018). Para que un sistema sea sostenible se necesitan de algunas características fundamentales como la disponibilidad de recursos; adaptabilidad y flexibilidad; estabilidad y resiliencia, refiriéndose a la capacidad del sistema de mantener o preservar los recursos; capacidad de respuesta, es decir, la adaptabilidad que tiene el sistema frente a los cambios.

Actualmente existe un marco legal y normativo que busca la gestión sostenible de los recursos hídricos en México, como la Ley de Aguas Nacionales que tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución, así como la

preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sostenible (PROFEPA, 2016)

Existen otros instrumentos para la gestión de recursos hídricos en el país como las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) que establecen criterios y estándares relacionados con el uso y calidad del agua con el objetivo de conservar los ecosistemas.

## 1.4 Caudal ecológico

El concepto de caudal ecológico o también conocido como caudal ambiental hace énfasis en la importancia de mantener los flujos de agua adecuados para preservar los ecosistemas acuáticos, así como garantizar el funcionamiento adecuado de sus procesos hidrológicos. A lo largo del tiempo, el concepto de caudal ecológico ha experimentado una evolución significativa; el enfoque tradicional se basa en garantizar volúmenes mínimos de agua para los ecosistemas. Actualmente el caudal ecológico tiene una visión integral, ya que destaca la necesidad de considerar múltiples factores, como la calidad del agua, la conectividad de los hábitats y las necesidades de las diferentes especies, para lograr una gestión sostenible del agua en beneficio de los ecosistemas (Morales, 2023).

El Fondo mundial para la naturaleza (WWF) menciona que el caudal ecológico en los ríos y humedales es un instrumento de gestión, permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012; WWF, 2010).

Por otra parte, UICN Dyson (2003), define al caudal ambiental como el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay empleos del agua que compiten entre sí, donde los caudales están reglados. Los recursos hídricos deben gestionarse para proporcionar caudales ambientales. El caudal se puede regular mediante infraestructura hidráulica o con el desvío de agua fuera del sistema. Existen distintas formas para proporcionar caudales ambientales, como modificación de infraestructura o cambios en las políticas y derechos de asignación del agua.

En cambio, la norma NMX-AA-159-SCFI-2012, define el caudal ecológico como la calidad, cantidad y variación del caudal o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales. Esto implica que además de proveer agua para los usos doméstico, público urbano, pecuario y agrícola, es posible mantener caudales provenientes tanto del escurrimiento, como de las descargas de los acuíferos para la conservación de los ecosistemas lóticos (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).



La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales sostiene que, el caudal ecológico, para la gestión integrada de los recursos hídricos, no solo es una determinación técnico-científica, también es un instrumento de gestión y administración del agua en una cuenca. El caudal ecológico posibilita la generación de límites que equilibran los múltiples usos del agua con el fin de tener un desarrollo sostenible en las cuencas hidrográficas y propiciar el mantenimiento y mejorar los bienes y servicios ecosistémicos (SEMARNAT, 2014).

Finalmente, durante el *10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference* en 2007 en Australia, se dio a conocer que los caudales ambientales deben de proveer de los caudales necesarios para sostener a los ecosistemas de agua dulce y los ecosistemas costeros. El objetivo del manejo de los caudales ambientales es restaurar y mantener la integridad del ecosistema, los bienes y servicios y la resiliencia de estos, puntos que deberán ser evaluados social y científicamente sustentados. (Alonso, 2007)

### 1.4.1 Métodos de caudal ecológico

Establecido el concepto de caudal ecológico, es importante comprender la importancia del cálculo de este parámetro para la gestión del agua para preservar la integridad de los ecosistemas. Dentro del ámbito ecohidrológico, el caudal ecológico es importante para la salud de los ríos y en su diversidad biológica que albergan. Las alteraciones en los caudales pueden ejercer un impacto considerable en las condiciones de bienes y servicios proporcionados por los ríos.

Como González (2015) señala, la aplicación del cualquier método de caudal ambiental requiere establecer un programa integral a nivel nacional y regional destinado a la recopilación de información. Este programa debe considerar mediciones hidrológicas, incluyendo caudales, así como mediciones hidráulicas como niveles de agua y secciones transversales. Además, es importante abordar los aspectos ecológicos como la identificación de especies presentes, ubicación y relaciones con el caudal de forma que se abarquen en forma representativa los diferentes biotipos y su situación nacional y regional.

Actualmente existe gran cantidad de metodologías para la evaluación del caudal ecológico, las cuales se clasifican conforme abordan el problema; el método más adecuado dependerá de los principios o fundamentos actualmente validados, por lo tanto, cualquier metodología será válida si se enfoca en comprender el significado ecológico de cada componente del régimen natural y genera propuestas para su conservación o en su caso el restablecimiento total o parcial (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).

Los métodos son clasificados en cuatro tipos: hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos o simulación del hábitat y holísticos (Ilustración 3). Actualmente, los métodos hidrológicos son los más utilizados debido a su fácil aplicación, sin embargo, los métodos holísticos están tomando cada vez más importancia, a nivel internacional ya que son los métodos con mejores aproximaciones (SEMARNAT, 2012).

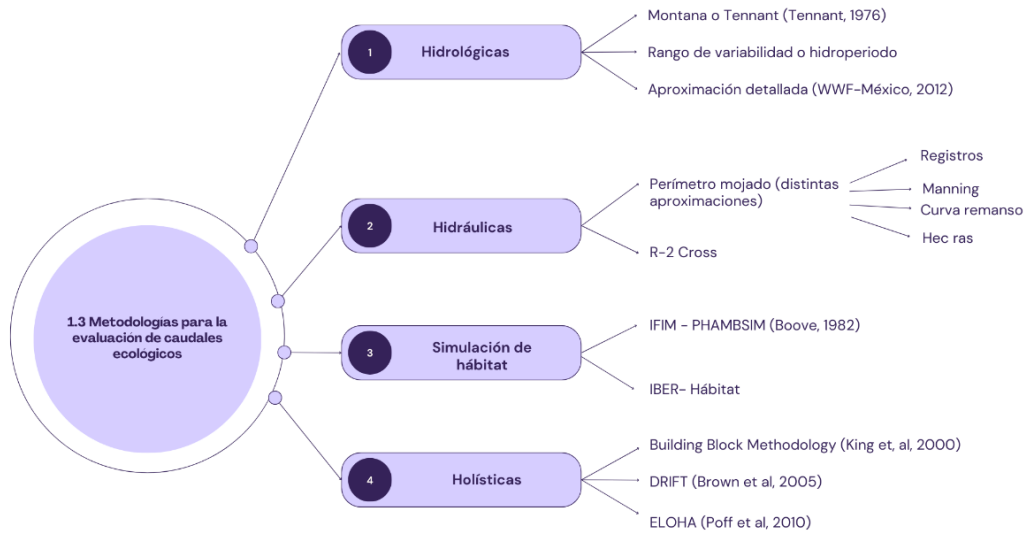


Ilustración 3 Clasificación y algunas metodologías para el cálculo de caudales ecológicos (Morales, 2023)

La evaluación de caudales ecológicos generalmente involucra el uso de más de dos métodos, con una tendencia a su aplicación de forma jerárquica, comenzando con enfoques hidrológicos y progresando hacia métodos más avanzados, tales como los métodos holísticos (Morales, 2023).

El grupo más grande de métodos usados hoy en día, son los hidrológicos (30% del total global) aplicadas en todas las regiones del mundo, adoptando por lo general el método de Tennant. Sin embargo, en los países más desarrollados, se utilizan las metodologías pertenecientes al grupo de simulación de hábitat, este grupo son las segundas más utilizadas con énfasis en la modelización de hábitats. El uso de las metodologías holísticas representa el 8% a nivel mundial, los métodos hidráulicos representan el 11%, estos métodos cada día se usan menos (Tharme, 2003).

En el presente trabajo, se emplearán los métodos recomendados por la norma mexicana, un método hidráulico (perímetro mojado) y un método de simulación del hábitat; serán aplicados en dos cuencas con diferentes características, una con régimen de caudal natural y otra con afectaciones antropogénicas.

#### 1.4.1.1 Métodos hidrológicos

Estos métodos también son conocidos como metodologías de porcentaje fijo y son considerados los más simples, porque pueden evaluarse desde gabinete; se basan principalmente en el uso de información hidrométrica diaria o mensual. Esta metodología es

considerada apropiada a nivel de planificación del desarrollo de los recursos hídricos o en situaciones de poca controversia (Tharme, 2003).

El método más conocido es el método de Tennant o también conocido como el método de Montana (Tennant, 1976), este método proporciona lineamientos para establecer un régimen como porcentaje del escurrimiento medio anual, es decir, considera diferentes porcentajes del promedio anual para distintas condiciones del río. Las categorías que se recomiendan van desde el 10% del promedio medio anual que se le conoce como condición mínima o pobre hasta 60-100%, considerada como rango óptimo.

En México el método Tennant es uno de los más usados, con el fin de establecer los caudales recomendados en evaluaciones de impacto ambiental debido a la construcción de presas. Se ha efectuado una modificación para aplicar el método en las zonas tropicales en donde se considera la variación climatológica trimestral y anual, para tratar de reproducir las variaciones del caudal natural durante el año (Alonso, 2007).

Para evaluar el caudal ecológico, Tharme (2003) sugiere aplicar diversos métodos; la combinación de diferentes enfoques ofrece una comprensión más completa y detallada en las condiciones hidrológicas y en los ecosistemas. Es importante comprender que cada método tiene sus limitaciones; al emplear distintos métodos es posible mitigar las limitaciones de uno con las fortalezas de otro.

**Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012**

La Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012) establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Se puede emplear a nivel de planificación hídrica anual.

El Apéndice A (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012), permite determinar los objetivos ambientales de las cuencas evaluando la importancia ecológica y la presión de uso del agua (Tabla 1 y Tabla 2)

*Tabla 1 Presión de uso. NMX-AA-159-SCFI-2012*

Presión de uso	Muy alta	Alta	Media	Baja
	≥80%	≥40%	≥11%	≤10

*Tabla 2 Importancia ecológica. NMX-AA-159-SCFI-2012*

<b>Importancia ecológica</b>	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D



Baja Media Alta Muy alta

**Presión de uso**

- A: Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación deseado muy bueno.
- B: Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación deseado.
- C: Objetivo ambiental con estado o nivel de conservación moderado.
- D: Objetivo ambiental con estado de conservación deficiente.

**Apéndice normativo B**

El apéndice normativo B establece el procedimiento para determinar la alteración del régimen hidrológico natural en una corriente por la presencia de infraestructura, con el objetivo de determinar si existe o no afectación significativa al régimen hidrológico natural debido a la presencia de infraestructura hidráulica (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).

El procedimiento requiere de información hidrométrica diaria con 20 años completos de información de cada régimen hidrológico (natural y actual). Si existen registros menores, se debe analizar la representatividad de esta en cuanto años húmedos, medios, secos y muy secos. El procedimiento se describe en la Ilustración 4 (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).

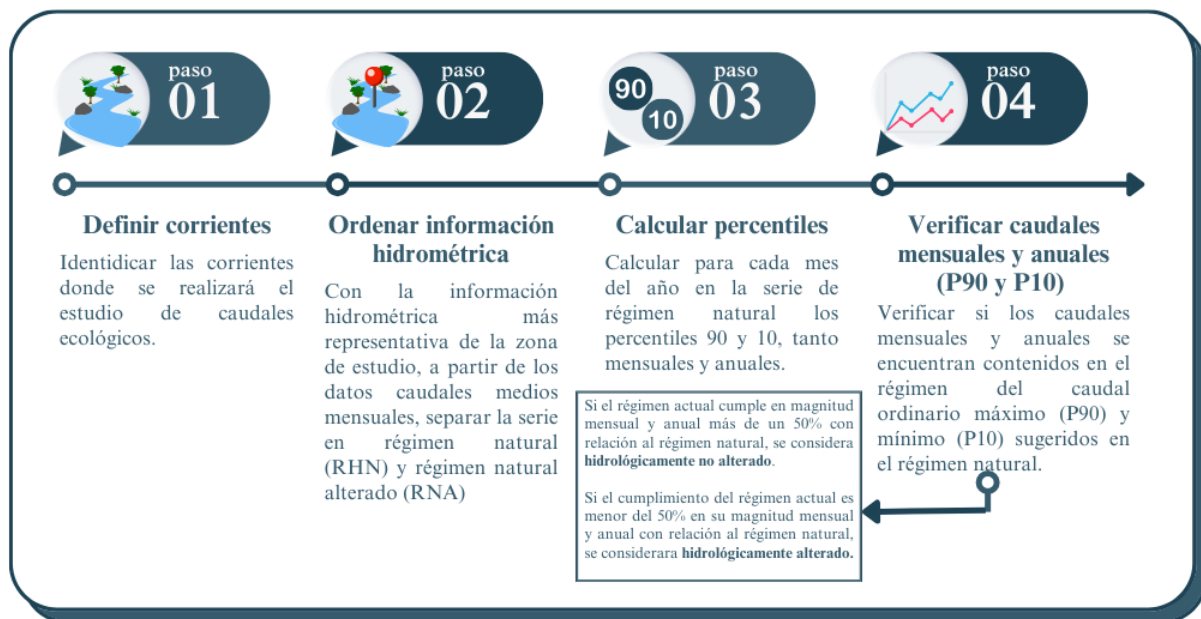


Ilustración 4 Procedimiento para el apéndice B

**Apéndice normativo C**

La metodología descrita en el Apéndice normativo C, se basa en el método de Tennant (Tennant, 1976), modificado para zonas tropicales y considerar la variación climatológica trimestral y anual. En México, se aplica para evaluar los impactos ambientales por obras hidráulicas. El procedimiento se describe en la Ilustración 5 (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012; García et al., 1999).

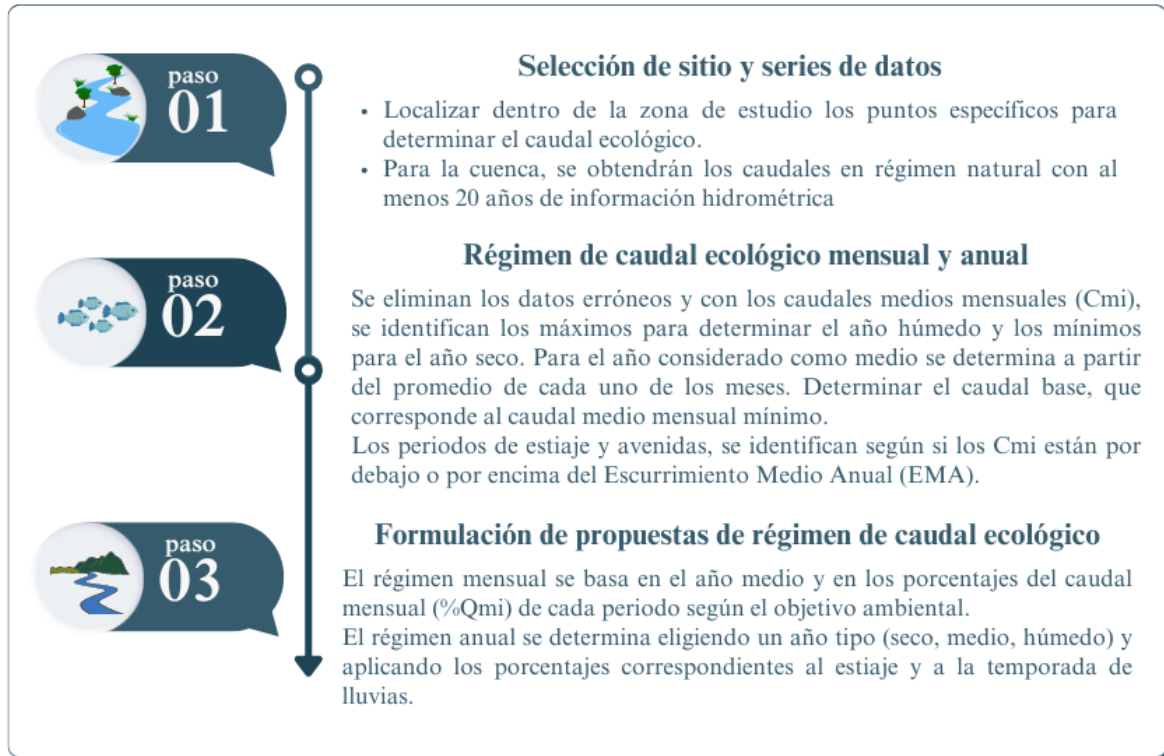


Ilustración 5 Procedimiento para el apéndice C

El valor máximo, mínimo y medio de cada mes se determina con la Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3, respectivamente.

$$Mes_{húmedo} = Valor\ máximo(Mes_{año1}, Mes_{año2}, Mes_{año3}, \dots, Mes_{año_n})$$

Ecuación 1

$$Mes_{seco} = Valor\ mínimo(Mes_{año1}, Mes_{año2}, Mes_{año3}, \dots, Mes_{año_n})$$

Ecuación 2

$$Mes_{medio} = Promedio(Mes_{año1}, Mes_{año2}, Mes_{año3}, \dots, Mes_{año_n})$$

Ecuación 3

El régimen del caudal ecológico mensual y anual, se determina a partir de los porcentajes propuestos en la Tabla 3.

Tabla 3 Recomendaciones de porcentaje de caudales con objetivos ambientales relacionados (Tennant, 1976), modificado por García et al. (1999) y propuesto por CONAGUA (2011) (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012)

Objetivo ambiental	Periodo			
	Estiaje		Avenida	
	% EMA	% Qmi	% EMA	% Qmi
A	30	100	60	50
B	20	80	40	40
C	15	60	30	30
D	5	40	10	20

#### 1.4.1.2 Métodos hidráulicos

Los métodos hidráulicos fueron desarrollados a partir de los métodos hidrológicos para recomendar flujos internos para pesquerías de importancia económica entre los años 1960-1970 en Estados Unidos. Son los métodos más utilizados en América del Norte. (Tharme, 2003).

Los métodos hidráulicos emplean relaciones cuantificables entre cantidad y calidad del recurso, tales como el hábitat y la descarga para el cálculo de los requerimientos del caudal ambiental (Tharme, 1996). Estos métodos se caracterizan por evaluar de forma detallada el hábitat hidráulico de un tramo en específico, a través del comportamiento del régimen de caudales y aspectos geomorfológicos. Uno de los métodos más conocidos y usado es el método del perímetro mojado, también conocido como el método del área (Pantoja, 2017).

##### Método del perímetro mojado

Calcula el caudal ecológico a partir de la relación de los parámetros hidráulicos, en este caso el perímetro mojado y el caudal circundante en el río; considera que la integridad del río está directamente relacionada con la calidad del agua (Pantoja, 2017).

El procedimiento de cálculo comienza localizando un tramo del río que permita visualizar los cambios de caudales. Generalmente se usan secciones importantes para la fauna o con rápidas, en las cuales, se construye una curva que relaciona el perímetro mojado con el caudal (Ilustración 6); la curva formada se caracteriza por tener dos tramos, en el primero el perímetro mojado crece rápidamente conforme aumenta el caudal y en el segundo, el crecimiento del perímetro mojado es menor; entre ambos tramos se identifica un punto de inflexión, representa el equilibrio entre el caudal y el hábitat disponible, es decir, este caudal es el óptimo para la biota disponible en el río y para mantener el hábitat acuático de forma sostenible; corresponde al caudal ecológico.

Este método parte desde el concepto de integridad del hábitat acuático y está relacionado directamente con el área húmeda del río y aquella que proporciona las condiciones necesarias para la vida. Es un método relativamente sencillo y práctico, ya que considera una sola variable hidráulica, el perímetro mojado, aunque ello también es una limitación al obtener estimaciones no representativas completamente y puede ser una desventaja en ecosistemas más complejos. Se considera un método con enfoque ecológico al incluir la relación de hábitat de las especies (Pantoja, 2017).

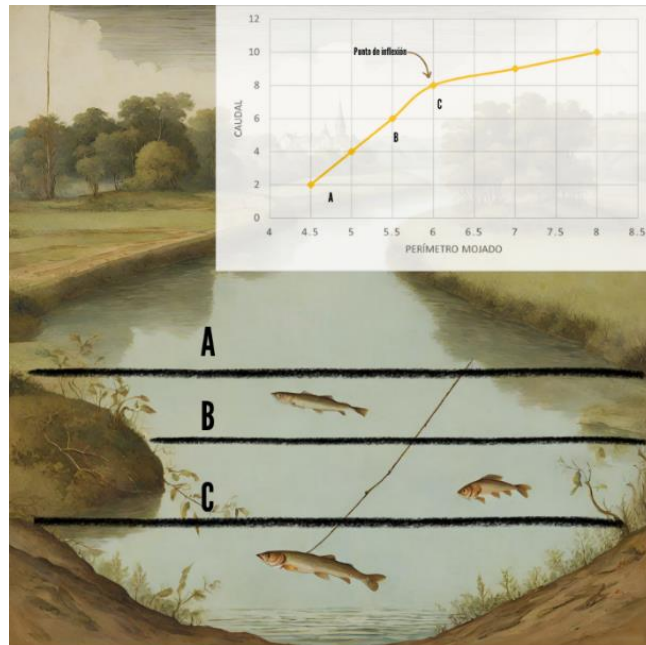


Ilustración 6 Aplicación del método hidráulico: perímetro mojado

#### 1.4.1.3 Simulación de hábitat

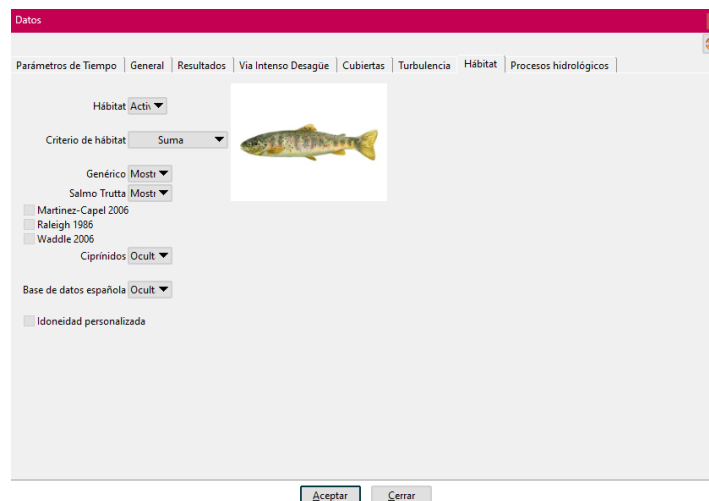
Por otro lado, los métodos hidrobiológicos o también llamados simulación del hábitat se derivan de los conceptos hidráulicos, biológicos, ecológicos y de las ciencias sociales; estos métodos analizan las respuestas de las especies a los cambios del caudal. El caudal ecológico se define a partir de un estudio de todos los factores y condiciones del ecosistema (Pantoja, 2017). Estos métodos se implementan en un tramo en específico, cuya selección debe atender criterios de representatividad ecológica e hidrológica, así como a su accesibilidad, disponibilidad de información y su potencial de extrapolación a la cuenca.

Un ejemplo destacado dentro de este grupo es el método IFIM ideado en Colorado, Estados Unidos, por el *Co-operative Instream Flow Service Group of the Fish and Wildlife Service* a finales de los años 70 y es considerado como la metodología más científica y jurídicamente defendible para evaluar la simulación hidráulica y del hábitat (Tharme, 2003).

El método IFIM también se conoce como *Physical Habitat Simulation System (PHABSIM)* y consiste en proyectar el hábitat físico y sus cambios en función del caudal; así se determinan

las preferencias del hábitat de las especies y se define un objetivo con base en variables hidráulicas que auxilian en la determinación de la conectividad de los ríos y la capacidad del cauce. Después se identifican caudales para todo el ciclo reproductivo de las especies en el hábitat. Al aplicar esta metodología se toma en cuenta las consecuencias que pueden existir en el microhábitat estudiando la calidad del agua y controlado el aumento o disminución de temperaturas (Pantoja, 2017).

Otra metodología con enfoque hidrobiológico es el método de simulación de hábitat, descrita por Sanz-Ramos et al. (2019), se centra en la evaluación del hábitat para los peces a partir de un modelo hidrodinámico bidimensional (2D), es decir, combina aspectos hidráulicos y ecológicos. Este modelo se puede aplicar con el módulo de simulación del hábitat del software Iber, con la herramienta simulación del hábitat (Ilustración 7).



*Ilustración 7 Herramienta simulación de hábitat en Iber*

El método evalúa el Hábitat Potencial Útil (HPU) y la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF); el primero se refiere a la calidad de las condiciones físicas en un punto en específico y se expresa en escala de 0 a 1, un valor cercano a 1, significa que el hábitat es adecuado para las especies, y cercano a 0 lo contrario; el segundo indica la superficie total que cumple con los requisitos ecológicos de la especie en estudio y se expresa en porcentaje (Sanz-Ramos et al, 2019). Como datos de entrada, se emplean curvas de idoneidad que representan las preferencias ecológicas para el hábitat acuático en las distintas fases de crecimiento, cada uno con características y necesidades diferentes (Ilustración 8), por ejemplo, el alevín es un pez en desarrollo temprano, suelen ser vulnerables; el juvenil, es un pez más independiente y en búsqueda de alimento; y el adulto, es capaz de reproducirse, buscan condiciones específicas para garantizar la supervivencia (Rothschuh, 2022).

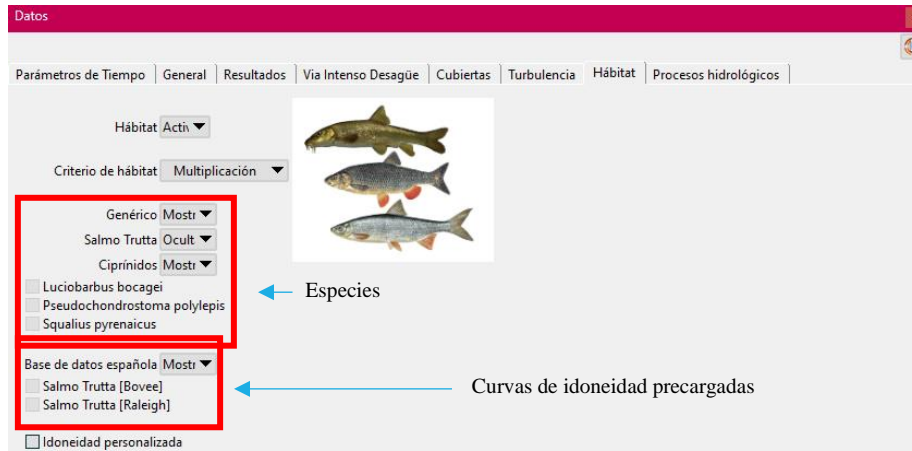


Ilustración 8 Datos de entrada en el módulo de simulación de hábitat

Las curvas de idoneidad también conocidas como funciones de preferencia (Ilustración 9), adquieren valores entre 0 y 1; 0 representa condiciones inaceptables y 1 la máxima idoneidad para el organismo (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).

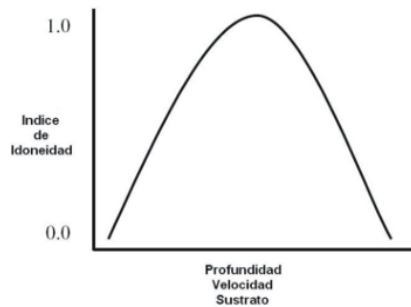


Ilustración 9 Representación de las curvas de idoneidad (Cardona, 2012)

Las curvas de idoneidad se pueden obtener de la literatura técnica, de las empleadas en otros países o realizar estudios de campo (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).

La herramienta Iber-Hábitat permite calcular relaciones entre el caudal simulado y el hábitat potencial útil, lo que resulta importante para proponer caudales ecológicos. El programa presenta resultados relacionados con el hábitat potencial útil y la idoneidad del hábitat físico, con el objetivo de analizar como las variables hidráulicas y el caudal afectan la calidad del hábitat.

#### 1.4.1.4 Métodos holísticos

La metodología holística representa uno de los métodos menos usados, utilizan registros históricos, variables hidráulicas y modelos que relacionan el caudal con los componentes del ecosistema; se ha aplicado en países como Sudáfrica, Australia, Reino Unido y Costa Rica. A diferencia de los métodos anteriores, considera como principio la observación del sistema fluvial, poniendo énfasis en la protección de los ríos (Tharme, 2003). Las metodologías más



usadas son Building Block Methodology (BBM) y Downstream Response to Imposed Flow Transformation (DRIFT).

Los métodos holísticos son una aproximación al sistema fluvial, incluyendo todas sus formas de vida, así como el conjunto de los procesos biológicos, físicos, químicos y sociales. Se enfocan principalmente en reconocer los eventos hidrológicos importantes que definen la variabilidad natural, dando dirección a los principales atributos del ecosistema acuático, esto es, se requiere de información multidisciplinaria. (Alonso, 2007).

### 1.5 Consecuencias de la alteración del régimen de flujo

Para satisfacer las demandas de agua para la sociedad, en ocasiones las necesidades de los ecosistemas fluviales quedan desprotegidas, estas acciones traen consecuencias que comprometen la integridad de los recursos hídricos (Ilustración 10) (Richter et al., 2003; Calvo, 2008).

La alteración del régimen de flujo significa una amenaza a la ecología de los ríos, zonas de inundación y humedales asociados (González, 2015). La alteración hidrológica se refiere a la modificación inducida de la calidad, cantidad y temporalidad de los regímenes hidrológicos, siendo ocasionada principalmente por la infraestructura hidráulica. Esta modificación impacta significativamente la provisión de servicios ambientales (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012).



Ilustración 10 Comparación del estado natural y alterado del ecosistema en los ríos. Adaptado de Calvo (2008). y Richter et al. (2003)

La alteración del régimen de flujo en los ríos afecta a cuatro aspectos fundamentales de la biodiversidad de las corrientes (Ward y Tockner, 2001)

- **Alteración en las condiciones del hábitat y la composición biótica**

Trae consecuencias para la vida de las especies debido a los cambios en las condiciones ambientales, ya que influyen directamente en la supervivencia y el crecimiento de las plantas y peces. Las consecuencias pueden llevar a una disminución de la biodiversidad y la alteración de los ecosistemas acuáticos (González, 2015).

- **Alteración en las estrategias de vida de las especies.**

Si existen cambios en las condiciones del hábitat, las especies comienzan a cambiar sus estrategias de vida. La transformación del hábitat en las especies acuáticas es una de las principales causas en la pérdida de biodiversidad porque se modifican sus patrones de supervivencia y su ciclo de vida (González, 2015).

- **Alteración de patrones naturales de conectividad longitudinal y lateral de las riberas.**

Es causada por la construcción de infraestructura hidráulica, ya que alteran la conectividad de los ríos. Esta conectividad se refiere a la capacidad que tienen las especies acuáticas para desplazarse dentro de su hábitat.

- **Introducción e invasión de especies exóticas a los ríos.**

Las especies invasoras son introducidas en los hábitats que no pertenecen naturalmente, estas especies logran establecerse y dispersarse produciendo daños en las especies nativas que conforman la región. Las especies exóticas logran desplazar a las nativas por la competencia del alimento, agua y espacio, en algunas ocasiones se convierten en depredadoras amenazando la vida de las nativas provocando su extinción (WWF, 2022)



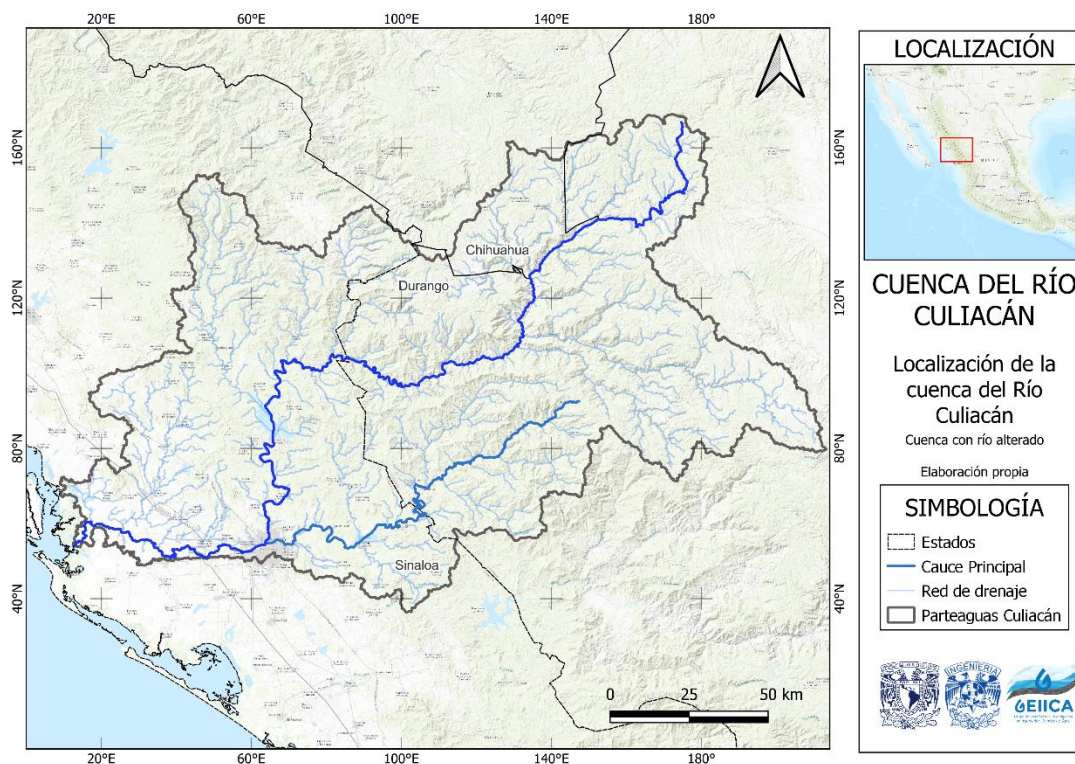
## II. Zona de estudio

En este apartado se describen las características principales de las cuencas a estudiar, la cuenca del Río Culiacán (cuenca con alteración antropogénica) y la cuenca del Río Piaxtla (cuenca con poca o nula alteración antropogénica).

### 2.1 Localización

Las cuencas en estudio descargan al Golfo de California, también conocido como Mar de Cortés, localizadas en el noroeste de la república mexicana, fueron delimitadas con sistemas de información geográfica (SIG), haciendo uso del Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI con resolución espacial de 15m.

La cuenca del Río Culiacán destaca por tener uno de los ríos más importantes del país por su longitud; la cuenca forma parte de la región hidrológica RH10 y de la Región hidrológica administrativa III Pacífico Norte. En la cuenca hay tres ríos principales, el río Culiacán, el cual se origina en la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula (Ilustración 11).



*Ilustración 11 Localización de la zona de estudio, cuenca del río Culiacán.*

Respecto a su delimitación política, los estados y municipios que abarcan la cuenca se listan en la Tabla 4, y muestran en la Ilustración 12 (Rosas, 2024).

Tabla 4 Municipios de la cuenca del Río Culiacán (Rosas, 2024)

Estado	Municipio	Área [km <sup>2</sup> ]	Área [%]
<b>Chihuahua</b>	Guadalupe y Calvo	920.27	5.08
<b>Durango</b>	Tepehuanes	2783.84	15.36
<b>Durango</b>	Topia	1627.65	8.98
<b>Durango</b>	Canelas	684.53	3.78
<b>Durango</b>	Tamazula	3154.07	17.41
<b>Durango</b>	Guanaceví	1003.31	5.54
<b>Durango</b>	Santiago Papasquiario	59.14	0.33
<b>Sinaloa</b>	Badiraguato	3230.40	17.83
<b>Sinaloa</b>	Culiacán	2821.51	15.57
<b>Sinaloa</b>	Mocorito	1018.10	5.62
<b>Sinaloa</b>	Navolato	638.24	3.52
<b>Sinaloa</b>	Cosalá	151.50	0.84
<b>Sinaloa</b>	Salvador Alvarado	13.68	0.08
<b>Sinaloa</b>	Angostura	13.97	0.08

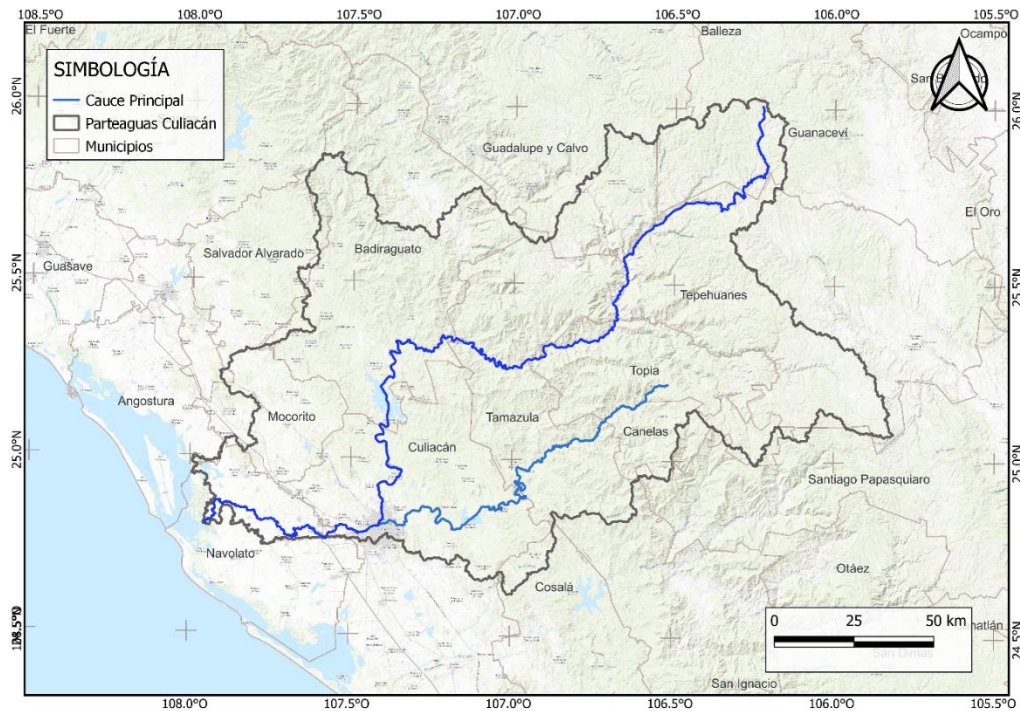


Ilustración 12 Municipios de la cuenca del Río Culiacán

Por otro lado, la cuenca del Río Piaxtla (Ilustración 13) también forma parte de la región hidrológica RH10 Sinaloa y de la Región Hidrológica-Administrativa III Pacífico Norte. Se encuentra delimitada en la parte alta por la Sierra Madre Occidental, limitando al norte con las cuencas de los ríos Nazas, San Lorenzo y Presidio, mientras que en el sur limita con la cuenca del Río Elota. En la cuenca hay un solo río principal que toma por nombre Piaxtla o también conocido Ixpalino.

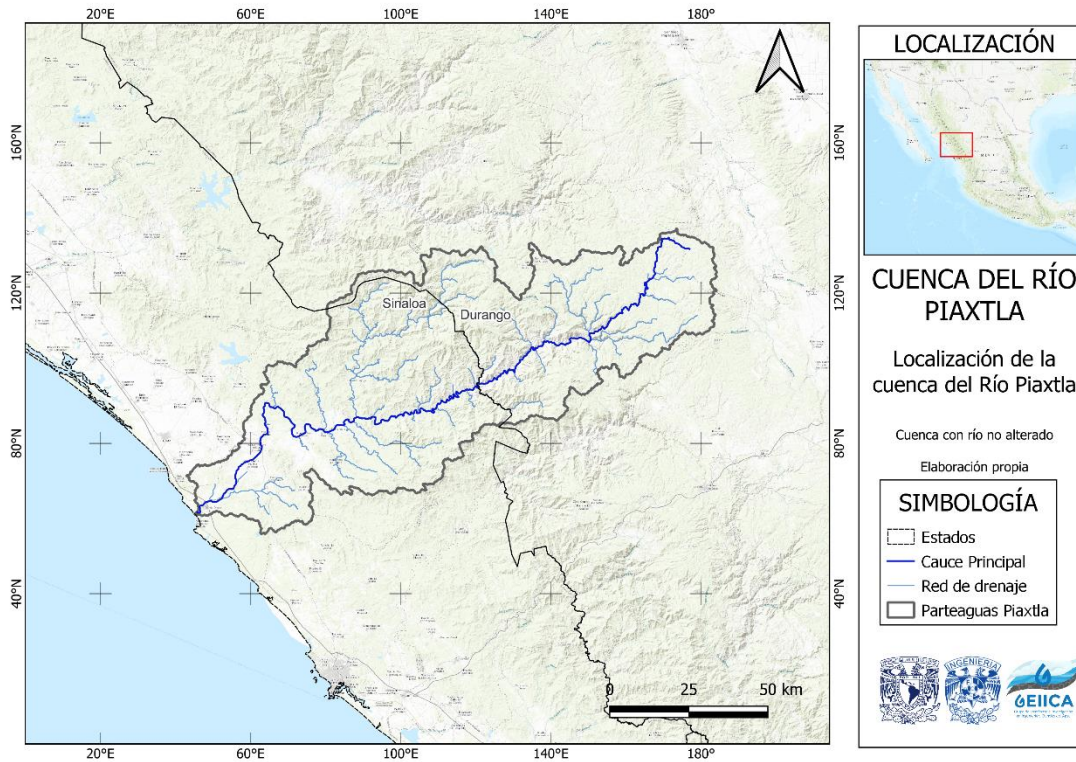


Ilustración 13 Localización de la zona de estudio, cuenca del Río Piaxtla

Respecto a su delimitación política, los estados y municipios que abarcan la cuenca se presenta en la Ilustración 14 y Tabla 5 (Hernández, 2022).

Tabla 5 Municipios de la cuenca del Río Piaxtla (Hernández, 2022)

Estado	Municipio	Área [km <sup>2</sup> ]	Área [%]
<b>Durango</b>	Canatlán	139	2.0
<b>Durango</b>	San Dimas	2852	40.8
<b>Durango</b>	Tamazula	76	1.1
<b>Sinaloa</b>	Elota	51	0.7
<b>Sinaloa</b>	Mazatlán	27	0.4
<b>Sinaloa</b>	San Ignacio	3837	55.0



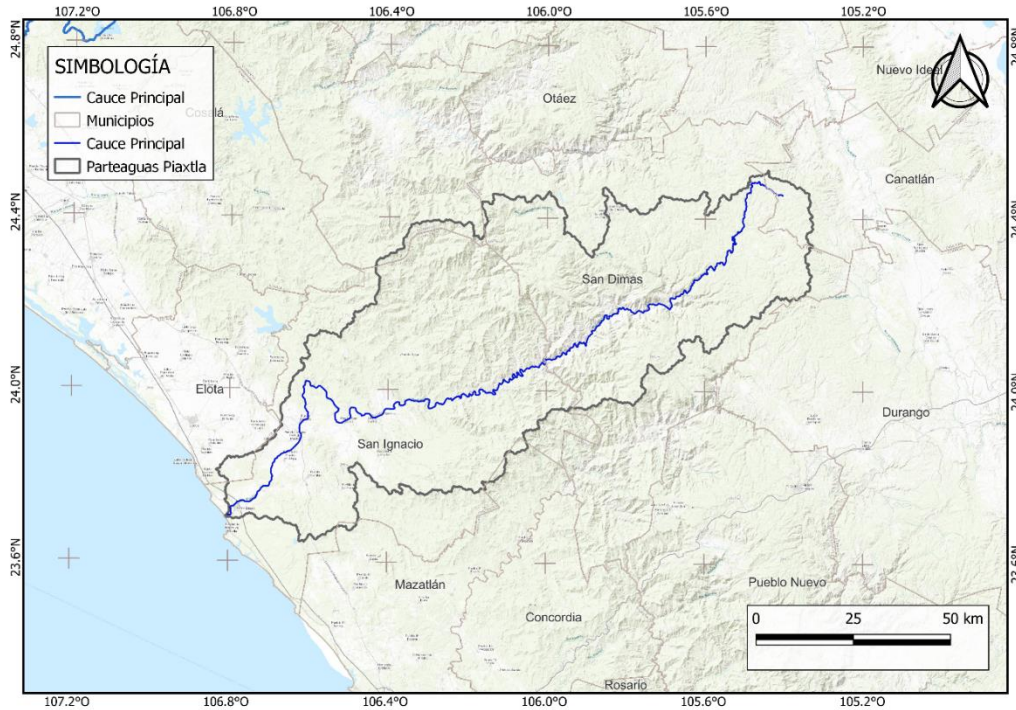
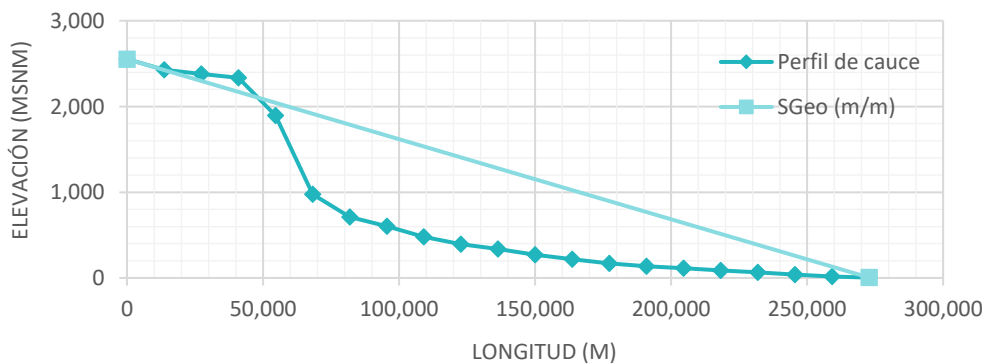


Ilustración 14 Municipios de la cuenca del Río Piactla

## 2.2 Características generales

La cuenca del Río Culiacán tiene un área de 18,121.18 km<sup>2</sup>, un perímetro de 1,352.95 km, longitud y pendiente del cauce principal de 461 km y 0.00598 m/m, respectivamente. La altitud máxima alcanza los 3,162 msnm en los estados de Chihuahua y Durango, perteneciendo a la Sierra Madre Occidental, mientras que en la zona costera del estado de Sinaloa se encuentra la altitud mínima de 3 msnm (Ilustración 15 y Gráfica 1). Esta cuenca se clasifica como exorreica, ya que sus ríos desembocan directamente hacia el mar.



Gráfica 1 Perfil y pendiente geométrica del cauce principal de la cuenca del Río Culiacán

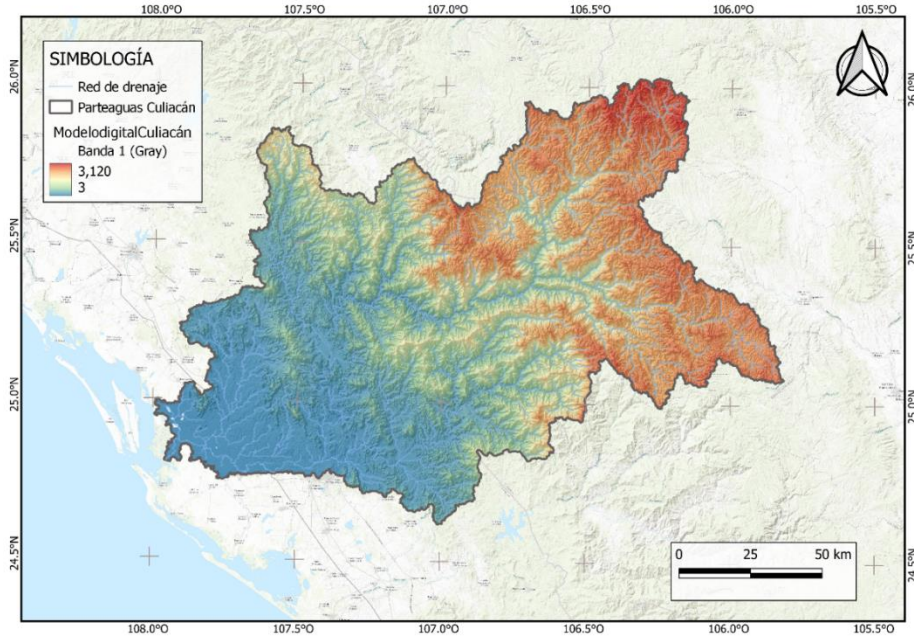
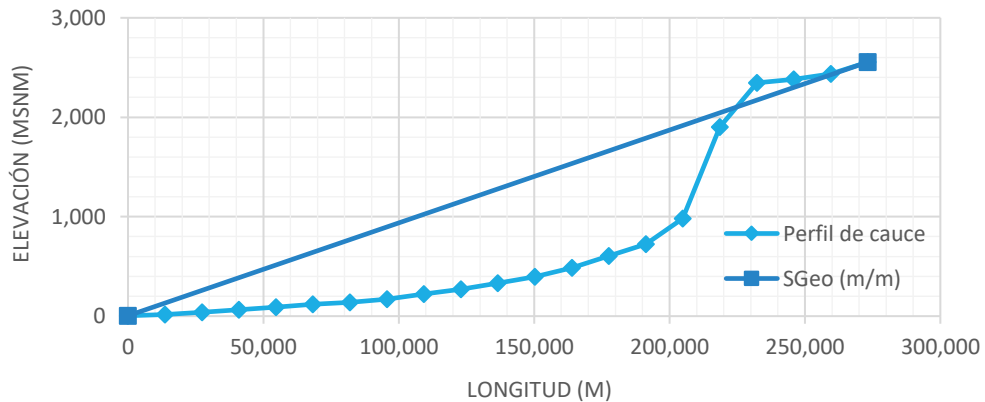
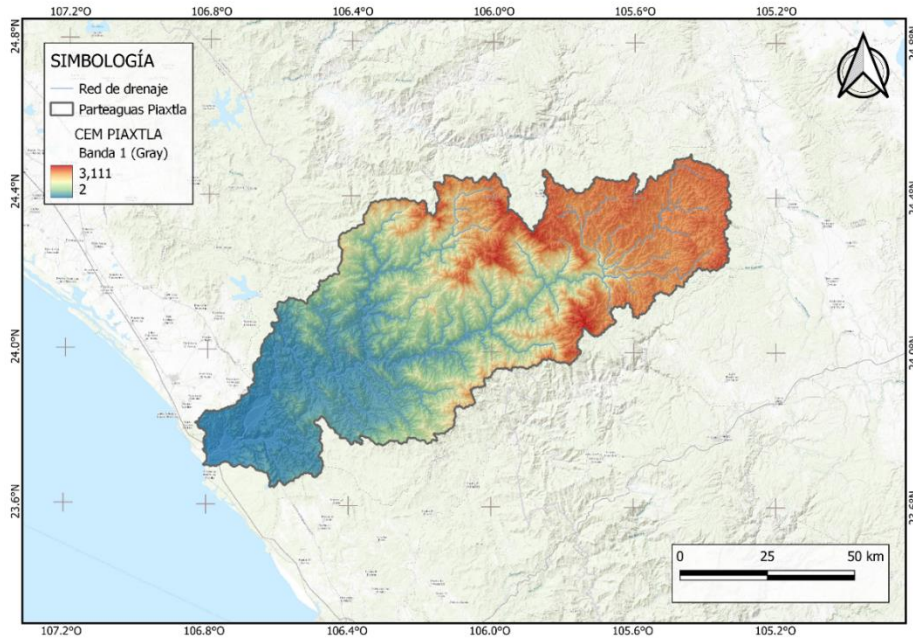


Ilustración 15 Elevación del terreno en la cuenca del Río Culliacán

La cuenca del Río Piaxtla tiene un área de 6,984 km<sup>2</sup>, un perímetro de 804 km, longitud y pendiente del cauce principal de 273.22 km y 0.00934 m/m, respectivamente. La altitud máxima alcanza los 2,555 msnm en el estado de Durango, mientras que en la zona costera del estado de Sinaloa se encuentra la altitud mínima, que es de 4 msnm (Ilustración 16 y Gráfica 2). Esta cuenca también se clasifica como exorreica, ya que sus ríos desembocan directamente en el mar.



Gráfica 2 Perfil y pendiente geométrica del cauce principal de la cuenca del Río Piaxtla



*Ilustración 16 Elevación del terreno en la cuenca del Río Piactla*

### 2.2.1 Clima

El Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática clasificó el clima de la República Mexicana de acuerdo con la clasificación de Köpen, tomando en cuenta las características de los elementos meteorológicos como la temperatura, vientos y lluvias; la clasificación considera 5 grupos principales de climas (INEGI, 2005):

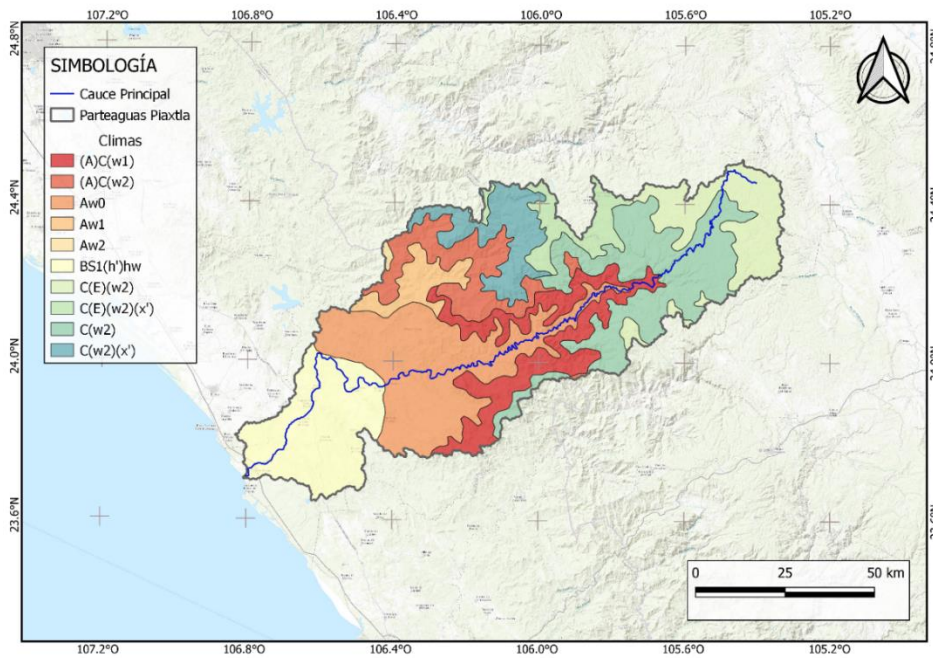
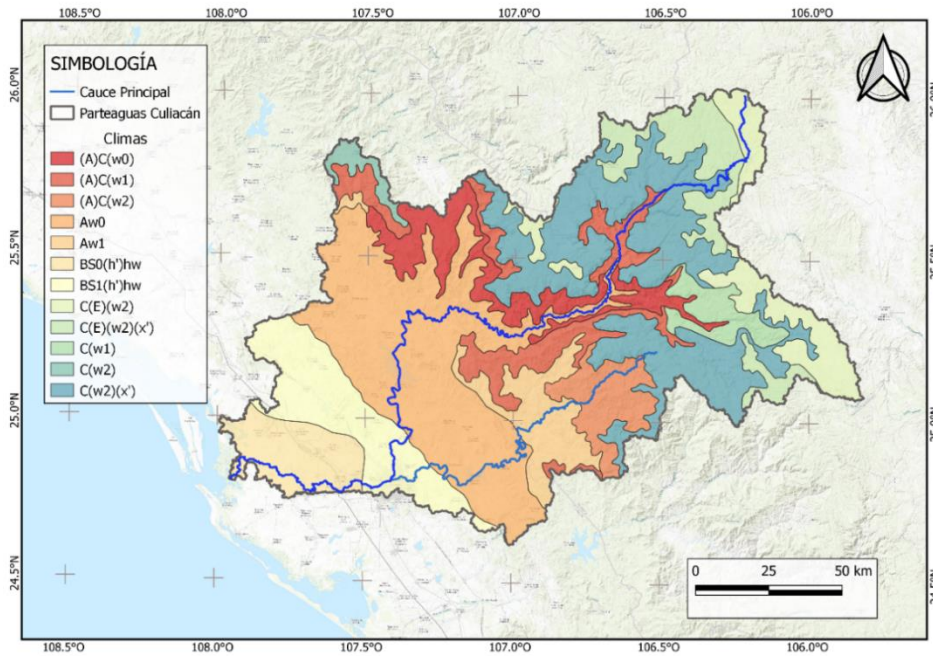
- Cálidos húmedos
- Secos
- Templados húmedos
- Frío boreal, de inviernos intensos
- Muy fríos o polares, o de grandes alturas

En la cuenca del Río Culiacán, predominan los climas subhúmedos y semiáridos cálidos pertenecientes a la zona media baja de la cuenca con temperatura media anual superior a los 22°C y en el mes más frío mayor a 18°C (Ilustración 17). En la parte alta de la cuenca, se encuentran los climas semifríos, con temperatura media anual entre los 5°C a 12°C, en el mes más frío la temperatura varía entre 3°C y 18°C y en el mes más cálido es de 22°C. En la parte más baja de la cuenca, el clima es árido y cálido con temperaturas superiores a 22°C, en el mes más frío es mayor a 18°C (CONABIO, 2001; Rosas, 2024).

En la cuenca del río Piactla predominan los climas semisecos y cálidos perteneciendo a las zonas más bajas, los climas más fríos corresponden a las zonas más altas (Ilustración 17); la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de la lluvia invernal es de 5 al 10.2% de total anual, se caracteriza por tener las menores temperaturas y mayores



precipitaciones presentando temperaturas entre 5°C y 12°C. La cuenca presenta en general temperaturas medias mayores a los 22°C (Hernández, 2022; CONABIO, 2001).



*Ilustración 17 Climas en la cuenca del Río Culliacán (arriba) y cuenca del Río Piactla (abajo)*

### 2.2.3 Uso de suelo y vegetación

El análisis del uso de suelo y cobertura vegetal permite conocer los cambios a lo largo del tiempo, ya que es fundamental para el sostenimiento del ecosistema, regula el ciclo hidrológico y mitiga el cambio climático (INEGI, 2017).

Con la carta de uso de suelo serie VI (2013) a escala 1:250,000 del INEGI, se determinó que la cuenca del Río Culiacán destaca por su gran porcentaje de área de vegetación de selvas, cubriendo aproximadamente el 55% (Ilustración 18). En las zonas medias y abajas de la cuenca predomina la vegetación de bosques ocupando el 24% de la extensión de la cuenca. El 18% de la cuenca se ocupa para los cultivos, 2% pertenece a la vegetación hidrófila y cuerpos de agua. El 1% restante en la cuenca pertenece a las áreas urbanas (CONABIO, 2005; Rosas, 2024).

En cambio, en la cuenca del Río Piaxtla los bosques abarcan un 59.8%, seguido por la vegetación tipo selva con un 30.8%, los cultivos con el 6.2% y el resto de la cuenca corresponde a zonas desprovistas de vegetación, manglares, cuerpos de agua o vegetación hidrófila, vegetación inducida y las zonas urbanas (Ilustración 18).

Las principales actividades generadoras de impacto ambiental son la agricultura (es considerada como fuente de contaminación en los suelos y el agua en el medio rural), el desarrollo pecuario, la explotación de los bosques y la tala de árboles (no tiene regulación, causando deforestación y con ello erosión). El crecimiento de las zonas urbanas y las industrias también son un factor importante ya que descargan aguas residuales con contenido alto de materia orgánica y tóxicos de origen industrial (Menchaca, 2024), de esta forma, el factor humano es el principal generador de la degradación de las cuencas hidrográficas, siendo el agua el recurso más importante (Rosas, 2024).



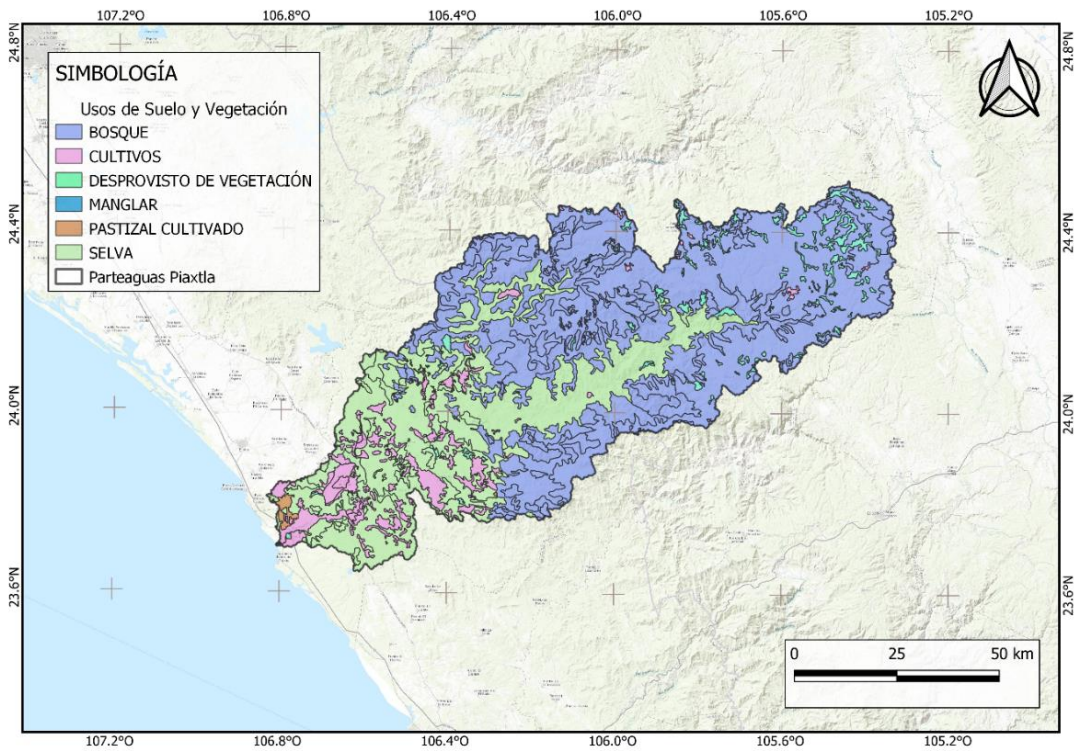
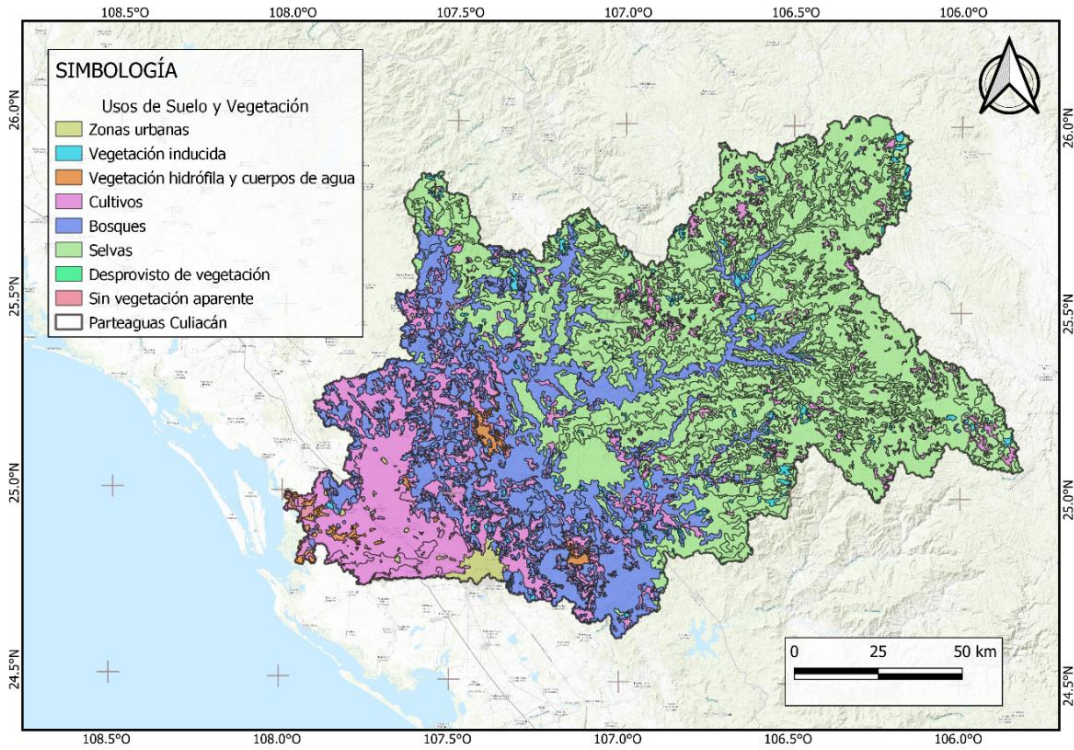


Ilustración 18 Uso de suelo y vegetación en la cuenca del Río Culiacán (arriba) y cuenca del Río Piaxtla (abajo)

## 2.3 Información hidrométrica

La Cuenca del Río Culiacán cuenta con 19 estaciones hidrométricas (EH) que aforan el agua que fluye por los ríos (12), arroyos (2) y canales (5) (Ilustración 19 y Tabla 6). La Cuenca del Río Piaxtla cuenta únicamente una estación hidrométrica que afora el río Piaxtla, ubicada en el pueblo Ixpalino (Ilustración 19 y Tabla 7).

Tabla 6 Estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Culiacán

Clave	Nombre	Inicio de registro	Fin de registro	Longitud	Latitud	Estado
10020	Puente Cañedo	1932	1954	-107.391666	24.811111	Sinaloa
10026	Picachos	1937	1944	-107.147222	24.812500	Sinaloa
10041	Sanalona II	1944	1977	-107.162500	24.800000	Sinaloa
10087	Tamazula	1962	1992	-106.975000	24.800000	Durango
10021	Tierra Blanca	1932	1940	-107.400000	24.829166	Sinaloa
10033	Palos Blancos	1938	1988	-107.384722	24.925000	Sinaloa
10081	El Varejonal	1960	1982	-107.395833	25.086111	Sinaloa
10088	Guatenipa	1965	2002	-107.225000	25.344444	Sinaloa
10112	Guatenipa II	1968	2005	-107.220833	25.344444	Sinaloa
10113	La Huerta	1969	1999	-106.700000	25.369444	Sinaloa
10018	Puente Sudpacífico	1924	1992	-107.404166	24.805555	Sinaloa
10079	Badiraguato	1959	1999	-107.537500	25.333333	Sinaloa

Tabla 7 Estaciones Hidrométricas en la cuenca del Río Piaxtla

Clave	Nombre	Inicio de registro	Fin de registro	Longitud	Latitud	Estado
10065	Ixpalino	1952,2007	1999,2011	-106.595833	23.955555	Sinaloa



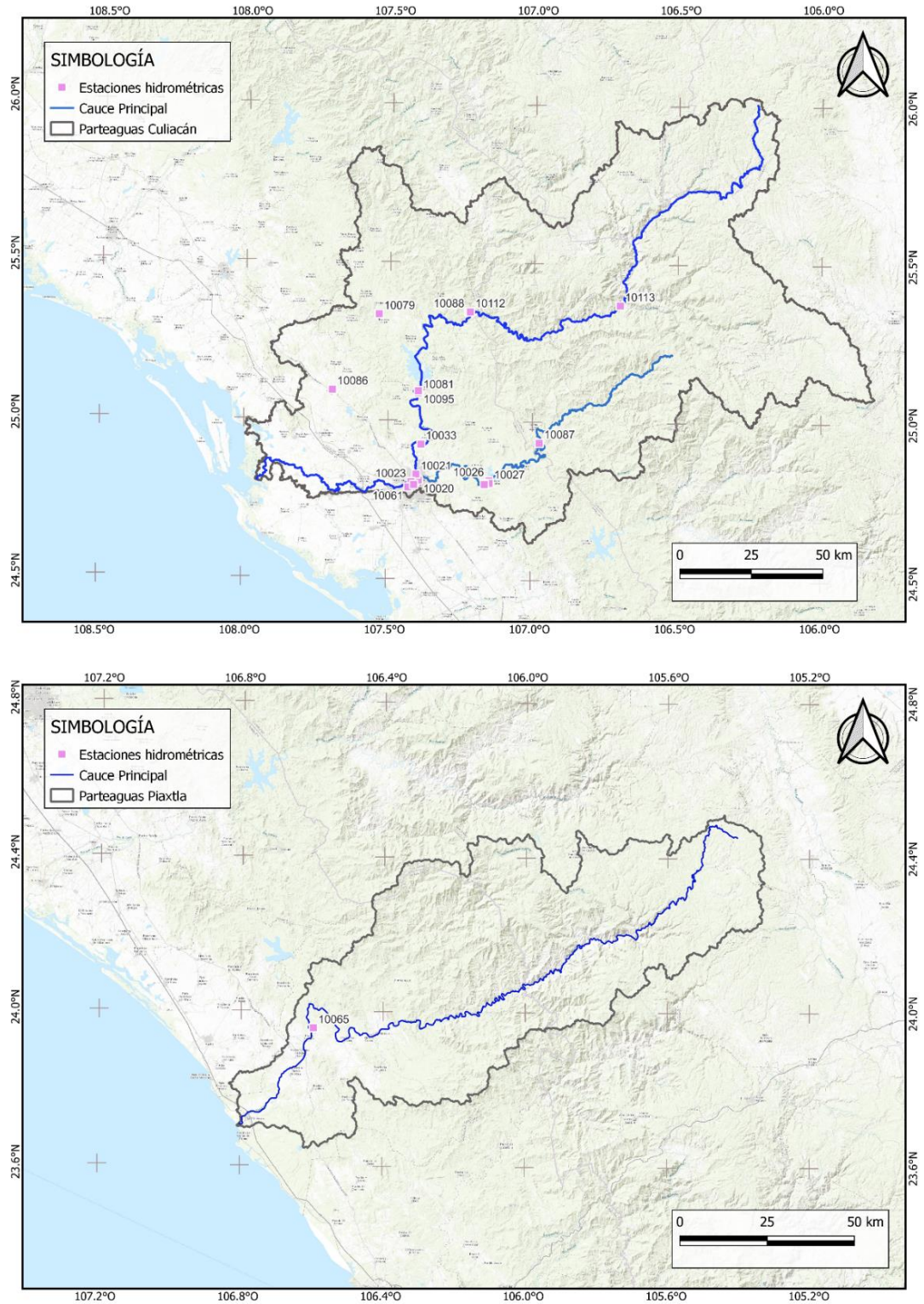


Ilustración 19 Estaciones hidrométricas en la cuenca del Río Cuiacán y cuenca del Río Piaxtla

## 2.4 Información hidráulica

La Cuenca del Río Culiacán cuenta con 19 presas, clasificadas como grandes, medianas, pequeñas y bordos según su altura y volumen (Ilustración 21). La cuenca se considera alterada ya que cuenta con 2 grandes presas, esto es que la altura de la cortina es mayor a 15 m y el volumen del embalse mayor a 3 hm<sup>3</sup>.

Una de las grandes presas es la presa Adolfo López Mateos, conocida también como Humaya o el Varejonal, ubicada en el estado de Sinaloa, municipio de Badiraguato, sobre el cauce del río Humaya (-107.387861, 25.100639). La presa entró en operación el 9 de septiembre de 1963 para almacenar y controlar las avenidas. Sus usos principales son el riego, la generación eléctrica, la acuacultura, pesca y uso recreativo. El organismo encargado de operar la presa es el Distrito de Riego 10 Culiacán-Humaya. La presa tiene una cortina de 105.5 m de altura tipo roca, equipada en la margen derecha con una obra de toma y un vertedor de excedencias tipo abanico. Almacena 3,086 hm<sup>3</sup>, dando lugar a un área de embalse de 12,800 ha<sup>2</sup> al nivel de aguas máximas extraordinarias (CONAGUA, 2011).

La otra, es la presa Sanalona, ubicada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, sobre el río Tamazula (-107,149547, 24.814344). La presa entró en operación en 1949. En 1965, comenzó a utilizarse para el riego y en 1962 comenzó a funcionar como planta hidroeléctrica. La altura de su cortina es de 81 m y su almacenamiento de 845 hm<sup>3</sup>. El organismo encargado de operarla es el Distrito de Riego 10 Culiacán-Humaya (CONAGUA, 2011).

Por otro lado, en la cuenca del río Piaxtla existe una presa derivadora, estas estructuras son colocadas transversalmente en el lecho del río con el objetivo de acumular el agua a una altura suficiente y así facilitar la desviación hacia un sistema de riego o cualquier otro uso. La estructura es nombrada Derivadora Piaxtla de Arriba, ubicada en San Ignacio, Sinaloa (-106.637294, 23.853514); se construyó en 1968 (Ilustración 22). La estructura es considerada como bordo ya que la altura de su cortina es de 4 m, la longitud de la corona es de aproximadamente 15 m (CONAGUA, 2024).



Ilustración 20 Derivadora Piaxtla (CONAGUA, 2024)



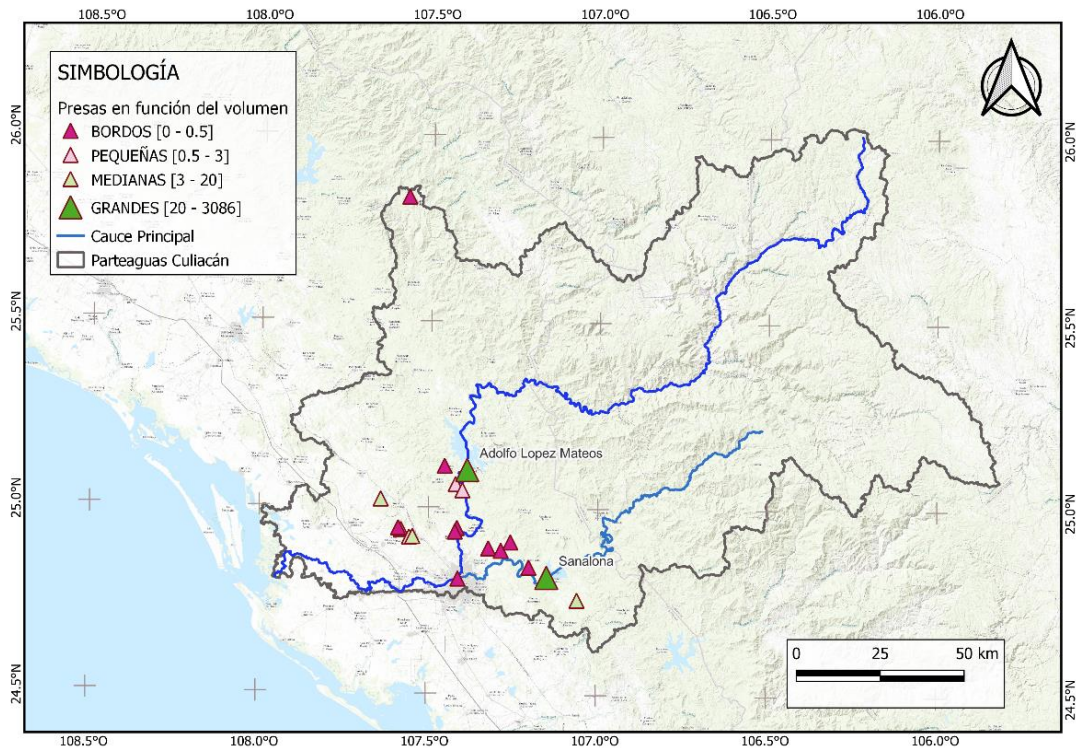
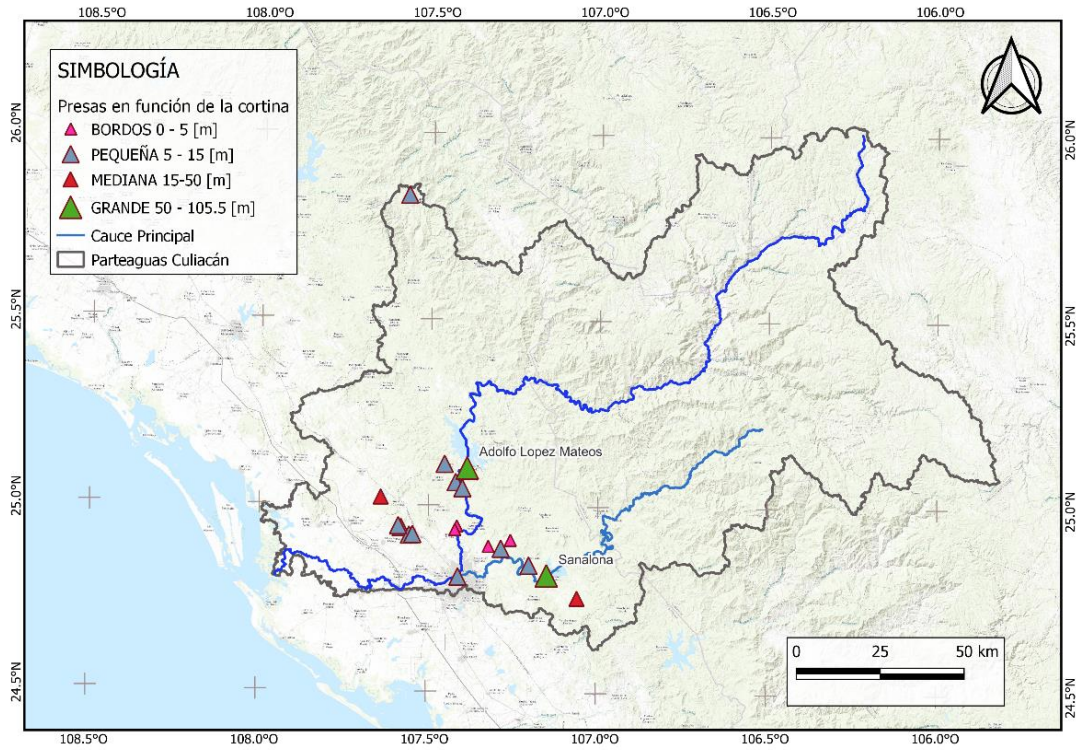


Ilustración 21 Presas clasificadas por altura de la cortina (arriba) y volumen del embalse (abajo) en la cuenca del Río Culliacán

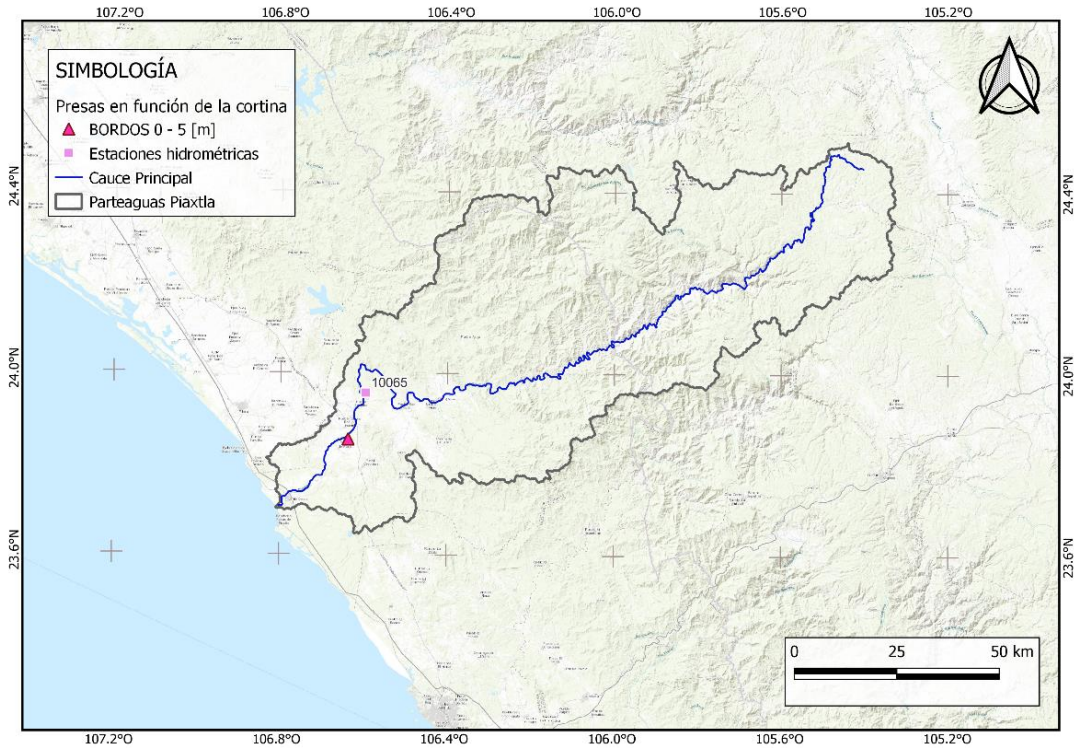


Ilustración 22 Presas clasificadas por tamaño de la cortina en la cuenca del Río Piaxtla

## 2.5 Usos del agua

Con información del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se recopiló información del uso del agua para las regiones en estudio. La base de datos contiene información por municipio, por lo que permitió determinar el volumen de agua concesionado municipal. Para obtener el volumen concesionado en las cuencas, se calculó el área de cada municipio, se estimó el volumen de agua correspondiente a esta área, basado en la proporción de la cuenca.

Así, el volumen total concesionado en la cuenca del Río Culiacán es de  $955.4 \text{ hm}^3$  (Tabla 8). Los volúmenes más grandes se registran en los municipios de Badiraguato, con  $861.5 \text{ hm}^3$  y Culiacán con  $369.0 \text{ hm}^3$ , esto se debe a que en estas regiones se encuentran las dos grandes presas y la mayor parte del agua superficial se utiliza para la generación de energía eléctrica.

Tabla 8 Volumen concesionado en la cuenca del Río Culiacán

Municipio	Municipio					Cuenca Río Culiacán		
	Vtotal hm <sup>3</sup>	Vsup hm <sup>3</sup>	Vsub hm <sup>3</sup>	Amun km <sup>2</sup>	A cuenca km <sup>2</sup>	Vtotal cuenca hm <sup>3</sup>	Vsup cuenca hm <sup>3</sup>	Vsub cuenca hm <sup>3</sup>
<b>Culiacán</b>	824.9	710.3	114.6	6,308.2	2,821.5	369.0	317.7	51.2
<b>Mocorito</b>	21.9	6.2	15.6	2,803.7	1,018.1	7.9	2.3	5.7
<b>Navolato</b>	60.8	12.1	48.7	2,333.3	638.2	16.6	3.3	13.3
<b>Badiraguato</b>	1,290.6	1,285.5	5.0	4,839.4	3,230.4	861.5	858.1	3.4
<b>Cosalá</b>	701.8	698.9	2.9	2,172.1	151.5	48.9	48.7	0.2
<b>Salvador Alvarado</b>	15.0	2.0	13.0	76,596.4	13.7	0.0	0.0	0.0
<b>Angostura</b>	21.2	4.4	16.8	1,908.9	14.0	0.2	0.0	0.1
<b>Guadalupe y Calvo</b>	5.3	5.3	0.0	9,621.4	920.3	0.5	0.5	0.0
<b>Tepehuanes</b>	6.0	4.0	1.9	6,066.1	2,783.8	2.7	1.9	0.9
<b>Topia</b>	1.6	1.6	0.0	1,627.4	1,627.7	1.6	1.6	0.0
<b>Canelas</b>	0.4	0.4	0.0	88,348.5	684.5	0.0	0.0	0.0
<b>Tamazula</b>	1.7	1.6	0.1	5,800.4	3,154.1	0.9	0.9	0.1
<b>Guanaceví</b>	201.9	201.6	0.4	5,482.8	1,003.3	37.0	36.9	0.1
<b>Santiago Papasquiaro</b>	223.4	212.2	11.2	6,398.8	59.1	2.1	2.0	0.1
<b>Total</b>	3,376.6	3,146.2	230.4	-	-	955.4	950.6	4.8

En cambio, el volumen concesionado total en la cuenca del Río Piaxtla es de 44.0 hm<sup>3</sup> (Tabla 9); el volumen más grande se extrae en el municipio de San Dimas, con 16 hm<sup>3</sup>, debido a que en el municipio la empresa minera Primero Empresa Minera, S.A. DE C.V. extrae 28.55 hm<sup>3</sup> de agua superficial para la generación de energía eléctrica.

Tabla 9 Volumen concesionado en la cuenca del Río Piaxtla

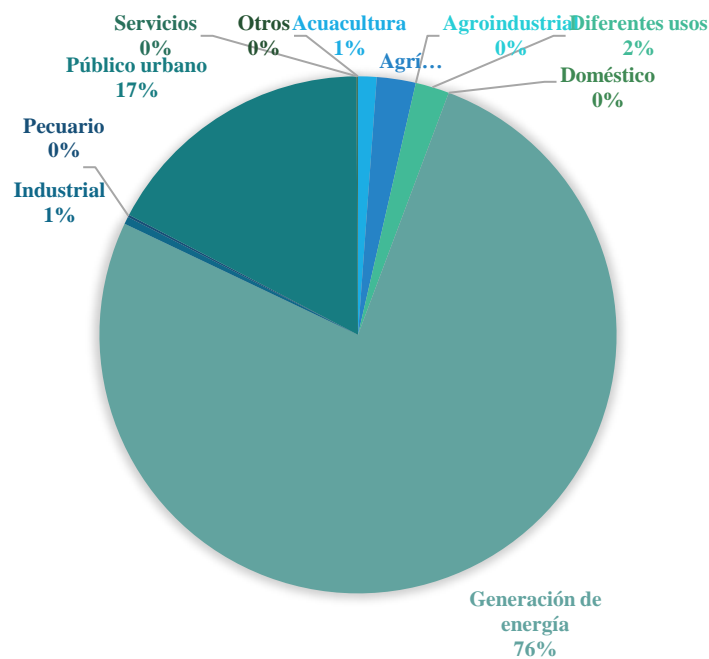
Municipio	Municipio					Cuenca Río Piaxtla		
	Vtotal hm <sup>3</sup>	Vsup hm <sup>3</sup>	Vsub hm <sup>3</sup>	Amun km <sup>2</sup>	A cuenca km <sup>2</sup>	Vtotal cuenca hm <sup>3</sup>	Vsup cuenca hm <sup>3</sup>	Vsub cuenca hm <sup>3</sup>
<b>San Ignacio</b>	32.6	10.2	22.4	5,573.1	3,837.0	22.4	7.0	15.5
<b>Mazatán</b>	172.8	93.2	79.7	2,773.7	27.0	1.7	0.9	0.8
<b>Elota</b>	20.2	10.9	9.4	1,807.6	51.0	0.6	0.3	0.3
<b>Tamazula</b>	1.7	1.6	0.1	6,425.5	76.0	0.0	0.0	0.0
<b>San Dimas</b>	34.0	33.8	0.2	6,013.8	2,852.0	16.1	16.0	0.1
<b>Canatlan</b>	87.5	64.5	23.0	3,854.8	139.0	3.2	2.3	0.8
<b>Total</b>	348.8	214.1	134.8			44.0	26.6	17.4



Los usos del agua en la cuenca del Río Culiacán y la cuenca del río Piaxtla, se muestran en la Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente.

Tabla 10 Usos del agua en la cuenca del Río Culiacán

Usos	Volumen [hm <sup>3</sup> ]
Acuacultura	27.4
Agrícola	57.6
Agroindustrial	0.0
Diferentes usos	50.0
Doméstico	0.1
Generación de energía	1806.4
Industrial	11.0
Pecuario	3.5
Público urbano	407.3
Servicios	2.2
Otros	0.3



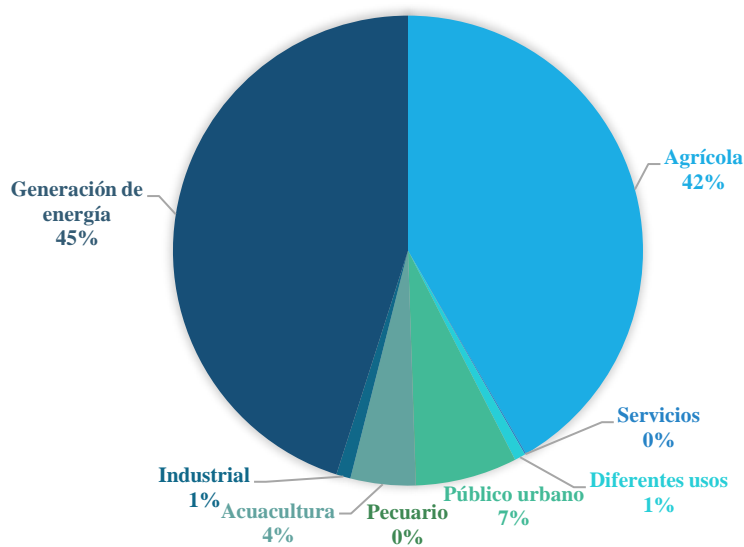
Gráfica 3 Usos del agua en la cuenca del Río Culiacán

En el caso de la cuenca del Río Piaxtla, el uso del agua se asocia principalmente con las actividades como la agricultura, el abastecimiento urbano y la acuacultura, lo que destaca una gran diferencia con la cuenca del Río Culiacán donde la intervención antropogénica es notoria (Tabla 11 y Gráfica 4).



Tabla 11 Usos del agua en la cuenca del Río Piaxtla

Usos	Volumen [hm <sup>3</sup> ]
<b>Agrícola</b>	26.36
<b>Servicios</b>	0.06
<b>Diferentes usos</b>	0.48
<b>Público urbano</b>	4.43
<b>Pecuario</b>	0.02
<b>Acuacultura</b>	2.83
<b>Industrial</b>	0.62
<b>Generación de energía</b>	28.55



Gráfica 4 Usos del agua en la cuenca del Río Piaxtla

En el caso de la cuenca del Río Piaxtla, el uso del agua se asocia principalmente con las actividades como la agricultura, el abastecimiento urbano y la acuacultura, a diferencia de la cuenca del Río Culiacán donde la intervención antropogénica es notoria.

## 2.6 Especies

En la cuenca del Río Culiacán existen alrededor de 41 especies de peces, catalogadas en diferente estado de conservación (Ilustración 25). Una de estas, es la *Xenotoca melanosoma* (Ilustración 23), ubicada sobre el río Tamazula, especie endémica también conocida como Mexclapique negro; el factor humano, las actividades agrícolas y la acuacultura, afectan su ciclo de vida porque su hábitat es modificado reduciendo la disponibilidad de agua; también es amenazada por las sequías, agravando cada vez más su situación (CONABIO, 2024).

Además, sobre el río Tamazula, entre los municipios de Culiacán y Tamazula, se encuentra la especie *Ictalurus pricei*, también conocida como Bagre Yaqui (Ilustración 23), en peligro

de extinción. Entre otras especies se encuentran la tilapia azul, la carpa común, tilapia mossambica y tilapia del Nilo (CONABIO, 2024).

La Tilapia azul se encuentra en el Río Tamazula, municipio de Culiacán y es considerada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) como una de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo debido a que son peces con hábitos territoriales muy fuertes y sin un peligro para las especies endémicas (CONANP, 2015).



Ilustración 23 *Xenotoca melanosoma* (izquierda) y *Ictalurus pricei* (derecha) (CONABIO, 2024)

En la cuenca del Río Piaxtla existen alrededor de 28 especies de peces, también catalogadas con distinto estado de conservación (Ilustración 25). Dentro de estas se encuentra la *Poeciliopsis latidens*, también conocido como Guatopote del Fuerte (Ilustración 24), especie endémica distribuida en las tierras bajas costeras de los municipios San Ignacio y Elota sobre el río Piaxtla, clasificada como casi amenazada debido al factor humano y por la extracción masiva de agua que han alterado sus características en el hábitat, provocando la reducción en su población (CONABIO, 2024).

Sobre el Río Piaxtla existen también especies exóticas invasoras como la Tilapia mossambica (Ilustración 24), especie introducida en el país para el cultivo de peces que resiste los cambios extremos, desplazando por completo a las especies nativas y considerada como una de las 100 especies exóticas más dañinas en el mundo por la UICN. Es considerada como exótica invasora porque resiste los cambios extremos desplazando por completo a las especies nativas (Amador, 2024; CONABIO, 2024).



Ilustración 24 *Poeciliopsis latidens* y *Tilapia mossambica* (Amador, 2024; CONABIO, 2024)

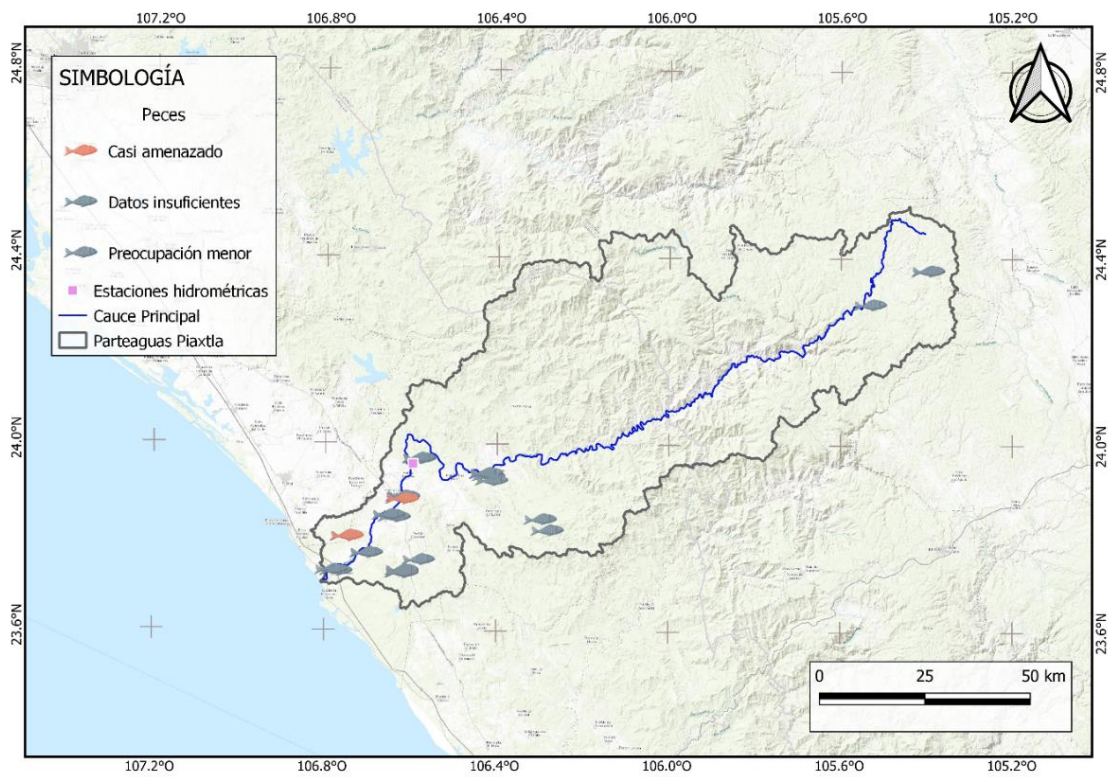
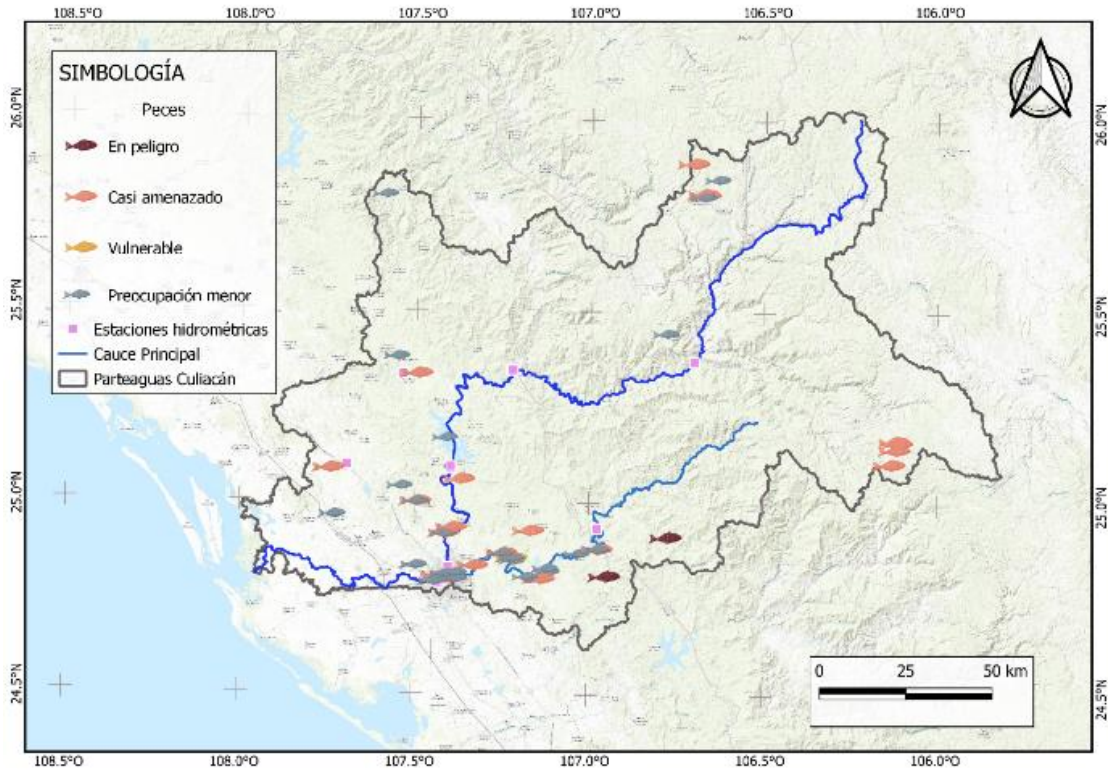


Ilustración 25 Condición de las especies de peces en la cuenca Río Culiacán (arriba) y cuenca del Río Piaxtla (abajo)



### III. Metodología

En este apartado se presenta el análisis de las series de tiempo de caudales medios diarios, mensuales y anuales. Este análisis permitirá evaluar el caudal ecológico en las cuencas en estudio con distintos métodos, como los hidrológicos, el método hidráulico del perímetro mojado con distintas aproximaciones (flujo permanente uniforme y variado) y simulación de hábitat con el software IBER.

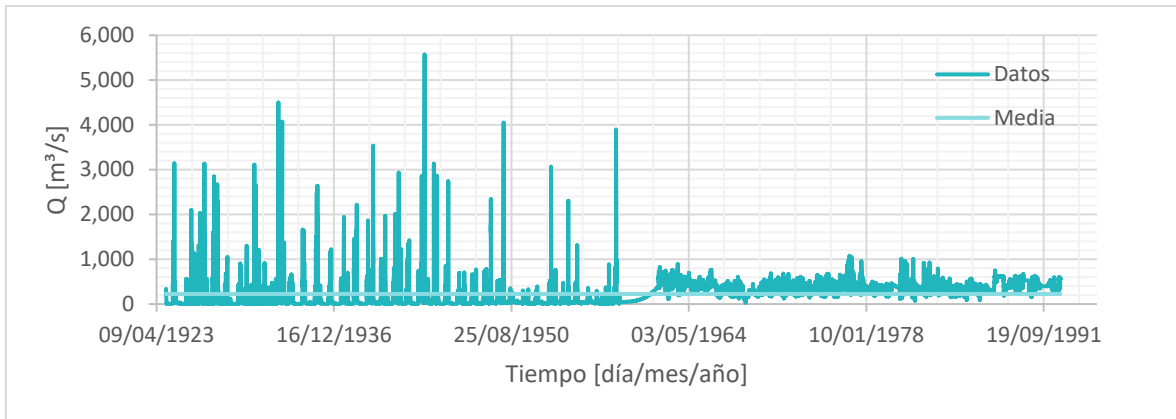
#### 3.1 Series de tiempo de caudales medios: diarios, mensuales y anuales

Las cuencas cuentan con información hidrométrica (Tabla 6 y Tabla 7), pero para el análisis se utilizarán las EH más cercanas a la línea de costa. En la cuenca del Río Culiacán se utilizará la EH 10018 Puente Sudpacífico, ubicada aguas abajo de los ríos Tamazula y Humaya y en la cuenca del Río Piaxtla la EH 10065 Ixpalino. Los datos hidrométricos fueron obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales, BANDAS (IMTA, 2024).

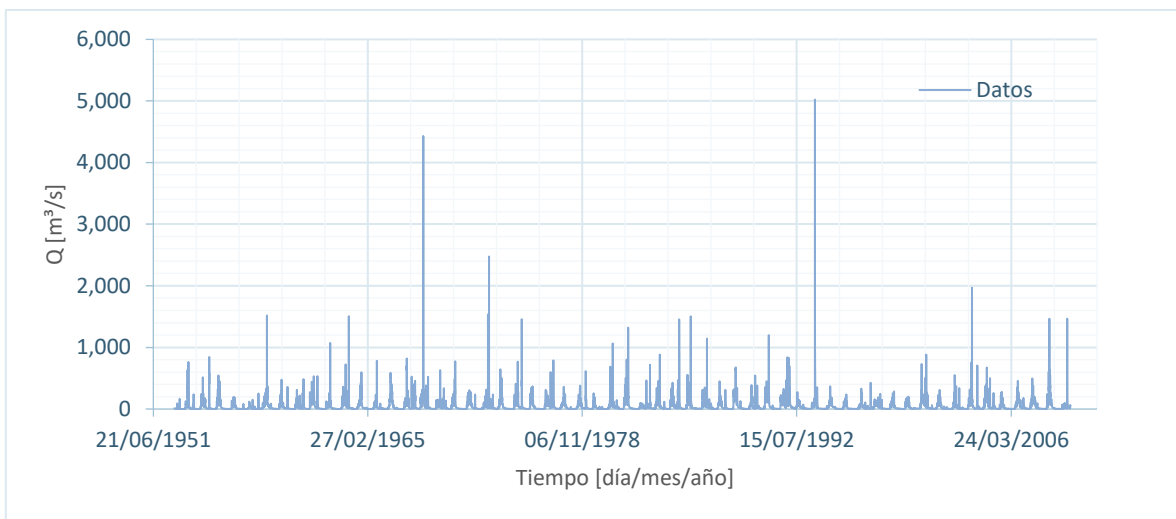
Las estaciones hidrométricas antes mencionadas, tienen registros históricos incompletos, por ello, fue necesario hacer uso de técnicas de regresión lineal usando la estación hidrométrica más cercana, y el método Polinomio de interpolación de Hermite cúbico por partes (PCHIP) a través del software MATLAB, para completar dichos registros.

El registro de los caudales medios diarios de la EH 10018 Puente Sudpacífico (Gráfica 5), muestra una disminución a partir del año 1958, que coincide con el año en el que se comenzó a construir la presa Adolfo López Mateos y en 1961 entró en operación. Ello se debe al inicio del proceso de almacenamiento de un volumen muy grande de agua en el embalse. Actualmente, el caudal registrado es menor al correspondiente antes de la construcción de dicha presa. No se observan cambios en el año 1949, construcción de la presa Sanalona, sobre el río Tamazula.

El registro de la EH 10065 Ixpalino, se corresponde con una cuenca que no se encuentra influenciada por actividades humanas importantes (Gráfica 6). A lo largo del registro histórico los datos presentan un comportamiento similar, a excepción de algunos picos notables que corresponden a eventos hidrológicos extremos, reflejando una respuesta natural a una precipitación intensa.



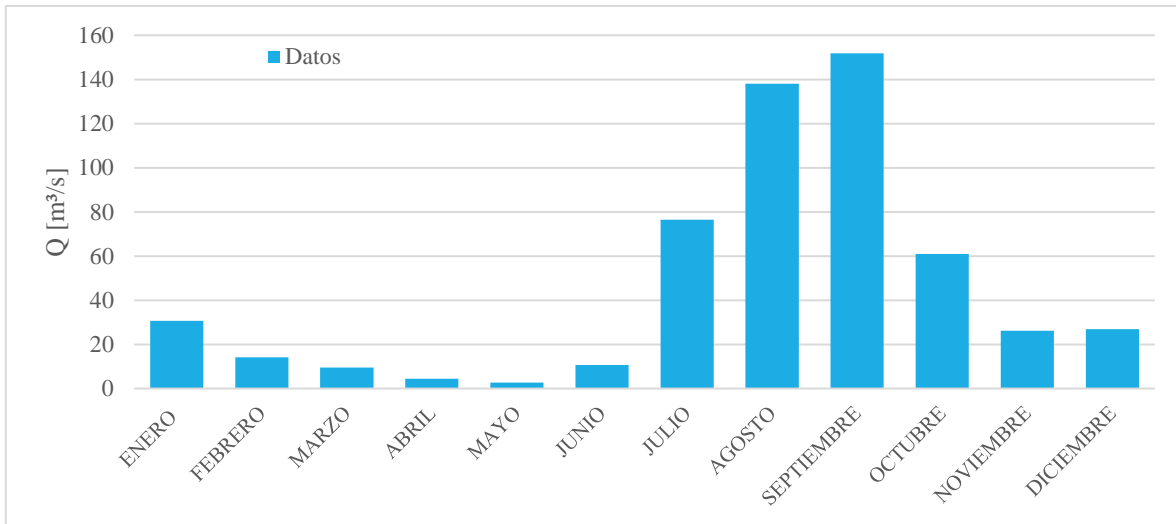
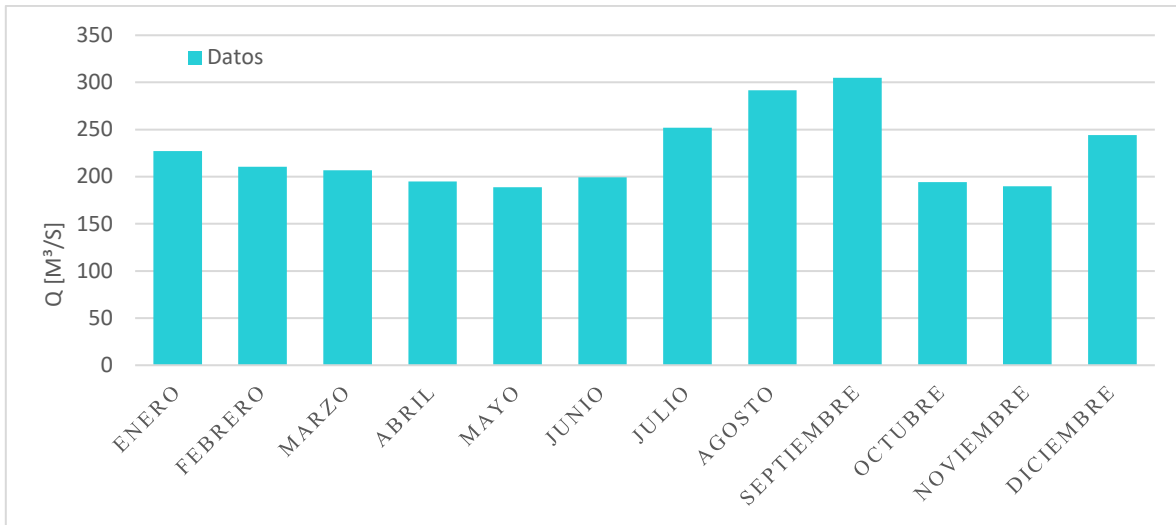
Gráfica 5 Caudal medio diario en la EH 10018 Puente Sudpacífico



Gráfica 6 Caudal medio diario en la EH 10065 Ixpalino

El análisis estacional con el registro de caudales medios mensuales se observa en la Gráfica 7; muestran comportamientos similares, ya que, en los meses entre julio a septiembre, los caudales son mayores, identificando la época de lluvias y la época de sequías entre febrero y mayo.

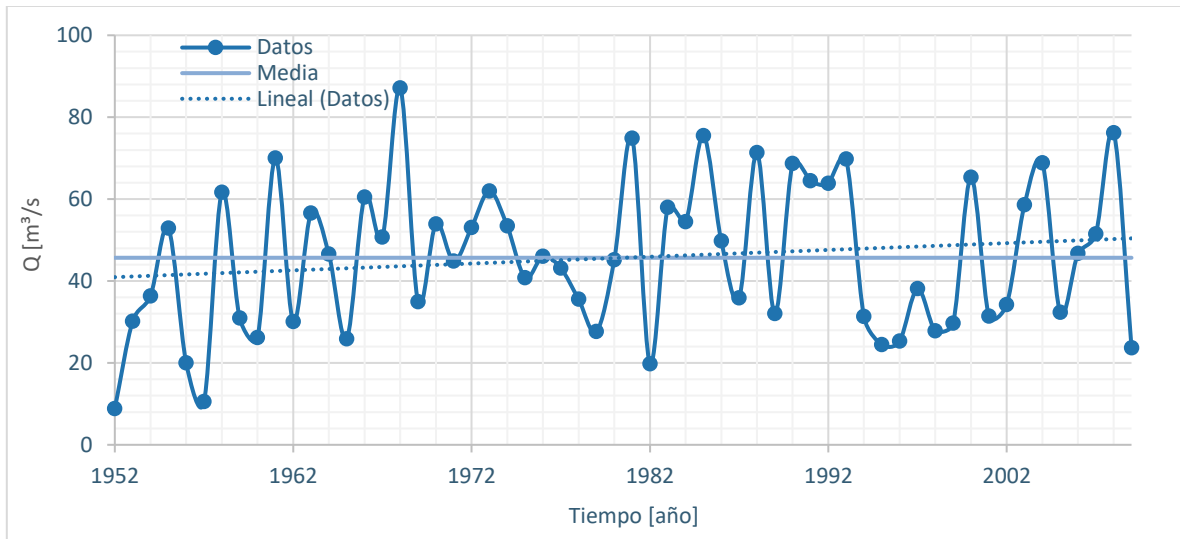
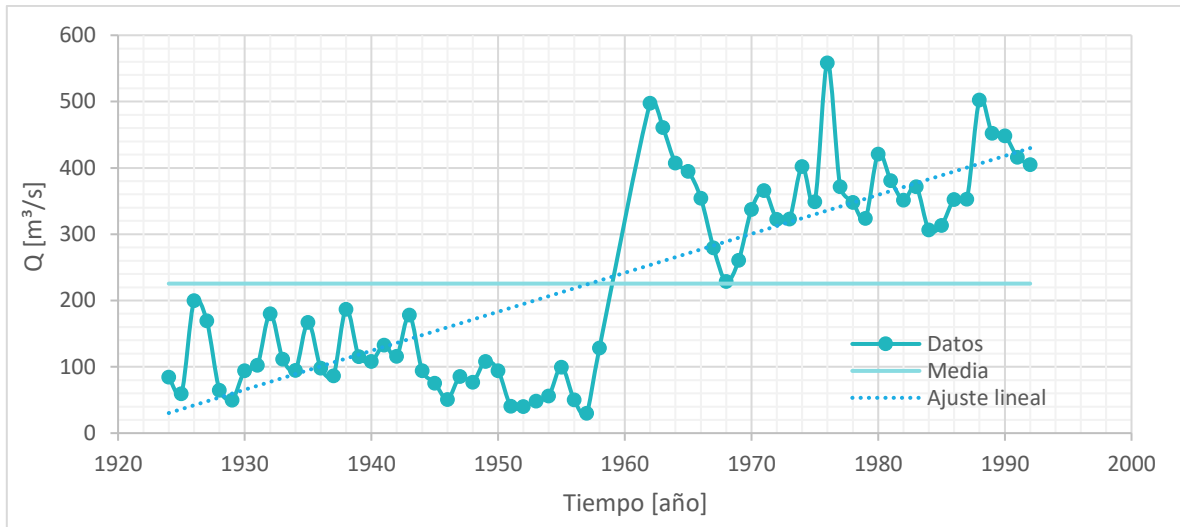




Gráfica 7 Caudal medio mensual en la EH 10018 Puente Sudpacífico (arriba) y en la EH 10065 Ixpalino (abajo)

En cuanto al caudal medio anual, en la EH 10018 Puente Sudpacífico tiene un comportamiento con alta variabilidad y menor magnitud en el periodo comprendido entre 1924 y 1958 en contraste con el comportamiento posterior a 1958, aumento en la magnitud de los caudales y reducción en la variabilidad; se registró un cambio notable, relacionado en principio debido a la construcción de la presa Adolfo López Mateos (Gráfica 8). En cambio, en la EH 10065 Ixpalino, se observa un comportamiento del caudal medio anual con picos que superan los 80 m<sup>3</sup>/s que podrían estar asociados a eventos hidrológicos. El caudal, se mantiene relativamente estable, con una ligera tendencia creciente (Gráfica 8).





Gráfica 8 Caudal medio anual. EH 10018 Puente Sudpacífico (arriba) y EH 10065 Ixpalino (abajo)

### 3.2 Evaluación del caudal ecológico

En este apartado se presenta el desarrollo de los métodos utilizados para determinar el caudal ecológico en la cuenca del Río Culiacán y en la cuenca del Río Piaxtla. Entre estos métodos se consideran los hidrológicos recomendados por la norma mexicana, que permiten estimar el caudal mínimo y máximo para mantener el ecosistema acuático. También se muestra el método hidráulico del perímetro mojado con dos aproximaciones (flujo permanente uniforme y variado), que evalúa las características del flujo en función de la geometría del río. Por último, la aplicación del método de simulación del hábitat con el software Iber, que permite modelar el caudal y la disponibilidad de hábitat para ciertas especies.

### 3.2.1 Métodos hidrológicos

Los objetivos ambientales de las cuencas del Río Culiacán y Río Piaxtla, según el Apéndice normativo A de la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (NMX-AA-159-SCFI-2012, 2012) se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Condiciones ambientales de las cuencas (NMXN-AA-159-SCFI-2012, 2012)

Clave de región hidrológica	10	10
Nombre de la región hidrológica	Sinaloa	Sinaloa
Nombre de la cuenca	Río Culiacán	Río Piaxtla
Importancia ecológica	Alta	Media
Presión de uso	Muy alta	Baja
Estado de conservación	Deficiente	Bueno
Objetivo ambiental	<b>D</b>	<b>B</b>

### NMX-AA-159-SCFI Apéndice B

A partir de los caudales medios mensuales se determinaron las series de tiempo de régimen natural (1924-1958 y 1953-1979) y régimen actual o alterado (1962-1992 y 1980-2009) en la EH 10018 Puente Sudpacífico ((Tabla 13 y Tabla 14) y en la EH10065 Ixpalino(

Tabla 15 y

Tabla 16) respectivamente.

Tabla 13 Régimen natural en la EH 10018 Puente Sudpacífico

Año	ENE	FEB	MA R	ABR	MA Y	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1924	81.4	11.0	6.9	3.3	2.3	4.0	356.7	353.8	119.5	30.4	14.7	18.9
1925	19.3	19.3	6.9	1.6	1.8	3.2	110.9	157.1	134.7	8.7	8.1	235.0
1926	250.3	11.0	131.4	5.0	42.3	11.3	253.9	390.5	526.1	65.8	14.0	671.9
1927	17.8	43.1	6.9	9.5	4.2	40.5	47.0	459.6	614.6	126.2	14.7	640.1
1928	129.9	11.0	64.4	3.3	15.8	20.0	99.5	223.7	138.2	30.6	19.9	16.3
1929	11.2	11.0	6.9	3.3	2.3	4.0	83.7	118.8	303.8	29.2	14.7	11.6
1930	82.1	90.6	114.2	3.3	2.3	30.3	53.2	86.2	29.2	302.0	23.5	307.5
1931	114.9	202.9	9.3	51.1	2.3	46.8	210.5	387.2	63.4	28.9	74.4	42.1
1932	11.2	10.7	205.2	3.3	2.3	4.0	344.9	502.5	471.1	117.7	14.7	457.3
1933	145.4	249.5	24.2	7.6	4.5	39.2	220.9	235.1	302.8	96.5	15.3	10.0
1934	6.9	5.6	3.4	2.3	4.1	21.0	323.9	503.7	216.6	24.7	8.4	6.3
1935	5.1	15.0	5.0	2.5	1.1	33.4	361.8	642.3	788.1	54.7	68.1	24.0
1936	11.7	7.0	4.8	2.5	1.5	3.6	73.3	278.8	715.8	53.9	13.6	16.5
1937	12.1	6.0	3.7	2.4	1.6	66.2	204.4	210.4	394.2	35.7	12.9	85.8
1938	86.6	15.8	8.0	3.5	2.0	93.2	822.9	455.8	669.5	47.5	16.7	9.0
1939	9.0	5.9	3.5	2.0	1.7	60.4	155.4	400.7	211.5	66.8	23.4	432.9
1940	61.8	22.7	13.4	5.3	3.0	13.7	126.4	501.0	239.6	29.6	90.7	186.8
1941	34.8	32.7	8.0	4.3	3.8	13.9	178.2	304.9	656.0	91.2	15.7	244.0
1942	18.2	138.6	19.7	6.3	3.0	2.7	83.7	465.2	430.3	179.4	37.2	11.5

Año	ENE	FEB	MA R	ABR	MA Y	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1943	12.2	6.7	3.3	2.0	1.6	127.8	200.9	317.3	672.8	244.6	27.1	508.3
1944	84.6	89.6	106.6	18.4	8.7	8.9	48.6	232.6	254.1	26.4	213.7	47.1
1945	43.6	13.4	6.9	4.1	2.4	1.6	166.3	266.8	123.7	238.0	18.5	10.8
1946	12.2	6.6	3.9	2.4	1.3	29.2	116.0	199.9	140.7	61.1	10.4	24.4
1947	166.0	15.2	10.9	7.5	5.4	10.1	59.1	321.5	273.3	32.1	22.1	99.0
1948	16.9	14.7	11.2	7.6	5.6	42.8	200.4	216.5	240.3	77.9	20.7	66.9
1949	464.8	106.3	26.1	30.4	27.4	25.0	103.7	156.3	201.5	62.9	43.2	49.0
1950	360.9	31.8	32.2	32.2	39.1	46.4	148.3	108.5	155.6	67.1	53.8	49.4
1951	39.4	49.6	38.0	33.6	31.3	22.3	58.5	101.6	39.0	26.7	13.2	36.2
1952	15.9	16.0	24.0	14.5	10.6	12.3	114.6	135.1	47.5	39.3	27.0	20.6
1953	13.8	18.9	23.2	14.0	6.6	3.2	54.0	93.0	279.4	26.8	22.5	27.5
1954	73.7	27.0	46.4	41.8	29.7	27.0	83.1	163.8	58.6	48.7	36.6	30.4
1955	238.4	18.5	29.1	36.8	46.0	40.5	64.2	319.9	241.5	95.9	28.1	28.8
1956	22.0	29.3	36.4	40.4	39.6	30.8	100.1	73.8	86.2	71.6	44.1	29.7
1957	21.8	22.9	41.8	25.7	20.6	13.7	20.8	80.1	33.7	29.2	17.5	34.8
1958	20.2	21.5	81.9	34.1	26.2	66.5	62.7	209.6	661.5	259.8	51.2	44.4

Tabla 14 Régimen alterado en la EH 10018 Puente Sudpacífico

Año	ENE	FEB	MA R	ABR	MA Y	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1962	536.1	607.1	615.6	609.2	597.7	559.7	409.7	389.7	338.0	346.8	478.7	493.4
1963	506.6	565.2	529.8	490.0	544.4	619.8	300.0	245.8	419.0	476.8	475.6	356.1
1964	458.5	497.7	479.0	508.0	498.9	479.2	365.6	350.7	326.6	311.8	330.3	307.2
1965	330.0	371.6	430.0	391.6	427.0	405.3	362.7	340.7	356.3	352.7	456.2	511.6
1966	594.7	463.4	439.4	449.7	445.9	358.2	278.2	211.4	201.0	197.1	303.6	317.7
1967	338.8	301.9	323.6	352.7	309.6	268.9	256.5	202.9	216.4	226.3	311.5	239.6
1968	302.9	360.6	223.3	327.6	252.6	288.2	180.2	156.6	117.1	185.7	164.9	206.6
1969	269.0	269.4	269.0	287.9	247.2	246.7	222.5	220.9	228.5	290.6	274.3	306.6
1970	327.3	307.4	384.5	367.5	399.2	358.4	351.6	294.7	304.1	303.3	308.8	342.2
1971	386.0	393.8	478.4	475.9	414.3	410.6	338.4	272.0	268.3	346.8	326.6	268.7
1972	366.0	342.3	311.5	329.3	340.8	340.3	294.1	263.2	375.2	315.5	266.1	341.1
1973	331.2	392.1	342.7	404.0	381.5	324.4	293.8	284.4	249.1	267.0	300.7	312.5
1974	336.8	383.1	478.3	528.5	472.8	524.8	424.9	370.0	320.3	310.8	311.7	367.5
1975	491.5	396.0	390.4	348.1	377.6	402.1	307.4	261.4	247.7	172.3	349.0	438.7
1976	459.1	462.1	511.8	482.1	459.3	481.2	509.4	606.7	836.2	726.3	703.2	484.0
1977	411.1	358.4	357.6	340.8	325.0	317.9	377.0	511.7	464.1	304.0	333.6	357.7
1978	313.1	324.7	324.5	321.6	378.2	420.5	421.1	348.8	298.6	357.0	330.1	334.1
1979	336.4	347.6	349.1	342.4	321.2	342.0	327.4	334.6	226.6	264.4	334.8	353.5
1980	438.0	439.4	411.9	400.1	386.8	373.8	360.8	318.4	501.7	508.5	452.0	476.6
1981	555.6	608.1	440.6	380.5	347.1	395.8	349.9	374.4	301.3	177.0	343.9	317.6
1982	313.2	303.4	286.4	294.4	316.3	361.2	397.9	333.3	315.2	410.6	454.0	430.8
1983	390.0	394.8	434.7	364.7	352.6	354.7	387.6	321.9	367.2	313.9	417.0	352.9
1984	336.0	358.3	327.1	333.6	323.2	357.6	278.7	218.3	271.6	282.6	328.9	279.8
1985	319.3	327.5	319.2	340.2	330.8	301.1	264.6	248.5	223.9	297.3	387.6	402.5

Año	ENE	FEB	MA R	ABR	MA Y	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1986	421.6	406.2	406.7	351.2	340.0	369.1	321.5	288.9	330.9	322.9	361.7	316.0
1987	320.2	326.1	351.2	358.2	333.5	331.5	316.8	303.5	289.9	291.7	381.8	614.4
1988	569.3	614.4	606.0	610.3	608.0	609.0	611.9	416.5	315.9	344.3	367.6	378.5
1989	432.1	487.7	477.6	469.0	463.7	483.9	558.8	455.1	295.7	296.9	401.6	605.3
1990	573.0	531.6	530.4	527.7	526.8	526.0	523.3	296.3	289.4	325.4	365.3	373.6
1991	490.7	424.9	450.8	433.4	404.5	390.6	397.6	397.6	397.6	397.6	397.6	397.6
1992	419.7	482.0	511.3	427.4	347.4	354.8	461.7	361.1	343.3	336.5	385.0	445.3

Tabla 15 Régimen natural en EH 10065 Ixpalino

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1953	6.8	13.9	5.0	1.8	0.7	1.5	37.8	95.9	162.7	18.3	7.1	10.6
1954	28.7	4.8	2.2	1.0	0.7	7.4	91.4	149.3	60.2	68.0	11.5	5.6
1955	107.8	10.8	4.5	2.1	1.1	2.7	71.5	243.4	117.3	49.9	11.0	6.2
1956	4.1	2.8	1.6	0.9	2.1	18.1	60.1	67.3	64.1	10.2	4.1	3.7
1957	2.7	2.0	7.2	1.8	0.9	1.0	13.2	43.2	21.6	17.9	5.5	7.8
1958	4.0	3.5	23.2	3.9	1.5	36.0	85.9	121.4	304.0	95.9	33.4	25.3
1959	13.5	7.8	4.2	3.6	2.2	6.2	60.9	163.1	54.4	33.0	11.6	6.8
1960	41.6	7.3	3.5	2.0	1.2	1.6	33.6	93.6	62.2	34.1	10.1	20.8
1961	85.6	16.0	4.6	2.5	0.9	36.5	134.4	206.8	224.4	54.7	15.2	53.3
1962	10.6	5.6	3.9	1.8	1.2	2.8	42.6	43.1	99.3	124.8	14.0	8.6
1963	6.5	3.7	1.9	1.0	0.6	6.8	103.6	155.0	161.2	82.3	17.1	132.5
1964	16.0	8.7	6.5	2.8	1.9	8.3	33.0	97.0	243.0	116.3	15.4	10.1
1965	8.3	8.0	2.9	1.6	0.9	1.3	26.2	70.2	136.9	30.6	5.8	17.4
1966	6.8	7.5	2.8	2.9	2.4	6.8	91.9	308.8	226.2	44.3	11.7	8.5
1967	8.1	4.4	2.2	1.1	0.8	5.8	80.2	224.4	177.1	34.5	7.8	57.0
1968	24.3	62.0	108.3	11.3	4.4	4.1	92.8	144.3	444.7	57.8	56.5	38.5
1969	62.2	13.0	6.5	3.7	2.4	2.8	69.0	54.9	74.7	72.4	12.1	41.8
1970	57.2	22.4	11.7	4.7	2.5	5.3	60.7	144.2	258.5	58.8	12.3	7.4
1971	5.4	3.3	2.5	1.6	1.3	14.2	106.4	169.9	124.2	72.8	19.7	12.2
1972	34.8	7.3	3.6	2.2	1.6	6.9	30.6	75.3	122.9	104.6	208.4	40.0
1973	32.0	40.9	15.0	6.5	3.8	4.6	51.1	289.1	225.7	47.7	16.0	9.0
1974	6.6	4.4	3.6	1.8	1.3	4.1	75.7	133.6	185.7	75.2	19.4	124.6
1975	37.0	12.8	5.2	2.8	1.8	1.9	93.1	162.7	127.6	26.4	9.5	5.6
1976	4.1	2.9	1.6	1.1	1.0	20.4	126.3	113.5	95.6	63.3	51.3	67.7
1977	109.1	14.3	7.0	4.3	3.0	11.8	54.5	105.0	128.2	56.0	15.3	6.2
1978	4.5	7.7	2.9	1.6	1.1	2.6	47.3	90.0	181.2	60.0	18.7	8.0
1979	60.3	46.7	8.5	3.7	1.9	1.5	46.4	102.8	40.3	7.9	3.4	8.0

Tabla 16 Régimen de alterado en la EH 10065 Ixpalino

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	3.9	8.1	2.2	1.0	0.8	1.2	24.7	150.3	149.8	132.5	47.1	19.0
1981	39.5	16.2	8.5	3.0	1.9	2.4	119.8	197.8	235.0	225.2	29.0	13.6
1982	9.4	5.4	3.4	1.8	1.5	1.6	33.8	42.1	35.3	20.8	11.4	68.8
1983	28.3	29.7	90.1	9.5	4.2	5.1	34.8	124.0	208.7	118.7	27.1	13.3
1984	13.4	17.8	4.4	2.2	1.6	33.9	171.6	200.4	77.4	28.1	19.6	78.2
1985	211.8	21.1	8.1	4.1	2.7	16.6	94.6	177.7	152.7	174.0	21.8	11.7
1986	8.3	8.4	5.5	4.4	4.0	6.9	88.1	121.6	150.2	135.4	22.8	37.3
1987	20.7	5.9	7.6	2.9	2.6	4.6	62.2	138.3	95.4	37.9	8.5	40.1
1988	19.3	4.8	2.3	1.7	0.4	5.9	237.6	300.0	175.2	50.6	22.2	28.8
1989	7.8	6.3	4.2	3.1	2.6	2.6	22.5	129.4	111.6	16.0	48.2	28.5
1990	69.4	22.1	9.5	5.5	3.6	16.3	167.4	182.1	150.7	154.5	21.5	14.7
1991	11.7	7.0	4.9	3.3	2.7	2.6	150.8	109.5	154.3	40.0	93.6	187.8
1992	291.3	123.8	31.6	18.4	13.6	9.2	60.1	93.2	66.5	22.8	14.7	20.0
1993	11.7	8.3	5.6	3.9	3.1	5.7	53.1	64.0	530.8	54.3	92.4	9.5
1994	7.5	5.6	5.1	4.1	3.4	17.9	22.9	75.9	102.2	71.7	30.8	27.2
1995	5.3	4.3	3.5	2.8	2.5	5.3	55.2	81.5	101.5	17.2	7.4	5.8
1996	4.5	3.2	2.7	2.4	2.3	9.9	36.7	82.2	103.2	26.2	16.2	14.2
1997	15.0	17.0	7.4	51.0	15.7	22.5	84.9	69.3	88.5	27.6	33.4	24.3
1998	8.4	6.9	4.7	3.6	2.9	5.2	45.0	80.9	89.8	61.0	14.5	8.4
1999	5.9	4.5	3.1	2.4	2.0	17.1	89.9	99.5	102.4	17.1	6.3	4.0
2000	12.8	9.7	8.5	7.8	6.9	79.8	185.9	136.3	124.3	92.1	94.8	22.8
2001	10.8	7.5	14.7	4.7	4.8	15.7	98.6	98.1	78.2	23.7	6.7	10.8
2002	6.9	12.2	4.5	3.1	2.6	4.9	45.4	159.2	98.1	29.0	20.5	22.0
2003	11.8	14.7	5.5	3.0	2.8	7.7	81.1	151.2	362.0	43.1	14.2	7.1
2004	54.2	19.0	10.0	4.9	3.0	19.7	106.2	248.1	246.5	36.7	60.7	15.8
2005	9.1	48.4	19.3	6.5	4.2	3.6	41.9	138.1	81.9	23.3	7.7	5.0
2006	4.6	4.1	2.9	2.3	2.2	11.3	58.1	194.5	178.9	60.3	20.9	17.2
2007	40.9	10.3	5.3	3.8	2.8	35.3	142.1	162.0	128.5	51.2	18.6	12.6
2008	6.8	4.8	3.7	2.9	2.5	4.0	98.8	358.8	309.5	78.7	26.3	14.1
2009	4.4	3.7	3.6	3.3	3.4	9.0	28.3	39.9	38.5	103.6	26.1	18.0

Posteriormente se calcularon los percentiles 90 (máximo) y 10 (mínimo) del régimen actual, tanto del caudal medio mensual como anual. Después se verificó si el régimen alterado se encuentra comprendido entre los percentiles 90 y 10 en el régimen natural mensual (Tabla 17 y Tabla 18; Gráfica 9 y Gráfica 10) y anual (Tabla 19; Gráfica 11 y Gráfica 12). Dado que el régimen alterado cumple con más del 50% con relación al régimen natural, en la EH 10065 Ixpalino, la cuenca se considera hidrológicamente no alterado, de lo contrario, se considera alterado como en la EH 10018 Puente Sudpacífico.

Tabla 17 Percentiles mensuales en la EH 10018 Puente Sudpacífico

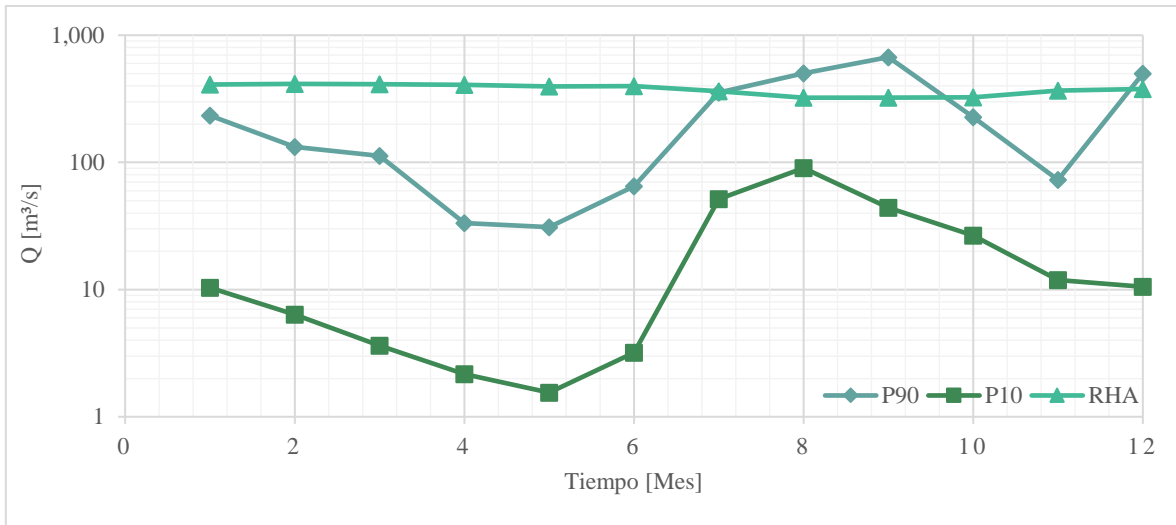
MENSUAL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>Percentil 10</b>	10.3	6.4	3.6	2.2	1.5	3.2	51.4	90.3	44.1	26.5	11.9	10.5
<b>Percentil 90</b>	233.5	132.1	112.7	33.3	31.0	65.1	354.3	502.2	672.1	226.3	73.1	498.1
<b>Cumple</b>	0	0	0	0	0	0	16	29	30	5	0	28
<b>Datos totales</b>	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<b>% que cumple</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.6	93.5	96.8	16.1	0.0	90.3
<b>% que cumple: 29.0 CUENCA ALTERADA</b>												

Tabla 18 Percentiles mensuales en la EH 10065 Ixpalino

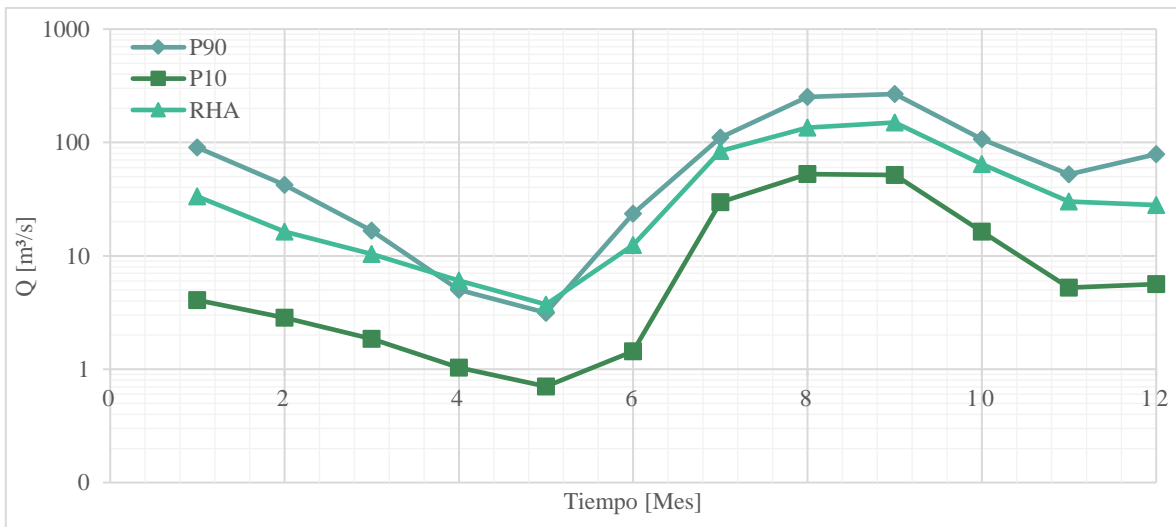
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>Percentil 10</b>	4.1	2.8	1.8	1.0	0.7	1.4	29.7	52.6	51.6	16.3	5.2	5.6
<b>Percentil 90</b>	90.0	42.1	16.7	5.0	3.1	23.5	110.4	252.6	267.6	107.0	52.3	79.0
<b>Cumple</b>	27	28	22	23	19	26	19	26	25	23	26	27
<b>Meses totales</b>	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
<b>% que cumple</b>	90.0	93.3	73.3	76.7	63.3	86.7	63.3	86.7	83.3	76.7	86.7	90.0
<b>% que cumple: 80.8 CUENCA NO ALTERADA</b>												

Tabla 19 Percentiles anuales en la EH 10018 Puente Sudpacífico y EH 10065 Ixpalino

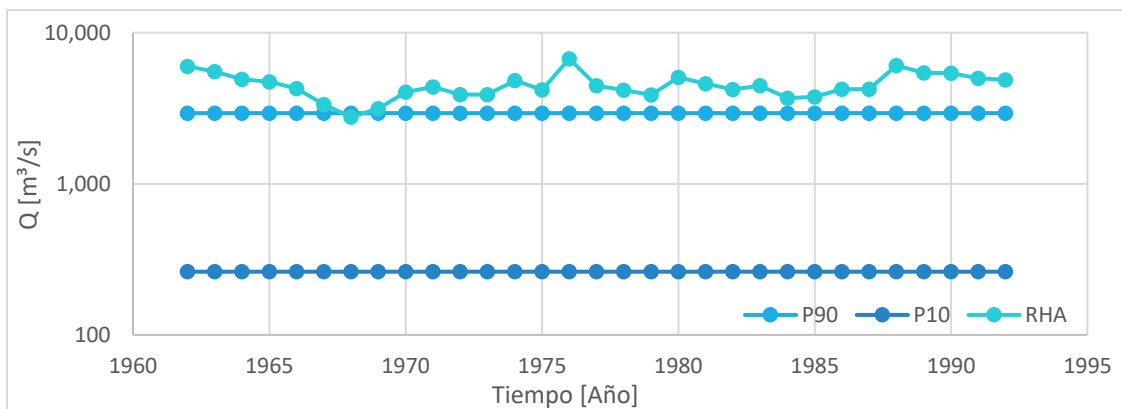
ANUAL	10018	10065
<b>Percentil 10</b>	261.9	172.9
<b>Percentil 90</b>	2933.8	1049.3
<b>Caudal medio anual</b>	21.8	14.4
<b>Caudal medio anual</b>	244.5	87.4
<b>Cumple</b>	1	30
<b>Datos totales</b>	31	30
<b>% que cumple</b>	3.2	100.0
<b>Estado</b>	<b>ALTERADA</b>	<b>NO ALTERADA</b>



Gráfica 9 Régimen hidrológico mensual en la EH 10018 Puente Sudpacífico

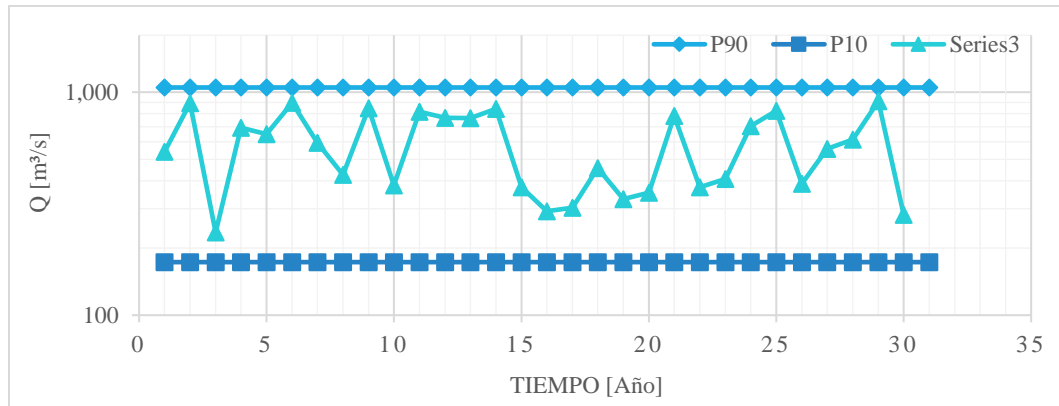


Gráfica 10 Régimen hidrológico mensual en la EH 10065 Ixpalino



Gráfica 11 Régimen hidrológico anual en la EH 10018 Puente Sudpacífico





Gráfica 12 Régimen hidrológico anual en la EH 10065 Ixpalino

*NMX-AA-159-SCFI Apéndice C*

A partir de los caudales medios diarios del régimen natural con al menos 20 años de registro de la EH 10018 Puente Sudpacífico (Tabla 13) y de la EH 10065 Ixpalino (

Tabla 15), se determinó el régimen de años secos, húmedos y medios (Tabla 20).

Tabla 20 Determinación de años secos, húmedos y medios

EH 10018 Puente Sudpacífico													
Año	Ene	Feb	Mar	Ab r	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pro m
Medio	77.6	39.9	33.4	13.4	11.5	29.1	163.2	276.4	301.0	80.8	32.9	129.6	<b>99.1</b>
Seco	5.1	5.6	3.3	1.6	1.1	1.6	20.8	73.8	29.2	8.7	8.1	6.3	<b>13.8</b>
Húmedo	464.8	249.5	205.2	51.1	46.0	127.8	822.9	642.3	788.1	302.0	213.7	671.9	<b>382.1</b>
EH 10065 Ixpalino													
Medio	29.2	12.8	9.4	2.8	1.7	8.3	67.4	135.9	152.7	56.2	23.1	27.5	<b>43.9</b>
Seco	2.7	2.0	1.6	0.9	0.6	1.0	13.2	43.1	21.6	7.9	3.4	3.7	<b>8.5</b>
Húmedo	109.1	62.0	108.3	11.3	4.4	36.5	134.4	308.8	444.7	124.8	208.4	132.5	<b>140.4</b>

Posteriormente, del análisis de los caudales se determinó el caudal base, como el caudal medio mensual mínimo, para las EH en estudio (Tabla 21).

Tabla 21 Caudal base en las EH 10018 y 10065

EH	10018	10065
Caudal base [m <sup>3</sup> /s]	7.4	1.6

Enseguida, se obtuvieron los periodos de estiaje y avenidas; de este modo, todos los caudales que se encuentran por encima del valor de escurrimiento medio anual se consideran como periodo de avenida, en caso contrario, se considera periodo de estiaje (Tabla 22).

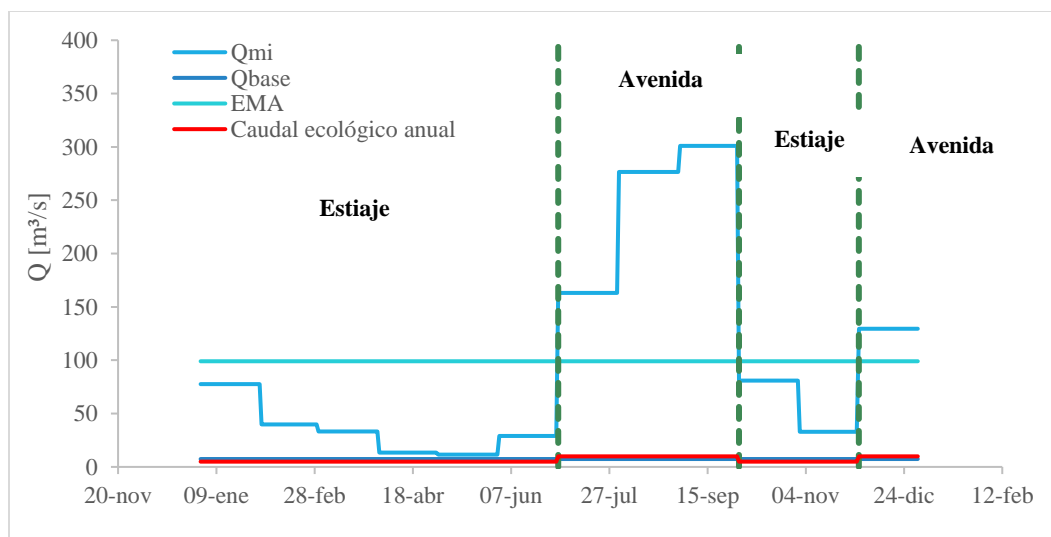
Tabla 22 Determinación de los periodos de estiaje y avenidas en las EH 10018 Y 10065

EH	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
10018	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Avenida	Avenida	Avenida	Estiaje	Estiaje	Avenida
10065	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Estiaje	Avenida	Avenida	Avenida	Avenida	Estiaje	Estiaje

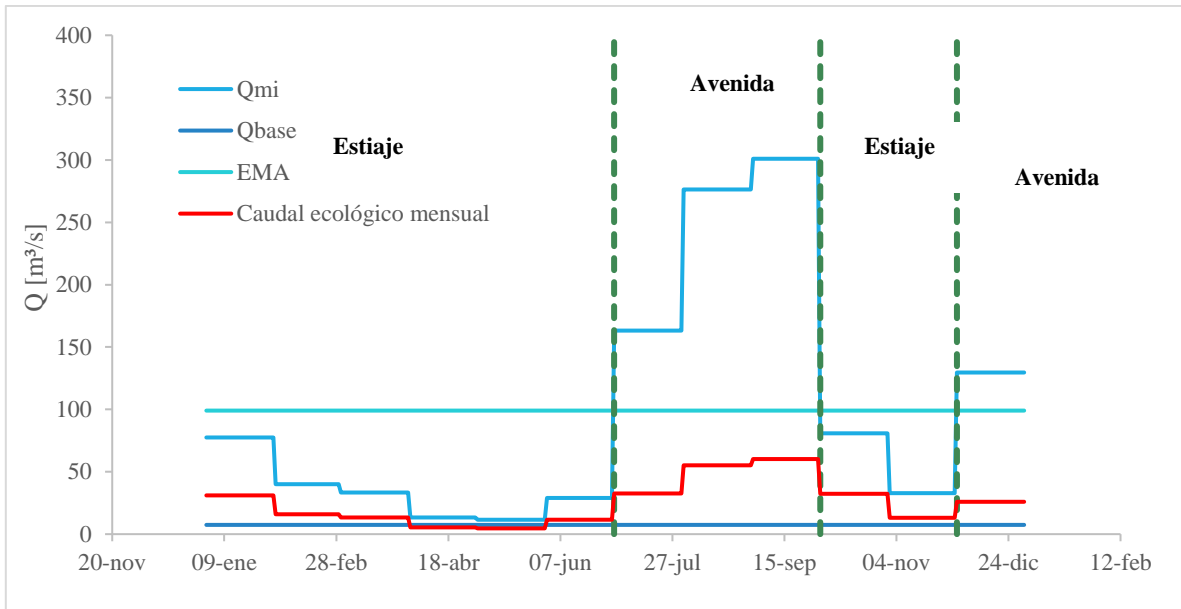
Finalmente, se formularon las propuestas de régimen de caudal ecológico tanto mensual como anual para el objetivo ambiental D (estado de conservación deficiente) para la cuenca del Río Culiacán (Tabla 24 y Gráfica 13 y

Tabla 25 y Gráfica 14, respectivamente) y B (estado de conservación bueno) para la cuenca del Río Piaxtla (Tabla 26 y Gráfica 15 y

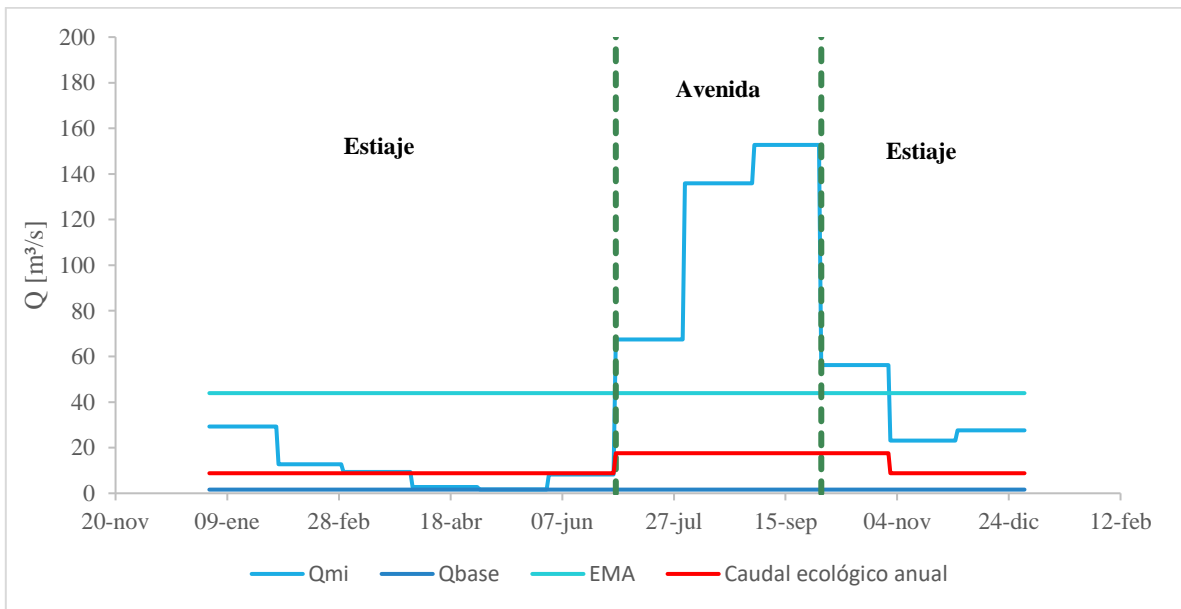
Tabla 27 y Gráfica 16, respectivamente).



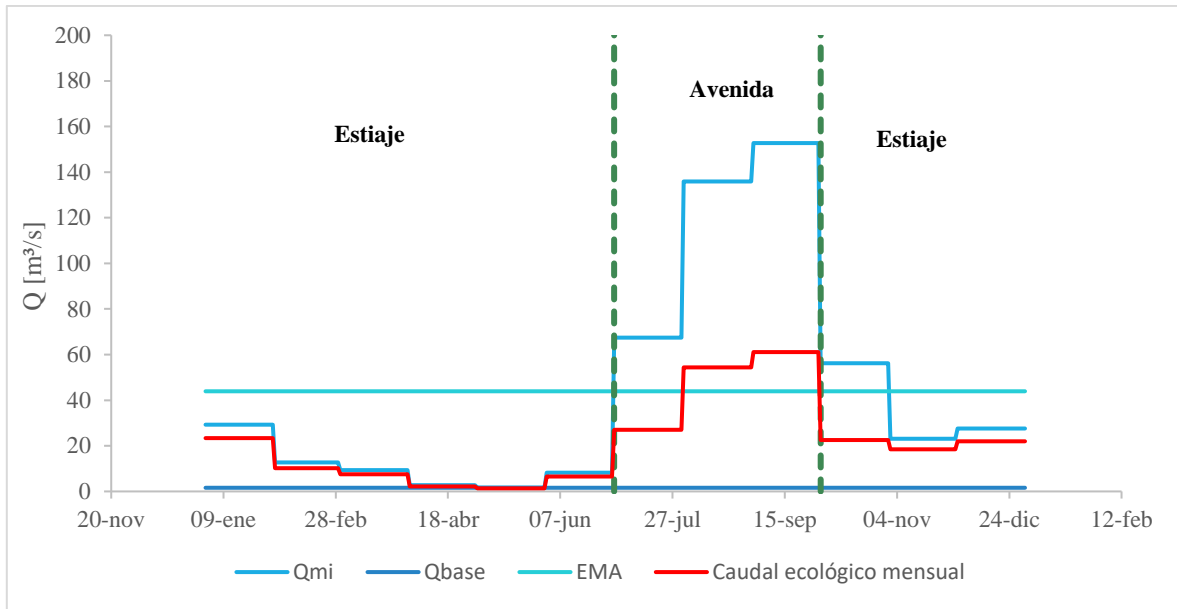
Gráfica 13 Propuesta de régimen anual de caudal ecológico para EH 10018 Puente Sudpacífico



Gráfica 14 Propuesta de régimen mensual de caudal ecológico para EH 10018 Puente Sudpacífico



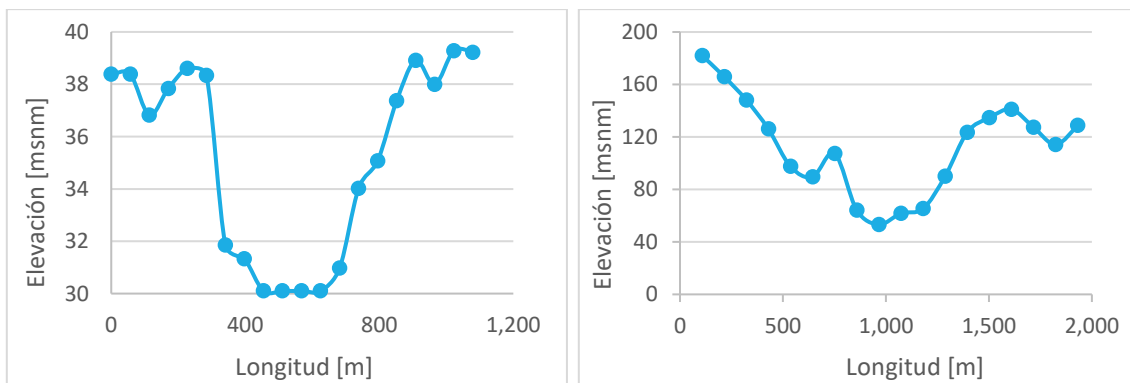
Gráfica 15 Propuesta de régimen anual de caudal ecológico para EH 10065 Ixpalino



Gráfica 16 Propuesta de régimen mensual de caudal ecológico para EH 10065 Ixpalino

### 3.2.2. Método hidráulico

Para el cálculo del caudal ecológico con el método de perímetro mojado se utilizan dos programas, HydroCalc y HEC-RAS; el primero con aproximación en régimen permanente uniforme y el segundo en régimen permanente variado. En ambos casos, se utilizó una misma sección transversal representativa, extraída del modelo digital de terreno con resolución espacial de 5 m del INEGI (INEGI, 2018; Gráfica 17), la pendiente media del cauce estimada con el método de la pendiente geométrica y un coeficiente de fricción de Manning, según las recomendaciones de Chow (1994) (Ilustración 35 y Tabla 23)



Gráfica 17 Secciones en EH 10018 Puente Sudpacífico (izquierda) y EH 10065 Ixpalino (derecha)

Tabla 23 Pendiente y coeficiente de fricción de Manning

Estación	S [m/m]	n
10018 Puente Sudpacífico	0.00598	0.035
10065 Ixpalino	0.00934	0.040

3.2.2.1. Hydrocalc2000

Una vez ingresados los datos anteriores y los caudales de interés, se calcularon los parámetros hidráulicos correspondientes (Ilustración 26).

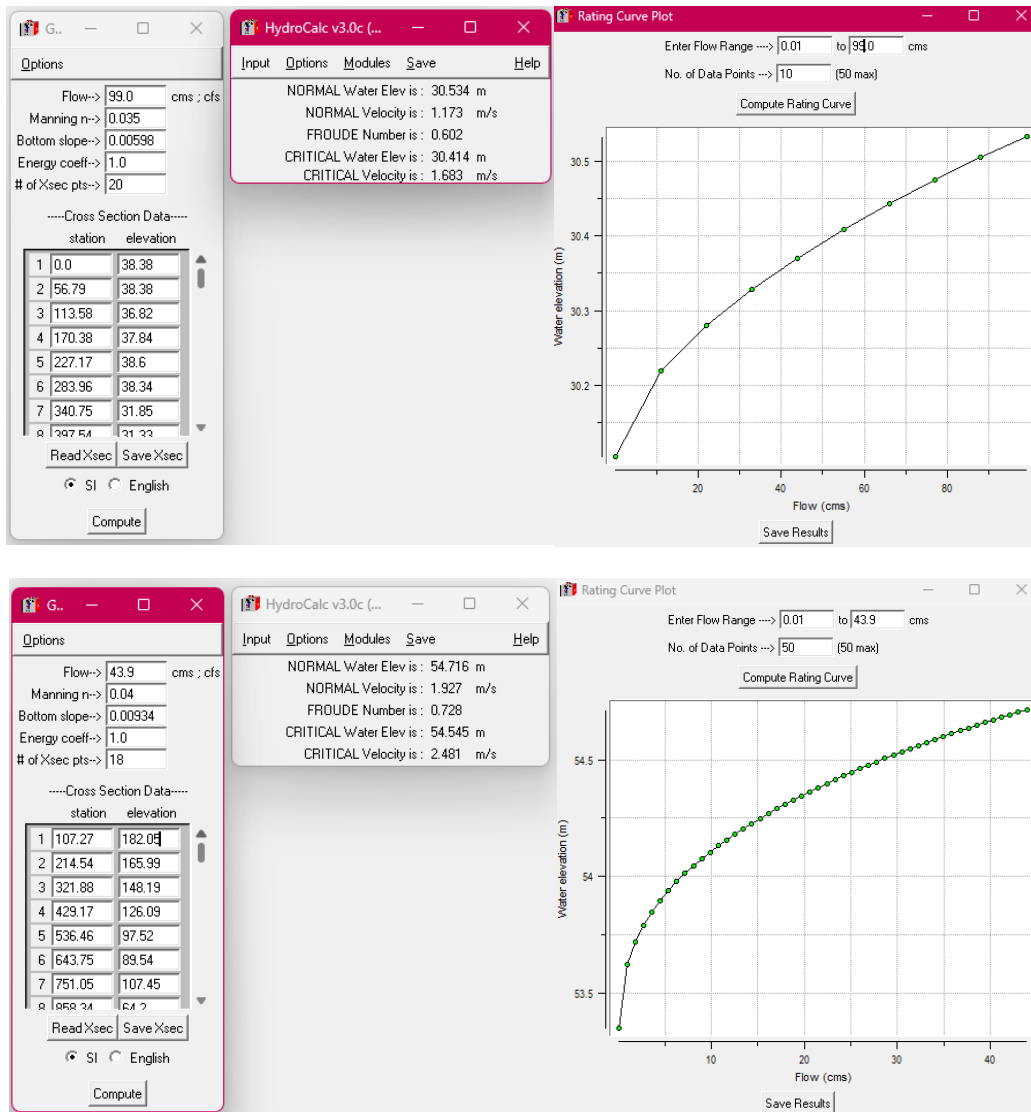
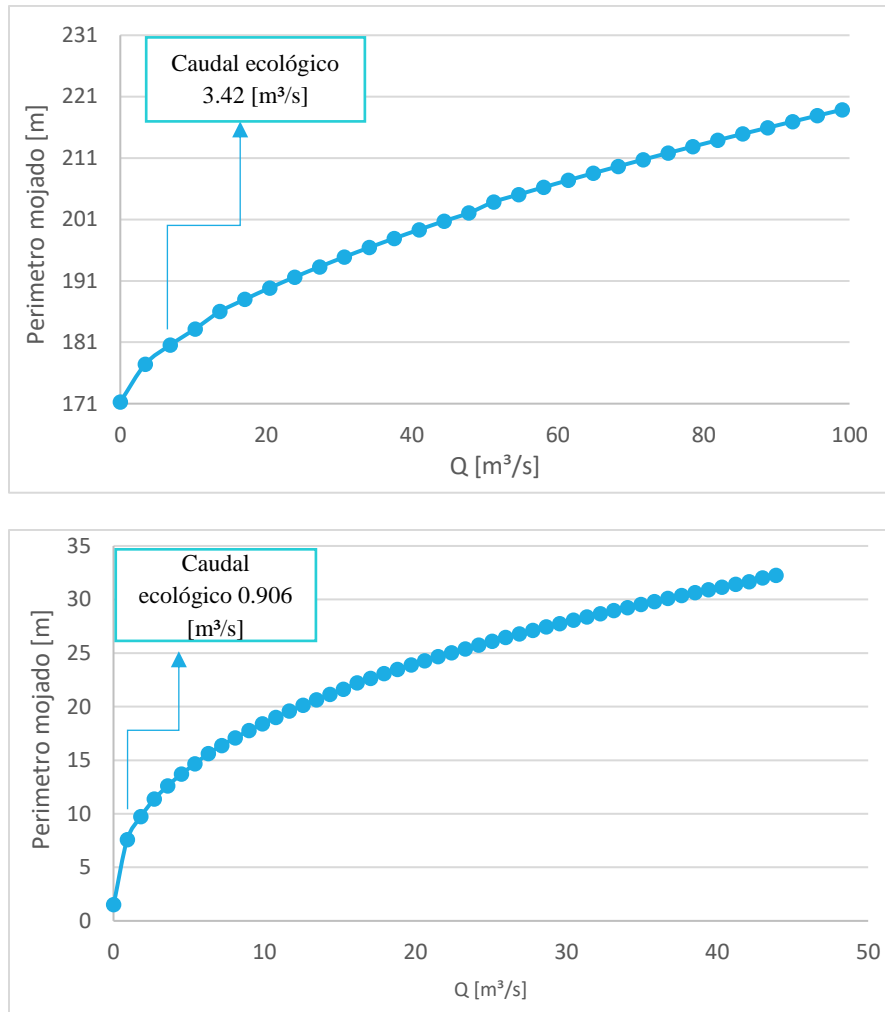


Ilustración 26 HydroCalc: ingreso de datos (izquierda) y resultados (derecha) en la EH Puente Sudpacífico (arriba) y EH Ixpalino (abajo)

Con la información anterior, se generó la curva que relaciona el caudal y el perímetro mojado y se identificó el punto de inflexión y con ello el caudal ecológico (Gráfica 18).



Gráfica 18 *Perímetro mojado vs caudal en la cuenca del Río Culiacán (arriba) y en la cuenca del Río Piaxtla (abajo)*

### 3.2.2.2. Hec-Ras

Para la aplicación de HEC-RAS, primero, se definió el modelo geométrico con el modelo digital del terreno con resolución espacial de 5 m (INEGI, 2018). El tramo de estudio se ubica a 1.3 km aguas arriba y 2 km aguas abajo de la EH 10018 Puente Sudpacífico y a 2.3 km aguas arriba y 1.3 km aguas abajo de la EH 10065 Ixpalino (Ilustración 27).

Posteriormente se incorporaron los parámetros hidráulicos, como la pendiente longitudinal del río, las condiciones de contorno y el coeficiente de rugosidad de Manning. Los caudales utilizados fueron los mismos que los empleados en HydroCalc (



Tabla 31).

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la sección transversal seleccionada para el análisis; la misma sección utilizada con HydroCalc (Ilustración 28). Así, con el perímetro mojado asociado a los distintos caudales, se generó la curva perímetro-caudal (Gráfica 19).

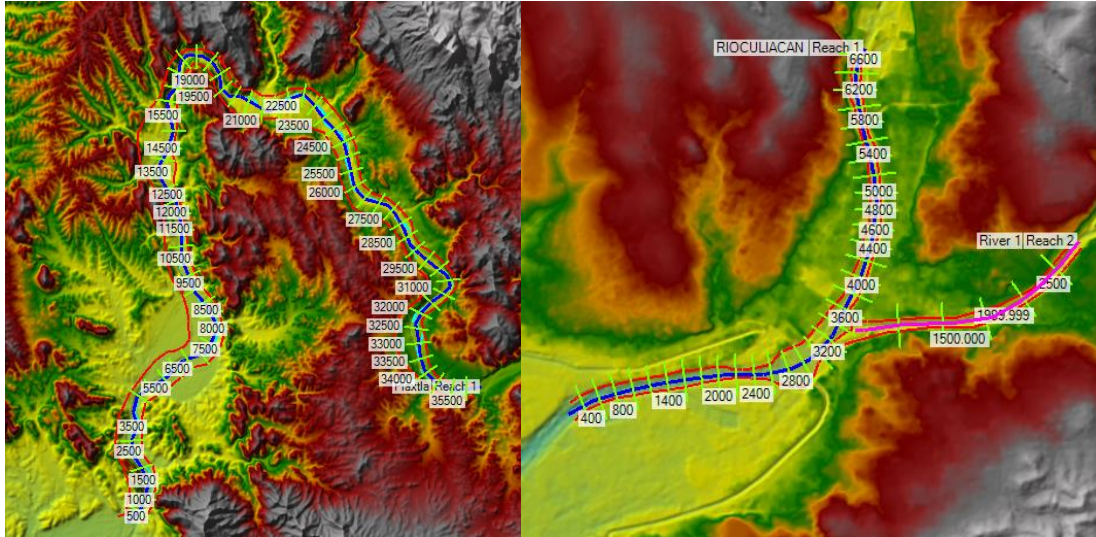


Ilustración 27 Modelo Digital de Elevación y geometría en el tramo de cauce del Río Piaxtla (izquierda) y Río Culiacán (derecha)

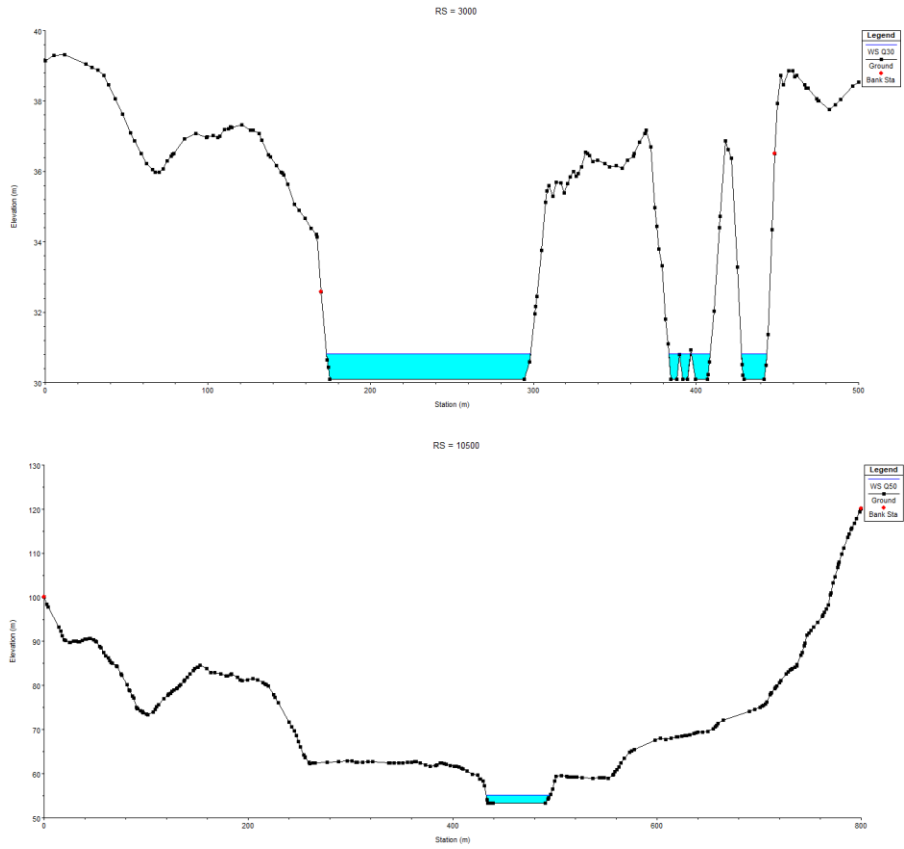
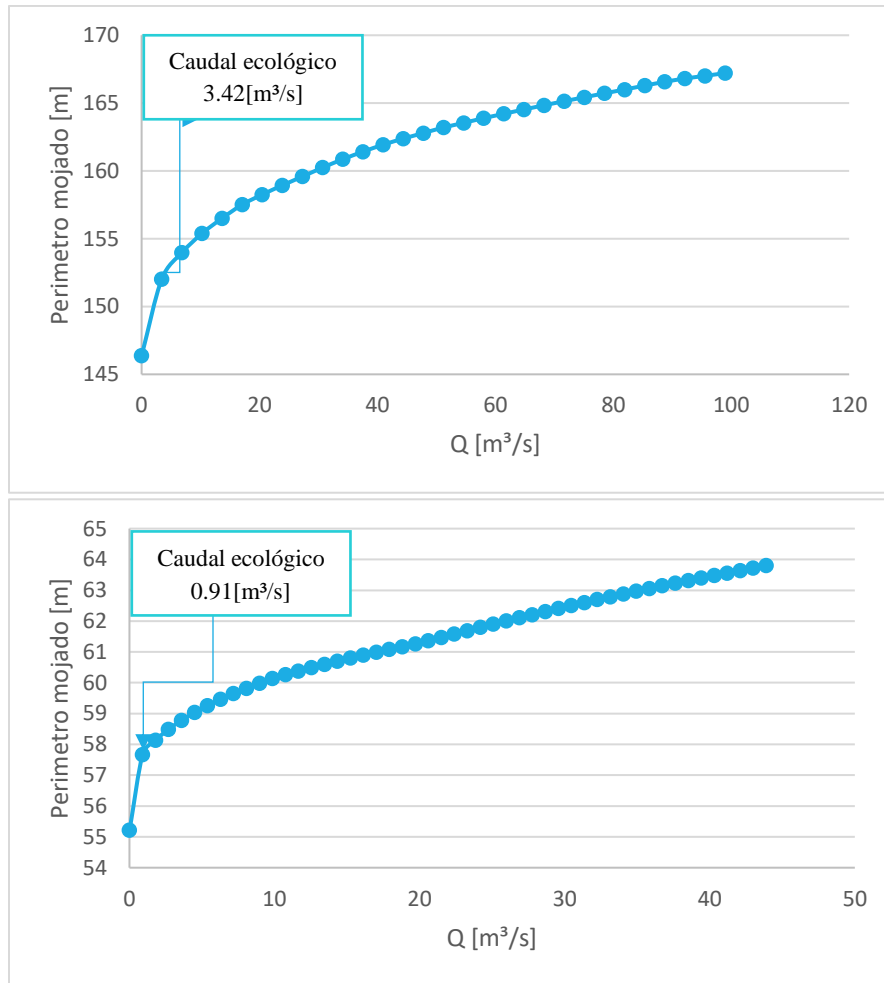


Ilustración 28 Sección transversal en la EH 10018 Puente Sudpacífico (arriba) y 10065 Ixpalino (abajo)



Gráfica 19 Perímetro mojado vs caudal en la EH10018 Sudpacífico (arriba) y en la EH 10065 Ixpalino (abajo)

### 3.2.2. Método Simulación del Hábitat

En este apartado se describe la aplicación del método hidrobiológico con el software Iber (Sanz-Ramos, et al., 2019). Los tramos de estudio son los mismos utilizados con HEC-RAS.

#### 3.2.2.1. Datos de entrada

A partir del modelo digital de terreno empleado en HEC-RAS se generó la malla de cálculo con elementos triangulares de 15 m de lado (Ilustración 29) y se asignaron los coeficientes de fricción de Manning correspondientes (Tabla 23).



Ilustración 29 MDT y malla para el tramo de estudio en el Río Culiacán y Río Piaxtla

### 3.2.2.2. Condiciones de contorno

Como condición de contorno de entrada se asignaron caudales escalonados entre 0.2 a 99 m<sup>3</sup>/s en la EH 10018 Sudpacífico y de 0.2 a 50 m<sup>3</sup>/s en la EH 10065 Ixpalino. Para la condición de contorno de salida, se asignó flujo subcrítico tipo vertedero.

### 3.2.2.3. Especie objetivo

El criterio seleccionado para evaluar el hábitat en ambas cuencas fue la suma de idoneidades, esto es, se suman los valores de idoneidad para las variables hidráulicas como el tirante y la velocidad; con ello, se determinan las áreas que son adecuadas para la especie. Debido a la información limitada de curvas de idoneidad de especies en México, se utilizó *Salmo Trutta* (Ilustración 30), ya que, la trucha es considerada importante en el país, se reproduce en agua dulce y en cultivo.

Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Via Intenso Desagüe | Cubiertas | Turbulencia | Hábitat

Hábitat: Actív

Criterio de hábitat: Suma

Genérico: Mostr

Salmo Trutta: Mostr

Martínez-Capel 2006

Raleigh 1986

Waddle 2006

Ciprínidos: Ocult

Base de datos española: Mostr

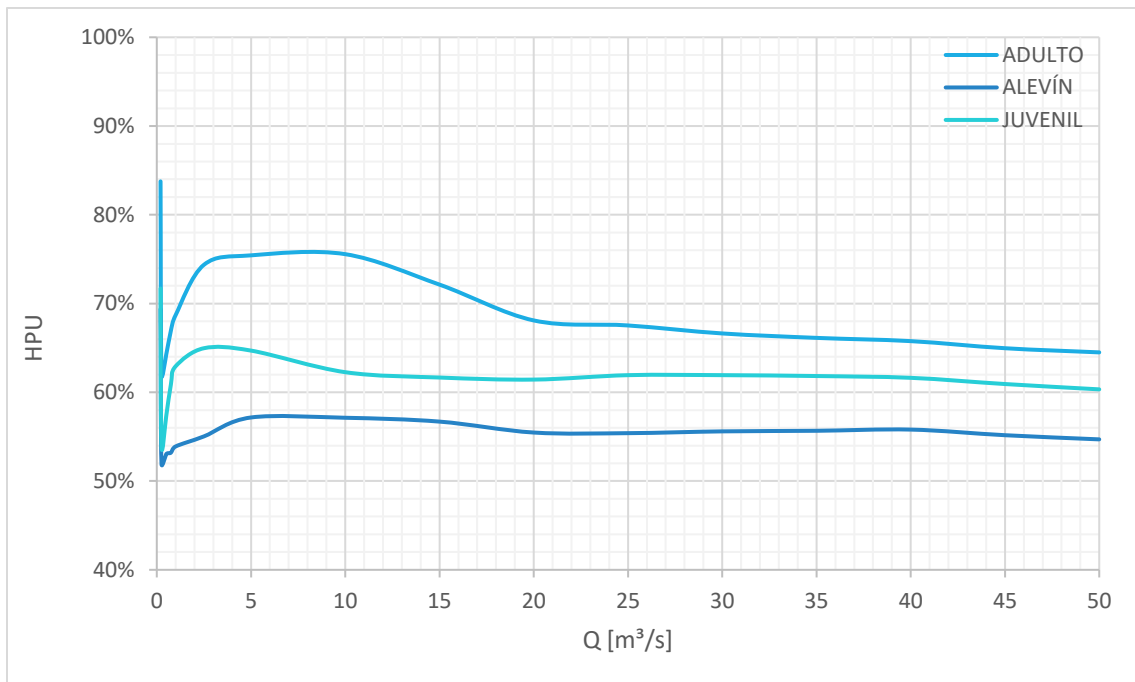
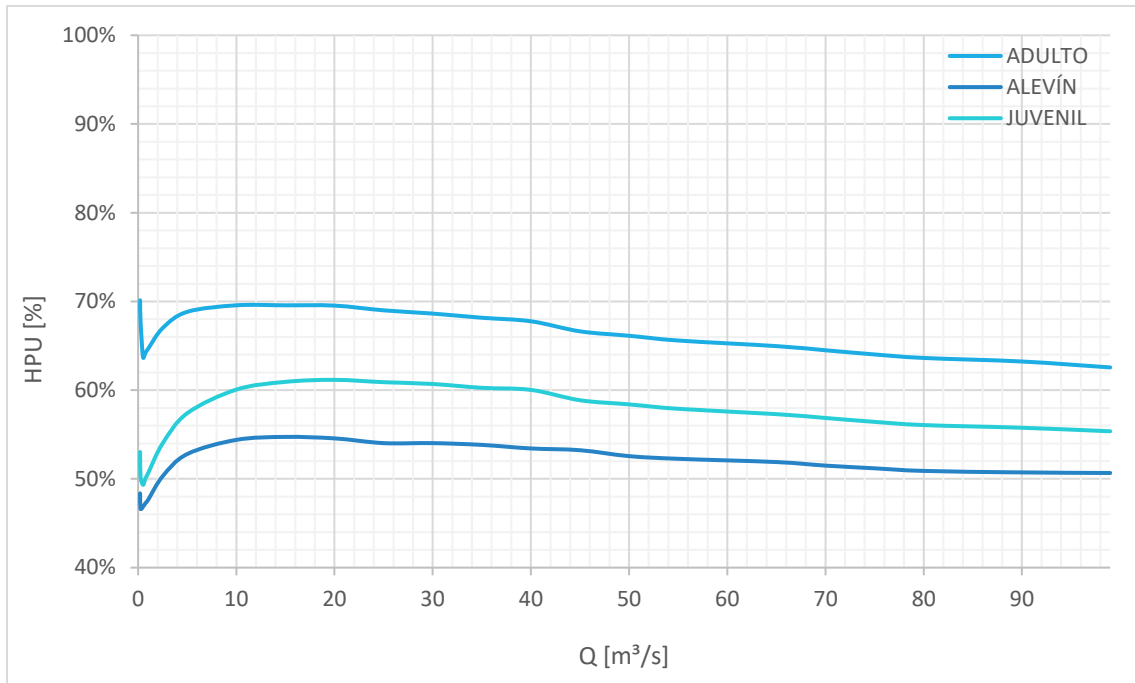
Salmo Trutta [Bovee]

Salmo Trutta [Raleigh]

Idoneidad personalizada

Ilustración 30 Parámetros ingresados en Iber habitat

Los resultados obtenidos de este proceso son mapas y curvas de idoneidad (Gráfica 20 e Ilustración 31).



Gráfica 20 Curvas HPU-Q para el tramo de la EH 10018 Puente Sudpacífico (arriba) y EH 10065 Ixpalino (abajo)



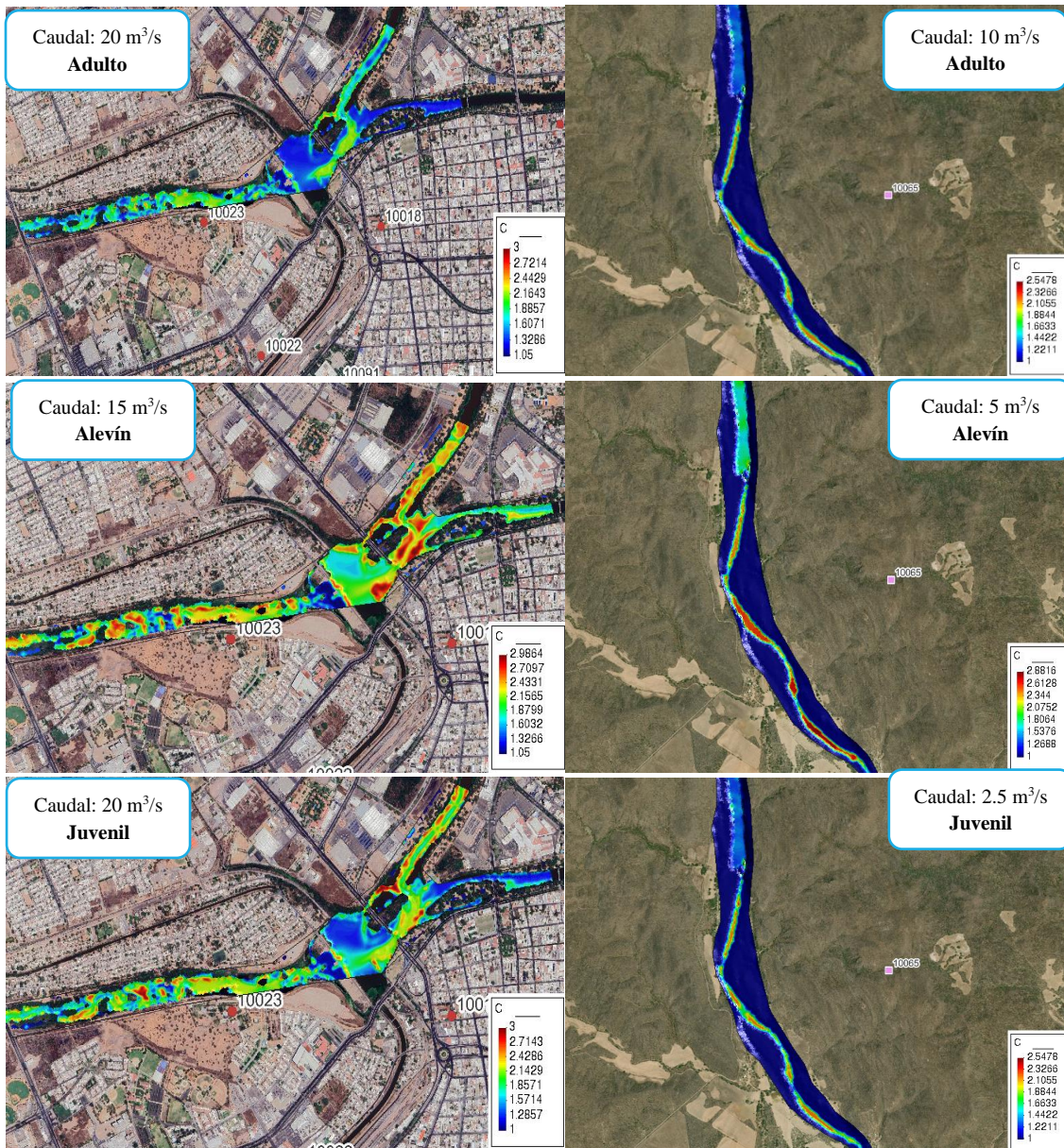


Ilustración 31 Mapas de máxima idoneidad en el tramo de la EH 10018 Sudpacífico(izquierda) y EH 10065 Ixpalino(derecha)

### 3.3 Análisis de resultados

En este trabajo se evaluó el caudal ecológico en cuencas distintas, la cuenca del río Culiacán y la cuenca del río Piaxtla, con metodologías distintas. Para ello, se utilizó información hidrométrica de las EH 10018 Puente Sudpacífico y 10065 Ixpalino, respectivamente.

El método descrito en el apéndice B de la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, muestra que el patrón de flujo de la EH 10018 se encuentra alterado y en la EH 10065 no alterado.



También, a partir del apéndice C de la misma norma, se determinó régimen anual (Tabla 24 y

Tabla 26) y mensual (Tabla 25 y

Tabla 27)

*Tabla 24 Propuesta de régimen anual de caudal ecológico para EH 10018 Puente Sudpacífico*

Caudal ecológico anual [m <sup>3</sup> /s]	
Estiaje	4.95
Avenidas	9.91

*Tabla 25 Propuesta de régimen mensual de caudal ecológico para EH 10018 Puente Sudpacífico*

EH	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>Estiaje</b>	31	16	13.3	5.3	4.6	11.7	-	-	-	32.3	13.1	
<b>Avenidas</b>	-	-	-	-	-	-	32.6	55.3	60.2	-	-	25.9

*Tabla 26 Propuesta de régimen anual de caudal ecológico para EH 10065 Ixpalino*

Caudal ecológico anual [m <sup>3</sup> /s]	
Estiaje	8.78
Avenidas	17.56

*Tabla 27 Propuesta de régimen mensual de caudal ecológico para EH 10065 Ixpalino*

EH	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>Estiaje</b>	23.4	10.2	7.5	2.3	1.3	6.6	-	-	-	-	18.5	22
<b>Avenidas</b>	-	-	-	-	-	-	27	54.3	61.1	22.5	-	-

Además, se aplicó el método hidráulico del perímetro mojado, con distintas aproximaciones, flujo permanente uniforme con Hydrocalc y flujo permanente variado con HEC-RAS. El caudal correspondiente al punto de inflexión en la gráfica perímetro mojado-caudal, esto es, el caudal ecológico, se muestra en la Tabla 28. Entre Hydrocalc y HEC-RAS, no hay diferencias, en cambio con Iber se obtuvieron valores menores.

Tabla 28 Resultados método de perímetro mojado

EH	Q ecol [m <sup>3</sup> /s]	
	Hydrocalc	Hec-Ras
<b>10018</b>	3.42	3.42
<b>10065</b>	0.91	0.91

El método de simulación de hábitat con Iber, permite determinar las curvas HPU-Q (Hábitat Potencial Útil-Caudal), los mapas de idoneidad y también el caudal ecológico correspondiente; dichas curvas y mapas permiten evaluar el impacto del caudal en la disponibilidad del hábitat en una especie en específico de forma espacial y para las distintas etapas de vida de la especie.

De forma general, en la EH 10018 Puente Sudpacífico, a medida que aumenta el caudal, existe una mejor idoneidad para la especie *Salmo Trutta*, hasta llegar a los 40 m<sup>3</sup>/s (Ilustración 31). Sin embargo, a medida que el caudal aumenta, la disponibilidad de hábitat útil decrece porque las condiciones hidráulicas exceden las preferencias del hábitat, esto es, a partir del caudal de 40 m<sup>3</sup>/s hasta 99 m<sup>3</sup>/s. En las curvas HPU-Q (Gráfica 20) se observa que el caudal óptimo para la especie en estudio se encuentra aproximadamente desde 0.2 m<sup>3</sup>/s a los 40 m<sup>3</sup>/s, resultando la máxima idoneidad con 20 m<sup>3</sup>/s, para los peces adultos y jóvenes y 15 m<sup>3</sup>/s para los alevines. Además, los resultados muestran que el hábitat se encuentra en zonas donde la velocidad es de 0.42 a 1.85 m/s y el tirante de 31.4 a 33.6 m (Ilustración 32). En la Ilustración 33 se muestran los mapas de idoneidad para el tirante y velocidad de la cuenca del Río Culiacán, correspondiente al caudal más idóneo, 20 m<sup>3</sup>/s.

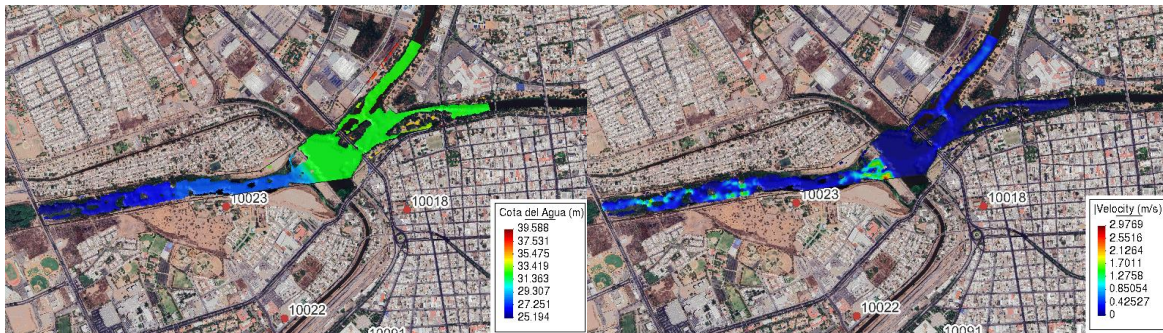


Ilustración 32 Campo de tirantes y velocidades en el tramo de la RH 10018 Sudpacífico



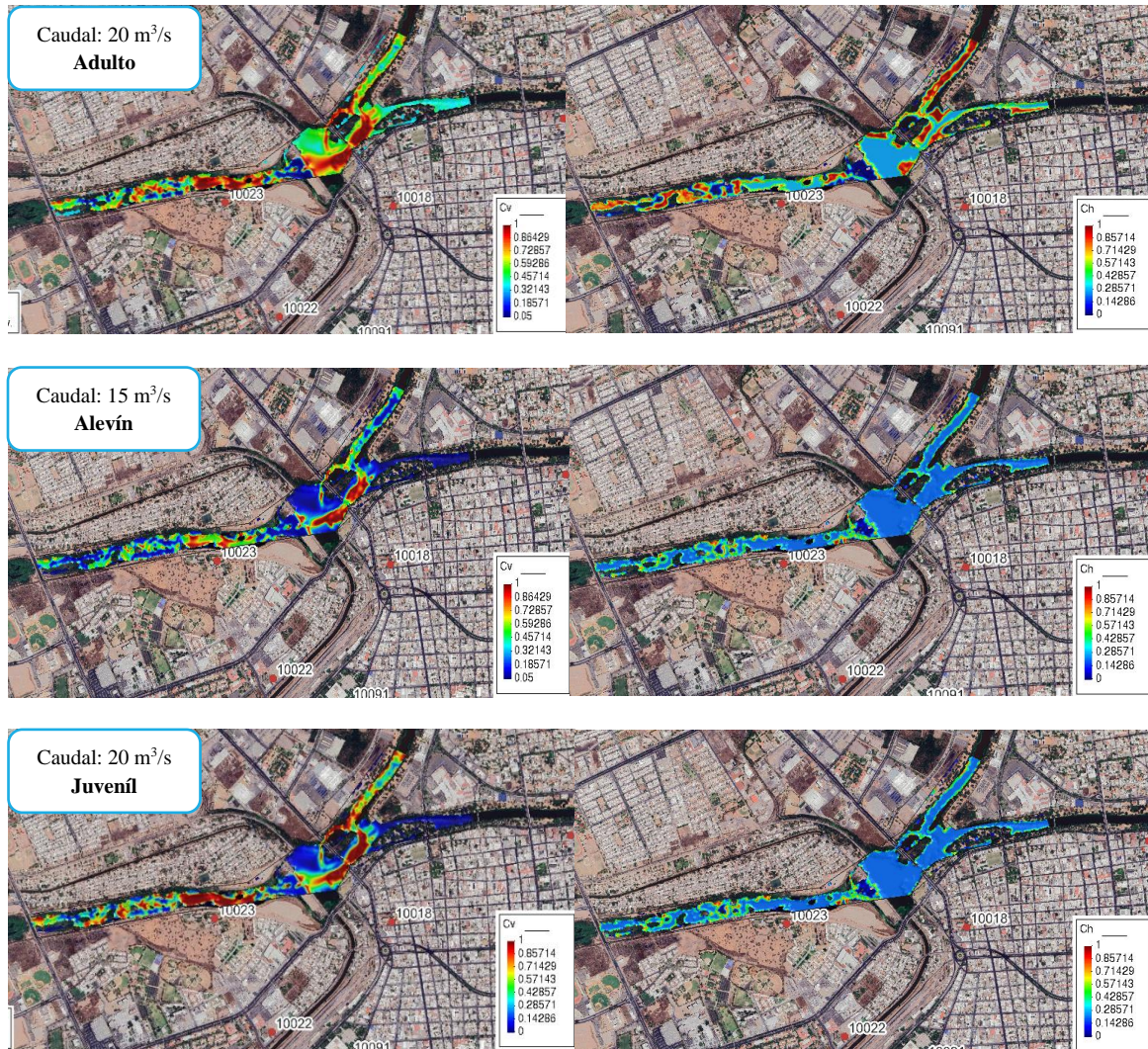


Ilustración 33 Mapa de idoneidad para la velocidad (izquierda) y tirante (derecha) en el estadio juvenil de la especie, en el tramo de la RH 10018 Sudpacífico

En el tramo de la EH 10065 Ixpalino, los resultados muestran una tendencia similar a la cuenca del Río Culiacán. Sin embargo, las condiciones óptimas son ligeramente diferentes por las características del terreno y ecológicas en la cuenca. En los mapas de sitios idóneos se observa que el hábitat adecuado para la velocidad (Ilustración 34) se encuentra en las zonas donde se acumula el caudal, esto es, 0.4 a 0.95 m/s; y el hábitat adecuado para el tirante se encuentra demasiado disperso en el tramo del río seleccionado, entre 4.66 a 5.44 m. En las curvas HPU-Q (Gráfica 20) se observa que el caudal óptimo para la especie en estudio se encuentra aproximadamente entre 0.75 m<sup>3</sup>/s a 10 m<sup>3</sup>/s para los peces adultos, en el caso de los peces jóvenes el caudal óptimo es de 2.5 m<sup>3</sup>/s a 10 m<sup>3</sup>/s y los peces alevines entre 2.5 m<sup>3</sup>/s a 15 m<sup>3</sup>/s (Ilustración 31).



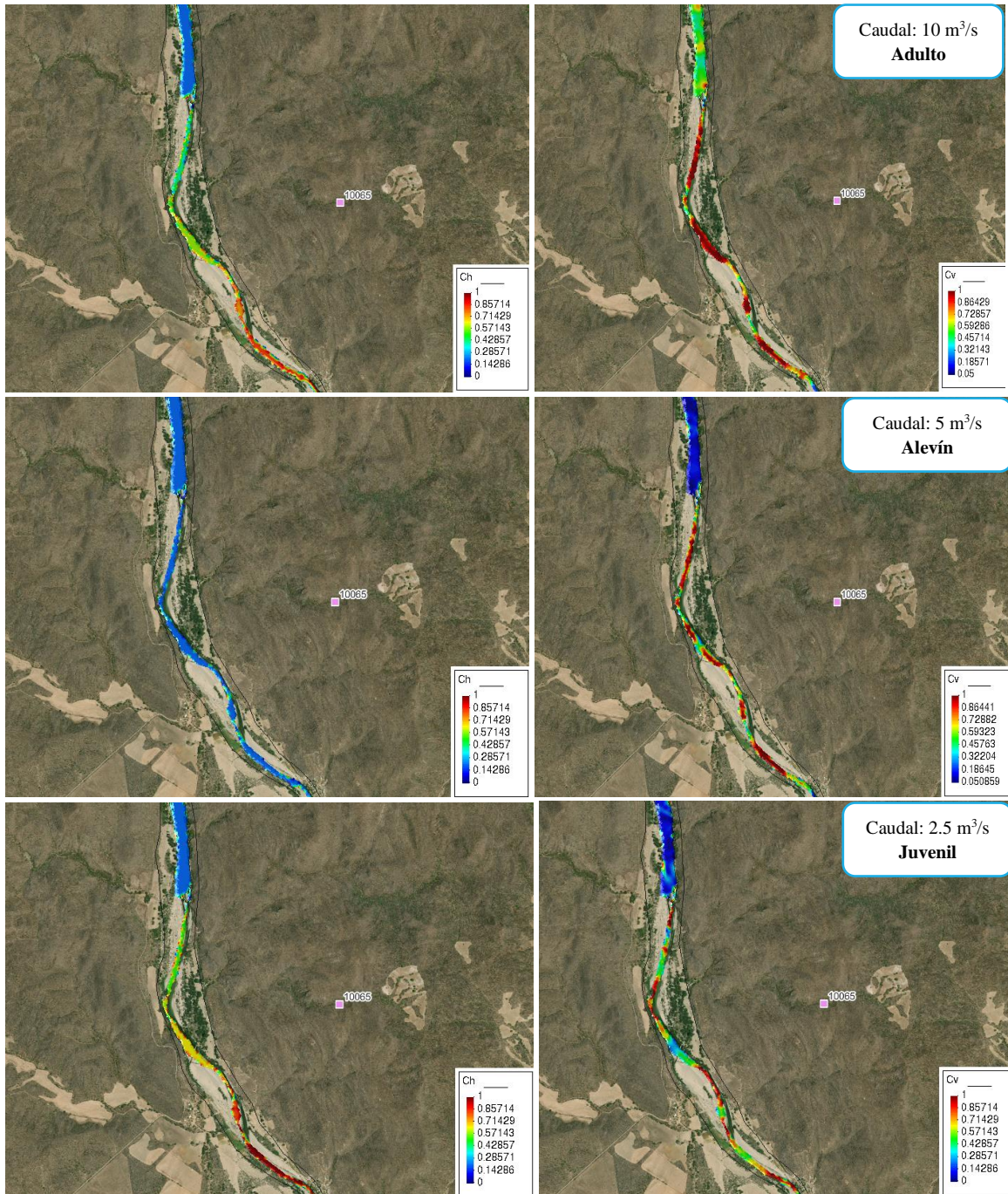


Ilustración 34 Mapa de idoneidad para el tirante (arriba) y la velocidad (abajo) de la especie, en el tramo de la RH 10065 Ixpalino

## IV. Conclusiones

En este trabajo se evaluó con distintos métodos el caudal ecológico en dos cuencas con características distintas; una cuenca con alteración antropogénica debido a la construcción de dos grandes presas, la presa Adolfo López Mateos y la presa Sanalona; y otra poco o no alterada, esto es, no existe alguna construcción de infraestructura hidráulica que ocasione que el régimen de flujo tenga cambios en su magnitud o variación, con lo cual, se cumple con el objetivo planteado.

En las corrientes principales de dichas cuencas se evaluaron tres enfoques metodológicos distintos para la evaluación del caudal ecológico: uno hidrológico, uno hidráulico y otro de simulación de hábitat.

Los métodos hidrológicos son ampliamente utilizados por su simplicidad, tienen efectos positivos porque consideran las variaciones en el tiempo, como las épocas de avenidas y estiaje. Sin embargo, también tienen limitaciones dado que no incluyen algún análisis específico de las necesidades de las especies acuáticas o plantas, lo que los convierte en métodos de baja resolución. Los resultados muestran una sobreestimación del caudal ecológico en ambas cuencas en comparación con los métodos hidráulicos y simulación del hábitat; esto quiere decir que, presentan algunas limitaciones para determinar un caudal preciso para las necesidades ecológicas específicas.

El método hidráulico (perímetro mojado), cuentan con la ventaja de considerar algunas características del hábitat para algunas especies, dado que fue diseñado para una especie en específico. Sin embargo, este enfoque tiene desventajas importantes, ya que se requiere un análisis hidráulico detallado, entre ellos, estudios batimétricos, lo que puede aumentar su complejidad y el costo. En este escrito, aunque los resultados fueron consistentes entre los dos softwares (Hydrocalc y Hec-Ras), el método se mostró menos ajustado a la realidad, en comparación al hidrológico, aunque puede no considerar las interacciones biológicas de las especies.

Los métodos de simulación del hábitat tienen la ventaja de incluir la especie acuática en el análisis, lo permite conocer las necesidades con mayor precisión. Es un método integral porque se considera que existe un vínculo entre lo biológico, ambiental e hidráulico. Incluso estos métodos pueden ser usados para determinar las consecuencias de caudales bajos o caudales altos, considerando diferentes variables como la velocidad, el tirante y el sustrato. La principal desventaja radica en la construcción de un modelo por cada especie.

Es necesario mencionar que, para realizar un análisis de este tipo, es necesario disponer de información suficiente para caracterizar las especies, entre ella, las curvas de idoneidad, la cual, en México es escasa o inexistente. El objetivo de este tipo de métodos es proporcionar herramientas para proponer caudales ecológicos, en este caso, mediante el análisis de las curvas HPU-Q; en las zonas analizadas se observó que los caudales muy altos reducen las condiciones óptimas para las especies debido a la velocidad excesiva. El balance se encontró en los caudales medios, donde la especie aprovecha mejor las condiciones del hábitat.

Con la evaluación de diferentes métodos para caudales ecológicos, se logró generar propuestas que equilibran las necesidades de las especies en las cuencas. Es importante

considerar el desarrollo de estas herramientas y bases de datos para una mejor precisión en la evaluación del caudal ecológico.



## V. Referencias

- Alonso, E. L. P. & González-Villela, R. (2007). Introducción a los caudales ambientales. . Eds. E. L. P. Alonso, M. A. Gómez, P. Saldaña. IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat. Jiutepec, Mor., 174 pp
- Amador, C. (2024). *Tilapia de Mozambique Oreochromis mossambicus*. Obtenido de <https://mexico.inaturalist.org/taxa/107889-Oreochromis-mossambicus>
- Aparicio, F. (2021). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, México, 303 pp.
- Calvo, J. C., Jiménez, J. A., González, E., & Jiménez, A. (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)*, 18.
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- CONABIO. (2024). *Bagre Yaqui*. Obtenido de <https://enciclovida.mx/especies/29442>
- CONABIO. (2024). *Bagre Yaqui (Ictalurus pricei)*. Obtenido de <https://mexico.inaturalist.org/taxa/103279-Ictalurus-pricei>
- CONABIO. (2024). *Guatopote del Fuerte*. Obtenido de <https://enciclovida.mx/especies/30098>
- CONABIO. (2024). *Mexclapique negro*. Obtenido de <https://enciclovida.mx/especies/30766-xenotoca-melanosoma>
- CONABIO. (07 de Febrero de 2024). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Registros de ejemplares de peces*. Obtenido de [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/snib/peces](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/snib/peces)
- CONAGUA. (15 de Febrero de 2016). *Procesamiento de información de variables hidrológicas (BANDAS)*. Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/acciones-y-programas/procesamiento-de-informacion-de-variables-hidrologicas-bandas>
- CONAGUA. (06 de Julio de 2017). *¿Sabes qué es una #EstaciónHidrométrica?* Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sabes-que-es-una-estacionhidrometrica?idiom=es#:~:text=Las%20estaciones%20hidrom%C3%A9tricas%20son%20reglas,las%20lluvias%20y%20los%20escurrimientos>.
- CONANP. (2015). Protocolo para el control y erradicación de la Tilapia Azul (*Oreochromis aureus*). 24.
- Dyson, M., Bergkamp, G., & J.Scanlon. (2003). *Flow*. U.K: UICN.
- Gallopín. (2023). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: Un enfoque sistémico*. Santiago de Chile: CEPAL.

- García, E., González, R., Martínez, P., & Athala, J. (1999). Guía de Aplicación de los Métodos de Cálculo de Caudales de Reserva Ecológicos en México. *Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano del Agua*, 190.
- Gómez, M. A., Rodríguez, S., & Saldaña, P. (2013). Análisis comparativo de los métodos hidrológicos aplicados en la norma de caudal ecológico. *Tercer Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Morelia, Michoacán.
- González, R., & Banderas, A. (2015). *Metodologías para el cálculo de caudales ecológicos y ambientales en ríos regulados por presas*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Hernández, L. (2022). *Análisis espacio-temporal de variables climatológicas en la cuenca del río Piaxtla*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 192 pp.
- IMTA. (2024). BANDAS. Obtenido de <http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/>
- Menchaca, S. (05 de Septiembre de 2024). *Actividades humanas y el agua*. Obtenido de <https://www.uv.mx/cienciauv/blog/lasactividadeshumanasyelagua/>
- Meza, D., Matínez, L. M., Olguín, J. L., & Aguirre, Á. (2019). Simulation of physical habitat in Ayuquila-Armeria river in the west of México. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 53-68.
- Morales, M. (2023). *Evaluación del caudal ecológico en cuencas que descargan al Golfo de California*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México. 192 pp.
- NMX-AA-159-SCFI-2012. (2012). *Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. (1 ed.). México: Secretaría de economía
- Pantoja, N. (2017). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo. *Universidad Pontificia Javeriana*, 119.
- PROFEPA. (05 de Septiembre de 2016). *Ley de Aguas Nacionales*. Obtenido de <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-de-aguas-nacionales-62956#:~:text=Tiene%20por%20objeto%20regular%20la,lograr%20su%20desarrollo%20integral%20sustentable.>
- Rosas, I. (2024). *Cuenca del río Culiacán: Evaluación ambiental y análisis del régimen del flujo por la construcción de grandes presas*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 111 pp.
- Rothschuh, U. (05 de Mayo de 2022). *Ciclo de vida de las especies*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/ciclo-de-vida-de-los-peces-3906.html>

- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Palau, A., Vericat, D., & Ramos, A. (2019). IberHABITAT: evaluación de la idoneidad del hábitat físico y del hábitat potencial útil para peces. Aplicación con el río Eume. *Ribagua*, 6(2),158-167. DOI: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>
- SEMARNAT. (24 de Julio de 2018). *Diferencia entre sustentable y sostenible*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/diferencia-entre-sustentable-y-sostenible>.
- SEMARNAT. (2014). *Ríos libres y vivos, introducción al caudal ecológico y reservas de agua*. Obtenido de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001908.pdf>
- Tennat, D. (1996). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Proceedings on Stream Flow Needs Symposium. *Bilings (Montana)*, 1(4), 359-373.
- Tharme, R. (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*, 397-441.
- USGS. (12 de Octubre de 2019). *El Ciclo del Agua - The Water Cycle, Spanish*. Obtenido de [https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#:~:text=El%20ciclo%20del%20agua%20describe%20d%C3%B3nde%20est%C3%A1%20el%20agua%20en,dulce%20o%20salina%20\(salada\)](https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#:~:text=El%20ciclo%20del%20agua%20describe%20d%C3%B3nde%20est%C3%A1%20el%20agua%20en,dulce%20o%20salina%20(salada)).
- WWF. (Octubre de 2010). *Caudal ecológico*. Obtenido de [https://awsassets.panda.org/downloads/fs\\_caudal\\_ecologico.pdf](https://awsassets.panda.org/downloads/fs_caudal_ecologico.pdf).
- WWF. (2011). Guía para la determinación de caudal ecológico en México. Programa Manejo del Agua en Cuencas Hidrográficas: Desarrollo de Nuevos Modelos en México. México.
- WWF. (16 de Febrero de 2022). *¿Por qué las especies invasoras amenazan la biodiversidad?* Obtenido de <https://www.wwf.org.mx/?374990/Por-que-las-especies-invasoras-amenazan-la-biodiversidad>.



## Anexos

## Anexo 1 Coeficiente de rugosidad

Tabla 29 Coeficiente de rugosidad  $n$  (Chow, 1994 y Morales, 2023)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<b>A. Corrientes naturales</b>			
<b>A.1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente &lt;30 m)</b>			
<b>a. Corrientes en planicies</b>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos, ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpeante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
<b>b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en nivel altos</b>			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
<b>A.2. Planicies de inundación</b>			
<b>a. Pastizales, sin matorrales</b>			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<b>b. Áreas cultivadas</b>			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<b>c. Matorrales</b>			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<b>d. Árboles</b>			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
<b>A.3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel creciente &gt;30m). El valor de <math>n</math> es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.</b>			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100



*Ilustración 35 Río Culiacán (izquierda) y Río Piaxtla (derecha)*



## Anexo2 Resultados HydroCalc

Tabla 30 Resultados de la EH 10018 Puente Sudpacífico

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tirante normal (m)	Velocidad (m/s)	Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Ancho de superficie libre (m)	Radio hidráulico (m)	Tirante (m)
0.010	30.105	0.090	1.405	171.297	171.297	0.008	0.008
3.423	30.16	0.346	11.012	177.438	177.437	0.062	0.062
6.837	30.19	0.439	15.987	180.536	180.535	0.089	0.089
10.25	30.214	0.51	20.293	183.176	183.173	0.111	0.111
13.664	30.236	0.579	24.979	186.005	186.003	0.134	0.134
17.077	30.255	0.625	28.298	187.984	187.981	0.151	0.151
20.491	30.272	0.666	31.454	189.846	189.842	0.166	0.166
23.904	30.289	0.704	34.471	191.609	191.605	0.18	0.18
27.318	30.304	0.739	37.368	193.287	193.283	0.193	0.193
30.731	30.319	0.771	40.161	194.891	194.887	0.206	0.206
34.144	30.333	0.801	42.862	196.43	196.425	0.218	0.218
37.558	30.346	0.829	45.481	197.91	197.906	0.23	0.23
40.971	30.359	0.855	48.026	199.339	199.334	0.241	0.241
44.385	30.372	0.881	50.506	200.721	200.716	0.252	0.252
47.798	30.384	0.905	52.926	202.06	202.055	0.262	0.262
51.212	30.396	0.936	56.194	203.855	203.85	0.276	0.276
54.625	30.407	0.956	58.404	205.06	205.054	0.285	0.285
58.039	30.418	0.976	60.581	206.24	206.234	0.294	0.294
61.452	30.429	0.996	62.728	207.397	207.391	0.302	0.302
64.866	30.44	1.014	64.845	208.532	208.525	0.311	0.311
68.279	30.45	1.032	66.934	209.645	209.639	0.319	0.319
71.692	30.46	1.05	68.996	210.739	210.732	0.327	0.327
75.106	30.47	1.066	71.033	211.814	211.807	0.335	0.335
78.519	30.48	1.083	73.045	212.87	212.863	0.343	0.343
81.933	30.489	1.099	75.035	213.909	213.902	0.351	0.351
85.346	30.498	1.115	77.002	214.932	214.924	0.358	0.358
88.76	30.508	1.13	78.947	215.938	215.931	0.366	0.366
92.173	30.517	1.144	80.872	216.93	216.922	0.373	0.373
95.587	30.526	1.159	82.777	217.907	217.899	0.38	0.38
99	30.534	1.173	84.664	218.87	218.861	0.387	0.387

Tabla 31 Resultados de la EH 10065 Ixpalino

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tirante normal (m)	Velocidad (m/s)	Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Ancho de superficie libre (m)	Radio hidráulico (m)	Tirante (m)
0.01	53.352	0.25	0.05	1.505	1.499	0.033	0.033
0.906	53.623	0.734	1.27	7.584	7.554	0.167	0.168
1.801	53.72	0.866	2.087	9.723	9.684	0.215	0.215
2.697	53.791	0.961	2.85	11.363	11.317	0.251	0.252
3.593	53.848	1.03	3.51	12.609	12.559	0.278	0.279
4.489	53.896	1.088	4.137	13.69	13.635	0.302	0.303
5.384	53.939	1.138	4.736	14.649	14.59	0.323	0.325
6.28	53.978	1.187	5.376	15.607	15.544	0.344	0.346
7.176	54.013	1.226	5.918	16.374	16.308	0.361	0.363
8.071	54.045	1.261	6.447	17.09	17.021	0.377	0.379
8.967	54.076	1.294	6.964	17.763	17.692	0.392	0.394
9.863	54.104	1.325	7.471	18.398	18.324	0.406	0.408
10.759	54.131	1.354	7.968	19	18.924	0.419	0.421
11.654	54.157	1.381	8.456	19.573	19.495	0.432	0.434
12.55	54.181	1.406	8.936	20.12	20.04	0.444	0.446
13.446	54.205	1.431	9.407	20.645	20.562	0.456	0.458
14.341	54.227	1.454	9.872	21.148	21.063	0.467	0.469
15.237	54.249	1.476	10.329	21.632	21.546	0.477	0.479
16.133	54.27	1.502	10.883	22.205	22.116	0.49	0.492
17.029	54.29	1.522	11.316	22.642	22.551	0.5	0.502
17.924	54.309	1.541	11.745	23.067	22.975	0.509	0.511
18.82	54.328	1.559	12.17	23.481	23.387	0.518	0.52
19.716	54.346	1.577	12.591	23.883	23.788	0.527	0.529
20.611	54.364	1.594	13.008	24.276	24.178	0.536	0.538
21.507	54.381	1.611	13.421	24.658	24.56	0.544	0.546
22.403	54.398	1.627	13.831	25.032	24.932	0.553	0.555
23.299	54.414	1.643	14.237	25.397	25.296	0.561	0.563
24.194	54.43	1.658	14.64	25.754	25.651	0.568	0.571
25.09	54.446	1.673	15.04	26.103	25.999	0.576	0.578
25.986	54.461	1.688	15.437	26.445	26.34	0.584	0.586
26.881	54.476	1.702	15.831	26.78	26.673	0.591	0.593
27.777	54.491	1.716	16.221	27.109	27	0.598	0.601
28.673	54.505	1.729	16.609	27.431	27.321	0.605	0.608
29.569	54.519	1.742	16.994	27.747	27.636	0.612	0.615
30.464	54.533	1.755	17.376	28.058	27.945	0.619	0.622
31.36	54.547	1.768	17.756	28.362	28.249	0.626	0.629
32.256	54.56	1.781	18.133	28.662	28.548	0.633	0.635
33.151	54.573	1.793	18.508	28.957	28.841	0.639	0.642
34.047	54.586	1.805	18.881	29.247	29.13	0.646	0.648
34.943	54.599	1.816	19.251	29.532	29.414	0.652	0.654

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Tirante normal (m)	Velocidad (m/s)	Área hidráulica (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Ancho de superficie libre (m)	Radio hidráulico (m)	Tirante (m)
35.839	54.611	1.828	19.618	29.813	29.693	0.658	0.661
36.734	54.623	1.839	19.984	30.089	29.969	0.664	0.667
37.63	54.635	1.85	20.347	30.362	30.24	0.67	0.673
38.526	54.647	1.861	20.709	30.63	30.507	0.676	0.679
39.421	54.659	1.872	21.068	30.895	30.771	0.682	0.685
40.317	54.671	1.882	21.425	31.155	31.031	0.688	0.69
41.213	54.682	1.893	21.781	31.413	31.287	0.693	0.696
42.109	54.693	1.903	22.134	31.667	31.54	0.699	0.702
43.004	54.705	1.917	22.638	32.025	31.897	0.707	0.71
43.9	54.716	1.927	22.98	32.266	32.137	0.712	0.715