

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS

INFORME FINAL
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN:

**Determinación del caudal ambiental requerido para río
Pejibaye mediante la implementación de una
metodología de cálculo hidrobiológica, considerando
variables de cambio climático**

Centro Funcional: 1421015

Período: 01 enero 2018- 31 diciembre 2019

Por:

Dra. Laura Chavarría Pizarro

Dra. Isabel Guzmán Arias

M.Sc. Francisco Quesada Alvarado

Lic. Fernando Watson Hernández

Junio, 2020

Agradecimiento por la cooperación brindada en el desarrollo de la investigación

MINAE, Dirección de Agua, Departamento de Desarrollo Hídrico

MSc. Leonardo Cascante Chavarría (Coordinador)

Ing. Jesús Monge Mejía

Ing. Leonel Sanabria Méndez

Acueductos y Alcantarillados, UEN Gestión Ambiental, A.F Estudios Básicos

Ing. Adrián Rojas Barrantes (Director)

Ing. Alina Trabado Sagot

Ing. Angie Araya Lescouflair

Ing. Abel Vargas Valverde

Tec. Josafat Chavarría Cascante

Tec. Diego Pérez Rivera

Tec. Juan Peñaranda Galeano

Tec. Alonso Arriola Lacayo

Instituto Costarricense de Electricidad

Biól. Luz Marina Rodríguez Quirós

Contenido

I.	Resumen	4
II.	Introducción.....	5
	Objetivo general	6
	Objetivos específicos	6
III.	Marco Teórico	7
	3.1 Caudal Ambiental	7
	3.2 Avances en la determinación de caudal ambiental.....	7
	3.3 Determinación del caudal ambiental	9
	3.3.1 Método hidrológico	9
	3.3.2 Método de valoración hidráulica	9
	3.3.3 Método hidrobiológico	10
	3.3.4 Método holístico.....	10
	3.4 Fundamentos de los métodos hidrobiológicos.....	10
	3.4.1 Indicadores biológicos.....	10
	3.5 Condiciones para Costa Rica	13
	3.6 Características de la cuenca del Río Pejibaye.....	14
	3.7 Escenario de cambio climático en la cuenca del río Pejibaye.....	14
	3.7.1 Reducción de la escala temporal del Escenario de Cambio Climático (ECC)	15
	3.8 Modelación hidráulica	16
	3.9 Simulación de habitat.....	18
IV.	Metodología	19
	4.1 Determinación de la respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca	19
	4.1.1 Generación de modelos hidrológicos para la cuenca río Pejibaye (P3), Subcuenca río Gato (P2) y Subcuenca río Pejibaye (P3)	20
	4.1.2 Análisis de la precipitación.....	21
	4.1.3 Análisis de la temperatura atmosférica.....	21
	4.1.4 Análisis de caudal	22
	4.1.5 Topografía y uso del suelo	23
	4.1.6 Caracterización morfológica de las cuecas.....	24
	4.1.7 Modelado hidrológico	25
	4.1.8 Escenario de cambio climático	27

4.2	Determinación de los indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental	28
4.3	Determinación del régimen de caudal ambiental del río	32
V.	Resultados	34
5.1	Respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca del Río Pejibaye ante escenarios de cambio climático.....	34
5.1.1	Análisis de la Precipitación.....	34
5.1.2	Análisis de Temperatura	36
5.1.3	Topografía y uso del suelo	39
5.1.4	Calibración y validación de los modelos hidrológicos.....	41
5.1.5	Corrección y análisis del escenario de cambio climático	45
5.1.6	Respuesta hídrica de las cuencas bajo el ECC.....	49
5.2	Determinación de indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental. .	53
5.2.1	Simulación hidráulica de los trayectos de cauce en estudio en las cuencas P1, P2 y P3	61
5.3	Régimen de caudal ambiental del río tomando en cuenta todos los componentes metodológicos y los escenarios de cambio climático.....	64
5.3.1.	Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P1.....	64
5.3.2.	Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P2.....	67
5.3.3.	Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P3.....	71
VI.	Discusión	75
6.1	Requerimiento del caudal ambiental según indicadores biológicos.....	75
6.1.1.	Insectos	75
6.1.2.	Ictiofauna	77
6.1.3.	Caudal ambiental	79
VII.	Conclusiones y Recomendaciones	81
VIII.	Bibliografía	82
IX.	Anexos	88
9.1	Anexo 1. Escenarios de temperatura y precipitación para P1 y P2.....	89
9.2	Anexo 2. Recuento de metodologías en A.L	90
9.3	Anexo 3. Curva Hipsométrica P1, P2 y P3.....	91
9.4	Anexo 4. Curvas de duración P1.....	92
9.5	Anexo 5. Curvas de duración P2.....	93
9.6	Anexo 6. Curvas de duración P3.....	94

9.7 Anexo 7. Modelación hidráulica	95
9.8 Anexo 8. Modelación de grado de preferencia de habitat	96

I. Resumen

En Costa Rica el caudal ambiental responde al 10% del caudal medio anual, este método carece de fundamento científico en relación a condiciones fluviales aptas para preservar los ecosistemas en los cauces. El proyecto propuesto, responde a una ruta de investigación que busca la selección y validación en campo de diferentes metodologías para obtener el caudal ambiental. En este caso, el proyecto está centrado en la adaptación y validación de una metodología hidrobiológica de cálculo del caudal ambiental en la cuenca del río Pejibaye en Jiménez de Cartago. Se utilizaron series de datos históricas de variables hidrológicas para analizar la condición actual y proyectada a futuro, se seleccionaron especies de macroinvertebrados y peces que permitieron evaluar la calidad de los ecosistemas asociados. Analizadas las características de hábitat óptimo, *Anacroneuria* y *G. nudus* fueron las mejores especies indicadoras. Según la metodología planteada se propone un régimen de caudal ambiental variable en un rango que coincidió entre las curvas del 90% y 95% de caudales de excedencia mensual, en donde el límite inferior es el caudal mínimo permitido. La evaluación de la respuesta de la cuenca al cambio climático, determino que el primer trimestre se presentara los mayores porcentajes de disminución del caudal promedio con valores entre el 12% y el 21%. Además se estableció, que en el periodo 2040-2059, en el primer semestre del año las cuencas presentarán caudales ambientales inferiores al mínimo permitido en el periodo actual y en el periodo 2080-2099 esta condición se produce en todo el año.

Palabras clave

Caudal ambiental, simulación de hábitat, río Pejibaye.

II. Introducción

El caudal ambiental establece cuánto del régimen hidrológico natural de un río debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia la planicie de inundación para mantener los valores característicos del ecosistema (Tharme, 2003). A nivel mundial, se utilizan los caudales ambientales como herramienta de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos para abordar la problemática generalizada de su uso excesivo y del deterioro de los ecosistemas acuáticos (Dyson et al. 2003). El proceso de cambio climático también ha dejado en evidencia la situación crítica en la que se encuentran muchos ecosistemas acuáticos; en algunos países la situación ha empeorado tanto en los últimos años, que grandes cuerpos de agua han llegado a desaparecer, como: el Lago Mead, y el Lago Badwater en Estados Unidos; el Lago Poopó en Bolivia y el Mar Aral en Kazakhstan (Ecoosfera, 2016).

A pesar de que el agua es un recurso imprescindible para el mantenimiento de la vida, los ecosistemas acuáticos han sufrido un proceso de degradación y sobreexplotación, que ha provocado entre otros problemas, la reducción del caudal necesario para mantener la biodiversidad y los servicios que obtienen las comunidades de éstos. En el país actualmente se utiliza como medida para la función de estos ecosistemas un 10% del caudal de estiaje, valor que no tiene un respaldo técnico ni científico y representa un modelo insostenible para una adecuada administración del recurso hídrico.

Al no contar el país con un procedimiento apropiado, es prioritario que las autoridades encargadas de administrar el recurso hídrico implementen una metodología donde determinen el caudal ambiental necesario para mantener la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y sus procesos naturales (tomando en cuenta el deterioro ambiental y el proceso de cambio climático), que determinan en gran medida, la disponibilidad del recurso para uso de las poblaciones. Conocer el medio hídrico, sus límites y las complejas relaciones que establecen su equilibrio, debe ser una las premisas básicas para la aproximación hacia una gestión integral, que sería el punto de partida del proceso de otorgamiento de concesiones para los demás aprovechamientos.

Debido que el rescate del capital hídrico es esencial para proteger y conservar las fuentes de agua, se han realizado varias iniciativas en el país para utilizar metodologías más acordes con el cálculo de los requerimientos reales. Diferentes instituciones han aplicado metodologías de acuerdo con las necesidades de sus proyectos, sin embargo, no se ha logrado determinar cuál sería la más apropiada en una determinada situación; por ejemplo, algunas metodologías dependiendo del tipo de concesión y de las características que tenga el río y su zona de influencia, podrían no ser aplicables. En el caso de la metodología holística, una de las más complejas y utilizada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), podría no ser adecuada para una valoración de aprovechamiento a muy baja escala y de un caudal pequeño. No obstante, la determinación del caudal debe ser atendida en toda su dimensión real de complejidad.

Objetivo general

Determinar el caudal ambiental requerido para río Pejibaye, mediante la implementación de una metodología de cálculo hidrobiológica, considerando variables de cambio climático.

Objetivos específicos

OE1: Estudiar el comportamiento hidrológico de la sub cuenca.

OE2: Determinar los indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental.

OE3: Establecer el régimen de caudal ambiental del río tomando en cuenta los componentes metodológicos establecidos y los escenarios de cambio climático.

III. Marco Teórico

3.1 Caudal Ambiental

Para comprender mejor el proceso de gestión del recurso hídrico, desde la ubicación de su origen en la fuente, hasta su utilización para los diferentes aprovechamientos, se vuelve fundamental la acción de establecer una premisa: el agua que es tomada o captada, representa una cuota del recurso para diversos usos según la demanda asociada a una fuente determinada; eso significa que necesariamente se debe considerar el concepto de caudal ambiental como el principal moderador de reserva de ese capital hídrico. En sus inicios la aplicación de caudales ambientales se dio debido a la necesidad de establecer límites de extracción de agua en ríos con el fin de que mantuvieran la capacidad de dilución y evitaran niveles de contaminación inadmisibles. De acuerdo a esto, dichos caudales plantean específicamente el interés de sostener los ecosistemas y el bienestar humano que dependen de estos (Piera, 2014). Existe gran variedad de conceptos que se refieren a caudal ambiental, sin embargo, la esencia del significado está en el proceso de evaluación ambiental, social y económico, por lo tanto, este se define como el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar los ecosistemas y sus beneficios, en casos donde hay empleos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados (UNESCO, 2015). La Declaración de Brisbane del año 2007 logró la definición más aceptada a nivel mundial, en donde se indica que “los caudales ambientales son los flujos de agua, el momento de su aplicación y la calidad de las aguas precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de los estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen del ecosistema” (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016).

3.2 Avances en la determinación de caudal ambiental

La determinación de caudales ambientales ha tenido cierta evolución, la cual ha consistido en pasar del enfoque de manejar caudales mínimos, al reconocimiento de los componentes que determinan su magnitud, duración, temporalidad, frecuencia y tasas de cambio a través del tiempo; se han implementado los requerimientos de flujo para la reproducción,

alimentación y migración de especies de distintas comunidades acuáticas, principalmente peces y macroinvertebrados bentónicos (Alonso, Gómez, & Saldaña, 2007).

En Latinoamérica los países aún no han superado la fase de proposición conceptual y metodológica, sin embargo, las metodologías de estimación de caudales ambientales son variadas, pero en general se fundamentan principalmente en métodos hidrológicos y en segundo lugar en métodos hidráulicos y eco-hidráulicos; siendo las metodologías holísticas las menos utilizadas. Colombia, Costa Rica y México se destacan en particular por sus avances al aplicar metodologías sofisticadas y modernas, así como en Brasil por su gran cantidad de experiencias referentes en general a los métodos hidrológicos. Honduras se encuentra dentro de los casos en los que la información ecológica es muy escasa y por tanto se consultaron a las comunidades indígenas para aportar su conocimiento tradicional, con esto y el conocimiento hidrológico permitió establecer caudales ambientales (Rodríguez-Gallego, y otros, 2011). En Brasil, debido a que es uno de los países del mundo que ha aplicado mayor número de metodologías para el cálculo de caudales ambientales, los cuales en su mayoría son métodos hidrológicos. En dicho país los ríos son característicos por recorrer fundamentalmente sobre planicies, es de suma importancia los pulsos de inundación en el funcionamiento ecológico del sistema, asimismo las poblaciones de peces, invertebrados e incluso plantas, así como los procesos biogeoquímicos dependen de dichos pulsos, debido a esto se reconoce la importancia del régimen en el funcionamiento natural de los ríos y se propone para Brasil el método de Richter, se distingue de este método que tiene instancias participativas y que es adaptativo, e incluso se propone hacer experimentos de manejo de ríos en donde se manipulen distintos aspectos del régimen hidrológico y se evalúen los efectos en el sistema como forma de ajustar el régimen hidrológico o hidrograma ambiental (Rodríguez-Gallego, y otros, 2011).

Costa Rica es uno de los países que cuenta con apoyo importante internacional para realizar estudios sobre el manejo sustentable en materia de sus recursos naturales y biodiversidad (Rodríguez-Gallego, y otros, 2011), esto colabora a que este país tenga avances importantes en este ámbito, debido al incremento en la demanda de agua generando impactos socio-ambientales, organizaciones internacionales como UICN, los cuales iniciaron proyectos para

implementar el concepto de flujo ambiental en el país, aplicando metodologías eco-hidrológicas.

3.3 Determinación del caudal ambiental

Existen diversos métodos de cálculo para la determinación del caudal ambiental, los cuales están clasificados en dos grupos principales, las metodologías normativas y metodologías interactivas. Estos últimos se orientan principalmente en generar varios regímenes de caudal que satisfagan diferentes intereses o condiciones deseadas del interés de múltiples usuarios, este aplica en cuencas donde estos usuarios establecidos y tienen fuertes intereses en el régimen de caudal. Sin embargo, los métodos normativos se enfocan en los métodos que buscan determinar un régimen específico de caudal con el objeto de cumplir un objetivo dado, por ejemplo, la conservación de una especie de pez, dentro de los métodos normativos más utilizados se encuentran, los métodos hidrológicos y los que siguen el enfoque hidráulico (Jiménez, 2005). Según (Consuegra, 2013) para establecer el valor del caudal ambiental existen cuatro métodos: hidrológico, valoración hidráulica, hidrobiológico y holístico; el mismo los define:

3.3.1 Método hidrológico

Este método permite calcular el caudal ambiental a partir del tratamiento de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices se opta por un caudal calificado o establecido antes como normativo o se calcula partiendo de recomendaciones previamente establecidas, dichas series es recomendado que posean extensiones inferiores a 20 años y en medida de lo posible que sean superiores a esta cifra.

3.3.2 Método de valoración hidráulica

Considera la relación existente entre el caudal y las características físicas del cauce en el cual se desarrollan las interacciones entre el medio biótico y abiótico, las cuales constituyen el ecosistema del lugar. Dentro de las relaciones que se estudian se destacan: el perímetro mojado, la velocidad y la profundidad de la lámina de agua, el sustrato vegetal entre otras;

esta valoración se realiza contemplando una o varias secciones transversales del cauce en estudio.

3.3.3 Método hidrobiológico

Dentro de este método también se pueden incluir métodos de cálculo como el perímetro mojado, sin embargo, se basa principalmente en la obtención de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos de la zona en estudio, con la finalidad de estudiar el efecto de los cambios en el caudal sobre la estructura de la corriente en análisis, la calidad del agua y la disponibilidad de hábitats, con esto se relaciona el caudal con el índice de hábitats a partir de las cuales se determinan los caudales apropiados para que ciertos organismos se encuentren en estado vital apto.

3.3.4 Método holístico

Este método posee dos enfoques el de aproximación bottom-up, diseñado para construir un régimen de caudal modificado mediante la adición de componentes de caudal a una línea base de caudal cero, y aproximación top-down el cual indica cuanto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notoriamente. Esencialmente, estos métodos buscan la integración de los componentes, hidrológicos, hidráulicos, biológicos y sociales, en el cálculo del régimen de caudal ambiental.

3.4 Fundamentos de los métodos hidrobiológicos

En los métodos hidrobiológicos se analizan los componentes principales como la preferencia de hábitat de algunas especies, en donde se contemplan la estimación del impacto físico, químico y biológico sobre las especies de peces determinadas como indicadores biológicos; se define el hábitat de preferencia de las principales especies del río, se evalúan también ciertos cambios en la composición de especies, a partir de esto se genera una estrategia de manejo de los caudales. (González, Sánchez, Bravo, Mijangos, & Branderas, 2015)

3.4.1 Indicadores biológicos

La incorporación de indicadores biológicos para estimar el caudal ambiental permite utilizar la flora y la fauna como herramienta para mantener la integridad funcional de los ecosistemas

dulceacuícolas. Incorporar los datos biológicos a los hidrológicos, permite que éstos últimos puedan ser utilizados para elaborar una estrategia de manejo ecológicamente sostenible, que permita el aprovechamiento del recurso por parte de las poblaciones, pero asegurando la protección del hábitat natural para las comunidades naturales. Entender la relación entre el régimen de flujo y la respuesta ecológica de los organismos es muy importante para mitigar el impacto que podría generar la modificación del caudal ambiental. A pesar de la importancia de los estudios hidrobiológicos para realizar una gestión integrada del recurso hídrico, son pocos los que se han realizado hasta ahora en Costa Rica; es por esta razón que cualquier iniciativa que permita obtener datos que permitan comprender mejor la dinámica y las relaciones entre la hidrología y la ecología es prioritaria.

Los indicadores biológicos son aquellas especies, o asociaciones, cuya presencia, ausencia o condición es utilizada como medida de la calidad ambiental (Chaves et al., 2006, Laporte et al. 2006). Su uso es recomendado en estudios ecológicos, y especialmente en regiones con alta diversidad biológica como los trópicos; ya que es difícil realizar estudios a nivel de comunidades biológicas por el grado de complejidad (Chaves et al., 2006). La denominación de una especie como bioindicadora requiere de un conocimiento previo respecto a su composición comunitaria bajo condiciones normales, de manera que sea posible comparar el antes y después de una perturbación ambiental; además es importante conocer el ciclo de vida de la especie, su estacionalidad, sus variaciones naturales, etc. Por estos motivos, no es cualquier especie la que puede ser utilizada como indicador biológico.

Las comunidades de fauna asociadas a las corrientes están adaptadas a las fluctuaciones naturales en magnitud, frecuencia, y duración de las corrientes de flujo ya sea alto, intermedio o bajo. En el caso de la determinación de caudal se ha demostrado que algunas especies de peces son particularmente útiles (Chaves et al., 2006, Laporte et al. 2006), sin embargo, también se ha recomendado el uso de macroinvertebrados, aves, mamíferos, anfibios y reptiles. El caudal afecta a los organismos acuáticos indirectamente al influenciar la composición del sustrato, las propiedades químicas del agua, la disponibilidad de nutrientes, partículas orgánicas y del hábitat (Dewson *et al.* 2007). Las ostras de agua dulce, por ejemplo, son muy sensibles a cambios en las condiciones hidráulicas debido a que necesitan un flujo

adecuado que mantengan su ambiente húmedo y con un suministro constante de alimento (Gates et al. 2015). Otros macroinvertebrados acuáticos como los insectos experimentan la corriente de forma localizada y diferente, a la magnitud general del ecosistema; por este motivo son muy sensibles a cambios en el ambiente (Hough *et al.* 2019). Además, los insectos responden de forma muy variable a los cambios de tamaño, tiempo, espacio y flujo de los ecosistemas acuáticos; Jowett (2015), por ejemplo, observó que la velocidad promedio óptima para varias especies de macroinvertebrados cambia de cuerpos de agua pequeños como arroyos, a cuerpos de agua mayores como ríos. También, muchos insectos acuáticos son fuente de alimento para peces y aves, por lo que una alteración en sus poblaciones podría causar un impacto en otras poblaciones de organismos; enfatizando la importancia de incluir este grupo en la evaluación del régimen de caudal ambiental para predecir cómo sus poblaciones podrían cambiar con las oscilaciones de la corriente.

En el caso de los peces, estos han sido ampliamente estudiados en cuanto a la relación entre las poblaciones, la ecología y comportamiento con las variaciones en el caudal. Por ejemplo, se sabe que algunas especies de salmones inician su proceso de migración y reproducción según las variaciones en el flujo, además de que se adaptan a los regímenes de flujo natural de los ríos y es un principio aceptado en la hidroecología, formalizado a través del paradigma de flujo natural (Milner, Solomon & Smith, 2012). Aun así, en general, no se comprende bien la relación entre el régimen de flujo natural y su influencia en las primeras etapas de la vida de los peces para la gestión de las poblaciones en los ríos de caudal alterado (King, Tonkin & Mahoney, 2009), por lo que aún hay vacíos en la ecología y la relación con el caudal.

Por otro lado, la regulación o alteración en el régimen de caudales tiene impactos directos en las poblaciones de peces. Se ha observado, que aguas abajo de una represa hidroeléctrica genera encallamiento de peces, cuando se disminuye el caudal; pérdida de especies adaptadas a hábitats turbulentos, debido al cambio en las características hidráulicas del río; pérdida de especies migratorias no solo por la barrera física que representa la represa, sino también debido a la disminución del caudal, que permite la conectividad longitudinal del río y una conexión entre hábitats rápidos y de pozas (Bunn & Arthington, 2002). También, se ha observado que cambios en el caudal al pasar de época seca a época lluviosa y viceversa, la

comunidad de peces varía, tanto en especies como en tallas, por lo que, al mantener caudales constantes sin cambios en el tiempo, puede provocar que una o varias especies desaparezcan o se vean mermadas en su población, mientras que otras, obtengan ventaja y se conviertan en las especies dominantes (Coelho & Santos, 2012). Otro problema que se da sobre los peces por cambios en el caudal, son las variaciones en la temperatura, si se habla específicamente ante disminuciones de caudal ya que, al disminuir el volumen de agua, aumenta la temperatura. Como consecuencia del aumento en la temperatura, se ha observado cambios en la tasa metabólica, reproducción y distribución en la cuenca (Bartolini, Butaik & Porfiri, 2014).

La interacción entre los peces y las variaciones en el caudal se han conocido de mejor forma a través de la ecohidráulica. Esta disciplina surgió para determinar el grado de impacto producto de las grandes represas y la disminución del agua sobre las poblaciones de peces migratorios y de interés comercial (Maddock, Harby, Kemp & Wood, 2013). Posteriormente, se originó la simulación del hábitat o modelos de preferencia de hábitat, para poder cuantificar el porcentaje de hábitat que se asignaba a una especie de ictiofauna, ante el aprovechamiento hídrico (Maddock, Harby, Kemp & Wood, 2013; Dongkyun, Sung-Uk & Byunwoong, 2018). La mayoría de estudios sobre caudal ambiental determinados a través de la fauna presente, se han realizado con ictiofauna (Rodríguez, et al. 2015), esto debido a que son organismos con los que las personas suelen tener mayor contacto y a la vez en algunas regiones son fuente de ingresos económicos por la pesca o turismo, pero también debido a todos los procesos ecológicos que se mencionaron anteriormente.

3.5 Condiciones para Costa Rica

Costa Rica posee características particulares de clima que en conjunto con su sistema orográfico hacen que el país tenga un rico capital hídrico de 24 m³/persona/año, (GWP, 2016). A pesar de la condición privilegiada, este potencial es poco y las acciones orientadas a garantizar un uso sostenible del recurso, son difíciles de gestionar. Consecuentemente; dentro de una cultura creciente de planificación del agua, se promueve el cumplimiento de compromisos que garanticen la satisfacción de la demanda presente y futura de todos los usuarios incluyendo a los ecosistemas. En ese sentido, se han desarrollado iniciativas de

determinación de caudal ambiental tanto a nivel de investigación como a nivel operativo. Por ejemplo, en la zona del río Tempisque se realizaron estudios en donde la existencia de especies y el requerimiento de hábitats fueran fácilmente relacionados con niveles de caudal, de forma que aquellas especies de mayor tamaño que encuentran limitaciones de paso y distribución en bajas profundidades fueron seleccionadas como indicadores, estas especies fueron el pez *Parachromis dovii* (guapote) y el *Crocodylus acutus* (cocodrilo) (Jimenez, 2005). A nivel operativo, lo que rige para todo el país, es el método de preservar una cuota de caudal que oscila entre el 10 y el 20% del caudal en la fuente.

3.6 Características de la cuenca del Río Pejibaye

La cuenca del río Pejibaye está ubicada en el cantón de Jiménez en la provincia de Cartago, pertenece al sistema de la Cuenca Alta del Río Reventazón ubicada en la vertiente del caribe de Costa Rica, esta cuenta con un área aproximada de 250 km² y un rango de altitud que va desde 570 a los 2680 m.s.n.m, presenta áreas con pendientes mayores a 60%. Esta cuenca se encuentra cubierta por el 80% de bosque denso, debido al Parque Nacional Tapantí principalmente, dentro de los principales usos del suelo se destacan la caña de azúcar, pastos, café y maleza. Asimismo, se caracteriza por tener un promedio anual de precipitación entre los 2800 y 8000 mm, en la zona centro oeste de la cuenca la precipitación puede ser de 9000 mm/año, esto provoca que sea una de las zonas más lluviosas del país, por lo que hace que sea un lugar con gran potencial hidroeléctrico con un caudal promedio anual de 34 m³/s, asimismo, es uno de los que más aportan al Proyecto Hidroeléctrico Angostura del ICE (Zuleta, 2013).

3.7 Escenario de cambio climático en la cuenca del río Pejibaye

Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en 2008 publicó escenarios de cambio climático por región para Costa Rica. Los escenarios climáticos utilizan como línea base el clima comprendido en el período 1961-1990 y lo proyectan al período futuro 2071-2100, En la Región Caribe determinaron un aumento de la precipitación en el sector costero, más acentuado en el sector central y sur, y la zona montañosa se definió que el comportamiento se mantendrá estable. En la zona cercana al Valle Central Oriental, la tendencia es de disminución de la precipitación anual. La temperatura máxima y la temperatura mínima

muestran un comportamiento de aumento progresivo en toda la región. La máxima se puede incrementar entre 2 y 4°C, mientras que la mínima puede aumentar entre 2 y más de 3°C (Instituto Meteorológico de Costa Rica, 2008).

Hidalgo y Alfaro (2015) evalúan 107 corridas de modelos de clima, según su capacidad para reproducir las características básicas de las variables precipitación y temperatura mensual (1979-1999), determinando que la corrida del modelo mejor calificado fue la cesm1_cam5 (modelo del Centro Euromediterráneo para el Cambio Climático). Siguiendo la metodología descrita por Hidalgo, Alfaro & Quesada, (2017), los investigadores Hidalgo y Alfaro generaron proyecciones climáticas mensuales para Costa Rica en el periodo 1979-2099, a una escala de 5,5 km x 5,5 km. La proyección del clima de la cuenca del río Pejibaye según Hidalgo et al.(2017), muestra que el promedio anual de las últimas dos décadas del siglo XXI la temperatura aumentara en 2,5 °C y la precipitación disminuirá en un 3,01%, según se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1: Escenario de cambio climático para la cuenca del río Pejibaye

Periodo	Anomalía P (%)	Anomalía T (°C)
2020-2039	0,14	0,71
2040-2059	-1,66	1,54
2060-2079	-2,20	2,05
2080-2099	-3,01	2,50

(Hidalgo et al., 2017)

Estas proyecciones son coherentes con las publicadas por el IMN, con la ventaja de presentar una escala espacial menor, producto de la aplicación de un proceso de reducción de escala, que permite realizar a análisis sobre cuencas de tamaño mediano.

3.7.1 Reducción de la escala temporal del Escenario de Cambio Climático (ECC)

La reducción de escala se refiere a al paso de series de datos mensuales a diarios, este proceso se realiza con alguna herramienta informática como WeaGets, que es un generador estocástico de clima basado en Matlab, con el cual se logra transformar precipitación y temperatura en cadenas de datos de longitud definida, esto permite realizar estudios de

impacto de ocurrencias de meteorología variable y cambio climático como herramienta para tener en cuenta los cambios esperados en precipitación y temperatura. Este generador tiene la ventaja de incorporar los esquemas computacionales de otros generadores meteorológicos conocidos, además de ofrecer opciones únicas como la corrección de subestimación de la variabilidad interanual y la capacidad de utilizar cadenas de Markov de diferentes pedidos (J. Chen, Brissette, & Leconte, 2012).

Para la generación de ocurrencia de precipitaciones se presentan tres opciones que incluyen modelos Markov de primer, segundo y tercer orden para producir precipitación ocurrencia. El proceso de Markov de primer orden es el más simple y más ampliamente utilizado, si el objetivo es usar WeaGETS como una herramienta de reducción de escala para estudios de cambio climático, el proceso de primer orden suele ser más práctico porque solo requiere la perturbación de dos parámetros (J. Chen et al., 2012). En la generación de temperaturas, se utiliza un modelo autorregresivo lineal de primer orden. La serie temporal observada se reduce primero a elementos residuales restando las medias diarias y dividiendo por las desviaciones estándar de los datos observados; las medias y las desviaciones estándar mensuales están condicionados al estado húmedo o seco (Jie Chen, Brissette, & Leconte, 2012).

3.8 Modelación hidráulica

En la modelación de ríos, los efectos gravitacionales y los viscosos son básicamente del mismo orden de magnitud. Por ejemplo, en flujos uniformes en equilibrio (es decir, flujos normales) la componente de fuerza gravitacional contrabalancea con exactitud la resistencia al flujo y las condiciones de flujo se deducen de las ecuaciones de continuidad y de momentum (Chason, 2002). En sí, la modelación de la propagación de avenidas en ríos busca resolver las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones se deducen a partir de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido en general. Para un fluido incompresible e isótropo, como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes para el movimiento instantáneo, y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las ecuaciones de Reynolds (Bladé et

al, 2009). Las ecuaciones de Saint Venant sobre continuidad y de momentum se presentan a continuación:

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots (Ec 1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = qV \dots\dots\dots (Ec 2)$$

Dónde: A=área hidráulica (m²), Q=gasto (m³/s), V=velocidad media (m/s), q=descarga lateral (m²/s), y=tirante hidráulico, Sf=pendiente de fricción, g=gravedad (m²/s)

Los modelos 2D consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Son utilizados para describir fenómenos naturales como la inundación de una gran llanura de inundación, la confluencia de dos cauces, el flujo en un cauce ancho e irregular y en general todos aquellos sistemas en los cuales se presente un movimiento del flujo de agua en dos dimensiones. Para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones también se han utilizado los métodos de las características, métodos en diferencias finitas, y métodos en elementos finitos, y además se ha utilizado la técnica de discretización en volúmenes finitos. Los esquemas numéricos clásicos en dos dimensiones, como los mencionados anteriormente, también sufren problemas de discontinuidades en la solución cuando se presenta flujo rápidamente variable (resaltos hidráulicos, frentes de onda, entre otros) por lo que en los últimos años se ha realizado un considerable esfuerzo para conseguir esquemas bidimensionales de alta resolución, como el método de los volúmenes finitos. Este método toma las ventajas tanto de las diferencias finitas como de los elementos finitos. Partiendo de la forma integral de las ecuaciones en forma conservativa, las discontinuidades se representan sin ninguna técnica especial a la vez que se conserva la masa y la cantidad de movimiento (Bladé & Valentín, 2006).

3.9 Simulación de hábitat

La metodología IFIM (“Instream Flow Incremental Methodology”) se basa en la calidad del hábitat, según variables hidráulicas como velocidad y profundidad del flujo, y la relación que estas tienen con los cambios incrementales en el caudal del flujo de agua, ya que afecta el hábitat disponible que puede ser descrita como el área que es adecuada para un organismo en particular (Navarro, McCauley, & Blystra, 1994). Es una teoría marco que evalúa el requerimiento de flujo ecológico de los ríos, generando una estructura organizativa para la evaluación y formulación de alternativas de gestión del agua que responden a los intereses de los diferentes usos del agua (Armas et al., 2017).

El modelo de simulación Iber 2.5.1, permite obtener relaciones entre el Hábitat Potencial Útil (HPU) y el caudal circulante (Q), además de ubicar la distribución espacial y temporal de la Idoneidad del Hábitat Físico (IHF) y del HPU para diferentes especies en diferentes tipos de flujos (Sanz-Ramos, Bladé Castellet, Palau Ibars, Vericat Querol, & Ramos-Fuertes, 2019). La metodología se basa en el concepto de Área utilizable ponderada conocida por sus siglas en inglés como WUA, es decir, el área hidráulica del cauce se pondera empíricamente derivada de las preferencias de microhábitat de las especies seleccionadas (Stalnaker, Lamb, Henriksen, Bovee & Bartholow, 1995).

La finalidad del modelo hidrobiológico es obtener la IHF, por medio de la interacción de los resultados del modelo hidráulico con la información del modelo ecológico. Que se evalúa mediante la composición de las diferentes idoneidades parciales que se producen de cada una de las variables hidráulicas utilizadas (Sanz-Ramos et al., 2019). Existen diversas maneras de evaluar la idoneidad elemental en función del criterio de hábitat:

- Suma de idoneidades $\sum_{k=1}^n C_k$ (Ec 3)
- Producto de idoneidades $\prod_{k=1}^n C_k$ (Ec 4)
- Media aritmética de idoneidades $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C_k$ (Ec 5)
- Media geométrica $\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n C_k}$ (Ec 6)

Donde; n es el número de variables consideradas y C_k el valor de la idoneidad de la variable k evaluada.

IV. Metodología

4.1 Determinación de la respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca

Los trayectos seleccionados para la determinación de caudales ambientales se establecieron por medio de criterios de uso de suelo, condiciones hidráulicas y biológicas. Por lo que, cada punto cumple con ubicarse fuera áreas protegidas (Parque Nacional, Reservas Privadas o cualquier otro tipo de área protegida), en donde existe información de datos históricos de caudales y en donde los trayectos de muestreo de los cauces con longitudes de entre 160 a 200 m de longitud, presentan variabilidad de hábitas caracterizadas hidráulicamente por la existencia de zonas con calados mayores al promedio (pozas), flujos supercríticos, subcríticos y áreas mixtas.

Se seleccionaron tres trayectos, dos en el río Pejibaye y uno sobre el río Gato (Figura 1). A los cuales se les nombro según el orden de recolección de muestras seguido durante las giras de campo. El primero definido como P1 está en el río Pejibaye a 350 m al sureste de la plaza de deportes del pueblo de Pejibaye, bajo el puente que comunica con el poblado Gato, el segundo punto P2 se ubica el río Gato a 400 m del campo de fútbol del poblado del mismo nombre y el tercer punto P3 sobre el río Pejibaye, se ubica aguas arriba del puente sobre la carretera nacional 225.

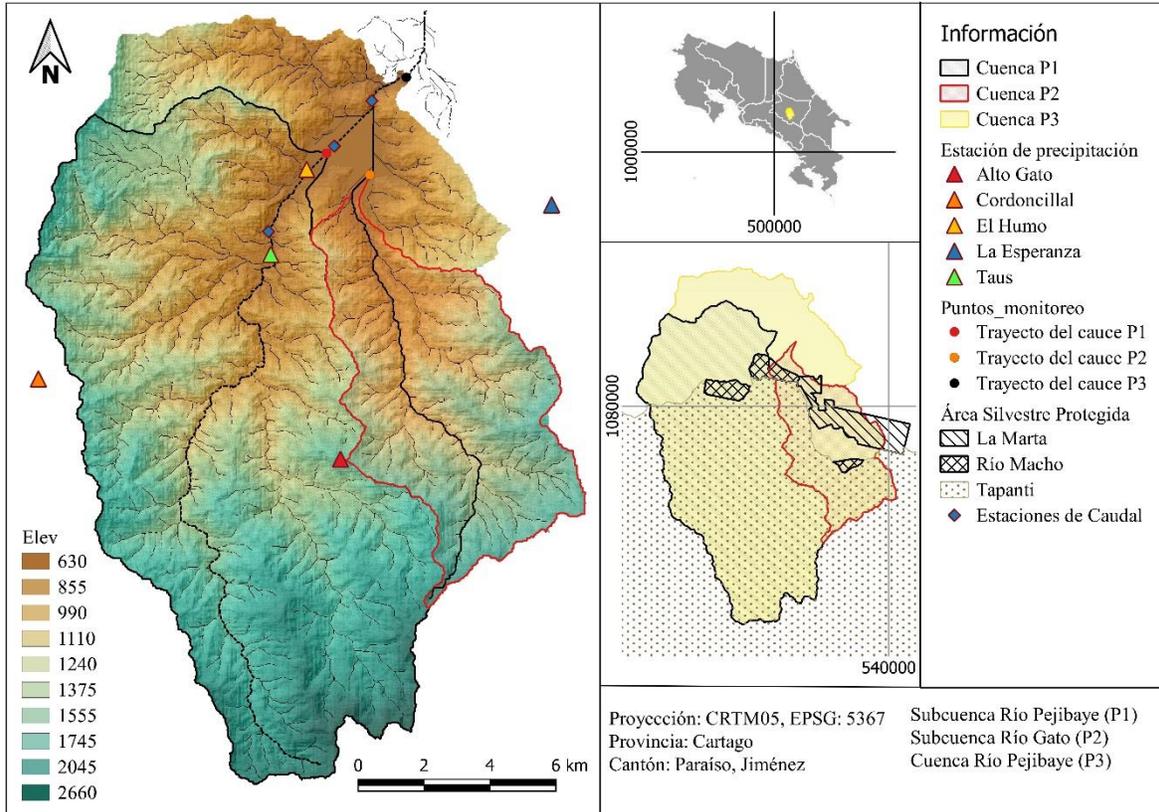


Figura 1: Ubicación de estaciones de medición (caudal y precipitación), áreas silvestres protegidas, puntos de muestreo y subdivisión de cuencas.

4.1.1 Generación de modelos hidrológicos para la cuenca río Pejibaye (P3), Subcuenca río Gato (P2) y Subcuenca río Pejibaye (P3)

Los trayectos P1, P2 y P3 para fines hidrológicos representan los puntos de aforo de la cuenca y subcuencas con las que se trabajaran en el presente estudio y que en adelante llamaremos; Cuenca P1, Cuenca P2 y Cuenca P3, las cuales pueden ser visualizadas en la Figura 2.

Las cuencas P1 y P3 cuentan con datos de precipitación (P), temperatura (T) y caudal (Q) para el periodo 2000-2009 a escala diaria, en tanto, la cuenca P2 tiene información de P y T para el mismo periodo de tiempo y misma escala temporal. La cuenca P2, al no tener datos de Q, no se le realizara una calibración directa, sino que se utilizaran los valores de los parámetros de calibración de la cuenca P3, que es con la que presenta mayores similitudes en cuanto a distribución de uso de suelo y pendiente media de la cuenca.

4.1.2 Análisis de la precipitación

Los datos de precipitación provienen de las estaciones El Humo (73028), Cordoncillal (73045), Taus (73045), La Esperanza (73054), Destierro (73037) y Alto Gato (73063) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la información se resume en el cuadro 2.

Cuadro 2: Estaciones de medición de precipitación.

Número	Nombre de la Estación	Norte	Este	Elevación (m.s.n.m.)
73028	EL HUMO	1084386,67	532023,731	690
73030	CORDONCILLAL	1078022,50	523880,803	1290
73045	TAUS	1081807,20	530935,018	742
73054	LA ESPERANZA	1083308,51	539459,638	873
73063	ALTO GATO	1075585,68	533050,825	1681

El análisis conllevó, en primera instancia, la determinación de los porcentajes de datos faltantes, mismos que fueron rellanados utilizando regresiones multivariable:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}) + e_i \dots\dots\dots (Ec 7)$$

Dónde: Y_i = variable dependiente, X_i = variable predictora, β_i = efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora X_i sobre la variable dependiente Y_i . Se conocen como coeficientes parciales de regresión, e_i = residuo o error, la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo.

Posteriormente, se determinó la relación entre la elevación de la cuenca y la precipitación promedio anual, con el fin de determinar el gradiente o el porcentaje de cambio de P en cada 100m de elevación.

4.1.3 Análisis de la temperatura atmosférica

Los datos de temperatura (T) provienen de la base de datos ECMWF ERA5 Reanalysis (ERA 5) y se les realizó una corrección al compararlos con datos observados de la estación meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) que

se encuentra aproximadamente a 7,5 km del trayecto P3. Se compararon datos de temperatura promedio mensual de la estación CATIE con datos de temperatura máxima y mínima de ERA 5, seleccionando los datos la cuadrícula que espacialmente se sobrepone sobre la ubicación de la estación del CATIE, en el periodo 2000-2009 ($R^2 = 0,895$, diferencia de medias $3,2^\circ\text{C}$), para realizar la corrección se utilizó una regresión lineal múltiple, la cual se aplicó a la data de ERA 5 de la cuadrícula de información que contiene la cuenca del Río Pejibaye.

Se utilizó la ecuación de Ecuación de Thornthwaite para el cálculo de la Evapotranspiración potencial mensual (Vélez et al., 2000).

$$ET_o = 0,5333 \left[10 \frac{T_m}{I} \right]^a k \dots\dots\dots (\text{Ec } 8)$$

Dónde: ET_o = evapotranspiración diaria promedio del mes en mm/día, T_m = temperatura diaria promedio del mes en $^\circ\text{C}$, I = índice calórico anual dado por:

$$I = 12 \left[\frac{T_{\text{anual}}}{5} \right]^{1,514} \dots\dots\dots (\text{Ec } 9)$$

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239 \dots\dots\dots (\text{Ec } 10)$$

Donde; T_{anual} es la temperatura promedio anual, a es un exponente dado en función de I , k es un coeficiente de corrección mensual.

4.1.4 Análisis de caudal

A las series de datos de caudal (Q) de las estaciones 09-33 y 09-09 del ICE del periodo 2000-2009, se les realizó un cambio de las unidades pasando de m^3/s a $\text{mm}/\text{día}$, lo que está en función de la subcuenca definida por la ubicación de la estación de aforo. Este cambio de unidades se debe a un requerimiento del programa HBV light, que es el modelo hidrológico que se utilizó en el presente estudio.

4.1.5 Topografía y uso del suelo

El análisis de morfológico de la cuenca se realizó con el programa QGIS 3.12 y herramientas de SAGA 2.3.2 y GRASS 7.8.2. La información de topografía utilizada es de los modelos de elevación digital (MED) ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2015), descargados a través de la plataforma ASF Data Search Vertex. Utilizando los modelos de elevación se generan MEDs individuales para cada una de las cuencas P1, P2 y P3. Estos son subdivididos en 12 zonas de elevación, por medio de una reclasificación del MED basada en rangos de elevación máximo y mínimo definidos para cada zona. Utilizando la plataforma Google Earth Engine Code, se generó un código para realizar una clasificación semiautomática de la cuenca total del río Pejibaye (contiene a las cuencas P1, P2 y P3), teniendo como producto una clasificación del uso de suelo agrupada en 3 tipos:

- Cobertura forestal: Contempla áreas con cobertura boscosa
- Cobertura vegetal: Contempla áreas de uso agrícola cultivos y pastos
- Sin cobertura vegetal: Contempla áreas que no cuentan con cobertura como construcción, centros de población, carreteras, calles, suelo desnudo (incluye área agrícola en sin cobertura).

A continuación en la Figura 2, se muestra un esquema de la clasificación utilizada.

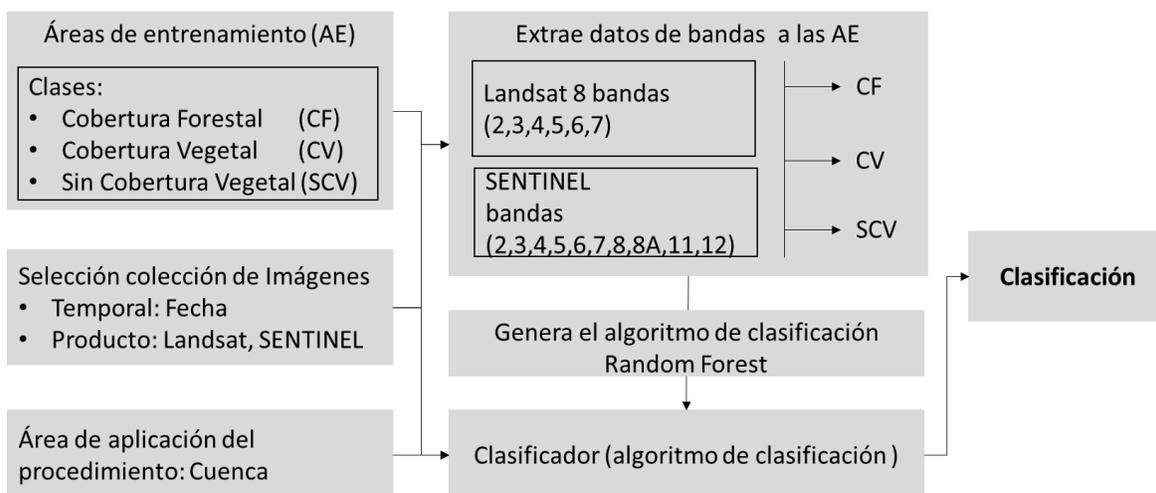


Figura 2: Esquema de la clasificación de uso de suelo

La clasificación del uso de suelo fue validada mediante puntos de control tomados en campo aplicando el coeficiente kappa de Cohen.

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \dots\dots\dots (Ec 11)$$

$$Po = \frac{\sum_{i=1}^r n_{ii}}{N} \dots\dots\dots (Ec 12)$$

$$Pe = \frac{\sum_{i=1}^r n_{i*} * n_{*i}}{N^2} \dots\dots\dots (Ec 13)$$

Donde; Po es la proporción de acuerdos observados, Pe es la proporción de acuerdos esperados por azar, n_{ii} número de aciertos o valores concordantes entre las pruebas, $n_{i*} * n_{*i}$ es el producto de la sumatoria de cada clase producida en la prueba, N número total de datos.

Se combinaron las capas de uso de suelo y zonas de elevación obteniendo una matriz que contiene la fracción de área por uso de suelo en diferentes rangos de elevación, esto se realizó para las tres cuencas y es parte de los datos de entrada del modelo hidrológico HBV.

4.1.6 Caracterización morfológica de las cuencas

A partir de los MED se generó de cada cuenca, se calculó y genero la delimitación, red de drenaje, área, perímetro, largo, ancho, pendiente promedio, curva hipsométrica, factor de forma de Horton (Kf), Coeficiente de compacidad (kc) y índice de alargamiento (ver cuadro 3).

Cuadro 3: Resumen de los coeficientes morfológicos para la comparación de las cuencas.

Parámetro	Ecuación	Variables	Valores
Factor de forma de Horton (kf)	$kf = \frac{A}{L^2}$	A es área de la cuenca L es largo de la cuenca	kf < 1 menos sujeta a crecientes kf > 1 más sujeta a crecientes
Coeficiente de compacidad (kc)	$kc = \frac{P}{Pc}$	P es perímetro de la cuenca. Pc es perímetro de un círculo equivalente	1,00 < kc < 1,25 forma redonda 1,26 < kc < 1,50 forma ovalada 1,51 < kc < 2,0 forma rectangular
Índice de alargamiento	$I_A = \frac{L}{A}$	A es área de la cuenca L es largo de la cuenca	kf < 1 cuenca achatada kf > 1 cuenca alargada

Los índices, coeficientes calculados y comportamiento del uso de suelo por zona de elevación (descrito en el punto anterior) fueron utilizados para determinar que entre las cuencas P1 y P3, la cuenca P1 tiene mayor similitud con la cuenca P2. Lo que será un aspecto importante para el desarrollo del modelo hidrológico de esa cuenca.

4.1.7 Modelado hidrológico

El modelo HBV se aplicó en las cuencas P1 y P3, fue alimentado con datos diarios de temperatura (°C), precipitación (mm) y caudal (mm/día), promedios mensuales de temperatura y evapotranspiración y una matriz de fracción de área de uso de suelo por zona de elevación.

La calibración se realizó utilizando el método de Monte Carlo (500000 corridas), seleccionando como función objetivo el coeficiente de eficiencia de modelo Nash Sutcliffe (NSE). Los rangos propuestos de los parámetros de calibración se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 4: Rango de parámetros utilizado para la calibración del modelo hidrológico

Parámetro	Explicación	Mínimo	Máximo	Unidades
Rutina de suelo				
FC	Humedad del suelo máxima (almacenamiento en la caja de suelo)	50	500	mm
LP	Umbral de reducción de la evaporación (SM / FC)	0.3	1	-
BETA	Coefficiente de forma	1	6	-
CET	Factor de corrección para la evaporación potencial.	0	0.3	1/°C
Rutina de respuesta				
K1	Coefficiente de recesión (caja superior)	0.01	0.4	1/d
K2	Coefficiente de recesión (caja inferior)	0.001	0.15	1/d
PERC	Flujo máximo de la caja superior a la inferior.	0	3	mm/d
MAXBAS	Enrutamiento, longitud de la función de ponderación	1	7	d

El programa devuelve un archivo con las 100 mejores corridas, evaluadas a partir de la comparación de caudales observados (Qobs) y caudales simulados (Qsim) por medio del

NSE y que contiene los valores de los parámetros de calibración que permiten el mejor ajuste. Esto se obtuvo para las cuencas P1 y P3 que tienen datos de Qobs. El modelo de la cuenca P2 por no tener datos de Qobs, se genera bajo la suposición que utilizando los valores de los parámetros de la cuenca P1 permitirá analizar la respuesta de la cuenca P2 bajo escenarios de cambio climático. Los procedimientos requeridos para generar y calibrar los modelos hidrológicos de las tres cuencas se muestran en la Figura 3.

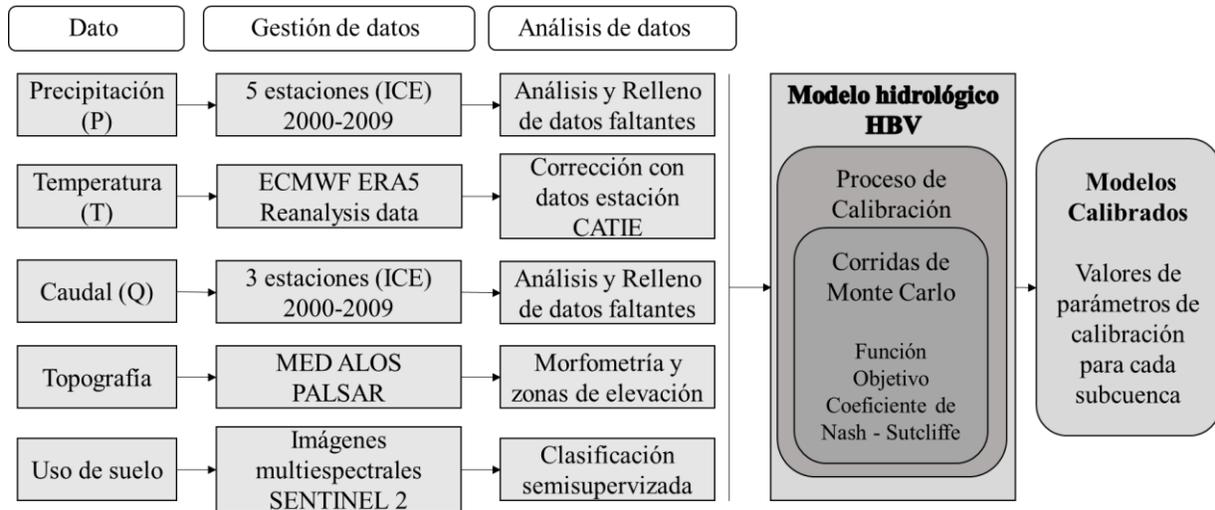


Figura 3: Esquema del proceso de generación de los modelos Hidrológicos

Realizada la calibración de los modelos, se procedió con la validación utilizando los datos del último año de la serie de caudales. En la evaluación de los modelos se utilizó el coeficiente NSE que mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, además se utilizó el coeficiente PBIAS o porcentaje de sesgo que mide la tendencia de que el promedio de los valores simulados sea mayor o menor que los valores observados. El valor óptimo de sesgo es cero, valores positivos indican subestimación por parte del modelo y valores negativos indican una sobreestimación. Los rangos de calificación utilizados se toman de Moriasi et al., (2007), los cuales se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5: Rangos de evaluación de modelo hidrológico según estadísticos NSE y PBIAS.

Evaluación	NSE	PBIAS (%)
Muy bueno	$0,75 < NSE < 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0,65 < NSE < 0,75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0,50 < NSE < 0,65$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$NSE < 0,50$	$PBIAS > \pm 25$

(Moriasi et al., 2007)

4.1.8 Escenario de cambio climático

El comportamiento esperado se obtendrá de los datos de precipitación y temperatura a escala mensual del 2000-2099 generados por Hidalgo y Alfaro (2015). Lo primero que se realizó fue un ajuste de la media y desviación estándar del ECC con los parámetros de los datos observados para el periodo 2000-2009. Posterior, los datos ECC mensuales fueron desagregados a diarios, para esto se utilizó el programa Generador de Tiempo Estocástico conocido por sus siglas como WeaGETS (Chen, 2020), que es un generador de tiempo estocástico y además se creó un código en Matlab que permitió parear y ordenar los datos del estocásticos con los datos provenientes del ECC, obteniendo precipitación (P), temperatura (T) a escala diaria.

El modelo WeaGETS funciona en la plataforma MATLAB, y requirió como información de entrada datos observados de P y T diaria del periodo 2000-2009 (10 años), se definieron los métodos estocásticos y se definió la generación de 1000 años de información diaria de T y P. Información que no tiene un orden anual, solo mensual y que está basada en la estadística de los datos observados. Posterior, con un código realizado en MATLAB, que requiere como entradas los 1000 años de información (P y T diaria) y el ECC, se logró conformar una serie de datos diarios cuyos estadísticos concuerdan con el ECC a escala Mensual. Este funciona tomando mes a mes los datos del ECC y busca dentro de los datos estocásticos el mes con mayor similitud. Por ejemplo, en el primer ciclo toma el mes de enero del 2000 del ECC para P y T (Acumulado mensual y promedio diario mensual respectivamente) y los compara con los 1000 eneros generados de forma estocástica, seleccionando el que menor diferencia tenga, esta acción se repite hasta completar la serie de datos del ECC.

La escala espacial de 5,5 km del ECC permitió generar datos de P y T individualizados para cada una de las cuencas P1, P2 y P3, los cuales son utilizados en los modelos hidrológicos calibrados para generar la serie de caudales 2000-2099 y determinar la respuesta las cuencas. Los datos de caudal se dividieron en periodos de 20 años, 2000-2019, 2040-2059, 2080-2099, se obtuvo el régimen hidrológico y curvas de excedencia mensuales, a partir de estos productos se generó una curva conformada por los caudales de cada mes, que representan

excedencia del 99%, 90%, 85%, 80% y 70%, estos son ordenados de mayor a menor con el fin de ser utilizados en los modelos hidráulicos.

4.2 Determinación de los indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental

Para la determinación del caudal ambiental se seleccionaron como organismos indicadores insectos acuáticos y peces. Estos organismos fueron seleccionados ya que están adaptados a las fluctuaciones naturales en magnitud, frecuencia, y duración de las corrientes de flujo (alto, intermedio o bajo). Específicamente, para macroinvertebrados acuáticos se tomaron muestras de ninfas de los órdenes de insectos Ephemeroptera (Baetidae; *Baetodes sp.*) y Plecoptera (Perlidae; *Anacroneria sp.*). Estas larvas son reófilas, además de poseer un cuerpo comprimido dorsoventralmente y en cada par de patas poseen una uña en forma de garfio para evitar ser arrastrados por la corriente. Además, el género *Anacroneria* ya ha sido utilizado como indicador de caudal para los ríos Savegre, Reventazón (Quesada, 2014) y Naranjo (Quesada, 2019), por lo que ya se tiene información de que la ninfa responde a cambios en el volumen del agua.

En cuanto a los peces como indicadores de caudal en el 2006, el ICE utilizó a las especies *Joturus pichardi* (bobo) y *Agonostomus monticola* (Tepemechín), ambos pertenecientes de la Vertiente Caribe de Costa Rica. Sin embargo, por la represa hidroeléctrica Angostura, estas especies ya no se registran en el río Pejibaye, por lo que, para este estudio se utilizó a las especies *Gobiexis nudus*, *Rhamdia laticauda* y *Astyanax aeneus*. En el caso de *Gobiexis nudus*, es una especie que suele habitar en los sistemas tipo rápidos y turbulentos, por lo que puede ser un buen indicador de caudal, debido a que los rápidos y las cataratas son los microhábitats más perjudicados al reducir el caudal. *Rhamdia* y *Astyanax*, se han registrado en distintos microhábitats determinados por la velocidad del agua, sin embargo, en el caso de *Astyanax* son más frecuentes en pozas y aguas calmas. Aun así, es importante corroborar su eficacia como especies indicadoras de caudal ambiental.

Para obtener las muestras tanto de macroinvertebrados acuáticos como peces, se obtuvo el permiso por medio del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central del SINAC,

número de resolución 089-2018- ACC-PI. Sin embargo, se hace la aclaración que todos los individuos de peces capturados con la electropesca fueron reincorporados al río y durante los muestreos no hubo muerte de ningún individuo.

Para realizar la colecta de macroinvertebrados se utilizó la metodología detallada por Ramírez (2010) y la estipulada en el Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE-S, 2007). Específicamente, en cada una de las secciones de control se estableció un transecto paralelo al flujo del cuerpo de agua de 50 m de distancia; luego en cada punto se seleccionaron microhábitats que fueran variables en cuanto a la profundidad y velocidad para capturar los insectos. En el primer punto se seleccionaron 10 microhábitats, en el punto 2 siete, y en el punto 3 ocho. Se realizaron colectas directas que son importantes para poder obtener aquellos organismos que se encuentran fuertemente adheridos al sustrato (Ramírez, 2010). En cada microhábitat se colocó una red tipo D corriente abajo, y se movió el sustrato y rocas con las manos para desprender los insectos a la red. El material acumulado en la red fue colocado en bandejas blancas con agua para buscar los individuos de *Baetodes* y *Anacroneturia*, que posteriormente fueron colocados en frascos con alcohol al 80% para su preservación. En cada sitio se realizaron muestreos equivalentes a una hora-hombre de trabajo.

Para la captura de peces, en cada sitio de muestreo se seleccionó un tramo no mayor a los 100 metros y se utilizó una electropesca marca Smith-Root y un cachador (Dimensiones). De esta forma, se realizó recorridos a lo largo del tramo y se muestreó la mayor cantidad de hábitats posibles, por lo que se evaluó ambos márgenes, raíces y troncos sumergidos y sistemas tipo rápidos y turbulentos. Una vez capturada una especie, se detenía el muestreo y se procedía con la identificación. Posteriormente, el individuo se colocó en un balde con agua y se proseguía con el muestreo, hasta detectar al siguiente organismo. El muestreo finalizó una vez recorrido todo el tramo seleccionado. Terminado el muestreo todas las especies fueron regresadas al río correspondiente, para evitar pseudoréplicas. Se hace la aclaración de que debido a la ausencia del equipo de electropesca, se procedió a realizar los muestreos con careta, siempre y cuando el agua no estuviera turbia, y se realizaba de igual forma en un tramo no mayor a los 100 m.

4.2.1 Curvas de preferencia

Para realizar las curvas de preferencia primeramente se realizó un diagrama de frecuencia, para determinar bajo cuales velocidades y profundidades hubo mayor cantidad de organismos. Seguidamente se realizaron las curvas de preferencia utilizando la metodología de la regla difusa. Esta consiste en asignarle una categoría al hábitat que la especie objetivo utiliza o no y cuenta con la ventaja de que las categorías se pueden superponer, debido a que la preferencia hacia un rango de una variable se da de manera gradual en la naturaleza (Noack, Schneider & Wieprecht, 2013). De esta forma, se estableció tres categorías de preferencia: hábitat óptimo, es el rango donde se encuentra la mayor abundancia de organismos; regular, son el conjunto de rangos donde hay presencia de organismos, pero en menor abundancia; inadecuado, es el rango (os) donde no hay presencia del organismo objetivo.

El proceso de las reglas difusas, define números reales entre 0,0 y 1,0, donde 0 significa que los valores de la variable del hábitat no pertenecen a la función de membrecía, mientras que 1 significa la totalidad de la membrecía (Noack, Schneider & Wieprecht, 2013) (Figura 4). Una vez generadas las curvas de preferencia estas se utilizan para poder generar la simulación del hábitat.

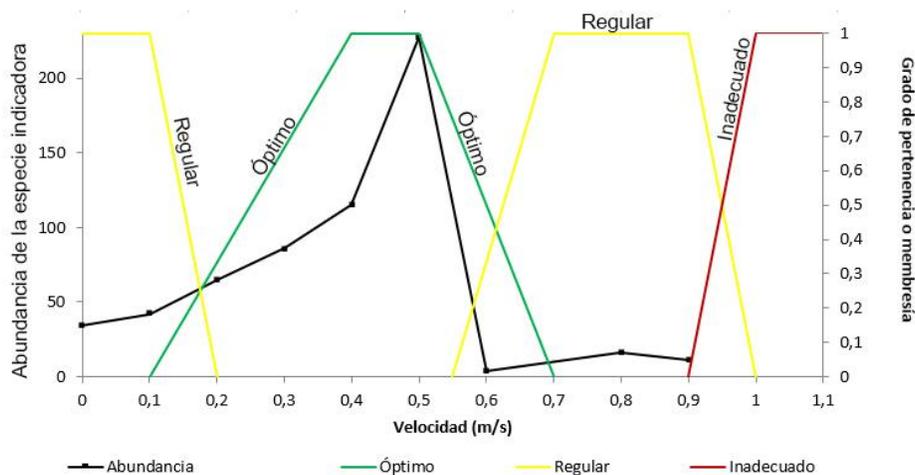


Figura 4 Grado de preferencia de especies indicadoras

4.2.2 Simulación de hábitat potencial útil (HPU)

Posteriormente, por medio del software Iber 2.5.1, se realizaron simulaciones de hábitat, que son modelos que tienen como objetivo evaluar la relación del caudal con la formación de hábitat físico óptimo, regular o inadecuado para las especies objetivo, y de esta forma evaluar los efectos del cambio de caudal. Para realizar la simulación se utilizaron los datos obtenidos de los indicadores biológicos, y siguientes los parámetros hidrológicos: profundidad y velocidad del agua.

Las relaciones de HPU y caudal circulante se realizaron siguiendo la Metodología de incremento del flujo en la corriente, mejor conocida por sus siglas en inglés como IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee,1982). La herramienta computacional utilizada es programa Iber, que permitió correr el modelo hidráulico, generando parámetros hidráulicos de velocidad y calado del flujo combinándolo con el modelo ecológico mediante el ingreso de las curvas de idoneidad de las especies seleccionadas (Sanz-Ramos et al., 2019), en la Figura 5 se muestra el esquema metodológico utilizado.

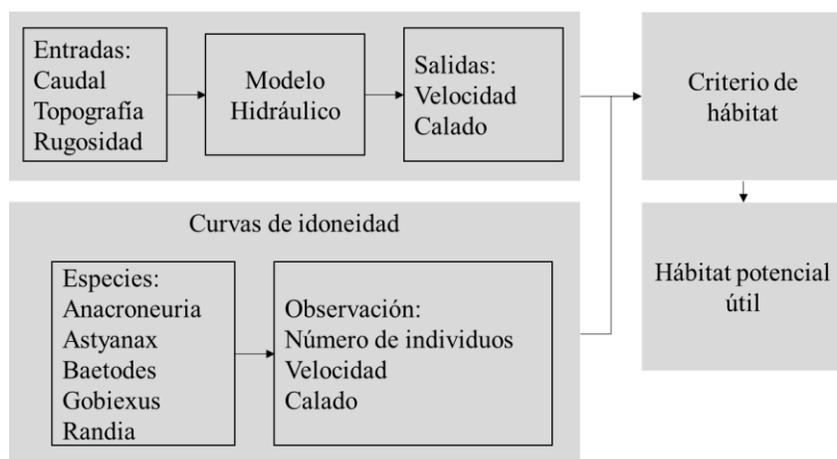


Figura 5: Esquema metodológico seguido para la obtención de los HPU.

4.2.3 Simulación de las condiciones hidráulicas de los trayectos P1, P2 y P3

La simulación de condiciones hidráulicas y de las condiciones de hábitat se realizó con el programa Iber, que es un modelo numérico bidimensional y que contiene un módulo específico para cálculo de Hábitat Potencial Útil (HPU).

Los datos requeridos para el montaje del modelo son topografía mediante un MED, condiciones de contorno o frontera, coeficiente de rugosidad del trayecto y curvas de preferencia. El MED se genera a partir de un levantamiento topográfico realizado con estación total, tomado secciones transversales separadas cada 5 m. Los puntos con información x , y , z fueron interpolados para construcción de curvas de nivel utilizando el programa Qgis y posterior a un proceso de edición, se utilizaron para producir el MED.

Las condiciones de contorno, aguas arriba se establecieron como una entrada escalonada, que no está en función de tiempo, sino al cumplimiento de la condición que la diferencia entre el caudal de entrada (Q_i) y caudal de salida (Q_s) sea igual o menor al 1% de Q_i , una vez se cumpla con esta condición, el modelo varía el Q_i tomando el caudal definido en el siguiente escalón. Las condiciones aguas abajo o de salida se definieron en función de datos de campo como flujo supercrítico.

Para determinar el coeficiente de rugosidad (n) en cada trayecto, se realizó una calibración del modelo tomando como parámetro de comparación el nivel de agua alcanzado para un caudal aforado en una sección transversal específica y referenciada (esto se realizó para cada uno de los trayectos). El proceso consistió en generar una primera corrida del modelo hidráulico con un n aleatorio y comparar el resultado de nivel de agua simulado (NAS) contra el nivel de agua observado (NAO), entrando en un ciclo de calibración, de tal forma, que si $NAS > NAO$ se disminuye el valor n y si $NAS < NAO$ se aumenta el valor n .

4.3 Determinación del régimen de caudal ambiental del río

4.3.1 Criterios para determinar el caudal óptimo

Según los criterios para establecer un régimen de flujo óptimo descritos por Armas et al (2017), se propone la utilización de los siguientes 2 métodos:

- a. Utilizando la curva WUA de la especie que presente el valor más grande de área de hábitad utilizable y determinando su valor de flujo óptimo. Este caudal debería de ser

representativo para las otras especies y se establece como el caudal mínimo durante la estación seca o de estiaje. Según García de Jalón y González del Tánago (1998), esta situación se traduce en las mejores condiciones para desarrollar un régimen de flujo ecológico: utilizando la curva de flujo natural, ajustando el flujo óptimo (obtenido de la curva WUA-Q) por el mínimo mensual valor de la curva natural, y calculando los meses restantes proporcionalmente. El flujo ambiental propuesto debería fluctuar de manera similar al régimen natural.

- b. Normalización de las curvas de WUA, utilizando la curva se extrae el flujo óptimo que proporciona el porcentaje máximo de hábitat para el conjunto de especies estudiadas (Leonard y Orth, 1988; Orth y Leonard, 1990). Basado en las curvas WUA-Q, y dado que el eje WUA esta normalizado y las curvas están superpuestas, permite la identificación de un flujo óptimo. Este flujo, que es representativo de todas las especies, se establece como flujo mínimo para el mes que presenta el máximo estiaje; y varia proporcionalmente durante todos los meses restantes. Con lo cual se genera un régimen de caudales para todos los meses.

V. Resultados

V.1 Respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca del Río Pejibaye ante escenarios de cambio climático.

5.1.1 Análisis de la Precipitación

Del análisis de datos de las 6 estaciones se determinó que el porcentaje de datos esta entre el 2,16% y 8,16%, excluyendo la estación Destierro que presenta un 27% (Figura 6), por tal razón no será utilizada en este estudio. Las ecuaciones utilizadas para relleno de las restantes 6 estaciones presentan coeficiente de determinación (r^2) entre 0,40 y 0,65.

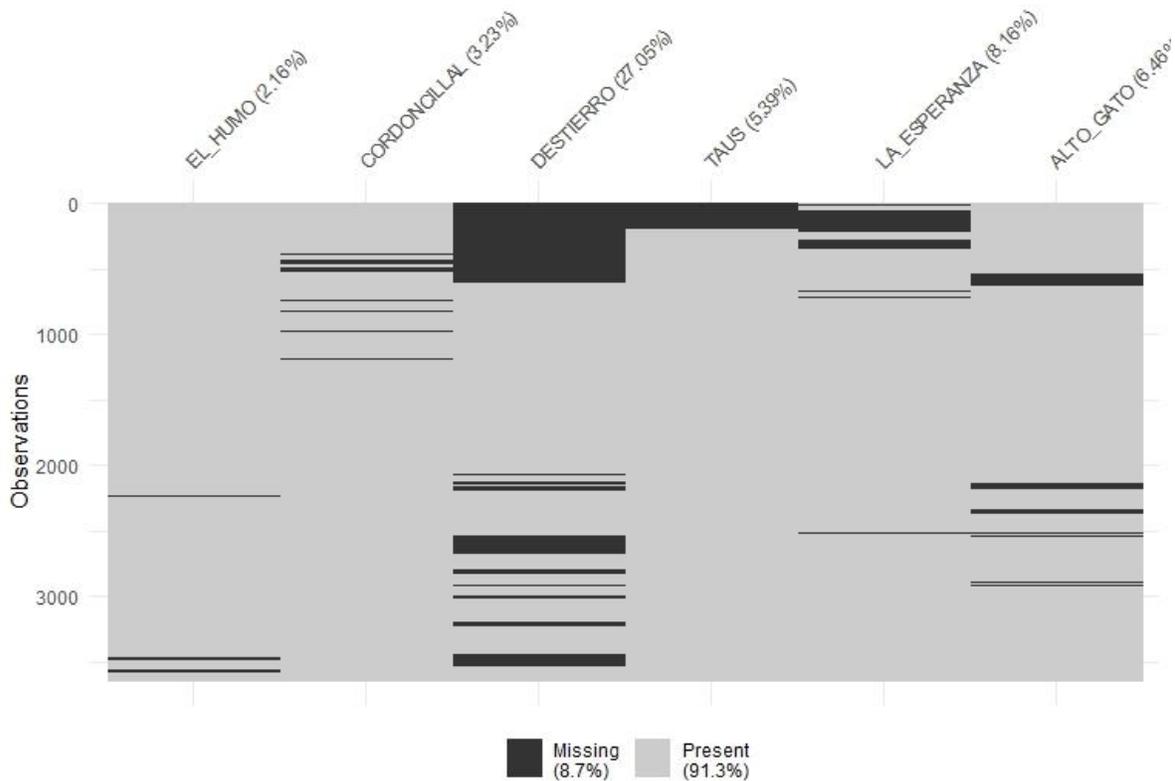


Figura 6: Cuantificación de datos faltantes de las series de precipitación

Si bien, los r^2 de algunas de las estaciones de relleno no son buenos, al comparar la precipitación promedio diario entre datos originales y los datos rellenos, se determinó que la variación de las medias mensuales es menor al 1%.

Calculados los promedios de la precipitación acumulada anual, se observó que existe un aumento de la cantidad de lluvia respecto a la elevación a razón de +264,5 mm por cada 100m de ascenso, lo que representa una variación del 5,05 %/100m respecto a la precipitación promedio anual de la cuenca, tal como se muestra en la Figura 7.

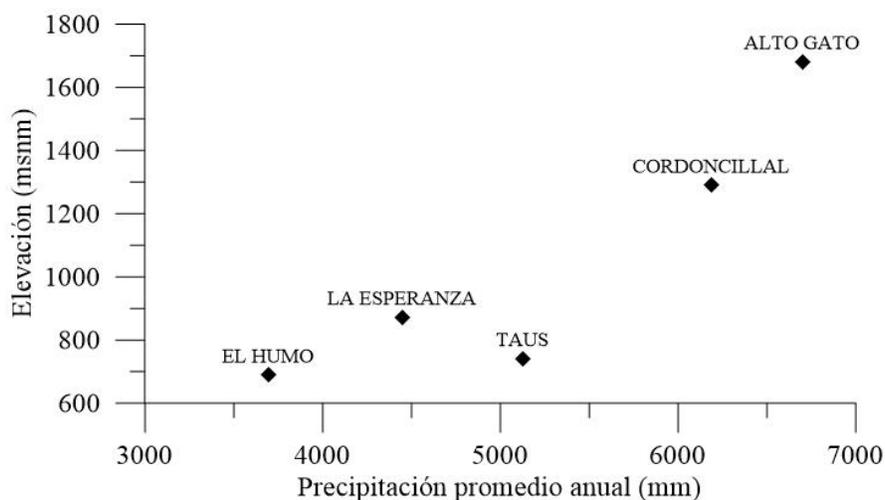


Figura 7: Relación entre elevación y precipitación

Esta condición, se verá reflejada en la cantidad de lluvia que recibe cada una de las cuencas en función con la elevación promedio (Ver Cuadro 2). En promedio las cuencas P1, P2 y P3 perciben una precipitación anual acumulada de 5925,7 mm, 4899,3 mm y 4849,4 mm respectivamente.

El régimen de precipitación de las cuencas muestra a diciembre, enero, febrero, marzo y abril como los meses que registran una menor cantidad de lluvia acumula, sin embargo, enero tiene un promedio mayor a los otros 4 meses, y sobre sale, que en su variabilidad sean registrado años sobre los 650 mm/mes, por lo que presenta características de ser un mes transitorio entre el periodo lluvioso y el periodo seco. La mayor precipitación se da, en los meses de mayo a noviembre, registrando precipitaciones promedio mayores a los 410 mm en las tres cuencas. No es posible indicar, por lo menos a nivel mensual, que exista una transición entre los periodos seco a lluvioso, debido a que el promedio de precipitación del mes de mayo (646 mm para la cuenca P3) es solo superado por el registro del mes de noviembre. Lo descrito puede ser observado de forma gráfica en la Figura 8.

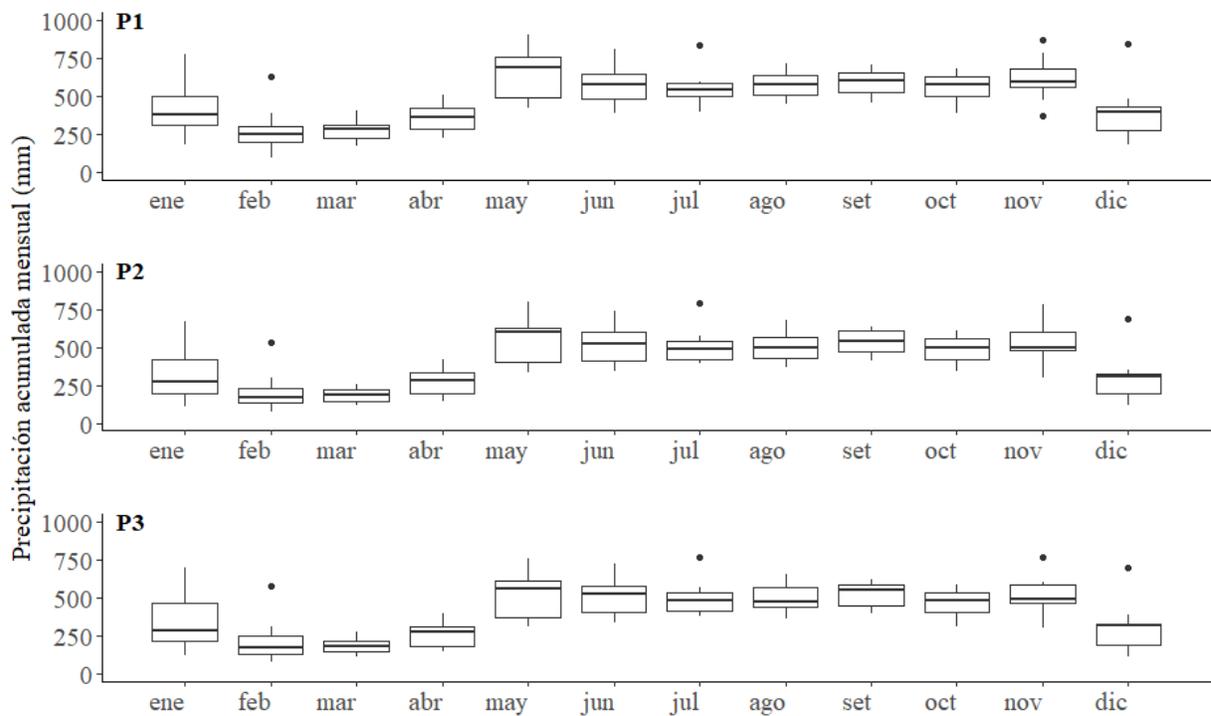


Figura 8: Régimen de precipitación mensual.

5.1.2 Análisis de Temperatura

En el proceso de calibración de los datos de temperatura, primero se determina que existe una correlación de 0,86 entre la serie de temperatura promedio mensual de la estación del CATIE en Turrialba y la serie de Temperatura promedio mensual con información de ERA5 para el periodo 2000 – 2009. Sin embargo, el valor de la media de ERA5 para el periodo de comparación es de 3,17°C menor y la desviación estándar es de 0,35°C mayor que los datos de la estación CATIE, según se muestra en la Figura 9. Para la calibración de los datos TCopernicus, se estableció una regresión lineal múltiple utilizando como variables predictivas Temperatura máxima mensual (Tmax) y Temperatura mínima mensual (Tmin) de ERAS5, generando la siguiente ecuación.

$$T_{\text{ERA5 corregida}} = 0,5912 * Tmax + 0,0807 * Tmin + 7,6675 \dots\dots\dots (\text{Ec } 14)$$

Realizada la corrección de los datos de temperatura ERA5, al comparar estadísticos con los datos de la estación CATIE, determina que las media y las desviaciones estándar se igualan y mejora los valores de las métricas BIAS y RMSE, según se puede apreciar en la Figura 9.

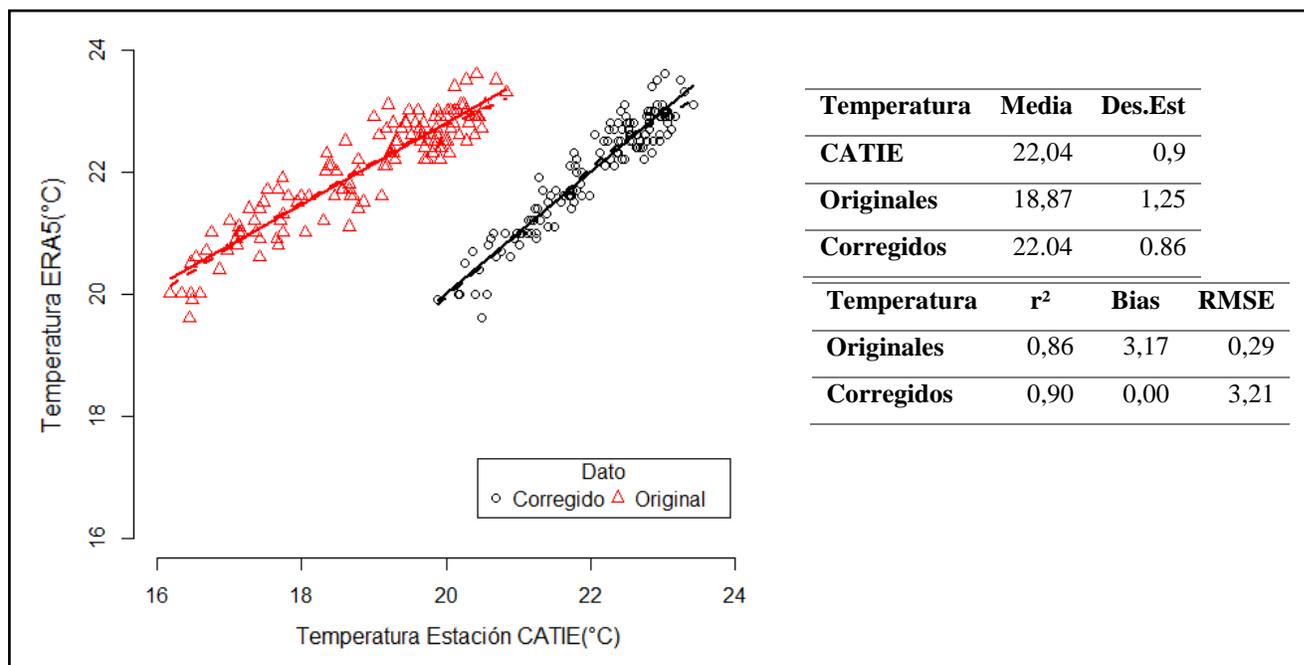


Figura 9: Relación de las series de datos de Temperatura

La resolución espacial de los datos de ERA5 es de 27,75 x 27,75 km, sin embargo, la cuenca del río Pejibaye y el sitio de ubicación de la estación CATIE, están en cuadrículas conjuntas, por lo que, los datos varían. En este análisis, se hizo la suposición; que el comportamiento de los datos de temperatura de las cuadrículas en donde se ubica la estación meteorológica del CATIE y la cuadrícula en donde se ubica la cuenca del río Pejibaye es relativamente similar por lo que permite utilizar la ecuación Ec 14 para obtener los valores de Temperatura corregidos para la cuenca y subcuencas en estudio, los resultados se muestran en la Figura 10.

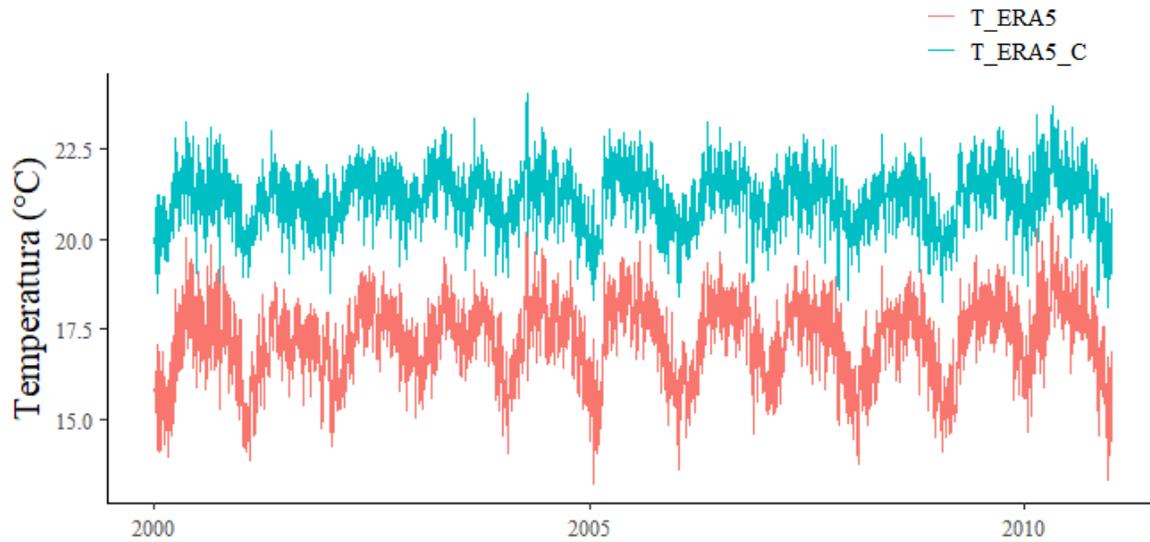


Figura 10: Temperatura cuenca río Pejibaye.

Para el periodo analizado, la temperatura promedio anual de las cuencas muestran un comportamiento estable, con una temperatura media anual de 21,1 °C, siendo enero el mes que en promedio presenta menor temperatura 20,2 °C y mayo presenta las máximas temperatura con 21,6°C. El comportamiento interanual, presenta un ascenso de la temperatura que inicia en enero y finaliza en su máximo en mayo, de mayo a setiembre presenta un periodo de temperatura similar, en donde junio presenta una mínima estacional (periodo mayo a setiembre) y de setiembre a diciembre se presenta una disminución de las temperaturas. Este comportamiento se muestra en la Figura 11.

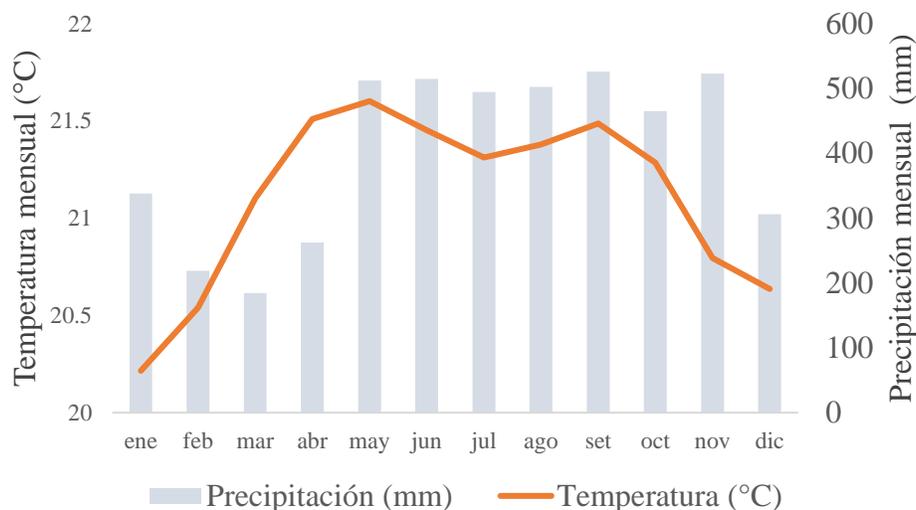


Figura 11: Comportamiento temperatura promedio mensual y precipitación acumulada promedio mensual del periodo 2000 – 2009.

5.1.3 Topografía y uso del suelo

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Pejibaye (P3) y subcuenca del río Pejibaye (P1) y de la subcuenca del río Gato (P2). La evaluación de la clasificación del uso de suelo arroja un coeficiente kappa de 0,695 que alcanza una fiabilidad buena. En general en las 3 cuencas el porcentaje de zona de vegetación forestal supera el 90%, lo cual no es sorprendente entendiendo la ubicación y la existencia de diferentes tipos de Áreas de protección que se ubican en la zona.

Las cuencas se caracterizan por presentar en las zonas bajas producción agrícola, principalmente caña y pastos (potreros) y donde la concentración de la población también se ubica en las áreas más bajas de la cuenca, en tanto, en las zonas altas y de mayor pendiente prevalece la cobertura forestal. La clasificación del uso del suelo utilizada responde a los requerimientos del modelo hidrológico HBV, el cual permite como máximo el ingreso de 3 clases de coberturas vegetales, por tal motivo se agrupó de la siguiente forma, cobertura forestal, cobertura vegetal (agrícola, tacional y pastos) y sin cobertura vegetal (vías públicas, suelo desnudo y construcción). En la Figura 12, se muestran para cada cuenca el acumulado del área de cada clase de cobertura según se asciende en la cuenca.

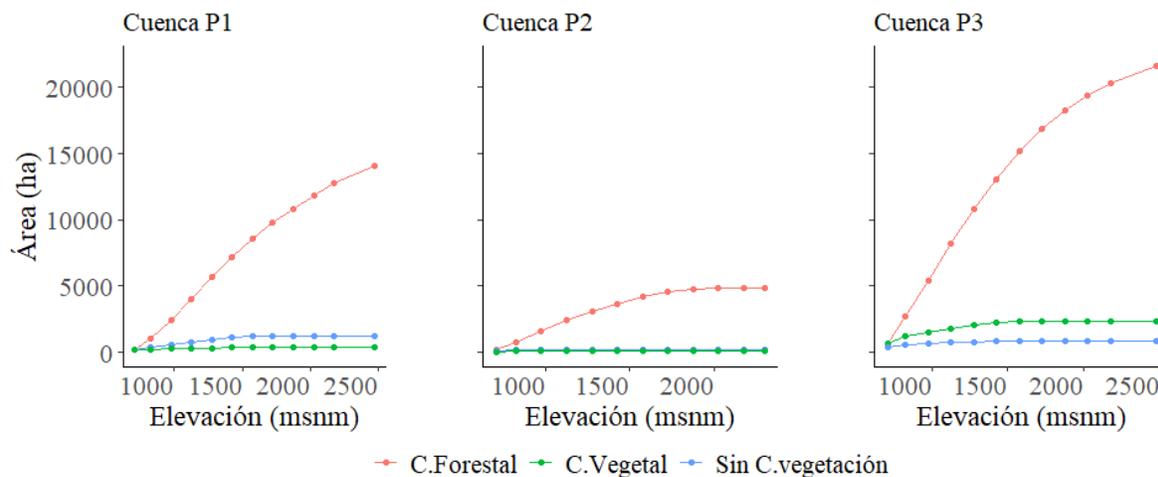


Figura 12: Distribución de zonas de vegetación vs elevación

En total la cuenca del río Pejibaye (P3) tiene un área de 26.020,00 ha con un perímetro de 99,52 km, su rango de altitud va desde los 614 msnm hasta los 2699 msnm, la pendiente media del cauce principal es de 0,0471m/m, con una elevación promedio de 1286 msnm. La cuenca P3 está conformada por P2 y P1, que en el mismo orden, estas representan un 63,05% y un 20,64% del área total de la cuenca.

Según el análisis de la curva hipsométrica, la cuenca P3, presenta procesos de arrastre de material desde las partes altas, generando procesos sedimentarios en las partes bajas en donde la pendiente del cauce disminuye reduciendo su capacidad de arrastre. Este proceso de transporte y deposición también caracteriza a las subcuencas P1 (río Pejibaye) y P2 (río Gato). Respecto a la forma y estructura de la cuenca P3 según el índice de forma se describe como poco alargada, en tanto las cuencas P1 y P2 son moderadamente alargadas, estas son colindantes, dispuestas de forma paralela y se unen 4,1 km aguas arriba de la confluencia del río Pejibaye con el río Reventazón. El resumen de las características de las cuencas se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Resumen de parámetros hidrográficos

Cuenca	A (ha)	P (km)	Ancho	Largo	Hmax	Hmin	Delta H	Pendiente	Índice Forma	Factor de Circularidad	Índice de Compacidad	Índice de alargamiento
P3	24804,0	96,56	14,88	22,1	2699	614	2085	0,0471	0,51	0,33	1,73	1,49
P2	5119,1	52,07	6,8	13,1	2373	694	1679	0,0733	0,30	0,24	2,05	1,93
P1	15638,7	81,62	8,5	19,2	2699	694	2005	0,0564	0,42	0,29	1,84	2,26

Los coeficientes morfológicos de las cuencas, muestran que la P2 presenta mayor semejanza con la subcuenca P1 que con la cuenca P3, esto no solamente sucede en los aspectos de forma, sino que también en el uso del suelo. Esta comparación es básica, ya que como la cuenca P2, no cuenta con registros de caudales observados, el modelo hidrológico de esta cuenca se construyó tomando los parámetros de calibración de la cuenca P1, los cuales se muestran en el cuadro 3.

5.1.4 Calibración y validación de los modelos hidrológicos

La calibración del modelo hidrológico HBV se realizó para la cuenca P3 y subcuenca P1, debido a que estas son las que cuentan con datos de caudales observados. Se estableció para el calentamiento del modelo el primer año de la serie de datos, para la calibración 8 años y la validación el último año de la serie, tal como se muestra en la Figura 13.

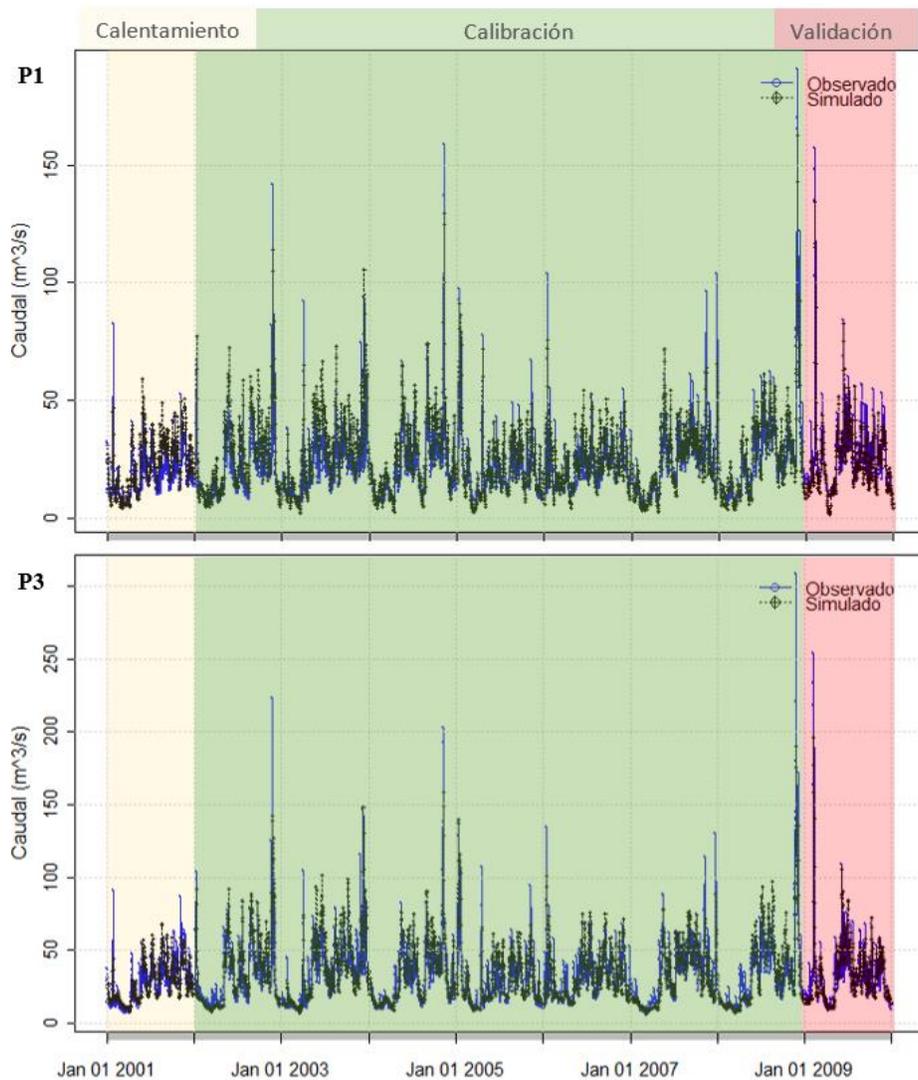


Figura 13: Caudales diarios datos observados y simulados de las cuencas P1 y P3

En general, según los estadísticos de evaluación utilizados r^2 , PBIAS y NSE, el rendimiento de los modelos evaluados para pasos de tiempo de escala diaria es bueno. EL NSE presenta valores iguales o mayores 0,76 y r^2 entre 0,8 y 0,87 en ambas cuencas tanto para el periodo de calibración como en la validación, el PBIAS para la cuenca P1 presenta valores de 14,40 y -5,80, la cuenca P2 de -4,3 y 2,30 para los periodos de calibración y validación respectivamente (Cuadro 7). Estos valores de PBIAS indican, en el caso de P1, que el modelo sobre estimó el caudal promedio anual observado del periodo de calibración en 3,19 m^3/s y subestimó en 1,55 m^3/s en el periodo de validación. Para P3 sobre estimó el caudal promedio diario en 1,36 m^3/s para la calibración y en la validación sobreestimó en 0,74 m^3/s .

Cuadro 7: Resumen del rendimiento estadístico de los modelos

Estadístico	P1		P3	
	Calibrar	Validar	Calibrar	Validar
NSE	0,72	0,86	0,77	0,81
PBIAS	14,40	-5.8	4,30	2,30
r²	0,81	0,87	0,80	0,81

Según (Moriassi et al., 2007), los valores obtenidos de NSE y PBIAS califica al modelo P1 como bueno y el modelo P3 de muy bueno para la calibración, en tanto, en el periodo de validación ambos modelos caen en la categoría de muy bueno (Cuadro 5). Estas calificaciones de rendimiento de los modelos nos permiten utilizarlos para establecer cuál será la respuesta de las cuencas bajo escenarios de cambio climático, específicamente con la propuesta de los investigadores Hidalgo y Alfaro (2015), la cual será desarrollada en la próxima sección.

Los parámetros de calibración de cada uno de los modelos se muestran en el Cuadro 8, en términos generales, los valores obtenidos son coherentes. Muestran que la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo en ambos modelos para las zonas forestales es superior a la capacidad de las áreas agrícolas y estas a su vez mayor que en zonas sin cobertura vegetal. De igual forma son coherentes los resultados obtenidos con el parámetro BETA, que es una variable adimensional que define la capacidad relativa de contribuir con la producción de escorrentía, lo que quiere decir, a mayor valor de BETA, mayor capacidad de escurrimiento tendrá ese uso de suelo, por lo que, tal como se obtuvo, lo esperado es que el BETA de las áreas forestales > áreas agrícolas > áreas sin cobertura.

Cuadro 8: Parámetros de calibración del modelo HBV para la cuenca

	Parámetros	Cuenca P1	Cuenca P3
		Cuenca P2	
Cuenca	PERC	1,2893	2,9123
	UZL	43,8903	76,1697
	K0	0,0643	0,1968
	K1	0,2071	0,0451
	K2	0,0711	0,1022
	MAXBAS	1,2875	1,4355
	Cet	0,2734	0,1097
	PCALT	0,0899	0,2152
	TCALT	0,3356	0,5552
	Forestal	FC_1	493,6594
LP_1		0,5178	0,6469
BETA_1		1,3872	1,5149
Cultivos y pastos	FC_2	145,5296	69,1006
	LP_2	0,7309	0,9280
	BETA_2	4,8234	4,3230
Construcción y suelo desnudo	FC_3	62,7360	67,1437
	LP_3	0,8050	0,9837
	BETA_3	5,0263	4,6421

Aplicando, estos parámetros en el modelo HBV y utilizando las series de datos de clima de la cuenca P2 del periodo enero del 2000 a diciembre del 2009, se generó la serie de caudal a escala diaria para esta cuenca, el comportamiento mensual de los caudales se puede observar en la Figura 14.

El comportamiento de los caudales máximos, mínimos y promedios es el mismo en las tres cuencas, los meses de estiaje se producen en marzo y abril, la mayor oferta hídrica se da en el periodo de mayo a noviembre y es en este último mes que se generan los mayores caudales pico.

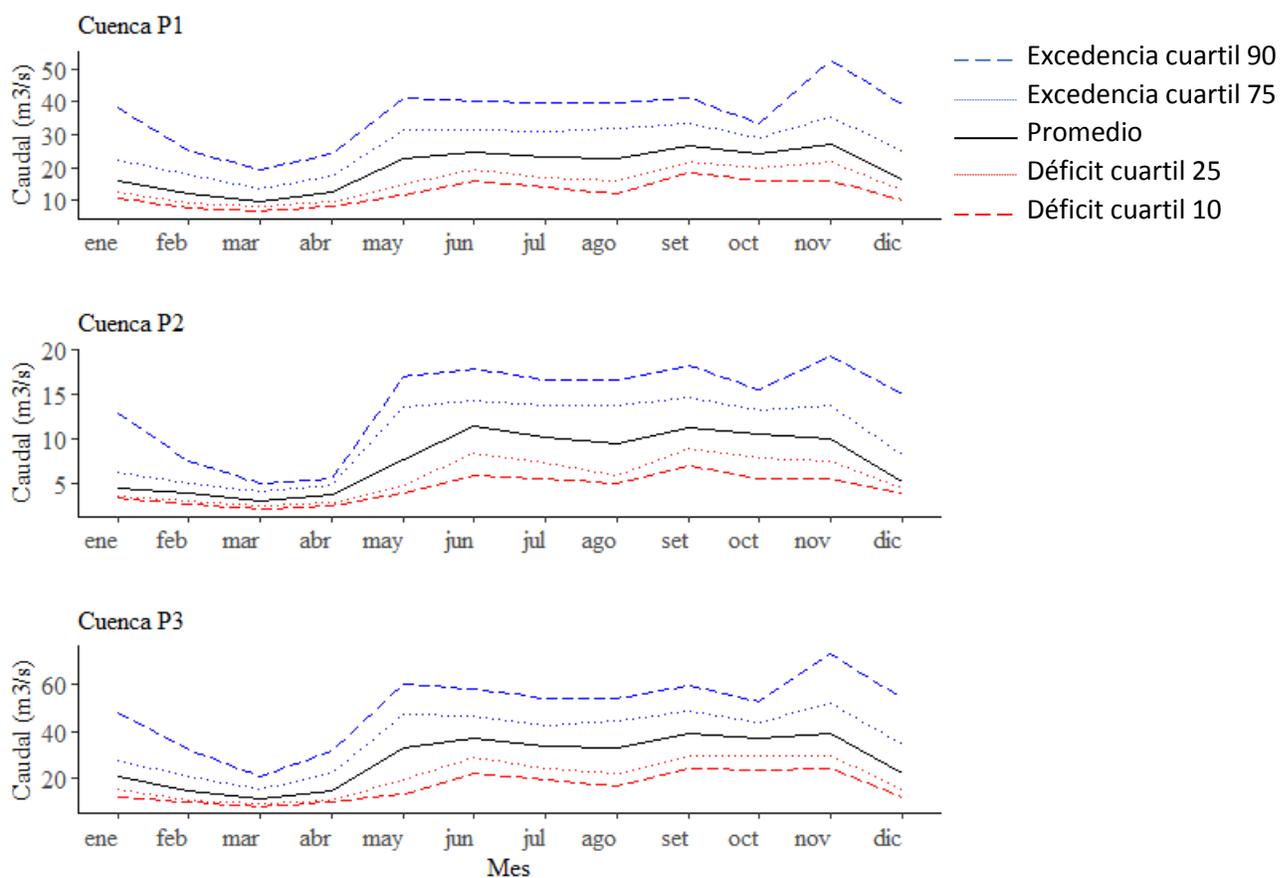


Figura 14: Régimen hídrico de las cuencas P1, P2 y P3

5.1.5 Corrección y análisis del escenario de cambio climático

Como se indica en la metodología, el ECC (Hidalgo et al., 2017) utilizado tiene una escala temporal mensual, esta serie cubre el periodo del 1 de enero del 2000 al 31 de diciembre del 2099. Como parte del análisis, se realizó una comparación en las 3 cuencas, con los datos de T y P de los promedios mensuales para el periodo coincidente con los datos observados del 2000 al 2009, determinándose que el comportamiento de los promedios mensuales de ECC no coincide con los observados. La temperatura del ECC desde el mes de abril hasta noviembre presenta valores promedios que superan los máximos observados y para el mes de enero, por el contrario, subestima la T, solo en los meses de febrero, marzo y diciembre se observan comportamientos similares, esta diferencia no solamente se presenta en los promedios, sino que también, en la desviación estándar mensual. En el caso de la P, las diferencias del comportamiento mensual no son tan marcadas, a excepción de los meses de

enero y noviembre en donde ECC subestima la P promedio, con valores inferiores al cuartil 25 de la P observada. Para corregir esta problemática en las 3 cuencas, se realizaron procedimientos de estandarización y corrección de medias y desviación estándar, tanto de los datos de P como de T de los ECC, los resultados de la cuenca P3 se muestran en la Figura 15.

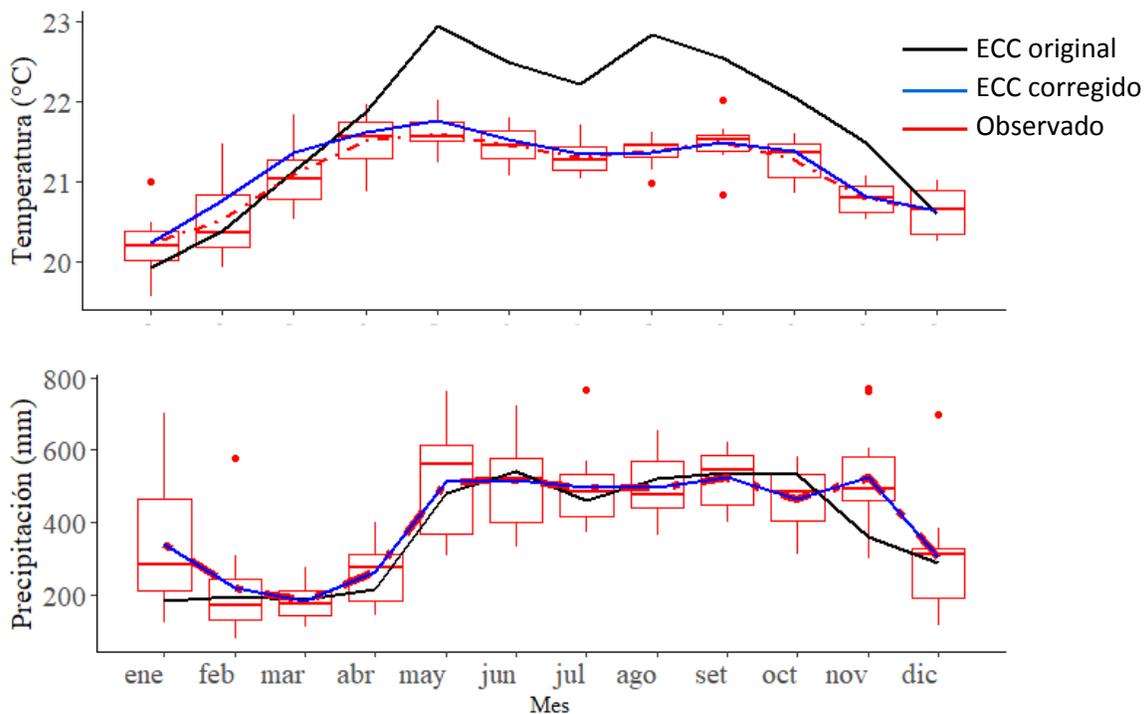


Figura 15: Comparativa de la corrección del escenario de cambio climático.

El procedimiento de ajuste se realizó para todo el periodo de las series mensuales del ECC (2000-2099), basados en las correcciones establecidas para el periodo 2000 – 2009, permitiendo mantener las tendencias de la serie original del ECC, de aumento para T y de disminución de P, en la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos para la cuenca P3.

Se presenta como línea base de comparación el periodo del 2000 al 2019, para este periodo las cuencas P1y P2 presenta una T promedio anual de 21,6°C y P3 de 21,9°C. La precipitación promedio acumulada anual de P1, P2 y P3 es de 5103,9 mm, 4088,1 mm y 4584,6 mm respectivamente. Los periodos de comparación son 2040-2059 y 2080-2099, en

ese mismo orden, la cuenca P3 presenta una disminución 1,7% y 3,04% en precipitación y un aumento de la temperatura de 1,54°C y 2,5°C.

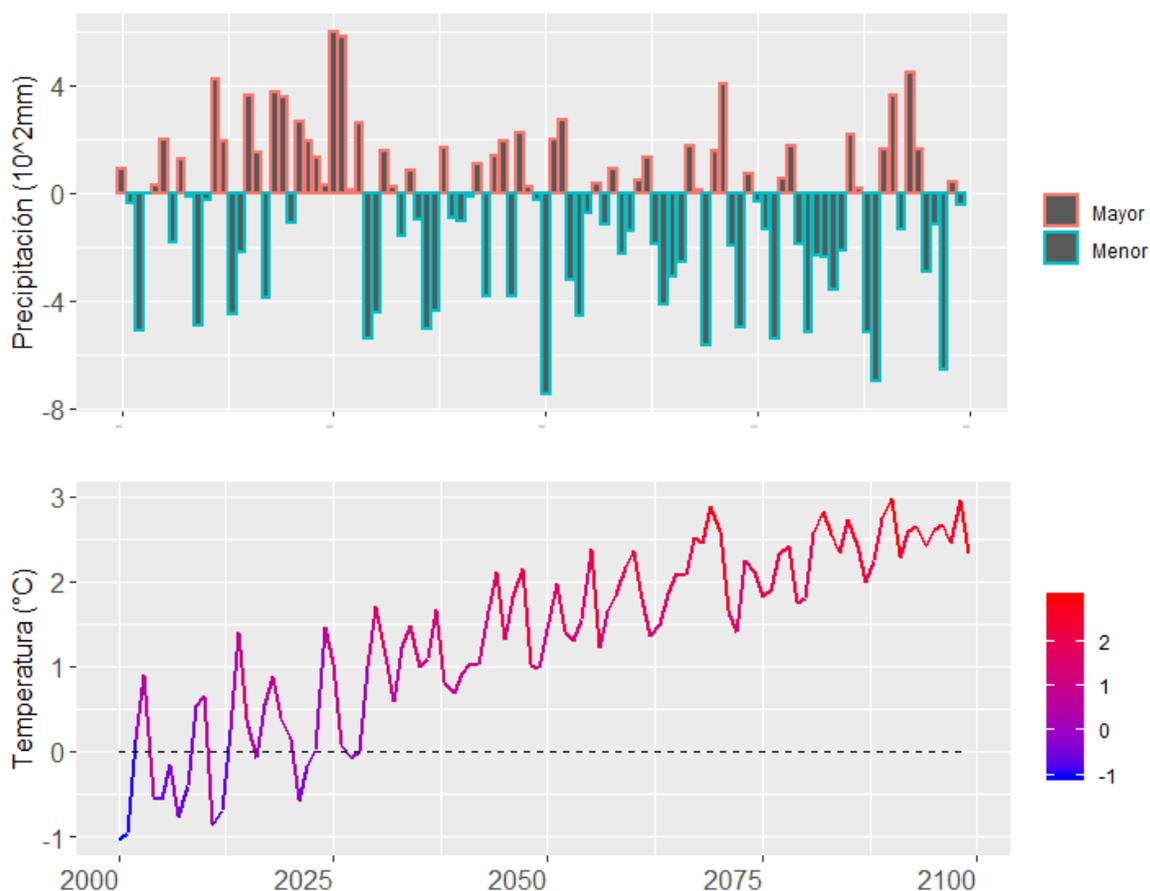


Figura 16: Anomalías de T y P respecto al periodo 2000-2019,

Se presenta como línea base de comparación el periodo del 2000 al 2019, para este periodo las cuencas P1y P2 presenta una T promedio anual de 21,6°C y P3 de 21,9°C. La precipitación promedio acumulada anual de P1, P2 y P3 es de 5103,9 mm, 4088,1 mm y 4584,6 mm respectivamente. Los periodos de comparación son 2040-2059 y 2080-2099, en ese mismo orden, la cuenca P3 presenta una disminución 1,7% y 3,04% en precipitación y un aumento de la temperatura de 1,54°C y 2,5°C. El detalle de anomalías de P y T se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Variación de Precipitación y Temperatura de P1, P2 y P3 según el ECC planteado.

Periodo	Base precipitación anual acumulada (mm)			Base Temperatura promedio anual (°C)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
2020-2019	5103,9	4088,1	4584,6	21,6	21,6	21,9
	Anomalía de la precipitación (%)			Anomalía de Temperatura (°C)		
2020-2039	0,13	0,18	0,13	0,71	0,71	0,71
2040-2059	-1,47	-1,81	-1,70	1,55	1,53	1,54
2060-2079	-1,95	-2,44	-2,22	2,06	2,04	2,05
2080-2099	-2,71	-3,32	-3,04	2,51	2,49	2,50

Analizando el ECC en los periodos 2040-2059 y 2080-2099 pero según sus promedios mensuales, se muestra que el aumento de la temperatura promedio mensual es generalizado en los 12 meses. Por el contrario, la precipitación promedio mensual presenta variaciones no asimétricas, para los dos periodos se presenta una disminución de la precipitación en los meses de enero, febrero, mayo y junio, en marzo, abril, julio y diciembre presenta promedios similares a la línea base 2000-2019 y agosto, setiembre y noviembre presentan variaciones con la línea y entre la tendencia de los periodos (Figura 17). Destaca noviembre, en donde la precipitación promedio mensual del periodo 2040-2059 supera el promedio del periodo base.

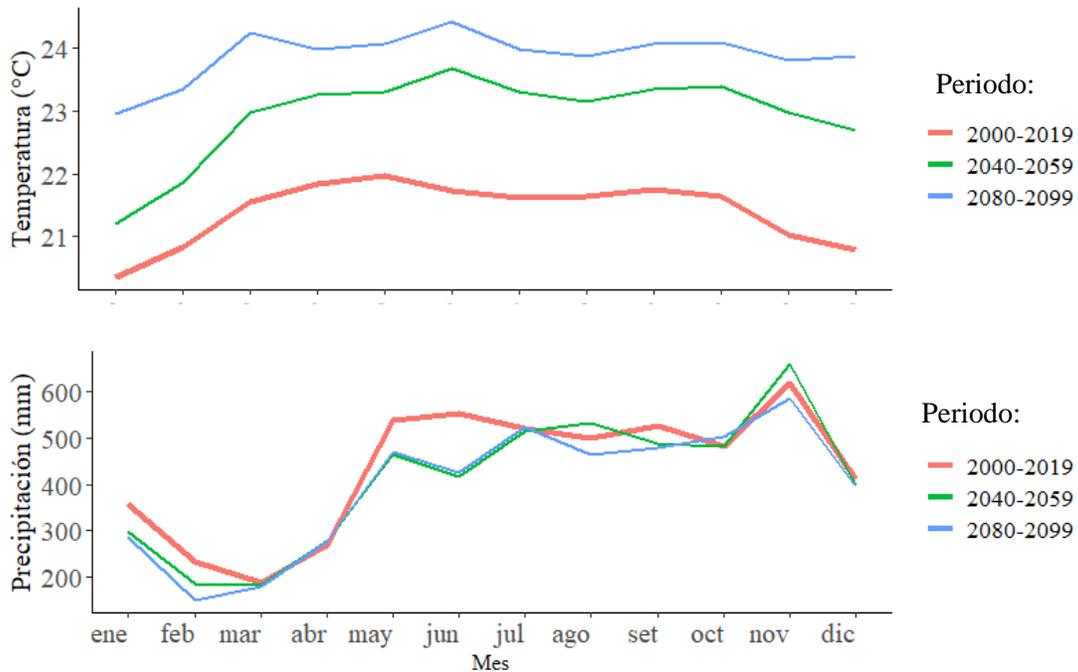


Figura 17: Promedios mensuales por periodo de análisis del ECC

Es importante indicar, que consideramos que con los datos de precipitación diaria del ECC de cambio climáticos generados en el presente estudio, no es pertinente, hacer un análisis de aumento de magnitud de eventos de precipitación a escala de tiempo diaria, ya que la base de datos observados a esa escala es de solo una década y no permitiría al modelo estocástico WeaGETS, crear extrapolaciones confiables del comportamiento de la intensidad de precipitación a dicha escala.

5.1.6 Respuesta hídrica de las cuencas bajo el ECC

En términos generales los efectos del cambio climático generaran una reducción de la oferta hídrica promedio anual (Figura 18). Se estima que en la cuenca P1, para el periodo 2040 – 2059 la oferta hídrica disminuirá en 42,8 MM³ (-6,50% de la oferta 2000-2019) y para el periodo 2080-2099 se reducirá en 72,97 MM³, (-11,03% de la oferta 2000-2019). En el mismo orden en la cuenca P2, el primer periodo presentara una reducción de 17,5 MM³ (-8,15% de la oferta 2000-2019) y en el segundo periodo 28,6 MM³ (-13,33% de la oferta 2000-2019). La cuenca P3 contiene a las subcuencas P1 y P2, por lo que su déficit está conformado

por el de estas dos cuencas, más las áreas de las partes bajas, en total la cuenca del río Pejibaye presentará una disminución de la oferta hídrica anual de 71,23 MM³ un -7,46% de la oferta 2000-2019 y en las últimas dos décadas del siglo se reducirá en 117,04 MM³ un 12,25% de la oferta hídrica actual.

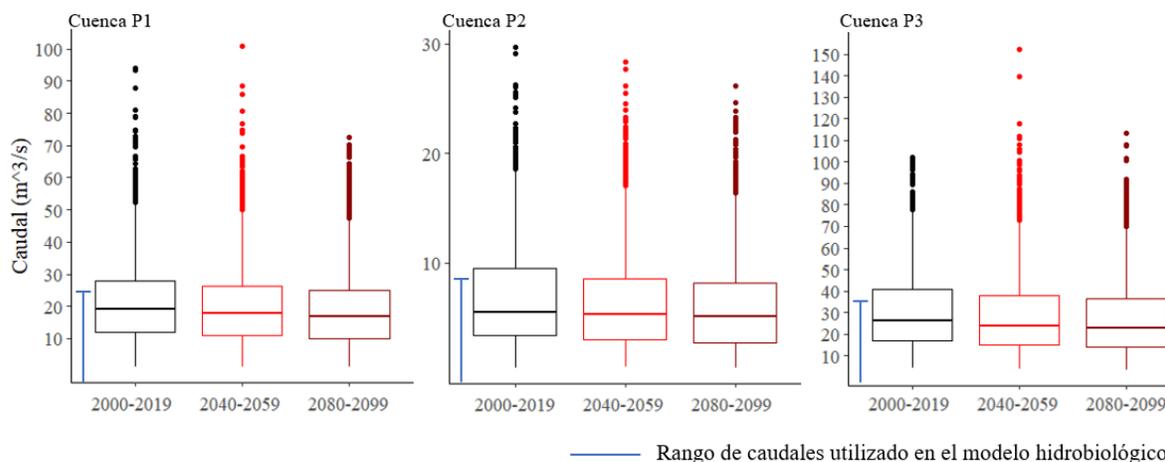


Figura 18: Comparación del rango de caudales de los periodos base 2000-2019 y de los periodos de análisis 2040-2059 y 2080-2099.

Realizando un análisis interanual, mediante la comparación de promedios mensuales, tomando como referencia los valores del periodo 2000-2019 y comparándolos con el ECC de los dos periodos propuestos, se aprecia en la Figura 19, que los efectos del cambio climático no alteran la definición meses de mayor oferta y estiaje según el comportamiento del régimen hídrico.

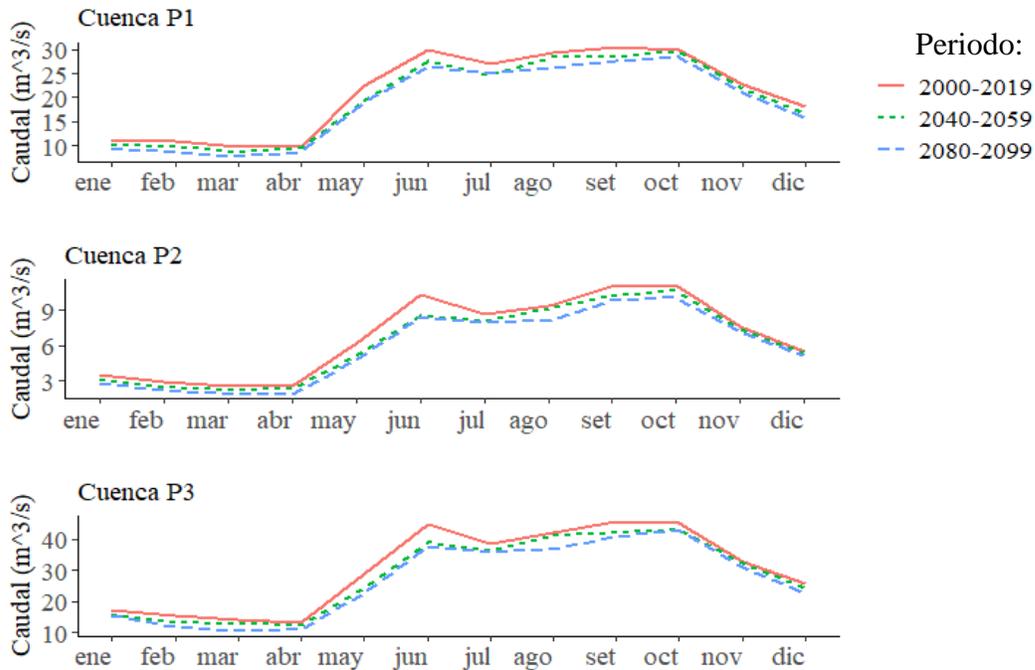


Figura 19: Régimen hídrico de las cuencas P1, P2 y P3 para los periodos base y los afectados por el ECC

Además, se determina que, si existe una reducción en la oferta anual que se distribuye en los 12 meses, pero que, porcentualmente la afectación es mucho más marcada para en los primeros 6 meses del año. Utilizando los datos de las cuencas, para el periodo 2040-2059 la reducción del caudal es del 11,9%, en tanto para la segunda mitad la reducción es del 4,5%. De igual forma ocurre para el periodo 2080-2099, la reducción proyectada será del 19,4% en los primeros 6 meses del año y de 8,8% para la segunda mitad, los datos por mes se muestran en el cuadro siguiente.

Cuadro 10: Efectos cuantificación de los efectos del cambio climático sobre los caudales promedios mensuales

Cuenca	Periodos	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
Caudales promedio mensual del periodo 2000-2019													
P1		11.18	10.92	9.72	9.73	22.42	29.88	27.06	29.21	30.37	29.95	22.65	17.96
P2	2000-2019	3.50	2.89	2.60	2.61	6.17	10.34	8.68	9.34	11.02	11.17	7.65	5.45
P3		17.35	15.47	13.92	13.40	28.61	44.73	38.27	41.80	45.49	45.06	32.86	25.57
Caudal promedio mensual reducido respecto al periodo 2000-2019													
P1	2040-2059	-1.16	-1.10	-1.23	-0.23	-3.08	-2.26	-2.21	-0.87	-1.75	-0.23	-0.91	-1.22
	2080-2099	-2.06	-2.41	-2.06	-1.20	-3.57	-3.42	-2.16	-2.89	-2.70	-1.53	-1.61	-2.14
P2	2040-2059	-0.35	-0.41	-0.36	-0.33	-0.97	-1.79	-0.55	-0.19	-0.86	-0.45	-0.31	-0.10
	2080-2099	-0.65	-0.66	-0.68	-0.69	-1.37	-1.86	-0.70	-1.20	-1.12	-1.11	-0.55	-0.30
P3	2040-2059	-1.92	-2.37	-1.32	-1.20	-4.32	-5.91	-2.01	-0.55	-3.59	-2.27	-0.58	-1.14
	2080-2099	-1.91	-3.47	-3.30	-2.48	-6.00	-7.24	-2.59	-5.33	-5.00	-2.31	-1.80	-3.16
Porcentaje de reducción en el caudal promedio mensual respecto al periodo 2000-2019													
P1	2040-2059	-10.4%	-10.0%	-12.6%	-2.4%	-13.8%	-7.6%	-8.2%	-3.0%	-5.8%	-0.8%	-4.0%	-6.8%
	2080-2099	-18.4%	-22.1%	-21.2%	-12.3%	-15.9%	-11.5%	-8.0%	-9.9%	-8.9%	-5.1%	-7.1%	-11.9%
P2	2040-2059	-10.1%	-14.3%	-13.9%	-12.6%	-15.7%	-17.3%	-6.3%	-2.0%	-7.8%	-4.1%	-4.1%	-1.8%
	2080-2099	-18.5%	-22.8%	-26.2%	-26.6%	-22.2%	-18.0%	-8.1%	12.9%	10.1%	-9.9%	-7.1%	-5.6%
P3	2040-2059	-11.1%	-15.3%	-9.5%	-9.0%	-15.1%	-13.2%	-5.3%	-1.3%	-7.9%	-5.0%	-1.8%	-4.5%
	2080-2099	-11.0%	-22.4%	-23.7%	-18.5%	-21.0%	-16.2%	-6.8%	12.7%	11.0%	-5.1%	-5.5%	-12.4%

Al comparar las curvas de excedencia del periodo base 2000-2019 con los periodos 2040-2059 y 2080-2099, se obtiene que el primer trimestre es el que presenta una mayor afectación relativa, principalmente entre las frecuencias de excedencia entre el 30% y el 95%, en el segundo trimestre sobre todo en la cuenca P2 se muestran disminuciones del caudal entre el 12% y 23% para el periodo 2040-2059 y de 18% y 25% para el periodo 2080-2099, en ambos casos en los caudales de excedencia en el rango del 10% y 80%.

El tercer trimestre es el que en promedio presenta una menor afectación con porcentajes de reducción menores al 10% en el periodo 2040-2059 e inferiores al 15% en el periodo 2080-2099. El cuarto trimestre tiene un comportamiento similar al tercero, excluyendo a los caudales que tienen mayores probabilidades excedencia, ya que, los caudales que superan el 90% de probabilidad de ser igualados o excedidos presentan tasas de reducción mayores, tal como se muestra en el cuadro 11, además las curvas de excedencia a nivel mensual pueden ser observadas en los Anexos 3, 4 y 5.

Cuadro 11: Cuantificación de los efectos del cambio climático sobre las curvas de excedencia a nivel trimestral

Cuenca	Trimestre	2040-2059						2080-2099						Porcentaje de reducción del caudal
		Porcentaje de excedencia						Porcentaje de excedencia						
		95%	90%	80%	60%	30%	10%	95%	90%	80%	60%	30%	10%	
P1	1	-11%	-14%	-16%	-14%	-11%	-8%	-27%	-24%	-24%	-23%	-18%	-21%	
	2	11%	3%	-2%	-7%	-8%	-6%	-2%	-11%	-9%	-14%	-13%	-5%	
	3	-8%	-8%	-7%	-6%	-4%	-7%	-11%	-11%	-11%	-12%	-10%	-5%	
	4	-12%	-10%	-4%	-3%	-2%	0%	-22%	-19%	-12%	-11%	-4%	-7%	
P2	1	-12%	-12%	-12%	-12%	-13%	-7%	-33%	-34%	-32%	-25%	-18%	-16%	
	2	3%	-8%	-12%	-10%	-16%	-23%	-9%	-18%	-18%	-18%	-24%	-25%	
	3	-1%	-2%	-6%	-7%	-7%	6%	-4%	-8%	-15%	-14%	-10%	-9%	
	4	-4%	-5%	-1%	-2%	-3%	-3%	-17%	-18%	-5%	-7%	-8%	0%	
P3	1	-13%	-10%	-12%	-12%	-10%	-17%	-29%	-28%	-26%	-19%	-14%	-18%	
	2	-3%	-5%	-8%	-11%	-14%	-8%	-12%	-18%	-16%	-17%	-19%	-12%	
	3	-9%	-9%	-7%	-6%	-5%	5%	-8%	-10%	-11%	-12%	-12%	-10%	
	4	-12%	-10%	0%	-1%	-2%	-5%	-11%	-10%	-5%	-6%	-8%	-7%	

Sobre las series de caudal utilizados en las simulaciones hidrobiológicas, el rango se definió para los caudales anuales ubicados entre los porcentajes de excedencia entre el 70% y el 90% (Figura 18).

5.2 Determinación de indicadores biológicos para el requerimiento de caudal ambiental

En relación con las especies de insectos estudiadas, se recolectó una mayor cantidad de individuos de *Baetodes* en relación con *Anacroneuria* durante los cuatro muestreos en los tres puntos (Figura 19), debido a que la muestra obtenida de la población de *Anacroneuria* fue muy pequeña (N=27) este organismo no fue utilizado en los análisis que se presentan a continuación. Se observó una tendencia general de los individuos de *Baetodes* a disminuir durante la época seca y la transición de la época seca en los tres puntos de control utilizados (K=14,08, df=3, p<0,05) (Figura 20). Sin embargo, al analizar la abundancia promedio en cada punto por separado, solo para el punto 3 se obtuvo una disminución significativa en la cantidad de individuos (K=11,1, gl=3, p<0,05) (Figura 21), en los otros puntos el cambio no fue tan evidente.

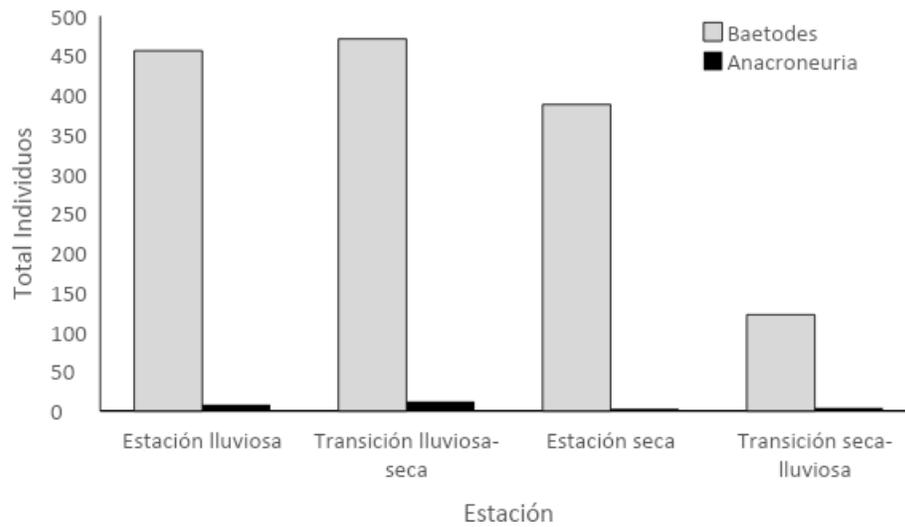


Figura 20: Cantidad de individuos de *Baetodes* y *Anacroneuria* encontrados.

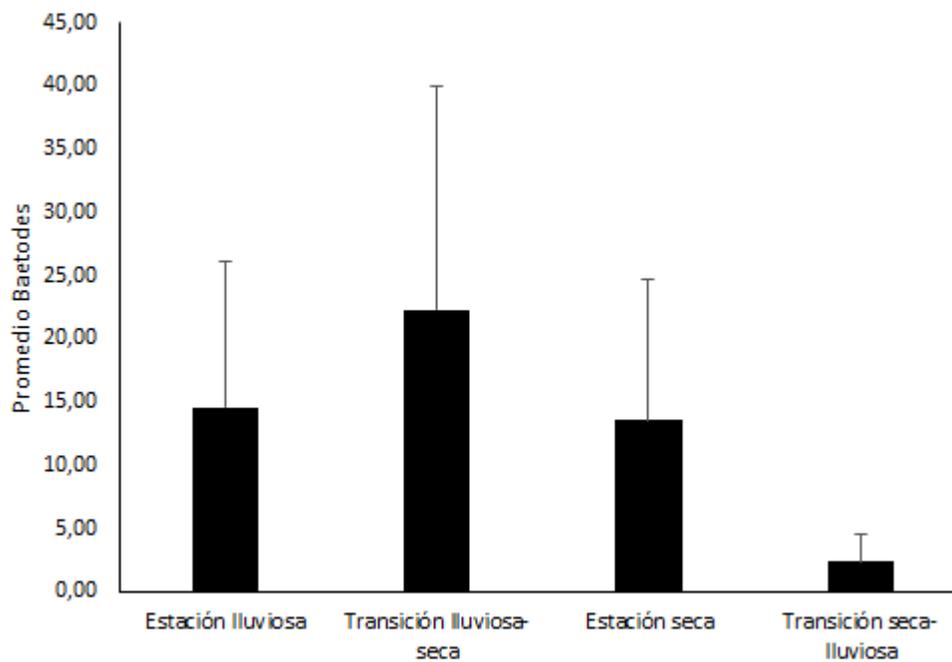


Figura 21: Promedio de individuos de *Baetodes* encontrados en los muestreos en P3.

En cuanto a la preferencia de hábitat, la profundidad óptima, fue donde se encontró una mayor cantidad de individuos de *Baetodes*, fue de 0,08 m, y entre 0,3 y 0,4 m (Figura 22-A); mientras que los hábitats con mayor profundidad entre 0,7 y 1 m fueron considerados

inapropiados. Los individuos de *Anacroneuria* mostraron preferencia por hábitats entre 0,3 y 0,5 m de profundidad, de forma similar que en *Baetodes* los hábitats entre 0,6 y 1 m fueron considerados inapropiados (Figura 22-B). En cuanto a la preferencia de hábitat por velocidad, los individuos de *Baetodes* mostraron una preferencia óptima por un rango amplio de velocidades entre 0,1 y 1,3 m/s, sin embargo, también presentaron un grado de preferencia regular por los otros rangos medidos, es decir, ninguno de los hábitats muestreados presentó una velocidad inapropiada para esta especie (Figura 23-A). Por otro lado, los individuos de *Anacroneuria* sí mostraron una preferencia entre óptima y regular por hábitats con velocidades entre 0,4 y 1,2 m/s, los hábitats con velocidad mayor a 1,3 m/s fueron considerados inapropiados (Figura 23-B).

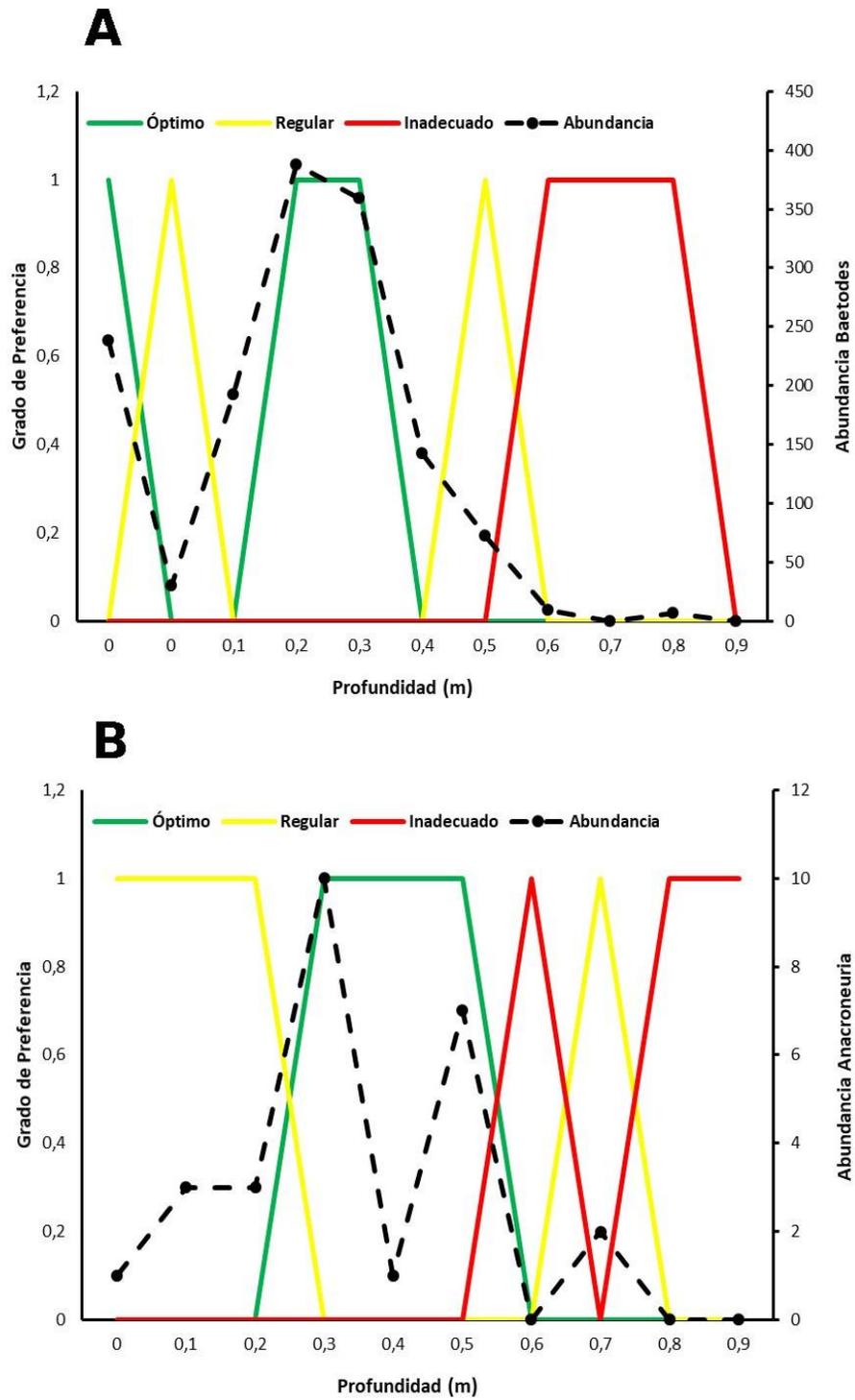


Figura 22: Modelo de la regla difusa para la preferencia (óptima, regular, inadecuada) de la variable de profundidad (m) y abundancia para las especies A- Baetodes y B- Anacroneuria.

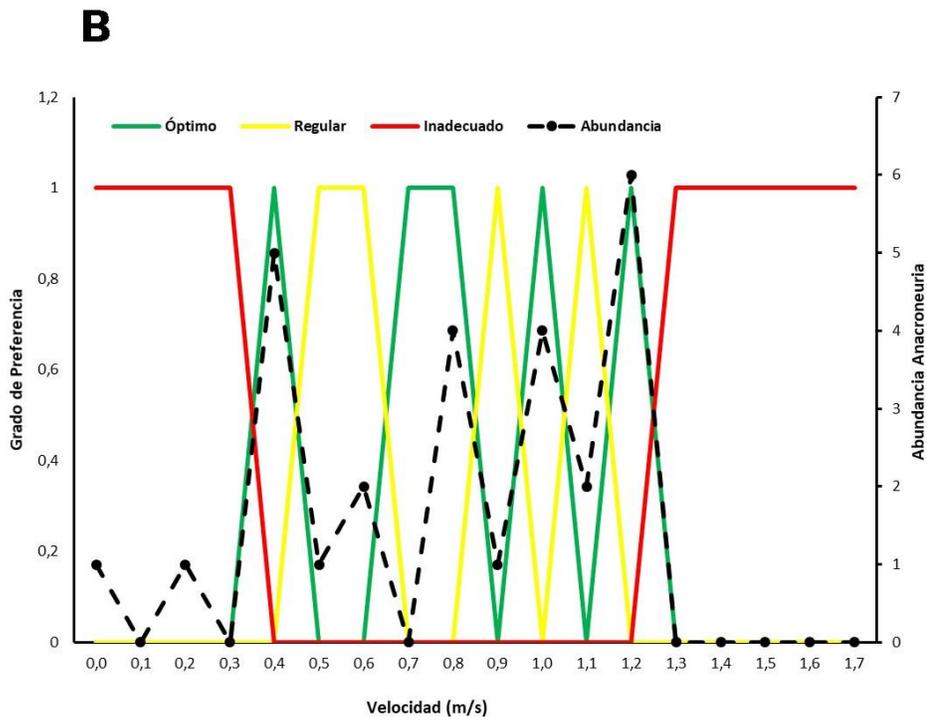
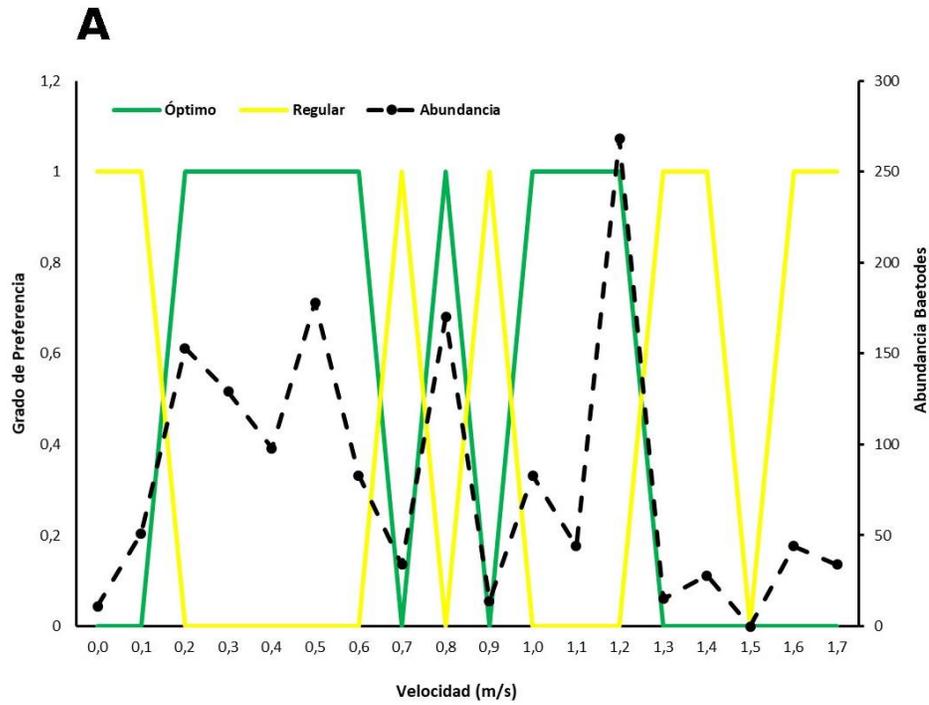


Figura 23: Modelo de la regla difusa para la preferencia (óptima, regular, inadecuada) de la variable de velocidad (m/s) y abundancia para las especies A- Baetodes y B- Anacroneuria.

En cuanto a las especies de peces estudiadas como posibles indicadoras de caudal, *Astyanax aeneus* fue la que registró una mayor abundancia, con un total de 600 individuos, *Gobiexos nudus* y *Rhamdia laticauda* fueron las que registraron la menor abundancia. La especie *A. aeneus* seleccionó rangos de velocidad que van entre los 0 y 0,9 m/s, siendo el rango entre 0,4 y 0,5 m/s la velocidad considerada como óptima. Esta especie, no registró un rango inadecuado a velocidades consideradas lentas, pero sí a velocidades mayores a los 0,9 m/s, por lo que velocidades moderadas y fuertes no son preferidas. Mientras que, en la variable profundidad del agua, la mayor cantidad de organismos se registró entre los 70 y 80 cm, por lo tanto, que se puede considerar como el rango óptimo, y a profundidades menores hasta los 20 cm es el hábitat regular para esta especie. Por último, el hábitat inadecuado o que especie no suele utilizar es a profundidades menores a los 20 cm y mayores al metro (Figura 24).

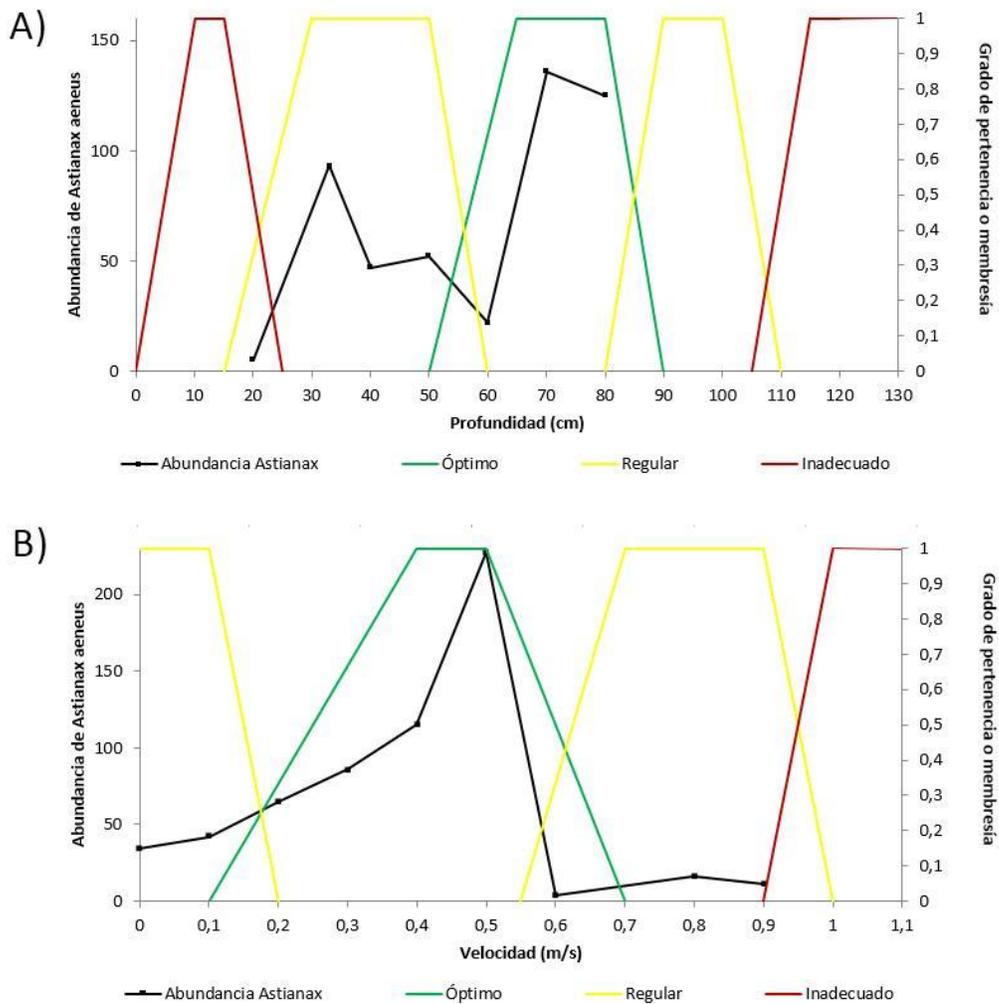


Figura 24: Modelo de la regla difusa, para las variables profundidad (cm) (A) y velocidad del agua (m/s) (B) del pez *Astianax aeneus*, en el río Pejibaye.

Para el caso de la especie *Gobiesox nudus*, se observó presencia de organismos entre velocidades nulas y velocidades de 1,7 m/s, registrando la mayor abundancia entre las velocidades 2 y 0,9 m/s, por lo que se puede considerar este rango, como las velocidades óptimas. Velocidades menores a 0,2 m/s, y entre el rango de 1 y 1,9 m/s pueden ser consideradas como hábitat regular. Mientras que a velocidades mayores a los 1,9 m/s, son consideradas como inadecuadas, en este caso tampoco hay condiciones de hábitat inadecuado a bajas velocidades. Para el caso de la variable profundidad del agua, la especie *G. nudus* se registró entre los 5 y 90 cm, siendo entre los 40 y 50 cm el rango donde hubo mayor abundancia y por lo tanto, se puede considerar como su rango óptimo. Profundidades

menores a los 5 cm y mayores a los 90 cm son consideradas inadecuadas para esta especie (Figura 25).

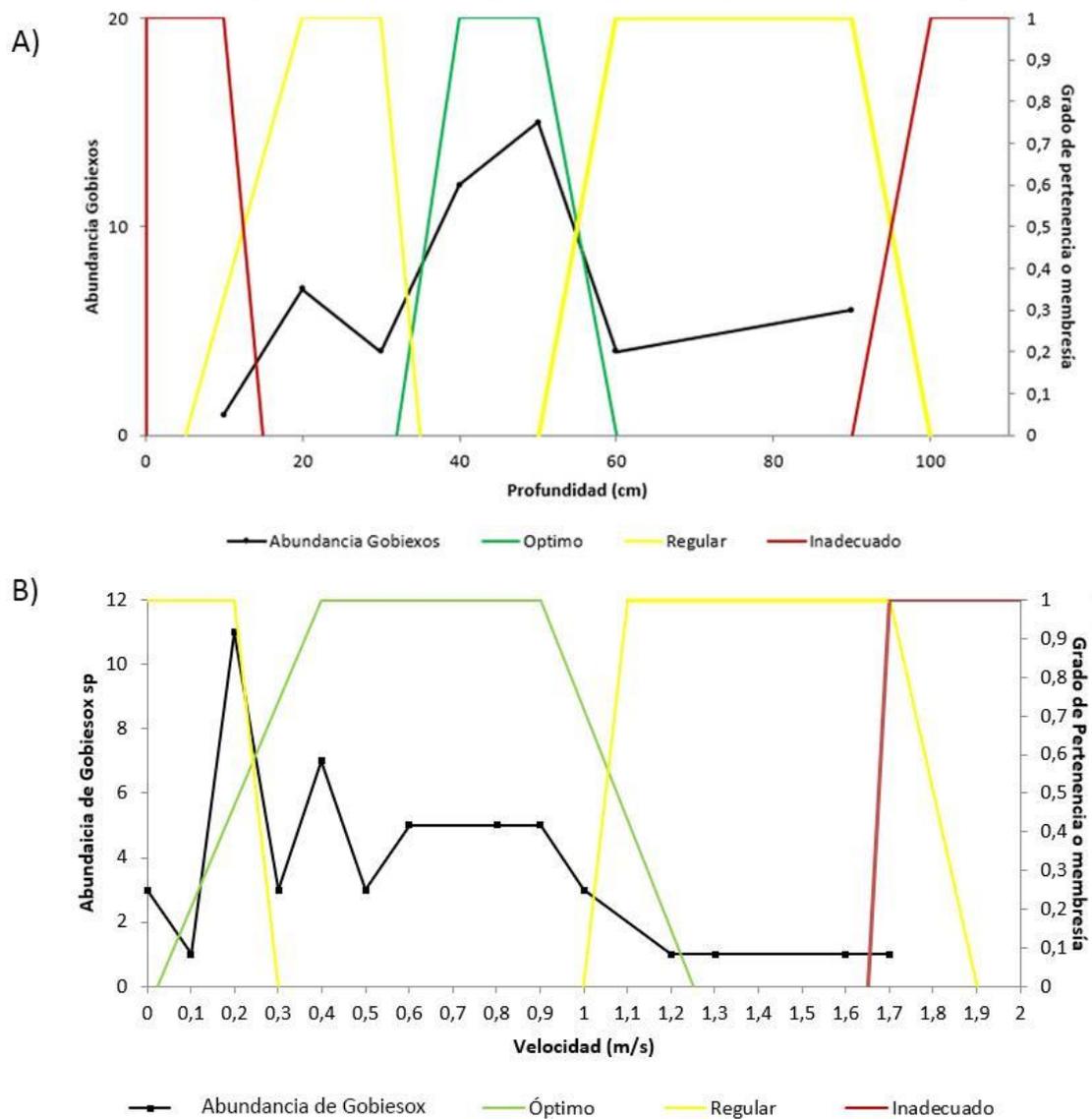


Figura 25: Modelo de la regla difusa, para las variables profundidad (cm)(A) y velocidad del agua (m/s) (B) del pez *Gobiesox nudus*, en el río Pejibaye.

La especie *Rhamdia laticauda*, se registró entre las velocidades de 0 y 1,5 m/s, el rango de hábitat óptimo puede ser considerado entre los 0 y 0,4 m/s, las velocidades regulares entre los 0,5 hasta los 1,5 y las inadecuadas velocidades fuertes y turbulentas mayores a los 1,5 m/s. Mientras que para la variable profundidad del agua, se registró entre los 10 y 70 cm, con

un amplio rango de hábitat óptimo, el cual se consideró entre los 10 y 50 cm, y el hábitat inadecuado sería a profundidades someras (Figura 26).

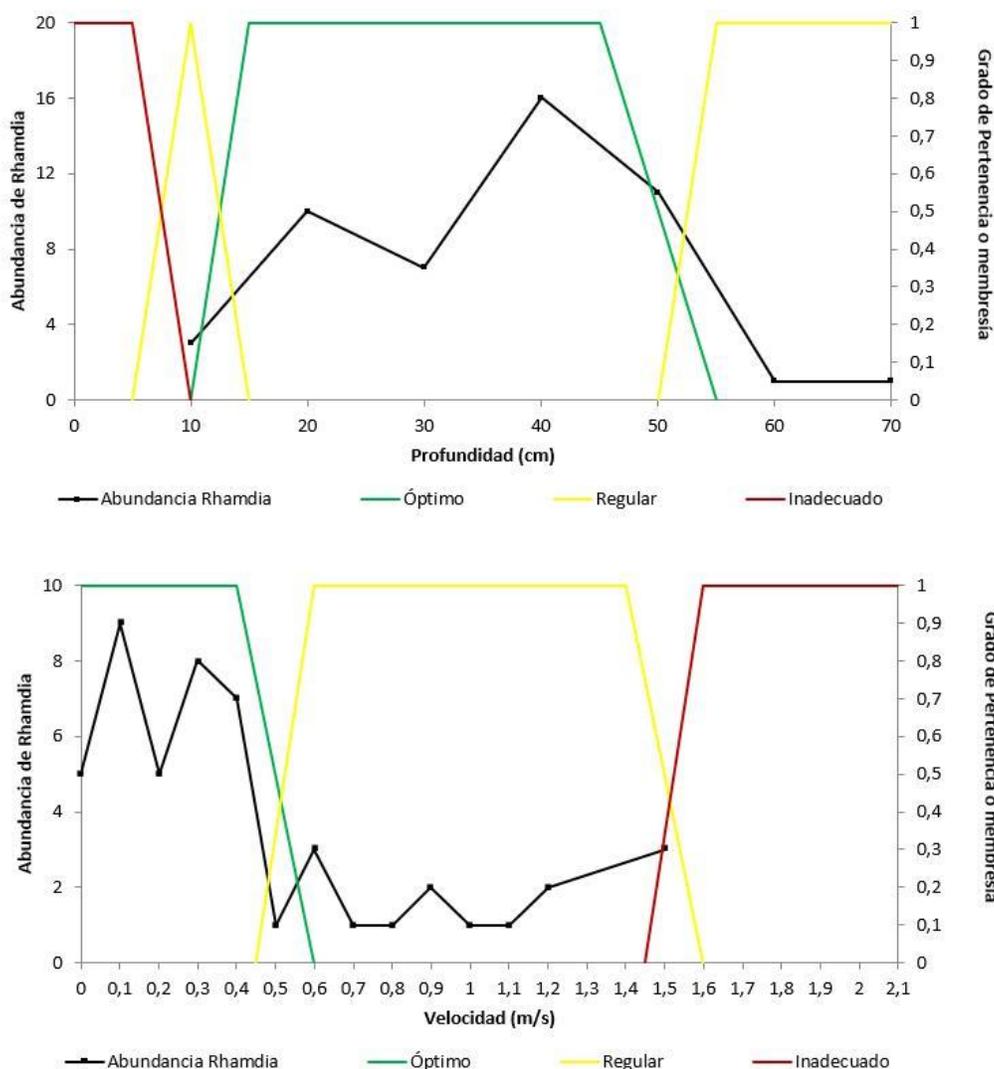


Figura 26: Modelo de la regla difusa, para las variables profundidad (cm)(A) y velocidad del agua (m/s) (B) del pez *Rhamdia latucauda*, en el río Pejibaye.

5.2.1 Simulación hidráulica de los trayectos de cauce en estudio en las cuencas P1, P2 y P3

Los trayectos de cauce seleccionados tienen longitudes entre los 165 y 200 m, estos se ubican en los puntos de aforo de las cuencas y coinciden con los puntos de muestreo y aforo. Los cauces de P1, P2 y P3 tienen anchos promedio de 41 m, 20 m y 71 m y pendientes promedio de 1,1%, 2,2% y 0,8% respectivamente. El tipo de flujo es mixto, presentado flujo

supercrítico en secciones de rápidos y subcrítico en zonas de pozas. En los tres trayectos la granulometría es muy variada, presentando desde arenas hasta cantos mayores a los 90 cm. Los modelos de elevación generados para cada uno de los trayectos se muestran en la Figura 27.

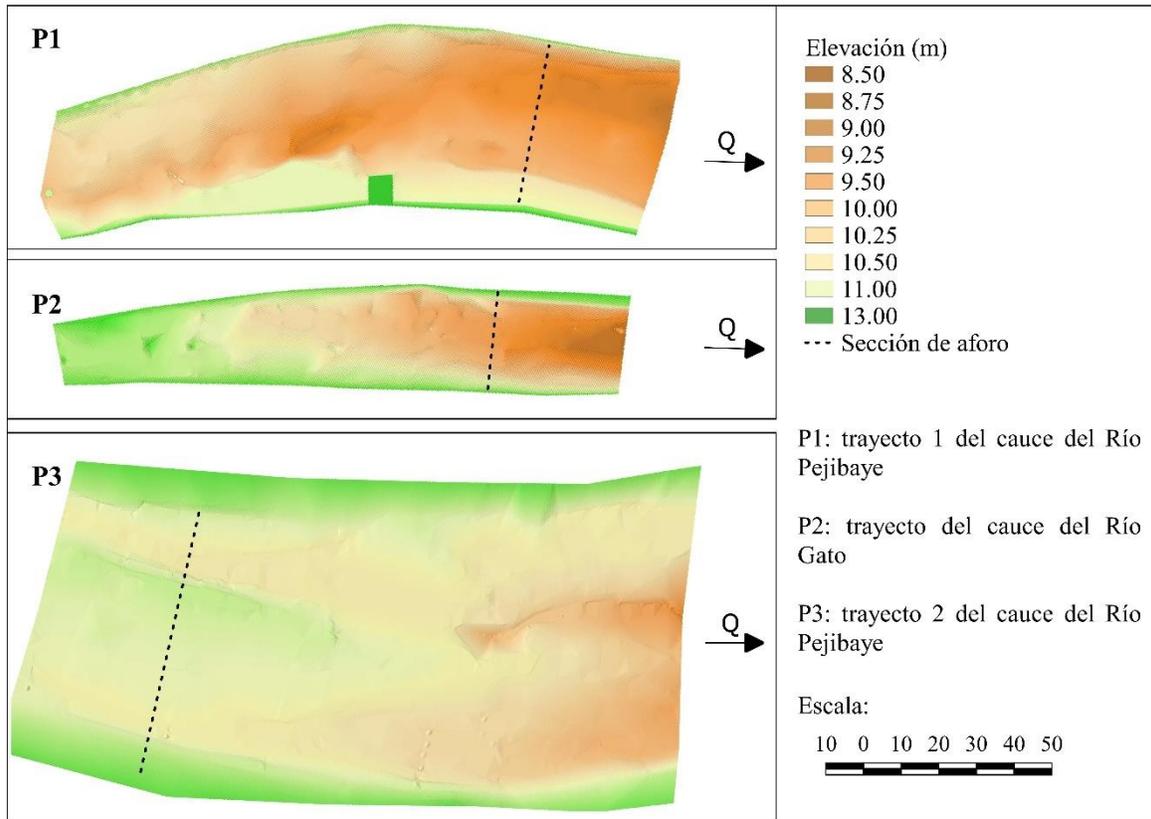


Figura 27: Módelos de elevación de terreno para los trayectos de cauce P1, P2 Y P3

Con la información de los aforos realizados se logró calibrar los modelos hidráulicos bidimensionales, por medio del ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning (n), según el procedimiento los coeficientes “n” tienen valores de $0,08 \text{ s/m}^{1/3}$, $0,078 \text{ s/m}^{1/3}$ y $0,063 \text{ s/m}^{1/3}$ respectivamente. En la Figura 28 se muestran los niveles de agua simulados para diferentes valores de coeficiente de rugosidad.

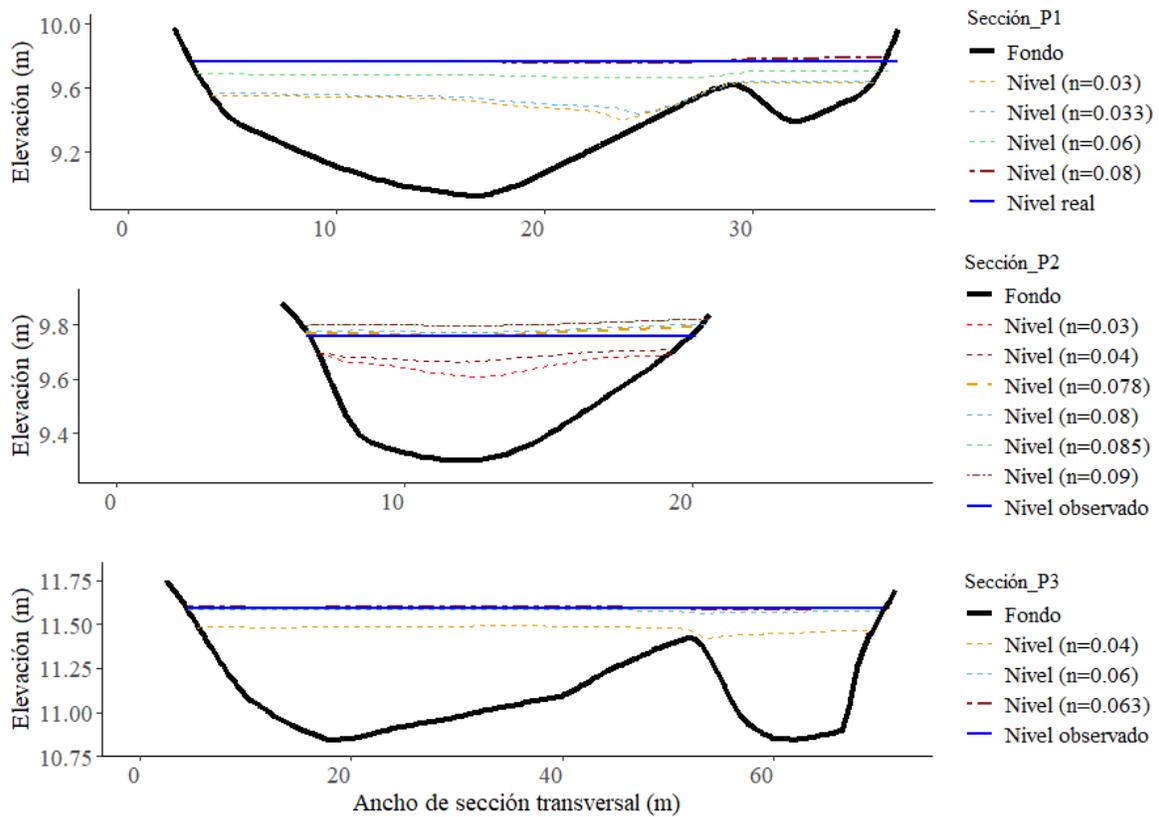


Figura 28: Secciones de aforo para trayectos de cauce de las cuencas P1, P2, P3 y niveles de agua calculados y observados utilizados para la calibración de los modelos en función de la rugosidad del cauce,

Los hidrogramas de entrada que se generaron para los modelos de cada trayecto de cauce, responden a las curvas de excedencia mensuales considerando los caudales que representan los porcentajes de excedencia entre el 70% y el 90%. La selección de este rango queda justificada en las curvas WUA obtenidas, ya que estas muestran el ascenso de la curva, el pico máximo y recesión del área del área utilizable.

Del modelamiento hidráulico, se obtiene, que existe una relación directa entre el caudal de circulante y los parámetros de velocidad y profundidad de los trayectos de cauce en las tres cuencas P1, P2 y P3, los valores máximos de velocidad registrados son de 1,85, 1,82 y 2,56 m/s, en profundidad 1,67, 0,91 y 1,26 m respectivamente y estos se generan para los caudales máximos ingresados.

5.3 Régimen de caudal ambiental del río tomando en cuenta todos los componentes metodológicos y los escenarios de cambio climático.

Por medio de la simulación de hábitat, se generaron las curvas de área utilizable ponderada (WUA) en unidades porcentuales del área del espejo de agua. La variación de WUA está en función del caudal sobre el cauce. Estas curvas se obtuvieron para los trayectos de cauce de las tres cuencas para las especies *Anacroneuria*, *Astyanax aeneus*, *Baetodes*, *Gobiexos nudus* y *Rhamdia laticauda*.

5.3.1. Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P1

La Figura 29 muestra las curvas WUA-Q para las cinco especies utilizadas en el área de estudio. Dado que la curva de la especie *Baetodes* tiene la mayor área de hábitat, alcanzando un máximo de 86% del espejo de agua para un flujo de 3,0 m³/s. La curva de *Astyanax aeneus* es la segunda que mayor área de hábitat utilizable presenta con un 77% del espejo de agua para para un caudal de 0,5 m³/s, la forma de su curva es muy aguda, lo que significa que pequeñas variaciones del caudal hacen caer drásticamente el porcentaje de WUA. La especie que presenta un menor pico es la *Anacroneuria* con un hábitat máximo de 43,4% para un flujo de 3,5 m³/s.

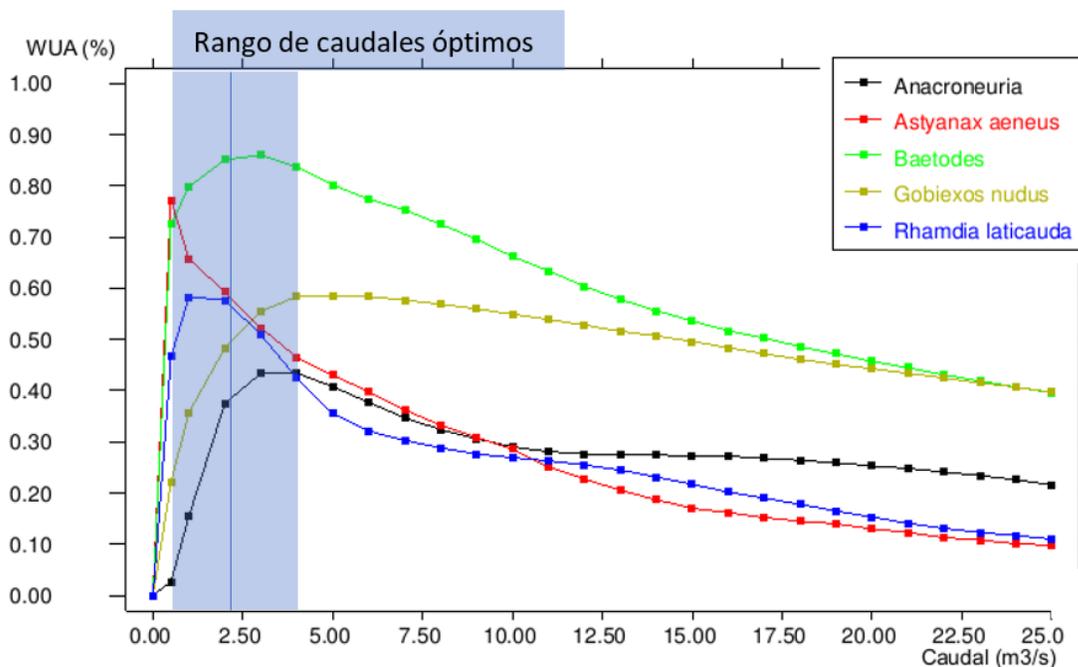


Figura 29: Comportamiento del Área utilizable ponderada (WUA%) en respuesta del caudal en el cauce de la cuenca P1 para las 5 especies indicadoras.

El rango de flujo entre 0,5 a 4,0 m³/s, contiene los caudales óptimos que generan los valores máximos de WUA en las 5 especies. Estos valores se definieron como límites superior e inferior, además de un valor medio 1,9 m³/s que responde al valor que maximiza el valor de WUA de las de las 5 especies (Figura 29), aclarando que no es el promedio del rango, si no el valor de caudal que menores afectaciones produce al conjunto de especies, según se propone en la metodología, Armas et al (2017).

Como en el régimen hídrico de la cuenca P1, el mes de abril presenta el caudal mínimo anual 9,36 m³/s, los valores de caudal óptimos de 0,5, 1,9 y 4,0 m³/s se establecen en ese mes como rango de caudales óptimos, representando una disminución porcentual del 95, 80 y 63% respectivamente. Estos factores se aplicaron al caudal del régimen hídrico de los restantes 11 meses. Los resultados se muestran en la Figura 30 y representar las líneas Inferior, Medio y Superior.

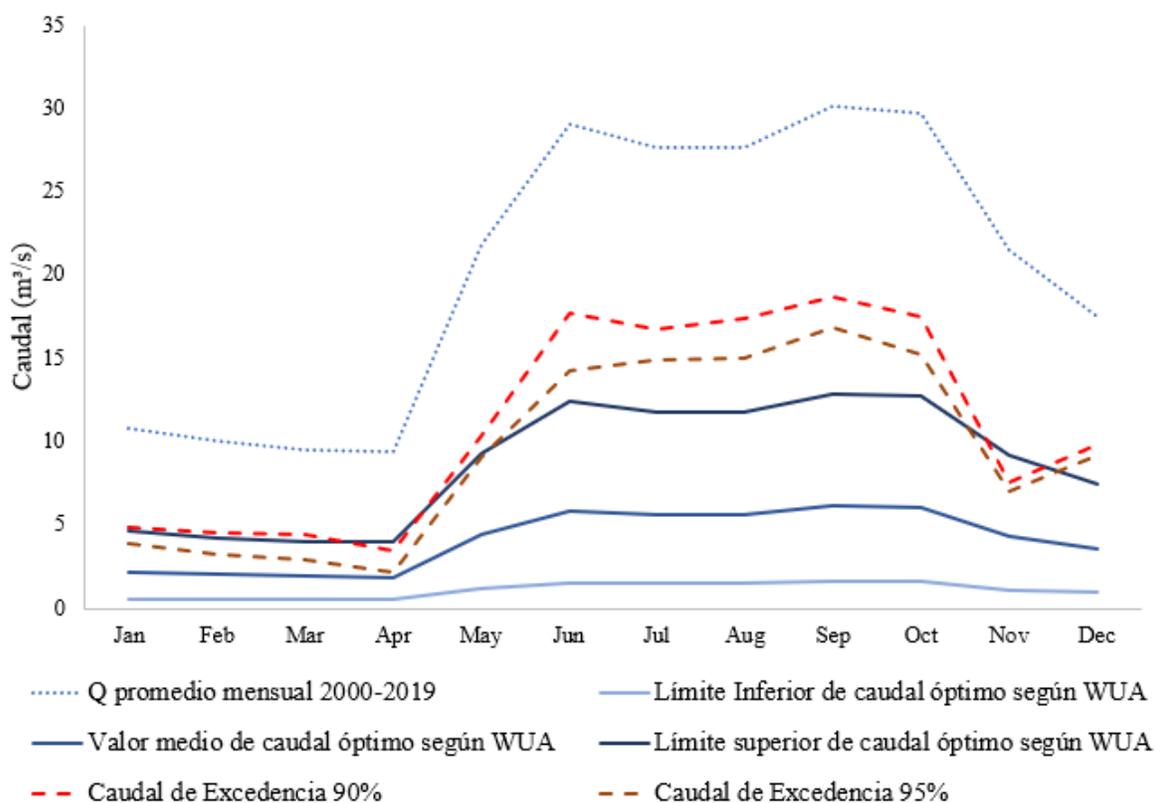


Figura 30: Resumen de las propuestas para establecer el régimen de caudal ambiental.

Al comparar los valores mensuales de los caudales óptimos generados, con los caudales de excedencia del 90 y 95% (Periodo 2000-2019), se aprecia que existe coincidencia en los meses de estiaje de enero a abril. En tanto, en la época lluviosa y por consiguiente en donde aumenta el caudal, las curvas de excedencia se despegan de los caudales propuestos. Entendiendo que los caudales de excedencia, responden al comportamiento natural de la corriente, dicho de otro modo, es una clasificación probabilística de que un caudal sea igualado o excedido, y estos están sustentada en caudales observados, en donde los porcentajes 90 y 95% están en el cuartil más bajo de caudales observados, es que se estima, que recomendar caudales inferiores a los mínimos que naturalmente se observan podría ser contraproducente y afectar dinámicas ambientales, fluviales o sociales diferentes a las evaluadas en el presente estudio. Por tal razón es que se propone establecer como régimen de caudal ecológico el obtenido siguiendo la metodología, siempre y cuando sus valores sean mayores a los caudales de excedencia mensual del 90 o 95 %, tal como se muestra en la siguiente figura.

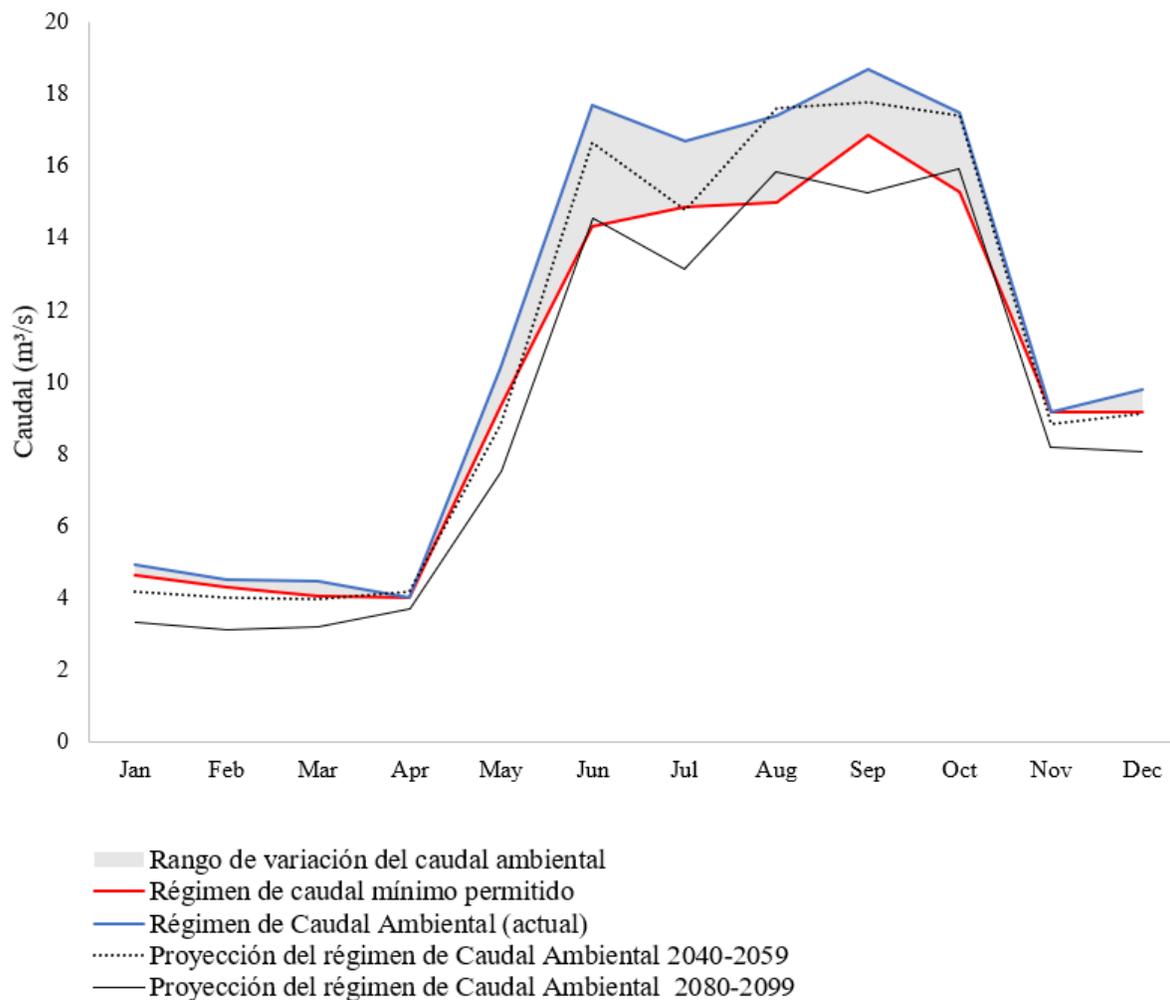


Figura 31: Régimen de caudal ambiental recomendado para la cuenca P1.

Al simular este régimen de flujo se obtiene que *Baetodes* en los primeros 4 meses del año presenta valores de WUA del 83%, el valor mínimo lo presenta en setiembre con un 48% y el promedio anual está en el 65% del espejo de agua. *Rhamdia laticauda* presenta el valor promedio anual menor de 28%, presentando su máximo del 49% en abril. En el Cuadro 12 se detallan los valores de WUA calculados para cada una de las especies en función de los caudales del régimen hídrico recomendado y en el anexo 8 se muestran la simulación espacial del comportamiento de las áreas utilizables para cada especie.

Cuadro 12: Comportamiento del área utilizable ponderada en respuesta del régimen de caudal ecológico recomendado.

Mes	Caudal (m ³ /s)	WUA Gobiexos nudus (%)	WUA Astyanax aeneus (%)	WUA Rhamdia laticauda (%)	WUA Anacroneuria (%)	WUA Baetodes (%)
Jan	4,9	59%	43%	36%	41%	81%
Feb	4,5	59%	45%	39%	43%	82%
Mar	4,5	59%	45%	39%	42%	82%
Apr	3,5	58%	49%	47%	44%	86%
May	10,4	55%	27%	27%	29%	65%
Jun	17,7	47%	15%	18%	27%	49%
Jul	16,7	48%	16%	19%	27%	51%
Aug	17,4	47%	15%	19%	27%	50%
Set	18,7	45%	14%	17%	26%	48%
Oct	17,5	47%	15%	18%	27%	50%
Nov	7,6	57%	34%	29%	33%	74%
Dec	9,8	55%	29%	27%	29%	67%
Máximo Caudal/WUA		4,00/58%	0,50/77%	1,00/58%	3,50/43%	3,00/86%

5.3.2. Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P2

En el trayecto de estudio del cauce de la cuenca P2, muestra al igual que en el cauce de la cuenca P1, que la especie *Baetodes* tiene la mayor área de hábitat útil (Figura 32), alcanzando un máximo de 96% del espejo de agua para un flujo de 2,5 m³/s. La curva de *Astyanax aeneus* igualmente, es la segunda que mayor área de hábitat utilizable presenta con un 90% del espejo de agua para para un caudal de 0,3 m³/s. La especie que presenta un menor pico es la *Rhamdia laticauda* con un hábitat máximo de 43% para un flujo de 1 m³/s.

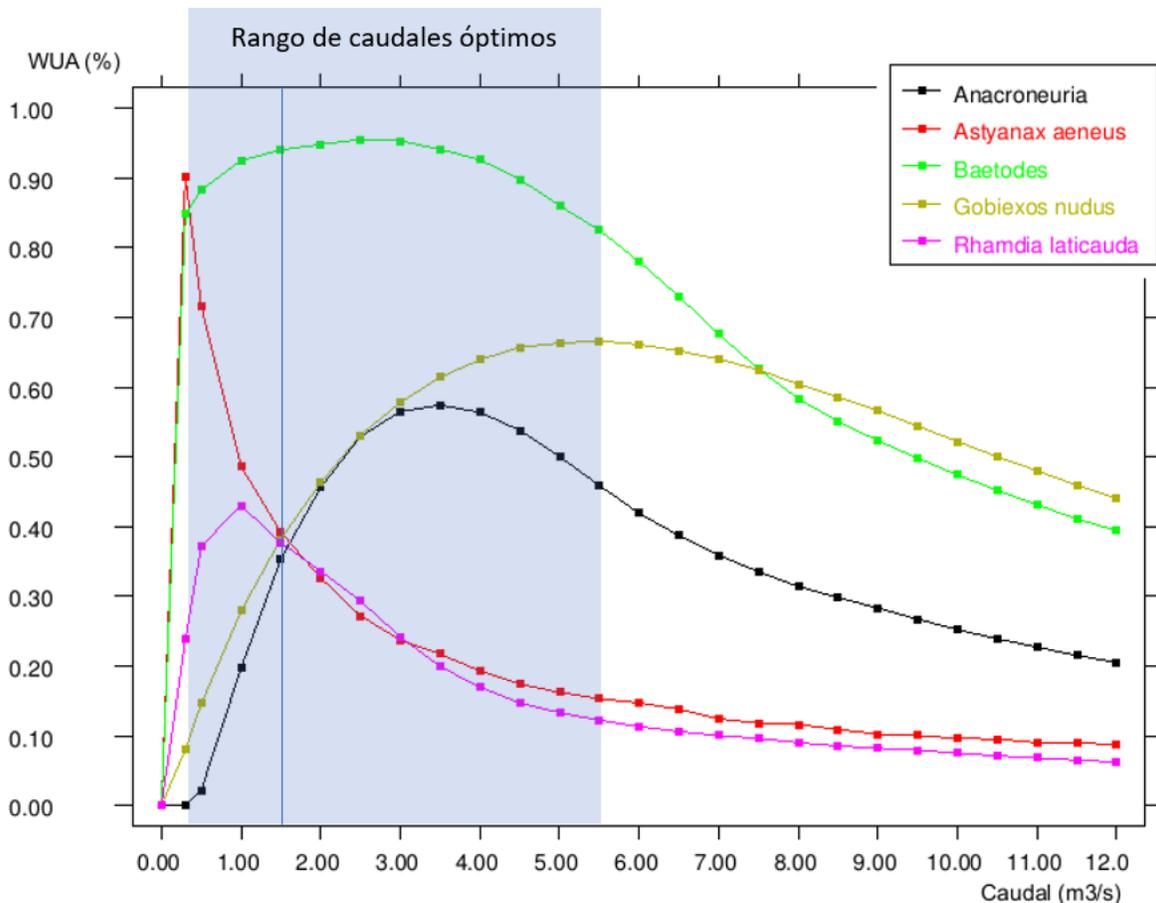


Figura 32: Comportamiento del Área utilizable ponderada (WUA%) en respuesta del caudal en el cauce de la cuenca P2 para las 5 especies indicadoras.

El rango de caudales óptimos en P2 es más amplio que P1, con caudales entre 0,3 a 5,5 m³/s. Siguiendo la misma metodología anterior, se establece un valor medio 1,4 m³/s (Figura 33). El mes de abril presenta el caudal mínimo anual 2,49m³/s, los valores de caudal óptimos de 0,3, 1,4 y 5,5 m³/s. Los porcentajes de disminución son del 88%, 44% para el límite inferior y medio respectivamente. Pero en esta cuenca el límite superior de caudal óptimo es más del doble que el caudal medio del mes de abril. En este caso se tomó el límite medio para establecer la recomendación del régimen de caudales, según se muestra en la Figura 33.

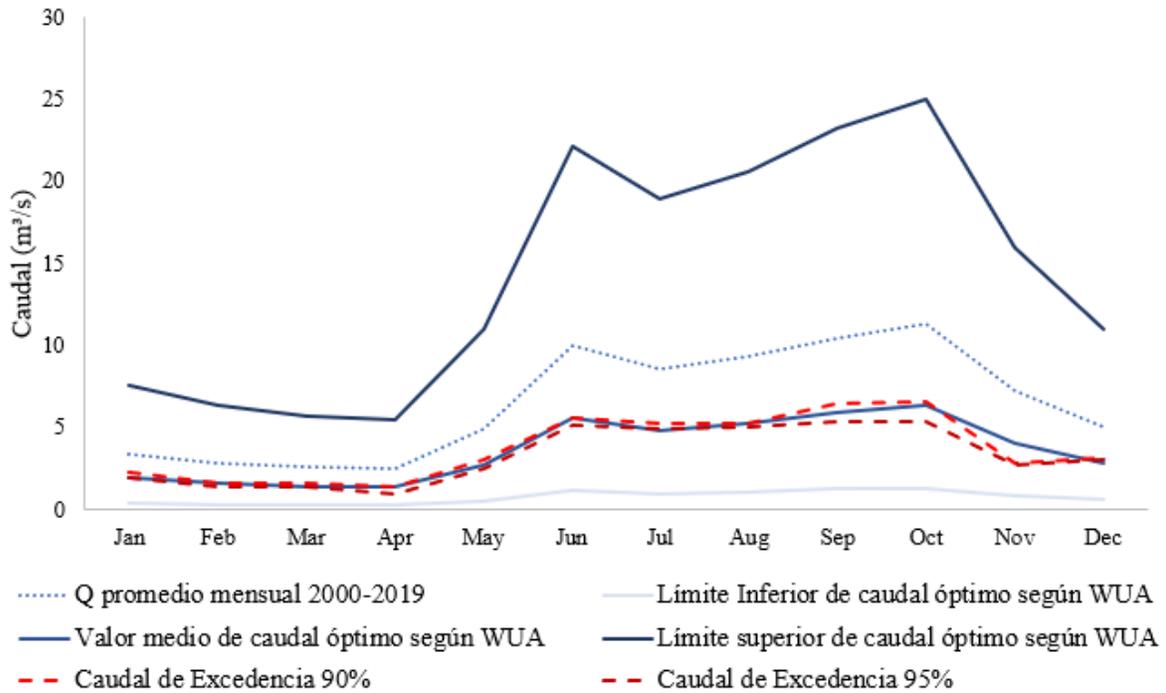


Figura 33: Resumen de las propuestas para establecer el régimen de caudal ambiental.

En este caso, al comparar el límite medio de caudal óptimo generado, con los caudales de excedencia del 90 y 95% (Periodo 2000-2019), se aprecia que existe coincidencia en prácticamente todos los meses exceptuando el mes de noviembre en donde se ubica ligeramente por encima. Siguiendo el mismo criterio que en la cuenca anterior en la Figura 34 se muestra el régimen de caudal ambiental recomendado en la cuenca P2.

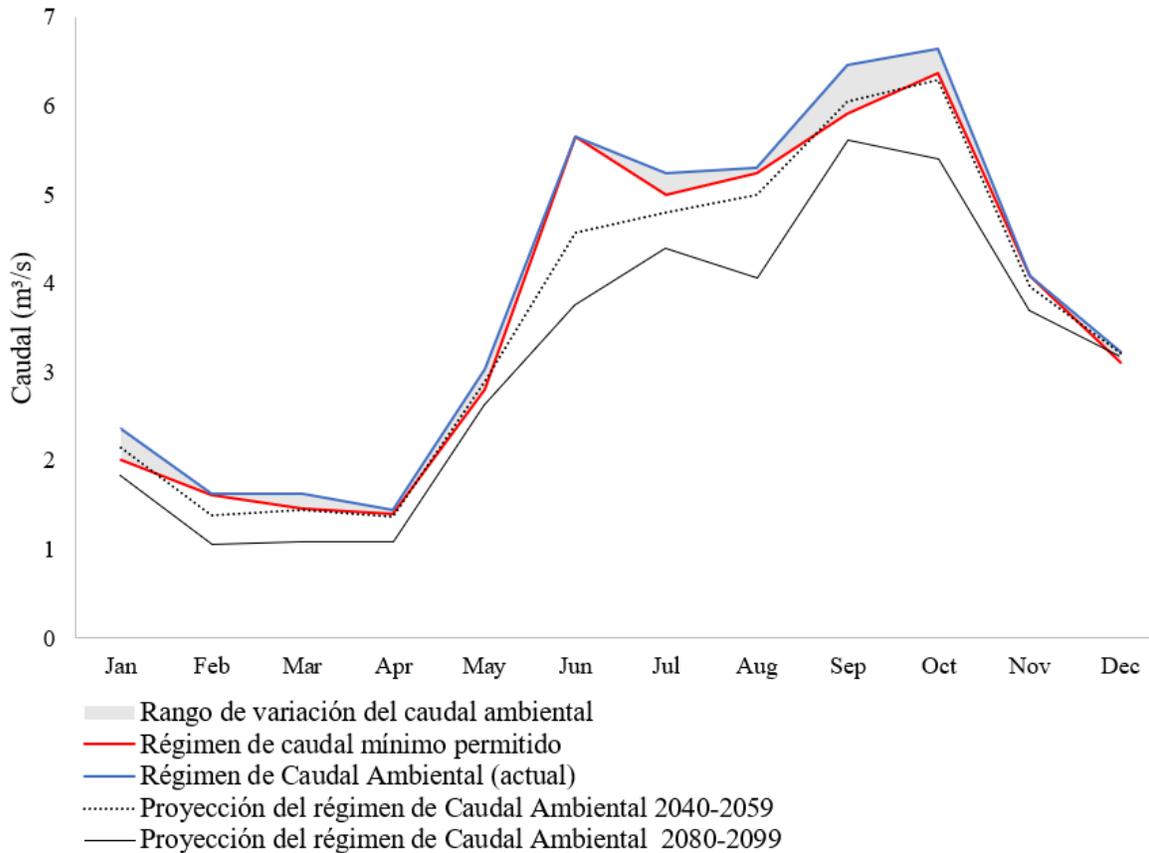


Figura 34: Régimen de caudal ambiental recomendado para la cuenca P2.

Al simular este régimen de flujo recomendado se obtiene que *Baetodes* en los primeros 4 meses del año presenta valores de WUA del 94%, el valor mínimo lo presenta en setiembre con un 72% y el promedio anual está en el 88% del espejo de agua. *Rhamdia laticauda* presenta el valor promedio anual menor de 22%, presentando su máximo del 41% en abril. En el Cuadro 13 se detallan los valores de WUA calculados para cada una de las especies en función de los caudales del régimen hídrico recomendado y en el anexo 8 se muestran la simulación espacial del comportamiento de las áreas utilizables para cada especie.

Cuadro 13: Comportamiento del área utilizable ponderada en respuesta del régimen de caudal ecológico recomendado.

Mes	Caudal	WUA Gobiexos nudus (%)	WUA Astyanax aeneus (%)	Rhamdia laticauda (%)	WUA Anacroneria (%)	WUA Baetodes (%)
Jan	2,4	52%	28%	30%	52%	96%
Feb	1,6	40%	38%	37%	38%	94%
Mar	1,6	40%	38%	37%	38%	94%
Apr	1,4	36%	41%	39%	33%	94%
May	3,0	58%	24%	24%	57%	95%
Jun	5,6	66%	15%	12%	45%	82%
Jul	5,2	67%	16%	13%	48%	85%
Aug	5,3	67%	16%	13%	48%	84%
Set	6,5	65%	14%	11%	39%	73%
Oct	6,6	65%	13%	11%	38%	72%
Nov	2,8	56%	25%	26%	56%	95%
Dec	3,2	59%	23%	22%	57%	95%
Máximo Caudal/WUA		5,5/67%	0,3/90%	1,0/43%	3,5/57%	2,5/96%

5.3.3. Trayecto en estudio del cauce de la cuenca P3

En el trayecto de estudio del cauce de la cuenca P3, muestra al igual que en el cauce de la cuenca P1 y P2, que la especie *Baetodes* tiene la mayor área de hábitat útil (Figura 35), alcanzando un máximo de 93,5% del espejo de agua para un flujo de 10 m³/s. La curva de *Astyanax aeneus* igualmente, es la segunda que mayor área de hábitat utilizable presenta con un 75% del espejo de agua para para un caudal de 2 m³/s. La especie que presenta un menor pico es la *Rhamdia laticauda* con un hábitat máximo de 53% para un flujo de 4 m³/s.

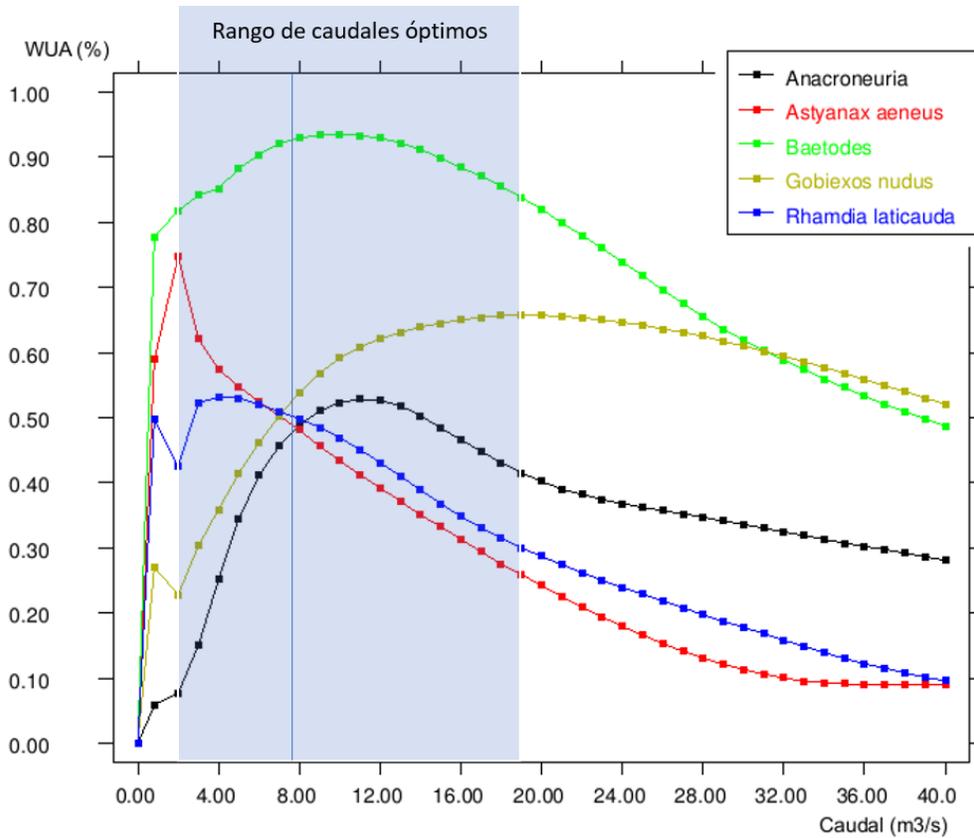


Figura 35: Comportamiento del Área utilizable ponderada (WUA%) en respuesta del caudal en el cauce de la cuenca P3 para las 5 especies indicadoras.

El rango de caudales óptimo es el más amplio del estudio, con caudales entre 2 a 19 m³/s. Aplicando la misma metodología, se establece un valor medio 7,6 m³/s (Figura 36). De igual forma, el caudal más bajo se presenta en abril con 13,33 m³/s, los valores de caudal óptimos de 2, 7,6 y 19 m³/s. Los porcentajes de disminución son del 85%, 43% para límite medio e inferior, de igual forma, esta cuenca tiene un límite superior de caudal óptimo mayor que el caudal medio del mes de abril. En este caso se tomó el límite medio para establecer la recomendación del régimen de caudales, según se muestra en la Figura 37.

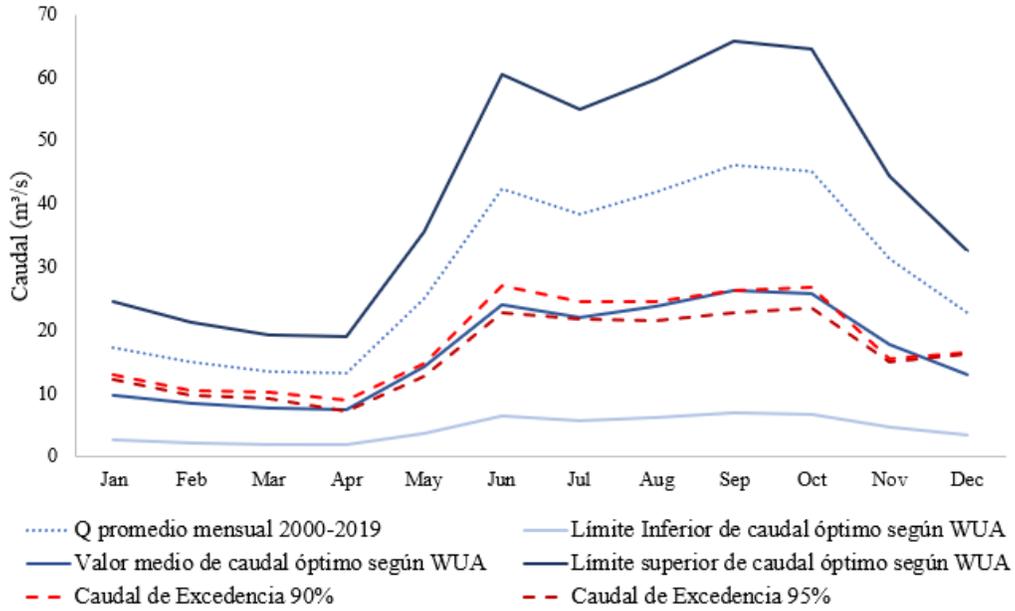


Figura 36: Resumen de las propuestas para establecer el régimen de caudal ambiental

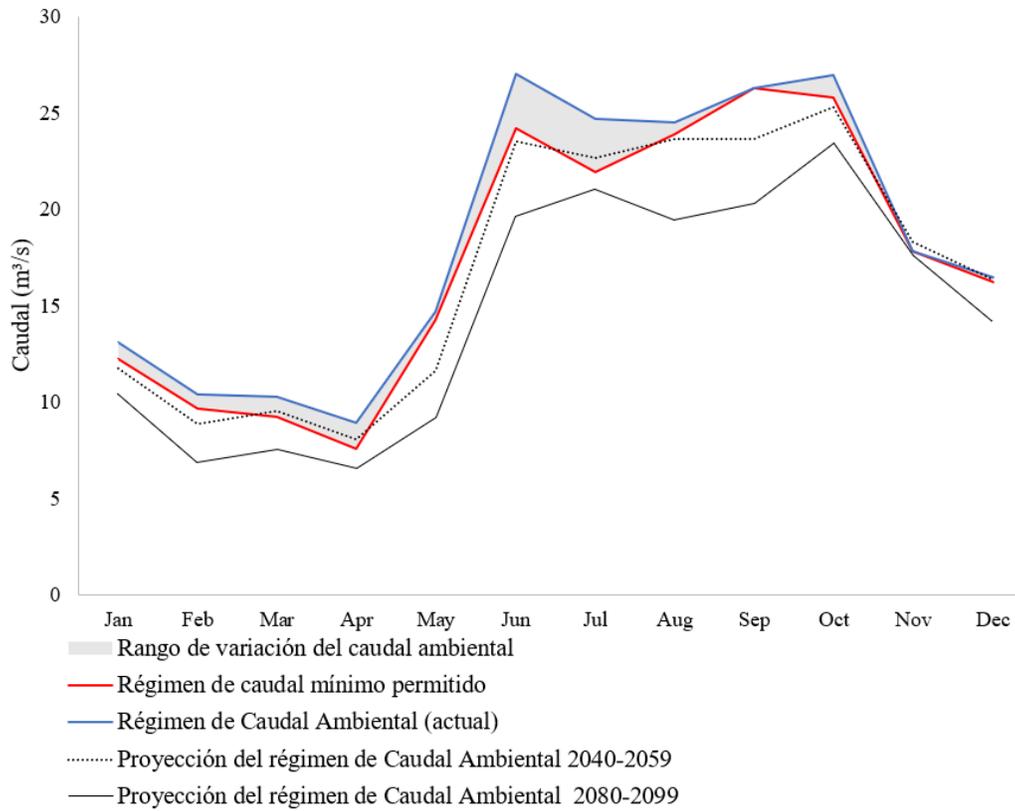


Figura 37: Régimen de caudal ambiental recomendado para la cuenca P3.

Al simular este régimen de flujo recomendado se obtiene que *Baetodes* en los primeros 4 meses del año presenta valores de WUA del 93%, el valor mínimo lo presenta en octubre con un 68% y el promedio anual está en el 82% del espejo de agua. *Astyanax aeneus* presenta el valor promedio anual menor de 29%, presentando su máximo del 46% en abril. En el cuadro 14 se detallan los valores de WUA calculados para cada una de las especies en función de los caudales del régimen hídrico recomendado y en el anexo 8 se muestran la simulación espacial del comportamiento de las áreas utilizables para cada especie.

Cuadro 14: Comportamiento del área utilizable ponderada en respuesta del régimen de caudal ecológico recomendado.

Mes	Caudal	WUA Gobiexos nudus (%)	WUA Astyanax aeneus (%)	Rhamdia laticauda (%)	WUA Anacroneuria (%)	WUA Baetodes (%)
Jan	13,1	63%	37%	41%	52%	92%
Feb	10,4	60%	43%	46%	53%	94%
Mar	10,3	60%	43%	46%	53%	94%
Apr	8,9	57%	46%	49%	51%	93%
May	14,7	64%	34%	37%	49%	90%
Jun	27,0	63%	14%	21%	35%	68%
Jul	24,7	64%	17%	23%	36%	72%
Aug	24,5	64%	17%	23%	37%	73%
Sep	26,3	64%	15%	22%	36%	69%
Oct	27,0	63%	14%	21%	35%	68%
Nov	15,4	65%	33%	36%	48%	89%
Dec	16,5	65%	30%	34%	46%	88%
Máximo Caudal/WUA		19,0/66%	2,0/75%	4,0/53%	11,0/53%	10,0/94%

VI. Discusión

6.1 Requerimiento del caudal ambiental según indicadores biológicos

El flujo de agua tiene una gran influencia en el establecimiento de los organismos acuáticos, ya que afecta la composición del sustrato, las propiedades químicas del agua, el movimiento de nutrientes y partículas orgánicas, así como la disponibilidad e idoneidad del hábitat (Dewson et al. 2007). La reducción natural en el caudal disminuye la velocidad y profundidad de forma gradual, sin embargo, cuando se reduce de forma artificial, al ocurrir los cambios de forma repentina se afecta de forma negativa a la biota del ecosistema acuático (McIntosh et al. 2002; Dewson et al. 2007). Dentro de este contexto, las actividades humanas podrían extender los períodos de caudal reducido a lo largo del año; por este motivo, es importante identificar aquellos organismos con requerimientos de caudal más estrictos, para garantizar un flujo que permita su supervivencia y la de especies asociadas. En el caso del río Pejibaye, se encontraron organismos bioindicadores que permitirían la determinación del caudal ambiental como se muestra a continuación.

6.1.1. Insectos

Los individuos de *Baetodes* y *Anacroneuria* tienen una preferencia similar por hábitats poco profundos menores a 0,7 m (Figura 21), siendo *Anacroneuria* más estricto con un rango óptimo entre 0,3 y 0,5 m. Por otro lado, en cuanto a la velocidad los individuos de *Baetodes* no mostraron una preferencia por un rango específico dentro de los hábitats muestreados, mientras que *Anacroneuria* sí mostró preferencia y no fue encontrado en hábitats con valores mayores a 1,3 m/s (Figura 22). De acuerdo con Brown & Brussock (1991) los efemerópteros como *Baetodes* tienen adaptaciones para habitar diferentes rangos de velocidad y caudal, por este motivo posiblemente no presentaron una preferencia particular de hábitat.

A pesar de que *Baetodes* fue encontrado en un rango amplio de hábitats, ambos organismos fueron encontrados en hábitats no muy profundos y con corriente, esto se debe a que ambas especies presentan adaptaciones para establecerse en zonas con corriente como un cuerpo aplanado y alargado, así como uñas para adherirse a los sustratos (Vázquez et al. 2009). Estas especies también muestran preferencia por zonas con alta concentración de oxígeno disuelto que necesitan un flujo constante de corriente (Vázquez et al. 2009; Zúñiga, 2010; Sierra-

Labastidas et al. 2017). El establecimiento de macroinvertebrados acuáticos también depende del tipo de sustrato, estudios realizados anteriormente sobre preferencia de hábitat han mostrado que el tipo de sustrato es uno de los factores más importantes en determinar la presencia de estos organismos (Buss et al. 2004; Silveira et al. 2006). Sustratos como la hojarasca, gravilla y piedras ofrecen refugio y alimento para los individuos de *Baetodes* (raspadores) y *Anacroneuria* (depredador de larvas de otros insectos). Áreas del río con un caudal muy alto podrían provocar el arrastre de estos sedimentos, por este motivo, posiblemente fue observada una disminución en la abundancia de ambas especies en hábitats con valores mayores de caudal.

Por otra parte, un caudal bajo (natural o artificial) también tiende a reducir la densidad de macroinvertebrados en los cuerpos de agua (McIntosh et al. 2002; Kinzie et al. 2006). Esta reducción en la densidad, se da como respuesta a un aumento en las dinámicas de competencia y depredación, ya que, al disminuir la cantidad de hábitat, disminuye la cantidad y calidad del alimento (McIntosh et al. 2002).

En relación con la variación estacional de *Baetodes*, se ha observado que la abundancia de las ninfas está relacionada con cambios pluviométricos (Sierra-Labastidas, et al., 2017; Castillo-Sánchez et al., 2018). Similar a lo observado por Vásquez et al. (2009) la abundancia de *Baetodes* fue mayor durante la época de lluvias y menor durante la época seca. El período de lluvias y algunos meses del período de transición, coinciden con la época reproductiva de *Baetodes*, lo que explica su mayor abundancia durante estos meses (Vásquez et al., 2009). En el caso de *Anacroneuria* no se obtuvo un tamaño de muestra suficientemente grande durante los diferentes muestreos, para realizar conclusiones sobre la variación en la abundancia entre las estaciones.

Según los resultados obtenidos se puede concluir que *Baetodes* es más generalista y puede habitar un rango mayor de hábitats, mientras que *Anacroneuria* es más selectivo y presenta preferencia por hábitats con características más específicas, sugiriendo que ésta especie podría ser un buen indicador en la determinación del régimen de caudal cuando estuviera presente en el cuerpo de agua estudiado. Adicionalmente, ambas especies fueron encontradas en diferentes épocas del año (Figura 19) lo que favorece la utilización en este tipo de organismos en este tipo de estudios.

6.1.2. Ictiofauna

Para las tres especies de peces evaluadas en el río Pejibaye, se observó que, al aumentar la profundidad y velocidad del agua, aumentó la cantidad de organismos, sin embargo, se llegó a un punto de quiebre y la abundancia empezó a disminuir. De igual forma, al aumentar el caudal aumentó el porcentaje de hábitat utilizable, pero el aumento continuo del caudal provocó la disminución en la cantidad de hábitat disponible. Estas condiciones obedecen a que los organismos cuentan con adaptaciones morfológicas que les permiten establecerse en uno o varios tipos de microhábitats, pero ante condiciones extremas se empieza a registrar menor cantidad de organismos (Parasiewicz & Dunbar, 2001).

En este caso, la especie *Gobiesox nudus*, cuenta con una ventosa ventral y cuerpo aplanado dorsoventralmente, que le permite mantenerse en las zonas con mayor velocidad y turbulencia y de esta forma evitar depredadores (Busing, 2002). No obstante, a velocidades mayores a los 1,2 m/s es posible que la especie experimente mayor dificultad para mantenerse o desplazarse esto debido a la incidencia del número de Reynolds por su tamaño (Baumgart & Friedrich, 2014) y de ahí se dé una disminución en su frecuencia, también considerando que los organismos evitan los sitios donde pierden más energía de la que adquieren alimentándose (Parasiewicz & Dunbar, 2001). Para *Rhamdia laticauda* y *Astyanax aeneus*, la mayor abundancia se dio a velocidades que van desde los 0 m/s hasta los 0,6 m/s; esta condición de no estar presentes en mayor abundancia a velocidades extremas puede estar medida por la forma corporal y hábitos alimenticios de cada especie (Quesada & Campos, 2019).

La posición de la boca de *A. aeneus*, le permite picar el fondo y superficie del agua para cazar insectos y frutos, y por su forma corporal ovoide (Busing, 2002), le dificultan permanecer en zonas con mayor fuerza de arrastre. Por su parte, *R. laticauda*, su boca se encuentra direccionada de forma frontoventral, permitiéndole alimentarse del fondo del río, por lo que se puede registrar con mayor frecuencia en zonas lentas (Busing, 2002). Sin embargo, por su cuerpo de forma de torpedo, le permite de igual forma movilizarse y asentarse en hábitats de mayor velocidad (Gordon et al. 2004), pero siempre protegiéndose u ocultándose entre las piedras cercanas al fondo, donde la velocidad es menor (Hynes, 1970).

En el caso de estas tres especies de peces el rango de hábitat y las curvas de preferencia, no pueden ser comparadas con otros estudios, ya que no hay registro bibliográfico sobre este tema para estas especies. No obstante, Gontijo, et. al. (2011) en su estudio determinaron la relación entre la forma del cuerpo y los aspectos ecológicos con respecto al uso del hábitat, utilizando varias especies de talla media, entre ellas el género *Astyanax* sp y la especie *Imparfinis minutus* (familia Heptapteridae, al igual que *R. laticauda*). En su estudio observaron que la mayor abundancia de *Astyanax* sp. se dió entre las velocidades de 0,5 y 1,0 m/s y en el rango de profundidad entre los 40 y 60 cm, similar a la especie costarricense *A. aeneus*. Mientras que *I. minutus* fue registrada con mayor abundancia entre las velocidades entre 1,5 y 2,0 m/s, diferente a *R. laticauda* la cual prefirió velocidades menores, sin embargo, esta disimilitud puede deberse a que a pesar de que pertenecen a la misma familia y con características morfológicas similares, tienen distintas preferencias por la velocidad del agua, o bien, porque durante en varios muestreos en el río Pejibaye no se pudo utilizar la electropesca dificultando así la observación en los macrohábitats turbulentos. En cuanto a la profundidad, *I. minutus* la registraron entre 10 y 20 cm, mientras que *R. laticauda* fue registrada con mayor abundancia entre 40 y 50 cm, por lo que para esta variable también hay diferencias.

Por otro lado, Dongyoun, Sung & Byungwoong (2018) obtuvieron curvas de preferencia de hábitat para cinco especies de peces, todas con cuerpo en forma de torpedo y de tamaño pequeño, y observaron la misma tendencia que en el río Pejibaye, donde las especies logran utilizar velocidades nulas y de corriente moderada a fuerte, pero menores a los 1 m/s. Aun así, la presencia de una especie en un tipo de hábitat no solo puede estar medida por la forma corporal (Gontijo, Tadini & Santos, 2011), sino también por sus hábitos alimenticios y por lo tanto, donde se encuentre las presas que consumen con mayor frecuencia (Seung & Sung, 2018).

A la vez, en el caso de la ictiofauna se recomienda a la especie *G. nudus* como la mejor especie indicadora de caudal ambiental, ya que cuentan con menores rangos de velocidad y profundidad consideradas como óptimas, por lo que variaciones con tendencia a la disminución pueden representar la disminución de sus respectivos hábitats idóneos y como

lo menciona Cortés (2002), ante disminución de caudal los hábitats más perjudicados son los rápidos y las cataratas, poniendo en riesgo a las especies reófilas.

6.1.3. Caudal ambiental

Muchas investigaciones han combinado los modelos ecológicos e hidrodinámicos para determinar la relación entre el caudal y la preferencia del hábitat físico en especies acuáticas. Las curvas de preferencia de hábitat, han sido usadas para caracterizar la preferencia de hábitat y la disponibilidad y calidad del hábitat de especies acuáticas (Wang & Lin, 2013). Así, a través de modelos de cuantificación del porcentaje de hábitat idóneo para las especies acuáticas según un caudal, se puede determinar bajo cuál o cuáles volúmenes de agua se puede mantener las condiciones requeridas por una o varias especies en aquellos ríos donde haya permisos de extracción de agua.

En el caso del río Pejibaye, con las curvas de área utilizable ponderada o porcentaje de hábitat idóneo para las especies acuáticas en el sitio P1, se pudo determinar que caudales entre los 1 y 4 m³/s, fue donde se genera la mayor cantidad de hábitat disponible para estas especies, y que durante la época seca o de estiaje para este tramo el caudal ambiental mínimo aceptable sería de 4 m³/s. Para el sitio P2, caudales entre los 1 y 5,5 m³/s, generan la mayor cantidad de hábitat disponible (más del 50%) para las cinco especies acuáticas estudiadas, con un caudal ambiental mínimo aceptable de 1 m³/s. Por último, el sitio P3 la mayor cantidad de hábitat disponible para las especies estudiadas se da entre 2 y 18 m³/s, y bajo un caudal de 8 m³/s es donde la mayoría de las especies cuentan con más de un 50% de hábitat idóneo. El caudal ambiental mínimo aceptable para este tramo cercano a los 8m³/s.

Sin embargo, se debe recalcar que el caudal mínimo aceptable no es solo para la época de estiaje, sino que durante la época lluviosa también se determina un caudal mínimo aceptable para cada tramo del río Pejibaye. Por lo que también se maneja el término de caudal ambiental adaptativo, que es aquel que permite cambios durante todo el año para dar mantenimiento al río, las especies acuáticas y todos los procesos ecológicos propios del ecosistema acuático. De esta manera en la época lluviosa, para el sitio P1, el rango de caudal ambiental es de 4,2 a 4 m³/s, para el sitio P2 es de 1,45 a 1,4 m³/s y para el sitio P3 sería de 8,9 a 7,6 m³/s. el

caudal ambiental puede variar en ese rango sin que represente una amenaza al ecosistema. En la época lluviosa pueden estar variando constantemente a valores mayores.

En una proyección de cambio climático a los periodos 2040 – 2059 y 2080 – 2099, el caudal ambiental se establece en 4,14 y 3,68 m³/s respectivamente para P1, en 1,37 y 1,09 m³/s para P2 y en 8,08 y 6,56 m³/s para P3. En estos escenarios, los caudales se acercan o sobrepasan en algunos casos, al límite inferior actual, lo cual evidencia el impacto en el régimen disponible de caudal en el río.

VII. Conclusiones y Recomendaciones

La respuesta hidrológica actual y futura de la cuenca del río Pejibaye ante escenarios de cambio climático, evidencia un comportamiento de estacionalidad en la actualidad, el cual se acentúa en la proyección a futuro conforme se extiende el periodo de tiempo proyectado, así lo demuestran las curvas de excedencia del periodo base 2000-2019 con los periodos 2040-2059 y 2080-2099, donde se obtuvo que el primer trimestre es el que presenta una mayor afectación relativa.

Por su menor rango en la selección de hábitat óptimo, el género de insecto *Anacroneturia* y la especie de pez *G. nudus*, son los mejores para determinar caudales ambientales.

El utilizar un conjunto de especies acuáticas para determinar sus preferencias de hábitat puede ser más efectivo para determinar caudales ambientales, ya que se puede observar los distintos tipos de requerimientos y bajo a cuáles caudales se obtienen.

Según las preferencias de hábitat y el porcentaje de hábitat idóneo para cada especie acuática, en época de estiaje (abril) se recomienda un caudal de 4 m³/s para el sitio P1, 1 m³/s en el sitio P2 y 8 m³/s en P3.

Estos caudales representan un factor del 0,43, 0,56 y 0,57 del caudal de excedencia del 50% para el mes de abril. Utilizando estos mismos coeficientes aplicados a en los demás meses del año y con la condición estar entre los caudales de excedencia del 90 al 95% se establecieron los regímenes de caudal ambiental en las tres cuencas.

Bajo el escenario de cambio climático, se determinó que al aplicar la misma metodología para el periodo 2040-2059, las cuencas en el primer semestre del año presentarán caudales inferiores al mínimo permitido del periodo actual y en el periodo 2080-2099 esta condición se produce en todo el año.

VIII. Bibliografía

- Alonso, P., Gómez, A., & Saldaña, P. (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. México.
- Armas, F., Escolero, O., De Jalón, D. G., Zambrano, L., Del Tánago, M. G., & Kralisch, S. (2017). Proposing environmental flows based on physical habitat simulation for five fish species in the Lower Duero River Basin, Mexico. *Hidrobiologica*, 27(2), 185–200. <https://doi.org/10.5445/IR/1000075796>
- Baumgart, J. & Friedrich, B. (2014). Swimming across scale. *Nature Physics*, 10 (10), 758-761.
- Bovee KD, A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology, Instream Flow Information, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, CO,1982;12:248,
- Brown, A. V., y BrussocK, P. P. (1991). Comparisons of benthic invertebrates between riffles and pools. *Hydrobiologia*, 220, 99-108.
- Buss, D. F., Baptista, D. F., Nessimian, J. L., y Egler, M. (2004). Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 518(1), 179-188.
- Bussing, W. (1998). Peces de las aguas continentales de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica, San Pedro, Costa Rica.468 p
- Cañas, J, R, (1994), Tendencias actuales en el modelado de la precipitación diaria, *Ingeniería del agua*, 1(1), 89-100,
- Castillo Sánchez, K.N., Aguirre, E, Y.P., Ríos González, T.A., y Bernal Vega, J.A. (2018). *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) del río Caldera, Chiriquí, Panama: nuevos registros de distribución altitudinal y variación estacional. *Revista de Biología Tropical*, 66 (1), 164–177.
- Chaves, A., Krasovskaia, I., y Gottschalk, L. (2006). Environmental demands for sustainable regulation schemes in the humid tropics. Climate variability and change-Hydrological Impacts (Proc. Fifth FRIEND Word Conference held at Havana, Cuba, November 2006). IAHS Publ. 308. IAHS press, Wallingford, UK (this volume).
- Chen, J., Brissette, F. P., & Leconte, R. (2012). WeaGETS – a Matlab-based daily scale weather generator for generating precipitation and temperature. *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), 2222–2235.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.211>

Chen, Jie, Brissette, F. P., & Leconte, R. (2012). Downscaling of weather generator parameters to quantify hydrological impacts of climate change. *Climate Research*, 51(3), 185–200. <https://doi.org/10.3354/cr01062>

Consuegra, C. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias*. Bogotá.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access), <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Cortes, R. M. V., Ferreira, M. T., Oliveira, S. V., & Oliveira, D. (2002). Macroinvertebrate community structure in a regulated river segment with different flow conditions. *River Research and Applications*. 18(4), 367–382

Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007, Accessed through ASF DAAC 11 November 2015, DOI: 10.5067/JBYK3J6HFSVF

Dewson, Z.S., James, A.B.W., y Death, R.G. (2007). A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 26(3), 401–415.

Dongkyun, I., Sung-Uk, C., y Byungwoong, C. (2018). Physical habitat simulation for a fish community using the ANFIS method. *Ecological Informatics*, 43, 73-83.

Dyson M, Bergkamp G & Scanlon J (Eds.). 2003. *Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales*. Tr. José María Blanch. San José, C.R.: UICN-ORMA. xiv+125 pp.

Ecoosfera. (2016). 8 ríos y lagos que se están secando por el calentamiento global. Consultado: 30 mayo 2020. Disponible en: <http://ecoosfera.com/2016/02/8-rios-y-lagos-que-se-estan-secando-por-el-calentamiento-global/>

García de Jalón, D. & M. González del Tánago. 1998. El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos Españoles. Disponible en línea en: <http://www.fnca.eu/biblioteca-del-agua/documentos/documentos/308.pdf> (consultado el 3 Octubre 2016).

Gates, K. K., Vaughn C.C., y Julian, J.P. (2015). Developing environmental flow

- recommendations for freshwater mussels using the biological traits of species guilds. *Freshwater Biology*, 60, 620–635.
- GWP (Global Water Partnership, Centro América) (2016) Situación de los Recursos Hídricos en Centro América. Tegucigalpa, Honduras.
- Gontijo, C., Tadini, N., & Santos, P. (2011). Morphology and habitat use by fishes of the Rio das Velhas basin in southeastern Brazil. *Environmental Biology of Fishes*, 90 (1), 143-157.
- González, R., Sánchez, J., Bravo, L., Mijangos, M., & Branderas, A. (Julio de 2015). Importancia del caudal ecológico para el manejo integrado de las cuencas y la mitigación de impactos: estudio de caso. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Quesada-Montano, B. (2017). Observed (1970-1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*, 141(1), 13–28. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1786-y>
- Hidalgo, Hugo G., & Alfaro, E. J. (2015). Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology*, 35(12), 3397–3421. <https://doi.org/10.1002/joc.4216>
- Horton, R. E. (1945), Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin, USA.
- Hough, I.M., Warren, P.H., y Shucksmith, J.D. (2019). Designing an environmental flow framework for impounded river systems through modelling of invertebrate habitat quality. *Ecological Indicators*, 106, 105445.
- Instituto Meteorológico de Costa Rica. (2008). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica, 75. Retrieved from http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf
- JIE CHEN (2020), Stochastic Weather Generator (WeaGETS) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29136-stochastic-weathergenerator-weagets>), MATLAB Central File Exchange, Retrieved April 17, 2020.
- Jiménez, J. A. (2005). *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el Río Tempisque*. IUCN.
- Jowett, I.G. (2000). Flow management. En: Collier, K.J., y Winterbourn, M.J. (Eds). *New Zealand stream invertebrate: ecology and implications for management*. (pp. 289-312). Christchurch, New Zealand: Limnological Society.

- King, A. J., Tonkin, Z., y Mahoney, J. (2009). Environmental flow enhances native fish spawning and recruitment in the Murray River, Australia. *River Research and Applications*, 25(10), 1205–1218. doi:10.1002/rra.1209
- Kinzie, R. A. I., Chong, C., Devrell, J, Lindstrom, D., y Wolff, R. (2006). Effects of water removal on a Hawaiian stream ecosystem. *Pacific Science*, 60, 1–47.
- Laporte, S., Pacheco, A., y Rodriguez, C. R. (2006). Estimation of minimum acceptable (compensatory) flow for the rivers of Costa Rica. En: *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (Proc Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK (this volume).
- Leonard, P. M. & D. J. Orth. 1988. Habitat-use guilds and selection of instream flow target species. Biological Report 88 (11). U.S. Fish and Wildlife Service. Annapolis, MD. 18p.
- Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P. (2013). Ecohydraulics: An introduction. En Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P. (Eds). *Ecohydraulics: An Integrated Approach*. Wiley Blackwell, UK. 1-4 p.
- Martín-Vide, J., Conesa, C., y Moreno, M, C, (1992), Acerca de la bondad de las cadenas de Markov de primero, segundo y tercer órdenes en el análisis de las sequías del sureste de España, *Actas del V Coloquio de Geografía cuantitativa*, 485-500, Recuperado de: http://tig.age-geografia.es//zaragoza92/1992_33_martin-vidе_etal.pdf
- McIntosh, M. D., Benbow, M. E., y Burky, A. J. (2002). Effects of stream diversion on riffle macroinvertebrate communities in a Maui, Hawaii, stream. *River Research and Applications*, 18, 569–581.
- Milner, N., Solomon, D. y Smith, G. (2009) The role of river flow in the migration of adult Atlantic salmon, *Salmo salar*, through estuaries and rivers. *Fisheries Management and Ecology*, 19, 537–547
- Ministerio de Ambiente y Energía (2007). Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. La Uruca, San José, Costa Rica.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *M e g s q a w s*, 50(3), 885–900.
- Navarro, J. E., McCauley, D. J., & Blystra, A. R. (1994). Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) for Modelling Fish Habitat. *Journal of Water Management Modeling*, 6062. <https://doi.org/10.14796/jwmm.r176-01>
- Noack, M., Schneider, M., & Wieprecht, S. (2013). The Habitat Modelling System CASiMiR: A Multivariate Fuzzy Approach and its Application. En, Maddock, I., Harby, A., Kemp, P. & Wood, P. (Eds). *Ecohydraulics: An Integrated Approach*. Wiley

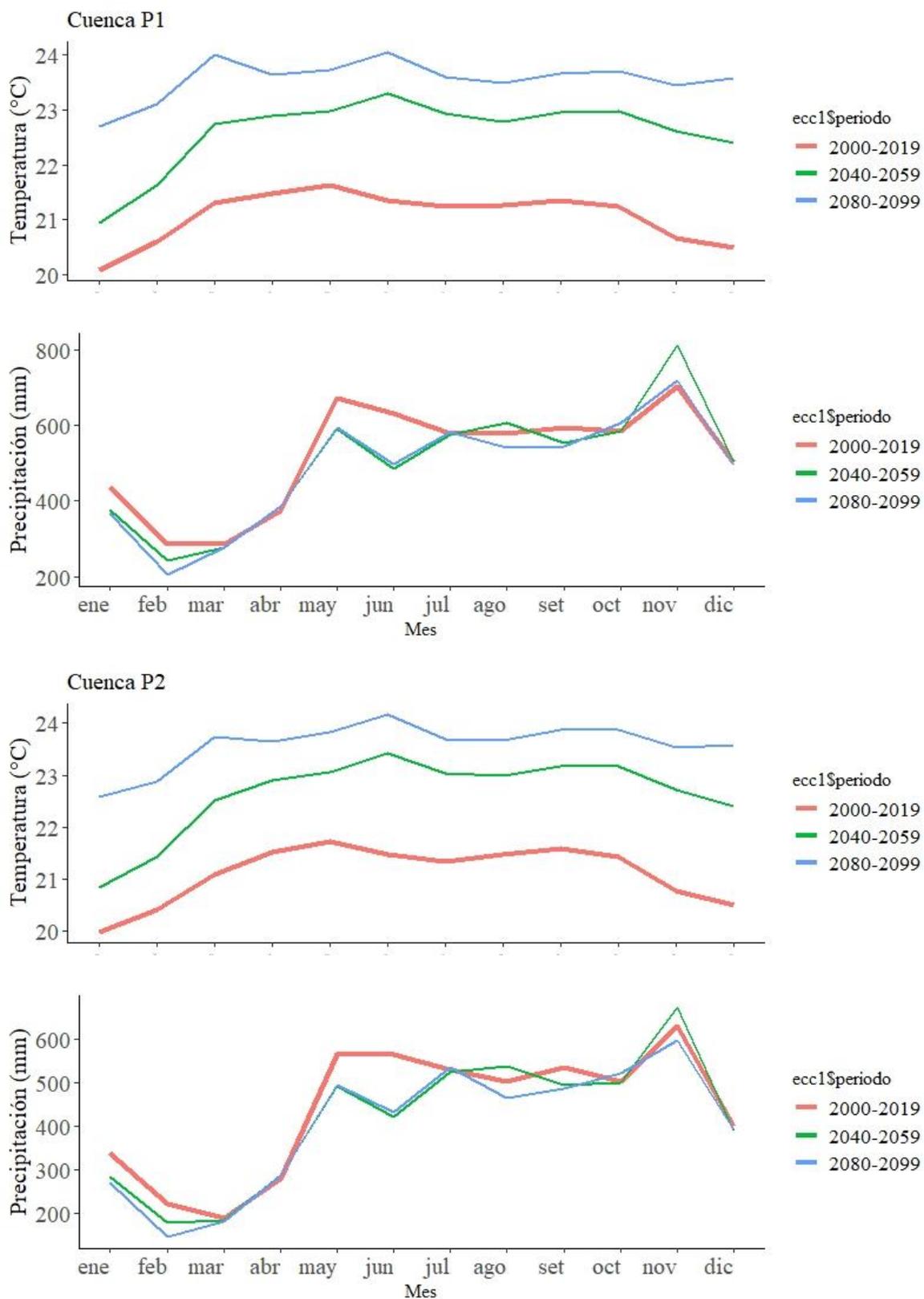
Blackwell, UK. 75 -89 p.

- Orth, D. J. & P. M. Leonard. 1990. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regulated Rivers: Research & Management* 5: 129-138. DOI: 10.1002/rrr.3450050204
- Piera, L. P. (2014). *Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay*. Montevideo, Uruguay.
- Quesada-Alvarado, F. (2014). Selección y preferencia de hábitat de *Anacroneturia* sp (Plecoptera: Perlidae), *Traverella* sp (Ephemeroptera: Leptophlebiidae) y *Corydalus* sp (Megaloptera: Corydalus) para determinar un caudal ambiental en tres represas hidroeléctricas. Tesis para grado de Licenciatura en Manejo de los Recursos Naturales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Quesada-Alvarado, F. (2019). Estimación de caudales ambientales utilizando macroinvertebrados acuáticos: una propuesta metodológica. Tesis para el grado de Maestría en Biología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Quesada-Alvarado, F., & Campos, F (2019). Morphometry and burst swimming in six continental fish species from Costa Rica. *Cuadernos de investigación*, 11(3), 395-402.
- Ramírez, A. 2010. Métodos de Recolección. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 41-50.
- Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., & Conde, D. (2011). *Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Uruguay, Uruguay.
- Sanz-Ramos, M., Bladé Castellet, E., Palau Ibars, A., Vericat Querol, D., & Ramos-Fuertes, A. (2019). IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume. *Ribagua*, 6(2), 158–167. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2016). *Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA*. Chile.
- Seung, K. & Sung, C. (2018). Prediction of suitable feeding habitat for fishes in a stream using physical habitat simulations. *Ecological Modelling*, 385 (1), 65-77.
- Sierra-Labastidas, T.K., Tamaris-Turizo, C.E., Reyes, S.A., y Rueda-Delgado, G. Densidad, biomasa y hábitos alimentarios de *Anacroneturia Klápalek* 1909 (Plecoptera: Perlidae) en un río Tropical. *Actualidades Biológicas*, 39(107), 66-74.
- Silveira, M.P., Buss, D.F., Nessimian, J.L., y Baptista, D.F. (2006). Spatial and temporal distribution of benthic macroinvertebrates in a Southeastern Brazilian river. *Brazilian Journal of Biology*, 66, 623-632.

- Stalnaker, C. B., B. L. Lamb, J. Henriksen, K. Bovee & J. Bartholow. 1995. The instream flow incremental methodology: a primer for IFIM. Biological Report 29. U.S. Geological Survey. Washington, DC. 45 p.
- Suren, A. M., Biggs, B. J. F., Kilroy, C., y Bergey, L. (2003). Benthic community dynamics during summer low-flows in two rivers of contrasting enrichment 1. Periphyton. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 37, 53–70.
- UNESCO. (2015). *Caudal Ambiental: definición, administración y normativa en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Vásquez, D., Flowers, R.W., y Springer, M. (2009). Life history of five small minnow mayflies (Ephemeroptera: Baetidae) in a small tropical stream on the Caribbean slope of Costa Rica. *Aquatic Insects: International Journal of Freshwater Entomology*, 31(1), 319-332.
- Vélez, J. I., Germán, P., & Mesa, O. J., (2000b), Balances hidrológicos de Colombia
- Wang, F., & Lin, B. (2013). Modelling habitat suitability for fish in the fluvial and lacustrine regions of a new Eco-City. *Ecological Modelling*, 267, 115–126.
- Zuleta, C. (2013). Estimación de los efectos del cambio climático y el cambio en el uso del suelo en el caudal de la cuenca del río Pejibaye-Costa Rica, mediante el modelo hidrológico Swat. *Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica*, 21-67.
- Zúñiga, M.C. Diversidad, distribución y ecología del orden Plecoptera (Insecta) en Colombia, con énfasis en *Anacroneuria* (Perlidae). *Momentos de Ciencia*, 7(2), 101-112.

IX. Anexos

9.1 Anexo 1. Escenarios de temperatura y precipitación para P1 y P2

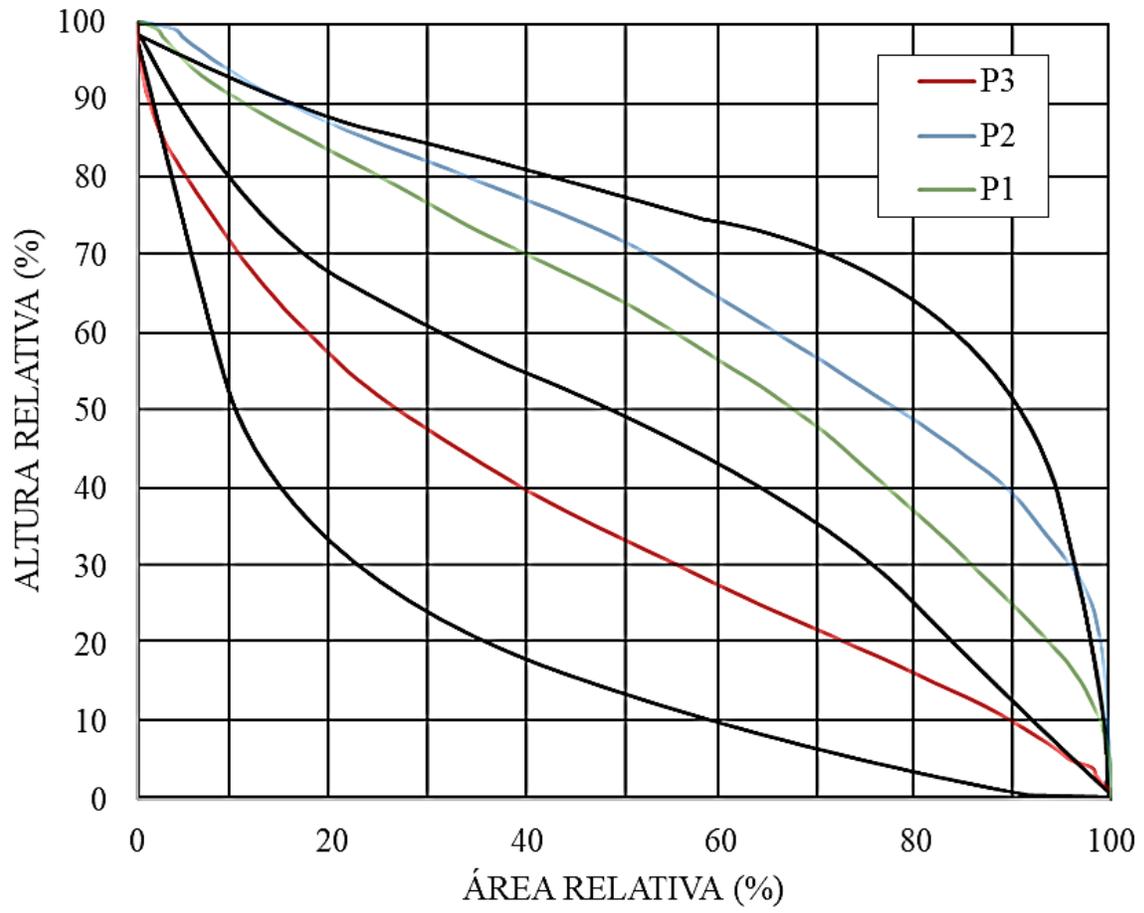


9.2 Anexo 2. Recuento de metodologías en A.L

País	Método	Autor o fuente	Tipo de aplicación
Argentina	DRIFT	Porcel et al, 2005	Conceptual
Brasil	50% o 70% del 7Q10, 10% del Q90, 5-20% del Q90	Benetti et al, 2002	En aplicación
	IFIM	In Tharme 2003	Sin especificar
	MESA	Modificado de Richter et al, 2003 por Collischonn et al, (sin año),	Conceptual
	Eco-hidráulicos	In Tharme 2003	Sin especificar
Chile	10% del flujo medio mensual	Davis & Riestra 2002 In Tharme 2003	Sin especificar
	PHABSIM	Com pers, In Tharme 2003	Sin especificar
	Building Block Methodology	Com pers, harme 200 In T 3	Sin especificar
	IFIM	Espinoza et al, (sin año)	Conceptual
Colombia	Eco-hidráulico	Diez Hernández & Ruiz Cobo 2007	Conceptual
	Régimen Ambiental de Caudales	Diez Hernández 2008	Conceptual
	Recopilación metodológica	MAVDT 2008	Conceptual
Costa Rica	Holístico	Jiménez 2005	Conceptual
	Q min, Aceptable (RANA)	Instituto Costarricense de Electricidad	En aplicación
	MESA (Richter et al, 2003)	Calvo Alvarado et al, 2008	Conceptual
Honduras	IHA, conocimiento tradicional para sustituir la falta de información	Esselman & Opperman 2010 (TNC)	Conceptual
México	IFIM	Com pers, In Thar e 2003	Sin especificar
	PHABSIM	García-Rodríguez et al, 1999, González Villeda & Banderas 2007 Santacruz de León & Aguilar-Robledo 2009	Sin especificar
	Tennat	Gómez-Balandra et al, 2007, García-Rodríguez et al, 1999, Santacruz de León & Aguilar-Robledo 2009	Sin especificar
	Holístico	Barrios et al, 2007	Sin especificar
Panamá	Hidrológicos	UNESCO 2005	Conceptual
Uruguay	Índice de Alteración Hidrológica (IHA, Richter et al, 1997)	Failache & Motta (sin año)	Conceptual

(Rodríguez-Gallego, y otros, 2011)

9.3 Anexo 3. Curva Hipsométrica P1, P2 y P3



9.4 Anexo 4. Curvas de duración P1

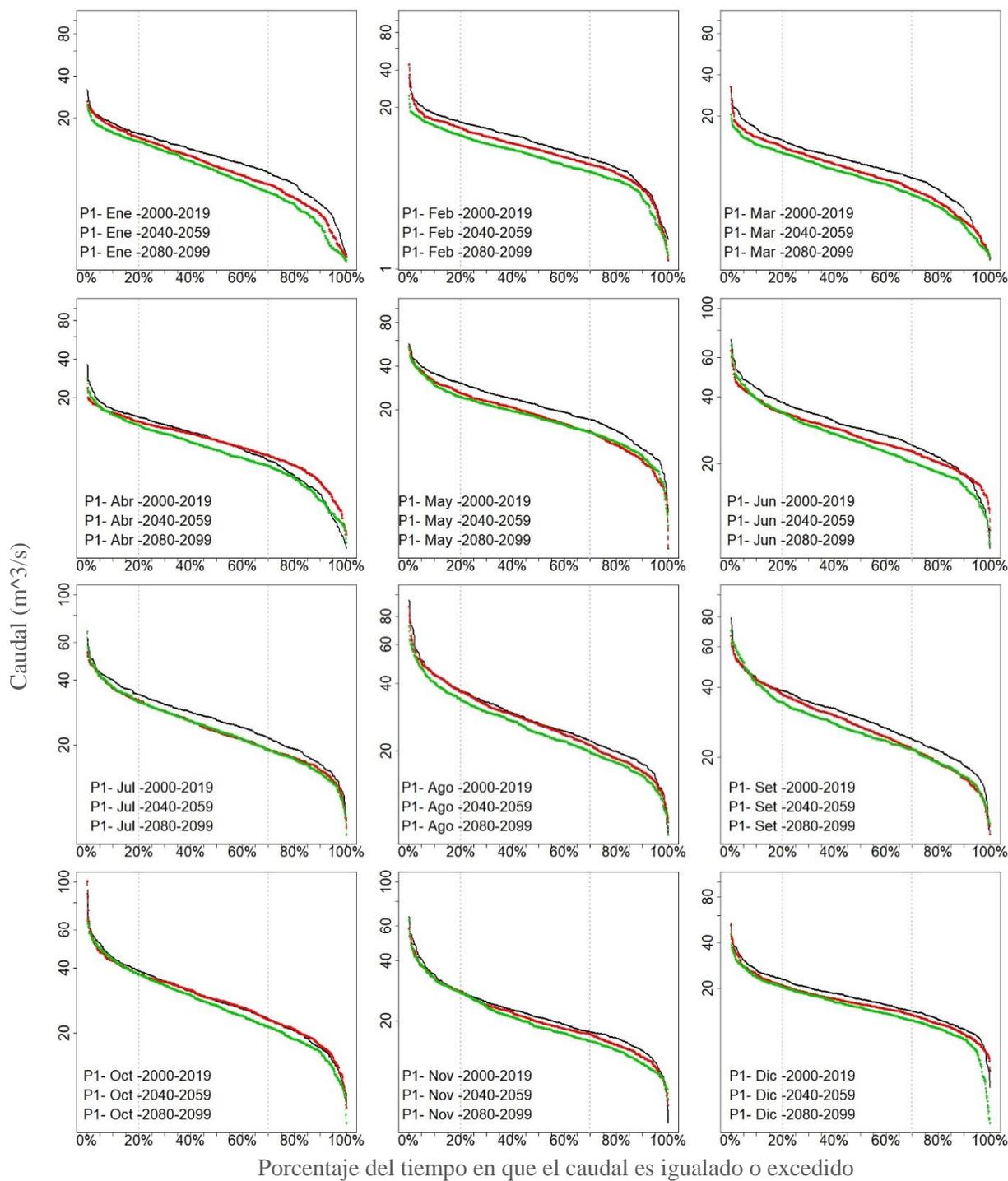


Figura 38: Curvas de duración del flujo mensual de la Subcuenca del río Pejibaye (P1), para los periodos del ECC 2000-2019, 2040-2059 y 2080-2099

9.5 Anexo 5. Curvas de duración P2

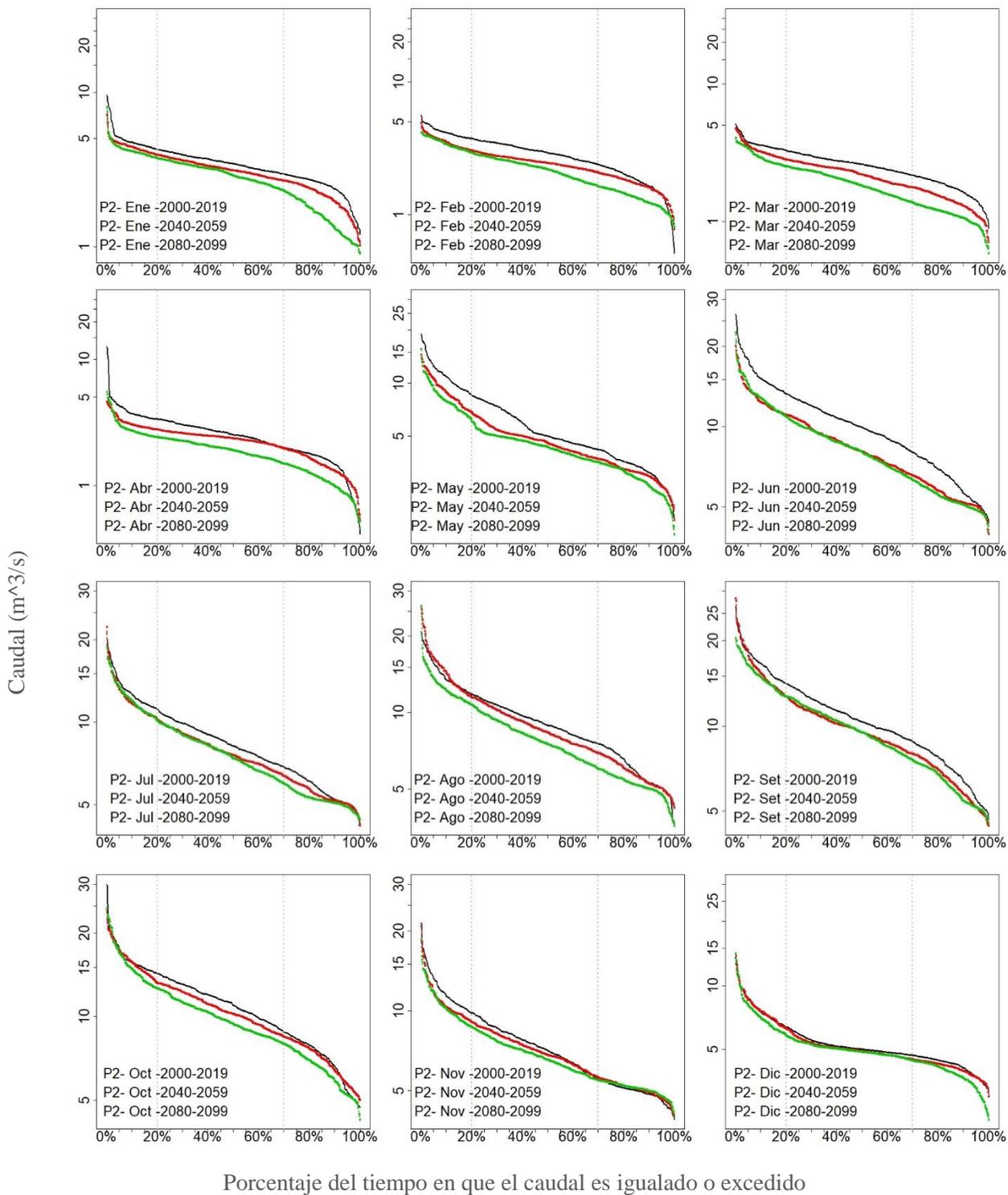


Figura 39: Curvas de duración del flujo mensual de la Cuenca del Río Gato (P2), para los periodos del ECC 2000-2019, 2040-2059 y 2080-2099

9.6 Anexo 6. Curvas de duración P3

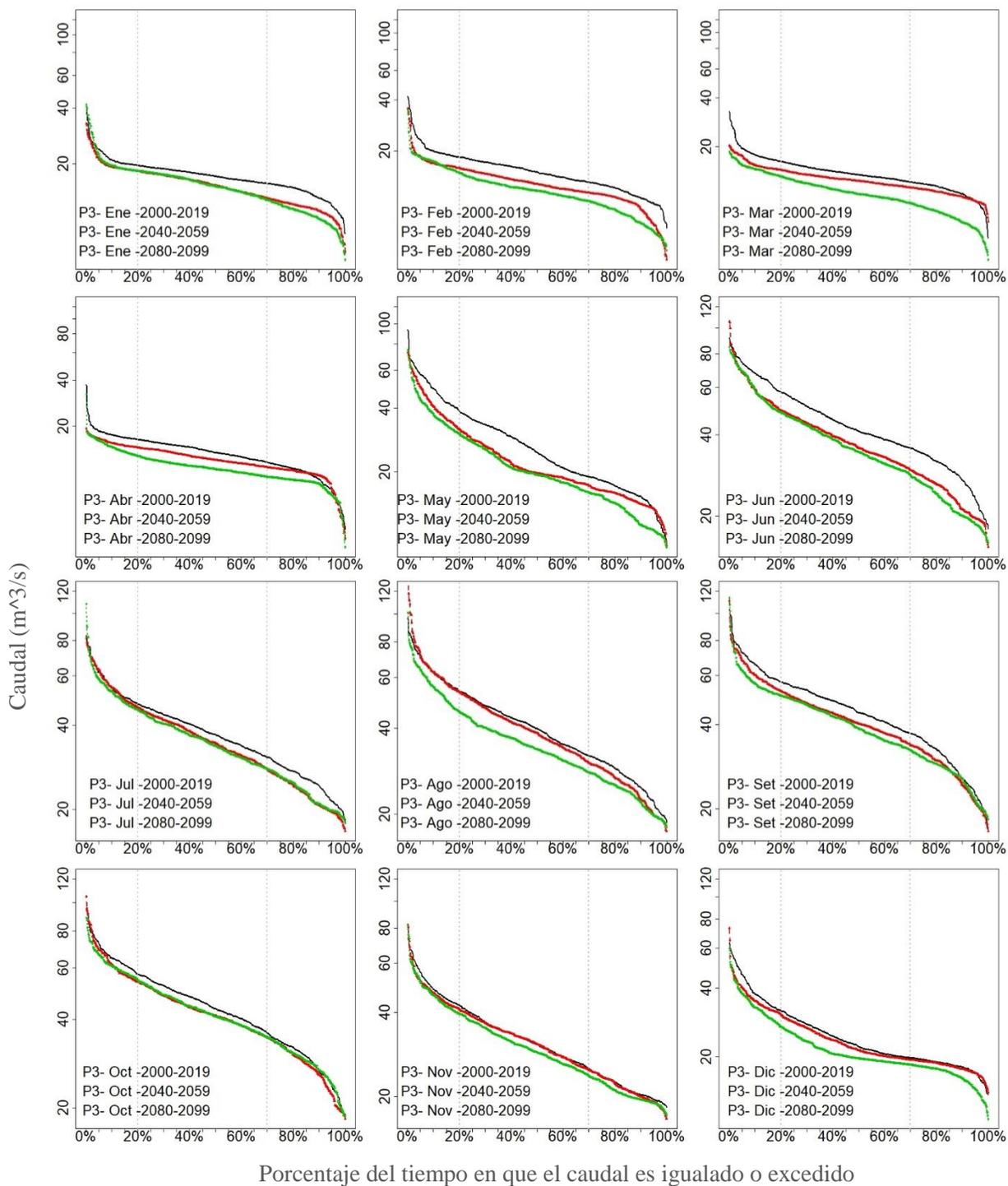
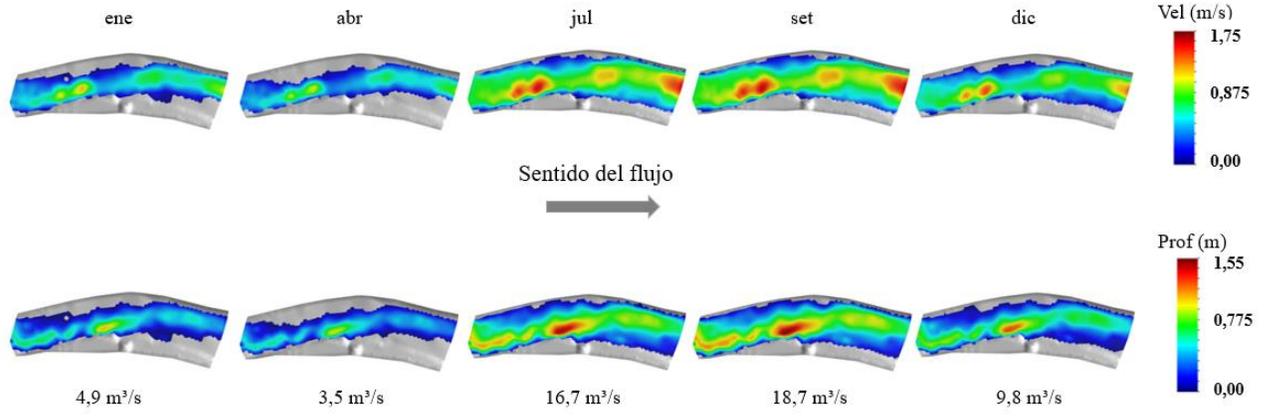


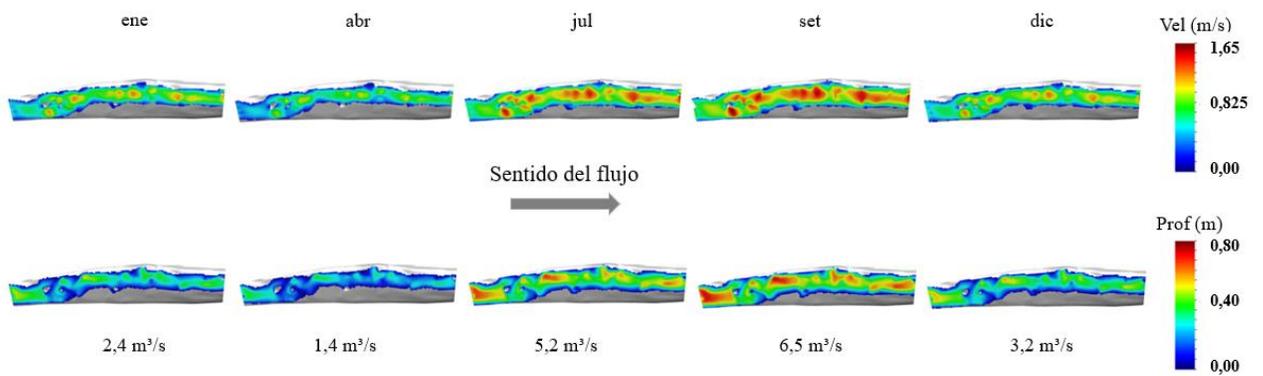
Figura 40: Curvas de duración del flujo mensual de la Cuenca del río Pejibaye (P3), para los periodos del ECC 2000-2019, 2040-2059 y 2080-2099

9.7 Anexo 7. Modelación hidráulica

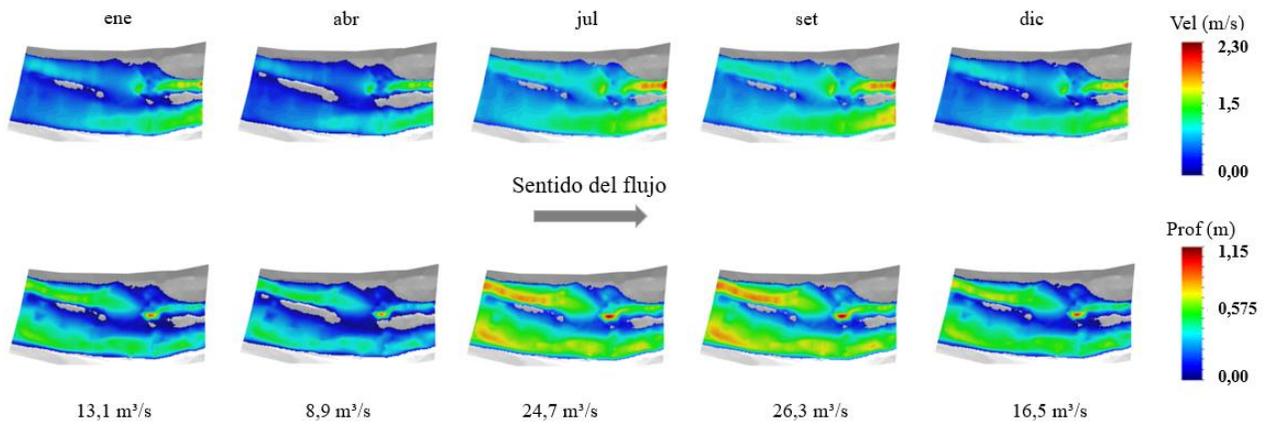
Trayecto cauce cuenca P1



Trayecto cauce cuenca P2



Trayecto cauce cuenca P3



9.8 Anexo 8. Modelación de grado de preferencia de hábitat

