

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
– IDEAM
Subdirección de Hidrología

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL
AMBIENTAL

Bogotá D.C., 2017

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM**

Ministro

Luis Gilberto Murillo Urrutia

Viceministro

Carlos Alberto Botero López

Director general – IDEAM

Omar Franco Torres

Director de Gestión Integral del Recurso Hídrico

Jairton Díez Díaz

Subdirector de Hidrología – IDEAM

Nelson Omar Vargas Martínez

Equipo técnico

Juan Sebastián Hernández Suárez

Sergio Andrés Salazar Galán

Claudia Liliana Buitrago Aguirre

Hernando Wilches Suárez

Andrés Felipe Rojas Aguirre

Juan Diego González Parra

Hilda María Palacio Betancur

Diana Marcela Moreno Barco

Grupo asesor:

Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare – CORNARE:
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín:

Grupo Jurídico

Claudia Fernanda Carvajal Miranda

Héctor Abel Castellanos Pérez

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 ASPECTOS GENERALES	2
1.1 OBJETIVOS DE LA GUÍA	2
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 DEFINICIONES	2
1.4 ENFOQUE CONCEPTUAL.....	3
1.4.1 <i>Componentes del régimen natural de flujo y su rol en el funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos</i>	4
1.4.1.1 Magnitud.....	5
1.4.1.2 Frecuencia de ocurrencia	5
1.4.1.3 Duración	5
1.4.1.4 Momento de aplicación (“timing”) y predictibilidad	5
1.4.1.5 Tasa de cambio	6
1.4.2 <i>Régimen alterado de flujo</i>	6
1.4.3 <i>Condición ecológica deseada</i>	7
2 MARCO METODOLÓGICO	8
2.1 NIVEL 1: ESTIMACIÓN	9
2.1.1 <i>Fase 1: Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua</i> 9	
2.1.2 <i>Fase 2: Estimación del caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico</i>	10
2.1.3 <i>Fase 3: Evaluación del caudal ambiental considerando servicios ecosistémicos</i>	14
2.2 NIVEL 2: GESTIÓN.....	16
3 CRITERIOS Y METODOS PARA EL DESARROLLO DEL NIVEL 1	18
3.1 FASE 1: LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CUERPO DE AGUA	18
3.1.1 <i>Paso 1: Delimitación del área de estudio</i>	18
3.1.2 <i>Paso 2: Definición de unidades de análisis del cuerpo de agua</i>	20
3.1.2.1 Definición de unidades de análisis en cuerpos de agua lóticos.....	20
3.1.2.2 Definición de unidades de análisis en cuerpos de agua lénticos.....	23
3.1.2.3 Procesamiento del Modelo Digital de Elevación	25
3.1.2.4 Caracterización morfológica del área de estudio	27
3.1.3 <i>Paso 3: Definición de estrategias de adquisición de información</i>	36
3.1.3.1 Información secundaria	36
3.1.3.2 Información primaria	39
3.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL CONSIDERANDO EL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO	49
3.2.1 <i>Paso 1: Estimar el régimen hidrológico natural</i>	49
3.2.1.1 Escenarios de disponibilidad de información hidrológica	49
3.2.1.2 Métodos de referencia	50
3.2.2 <i>Paso 2: Calcular métricas de interés ecológico</i>	56
3.2.2.1 Estimación de métricas hidrológicas de interés ecológico	58

3.2.2.2	Estimación de métricas morfométricas de interés ecológico	59
3.2.3	<i>Paso 3: Identificar y caracterizar los eventos de interés ecológico del régimen hidrológico natural (o naturalizado)</i>	66
3.2.4	<i>Paso 4: Generar la propuesta de aprovechamiento máximo de caudales... 68</i>	
3.2.5	<i>Paso 5: Identificar los eventos de interés ecológico para la serie alterada de caudales o niveles</i>	69
3.2.6	<i>Paso 6: Evaluar iterativamente la alteración del régimen hidrológico natural a partir de los resultados de los pasos 3 y 5.....</i>	69
3.2.7	<i>Paso 7: Obtener la información hidrobiológica de línea base que servirá como referencia para el seguimiento a la implementación de los caudales ambientales</i>	71
3.3	FASE 3: EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL CONSIDERANDO SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	73
3.3.1	<i>Paso 1: Determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua ... 73</i>	
3.3.1.1	Establecimiento del modelo de calidad del agua a escala de tramo	74
3.3.1.2	Extensión del modelo a escala regional.....	74
3.3.2	<i>Paso 2: Simular escenarios críticos.....</i>	76
3.3.2.1	Identificación de objetivos de calidad de agua.....	76
3.3.2.2	Definición de escenarios críticos	78
3.3.3	<i>Paso 3: Identificar problemáticas ambientales.....</i>	78
3.3.4	<i>Paso 4: Identificar conflictos ambientales</i>	79
3.3.5	<i>Paso 5: Consolidar problemáticas y conflictos ambientales.....</i>	80
4	CRITERIOS ADICIONALES PARA PROYECTOS ESPECÍFICOS SUJETOS DE LICENCIAMIENTO AMBIENTAL	81
4.1	CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	81
4.1.1	<i>Proyectos con retorno de agua a la fuente de captación</i>	<i>81</i>
4.1.1.1	Caso A – Proyecto sin regulación y con retorno a pie de presa	81
4.1.1.2	Caso B – Proyecto sin regulación y con retorno con conducción.....	82
4.1.1.3	Caso C – Proyecto con regulación y con retorno a pie de presa.....	82
4.1.1.4	Caso D – Proyecto con regulación y con retorno con conducción.....	83
4.1.2	<i>Proyectos sin retorno de agua a la fuente de captación.....</i>	<i>83</i>
4.1.2.1	Caso E – Proyecto sin regulación y sin trasvase	83
4.1.2.2	Caso F – Proyecto con regulación y sin trasvase	83
4.1.2.3	Caso G – Proyecto sin regulación y con trasvase.....	84
4.1.2.4	Caso H – Proyecto con regulación y con trasvase.....	84
4.2	CRITERIOS ADICIONALES EN LA FASE DE ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL.....	85
4.2.1	<i>Métricas adicionales de interés ecológico.....</i>	<i>85</i>
4.2.2	<i>Propuesta de aprovechamiento máximo de caudales.....</i>	<i>89</i>
4.2.3	<i>Criterios adicionales para para minimizar la alteración del régimen de caudales</i>	<i>89</i>
4.3	CRITERIOS ADICIONALES PARA EL NIVEL 2	94
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Elementos que componen el régimen natural de flujo. Adaptado de Postel y Richter (2003).....	4
Figura 2 Estructura metodológica para la estimación del caudal ambiental en Colombia..	8
Figura 3 Fases desarrolladas en el Nivel 1 de la guía metodológica.	9
Figura 4 Diagrama de flujo para la aplicación del componente de análisis de funcionamiento ecológico	11
Figura 5 Diagrama de flujo para el desarrollo del componente de análisis de servicios ecosistémicos	15
Figura 6 Patrones fluviales característicos de ríos colombianos. Fuente: Google Earth..	20
Figura 7. Unidades espaciales propuestas para la clasificación geomorfológica de ríos. Adaptado de Belletti et al. (2017)	22
Figura 8 Delimitación de segmentos por confluencias o nodos hidrológicos y/o sitios con cambios significativos de pendiente (nodos topográficos) – Tomada y modificada de Jiménez (2015).....	26
Figura 9 Árbol de clasificación morfológica propuesta por Flores et al. (2006)	29
Figura 10 Ficha para la recolección y consolidación de información hidrométrica (Minambiente-CORNARE, 2015).....	41
Figura 11 Esquematación de sección transversal seca y batimétrica en el sitio de monitoreo (Minambiente-CORNARE, 2015)	41
Figura 12 Ríos Trenzados (Tomada y modificada de Egozi y Ashmore, 2008)	43
Figura 13 Sistemas escalón-pozo, o sistemas transicionales rápidas-pozo. H_s representa la altura de la caída, L_s la separación cresta a cresta, z la caída entre crestas y s la profundidad de socavación en el pozo.....	43
Figura 14 Sistemas de planicie	44
Figura 15 Definición de estaciones de registro de acuerdo con el objetivo del monitoreo (Minambiente-CORNARE, 2015).....	45
Figura 16 Uso de muestras compuestas e integradas dependiendo del sitio de muestreo definido (condición de frontera o interna). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015. .	46
Figura 17 Esquematación del levantamiento integrado de información hidrométrica, físico-química e hidrobiológica en inmediaciones de sitios de monitoreo establecidos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	48
Figura 18 Escenarios de disponibilidad de información hidrológica. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	49
Figura 19 Protocolo de modelación hidrológica. Adaptado de Dingman (2002).....	52
Figura 20 Categorización de caudales medios diarios en las condiciones hidrológicas normal, seca y húmeda (en este caso Neutral, El Niño, y La Niña). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	54
Figura 21 Media de los caudales mínimos anuales para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	55
Figura 22 Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica (<i>seca, normal, húmeda</i>). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	56
Figura 23 Perfiles de flujo en un tramo de alta pendiente y visualización de barreras hidráulicas cuando el caudal alcanza la magnitud Q_{t-Q} . Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	59
Figura 24 Estructura del modelo MDLC (tomada y modificada de Camacho y Lees, 1999)	60
Figura 25 Aproximación al diagrama t-Q empleando experimentos con trazadores. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	61

Figura 26 Identificación de métrica Q_{t-Q} a partir diagramas tiempo caudal: en sistemas de alta pendiente según Jiménez y Wohl (2013) y en sistemas de planicie de acuerdo con el modelo MDLC (Camacho y Lees, 1999).....	62
Figura 27 Regionalización del caudal Q_{t-Q} como una función del área de cuenca y la pendiente del tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	62
Figura 28 Esquematzación de la información hidrométrica disponible. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	63
Figura 29 Esquematzación de las etapas requeridas para la estimación de las condiciones de banca llena en sitios o segmentos monitoreados. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	64
Figura 30 Esquematzación de la geometría hidráulica hacia aguas abajo para el ancho de banca llena. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	65
Figura 31 Esquematzación de la geometría hidráulica en la estación para el ancho de banca llena. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	66
Figura 32 Esquematzación de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	66
Figura 33 Visualización de serie de tiempo de caudales y métricas definidas por los componentes ambientales del régimen Q_{t-Q} y Q_B , $Q_{maxTr=15}$ y $Q_{minTr=10}$. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	67
Figura 34. Caudal de aprovechamiento mensual como un porcentaje P del caudal medio mensual. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	68
Figura 35. Prueba t para evaluar si la distribución de una métrica (duración, intensidad, magnitud) es significativamente diferente para dos escenarios diferentes. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.	69
Figura 36. Régimen de caudales en condiciones naturales y alteradas: (a) Régimen de caudales medios en condición natural (cajas blancas) y luego del aprovechamiento máximos considerando el régimen de los componentes del régimen $Q_B\uparrow$; $Q_{Tr=15}\uparrow$; $Q_{t-Q}\downarrow$; $Q_{Tr=10}\downarrow$; (b) Curvas de duración en condición natural (azul) y luego del aprovechamiento máximos considerando el régimen de los componentes del régimen. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.	70
Figura 37. Caudales ambientales y aprovechables para condición hidrológica seca en un punto de la red de drenaje.	70
Figura 38. Agrupación de sitios de monitoreo de acuerdo con el contexto hidromorfológico del área de estudio. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.	71
Figura 39. Valoración de la importancia de cada especie de acuerdo con su abundancia y biomasa. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.	72
Figura 40. Selección de especies representativas o dominantes. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.	72
Figura 41 Índice MHSI para diferentes factores de hábitat (oxígeno disuelto, profundidad máxima y profundidad de banca llena). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	73
Figura 42 Esquematzación de la aplicación del factor de asimilación en la escala de tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....	74
Figura 43 Evaluación de problemáticas de calidad y cantidad de agua en el área de estudio en relación con los caudales ambientales obtenidos de acuerdo con el componente ecológico e hidrológico. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	76
Figura 44 Esquematzación de la consideración de criterios de calidad de agua, de acuerdo con los usos del agua que se identifiquen a partir de la información secundaria y la información hidrobiológica en sitios de monitoreo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	77
Figura 45. Perfiles de calidad de agua y de oferta hídrica disponibles para la verificación de problemáticas. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	78

Figura 46 Clasificación de proyectos utilizada para la delimitación del tramo de estudio	81
Figura 47 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con retorno a pie de presa	82
Figura 48 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con retorno con conducción	82
Figura 49 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con retorno a pie de presa	82
Figura 50 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con retorno con conducción	83
Figura 51 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y sin trasvase	83
Figura 52 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y sin trasvase	84
Figura 53 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con trasvase	84
Figura 54 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con trasvase	85
Figura 55 Esquematación de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015	89
Figura 56 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica seca. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	91
Figura 57 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica normal. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	92
Figura 58 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica húmeda. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.	93

VERSIÓN PARA COMERCIALIZACIÓN

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Algunas fuentes de información para la adquisición de modelos digitales de elevación	19
Tabla 2 Algunas consideraciones para la selección del tamaño de píxel o resolución de un modelo digital de elevación.....	19
Tabla 3 Consideraciones para la segmentación de redes de drenaje.....	26
Tabla 4 Esquemas de clasificación morfológica de corrientes que se basan en información geoespacial	28
Tabla 5 Umbrales de patrones de cauces no confinados (Adaptado de Beechie et al., 2006)	29
Tabla 6 Características cualitativas de sistemas escalón-pozo	30
Tabla 7 Características cualitativas de sistemas de cascada	31
Tabla 8 Características cualitativas de sistemas de lecho plano	32
Tabla 9 Características cualitativas de sistemas pozo-cruce.....	33
Tabla 10 Características cualitativas de sistemas trenzados	34
Tabla 11 Características cualitativas de sistemas anastomosados y sistemas de dunas	35
Tabla 12 Síntesis de información básica requerida para la estimación y evaluación de caudales ambientales	36
Tabla 13 Variables hidrométricas requeridas, como mínimo, para cada sitio de monitoreo	42
Tabla 14 Variables físico-químicas y microbiológicas mínimas para análisis en sitios de monitoreo y vertimientos.....	47
Tabla 15 Variables hidrobiológicas sugeridas para análisis en sitios de monitoreo	48
Tabla 16 Componentes ambientales del régimen de caudales. Adaptada de Mathews y Richter (2007).....	57
Tabla 17 Relaciones empíricas para la estimación de tiempos de tránsito en la escala de tramo, en ríos de alta pendiente	60
Tabla 18 Ejemplo de separación y caracterización de los eventos por encima del caudal de banca llena Q_B	67
Tabla 19 Usos del agua a los que hace referencia el Decreto 1076 de 2015	77
Tabla 21 Métricas discretas de integridad del hábitat sugeridas para la caracterización de la estructura física del hábitat y la estructura del flujo (régimen de caudales), en relación con el contexto morfológico y ecológico de la red de drenaje del área de estudio.....	86
Tabla 22 Ejemplo de separación y caracterización de la cantidad y duración (días) de los eventos de interés ecológico.....	90

INTRODUCCIÓN

El caudal ambiental es el volumen de agua por unidad de tiempo en términos de régimen y calidad requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos continentales y su provisión de servicios ecosistémicos (e.g. Dyson et al., 2003; IDEAM, 2010, 2015; Adams, 2012; Poff y Mathews, 2013). Se entiende como régimen la dinámica temporal de los flujos de agua que regulan los procesos biológicos y el funcionamiento ecológico de los cuerpos de agua. Dicha dinámica se describe en términos de la magnitud, frecuencia, duración, momento de aplicación y tasa de cambio (Richter et al., 1996; Poff et al., 1997; Postel y Richter, 2003; Wohl et al, 2005; Arthington, 2012; Poff y Mathews, 2013) de los caudales, volúmenes o niveles de agua.

En el presente documento se desarrollan los lineamientos metodológicos para orientar la estimación del caudal ambiental en el territorio colombiano, en el contexto de la gestión integral del recurso hídrico, que comprende desde la formulación e implementación de instrumentos de planificación como los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA y los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico – PORH, hasta la administración de los recursos naturales renovables a través de instrumentos como los permisos y licencias ambientales y las reglamentaciones del uso de las aguas y de vertimientos, conforme a lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 o la norma que lo modifique o sustituya.

Esta guía metodológica desarrolla un enfoque holístico para la estimación del caudal ambiental, que involucra aspectos hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos, de calidad del agua, ecológicos y servicios ecosistémicos. Asimismo, establece requerimientos mínimos de información, criterios para la delimitación del área de estudio y alcances específicos de aplicación, en función de la escala de trabajo. Adicionalmente, los lineamientos metodológicos incorporan elementos de análisis sobre variabilidad climática, evaluación y seguimiento de los caudales ambientales y su importancia para la restauración de ecosistemas acuáticos continentales degradados.

La guía se estructura en cuatro capítulos de forma que, en el primero, se presentan las generalidades relacionadas con los objetivos de la guía, el enfoque conceptual adoptado, los alcances de su aplicación y las definiciones de los términos más recurrentes en el desarrollo del documento; en el segundo capítulo, se hace énfasis en la estructura metodológica que orienta la estimación del caudal ambiental en el territorio colombiano; en el tercero se presentan los requisitos mínimos de información en función de la escala de trabajo y su uso dentro del esquema metodológico, indicando los criterios para la delimitación del área de estudio y para la adquisición de información; y finalmente, en el cuarto capítulo se desarrollan cada uno de los componentes esenciales de la estructura metodológica, mencionando algunos métodos de referencia.

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 OBJETIVOS DE LA GUÍA

1.1.1 Objetivo general

Estandarizar una metodología para la estimación de caudales ambientales en Colombia en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Establecer el alcance de la estimación del caudal ambiental en el marco de la planificación y administración del recurso hídrico a nivel de subzonas hidrográficas o niveles subsiguientes.
- Definir los requisitos mínimos de información, para el desarrollo de dos componentes de análisis (funcionamiento ecológico y servicios ecosistémicos) y dos niveles de desarrollo (estimación y gestión).
- Orientar métodos y procedimientos de referencia para cada uno de los componentes de análisis y niveles de desarrollo.
- Establecer los mecanismos de seguimiento a la implementación de los caudales ambientales, con el propósito de verificar las hipótesis de alteración hidrológica y ecológica.

1.2 ALCANCE

Esta guía presenta los criterios mínimos para la estimación y evaluación del caudal ambiental, entendido este como el volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos.

La estimación del caudal ambiental es un insumo para el desarrollo de los instrumentos de planificación, administración y para la toma de decisiones que condicionan (determinante ambiental) el aprovechamiento del agua superficial. Adicionalmente, el caudal ambiental se reconoce como una herramienta para la restauración de ecosistemas degradados¹.

Los métodos y procedimientos de referencia desarrollados en esta guía pueden ser complementados, bajo el principio de que el método o procedimiento adicional sea igual o más robusto que el de referencia.

1.3 DEFINICIONES

Área de estudio. El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del cuerpo de agua objeto de estimación de caudal ambiental dentro de la cual se concentra un determinado levantamiento de información.

Barrera. Condición local (puntual) permanente, temporal, natural o antrópica, que restringe el movimiento (tránsito) de peces en la red de drenaje, ya sea hacia aguas arriba o hacia abajo. Dichas barreras tienen asociadas una posibilidad de tránsito que depende de los atributos físicos, químicos o hidráulicos de la barrera, así como de la biología de los organismos de interés (Cote et al., 2009).

¹ Consistente con lo planteado en el Plan Nacional de Restauración (MinAmbiente, 2015) en cuanto al restablecimiento del régimen hidrológico en humedales como estrategia de restauración.

Conflicto ambiental. Son un tipo particular de conflicto social en los que la temática en disputa se refiere a aspectos relacionados con el aprovechamiento o manejo de los recursos naturales renovables.

Factor de asimilación. Razón entre la carga del contaminante a la entrada del tramo y la concentración resultante aguas abajo sobre el cuerpo receptor (Chapra, 1997).

Funcionamiento ecológico. Conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que, al permitir el flujo y transformación de diferentes formas de materia y energía, sostienen la biodiversidad y se expresan como servicios ecosistémicos.

Oferta hídrica total disponible. Volumen de agua por unidad de tiempo que resulta de sustraer a la oferta hídrica total superficial, el caudal ambiental².

Oferta hídrica total superficial. Volumen de agua por unidad de tiempo, la cual escurre por la superficie de forma natural e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie del suelo, que no se infiltra o se evapora, y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos³.

1.4 ENFOQUE CONCEPTUAL

El enfoque adoptado por esta guía está orientado a la identificación del caudal, expresado en términos de régimen, en sus componentes de magnitud, frecuencia, duración, momento de aplicación, y tasa de cambio (ver Figura 1), requerido para mantener el funcionamiento ecológico de los cuerpos de agua continentales. Una vez identificado dicho límite, se procede a su evaluación considerando el estado de intervención del ecosistema acuático, para formular e implementar las medidas de gestión que permitan alcanzar o mantener la calidad del agua y las demás condiciones requeridas para la prestación de sus servicios ecosistémicos.

El enfoque anterior abandona la aproximación tradicional de “extraer hasta dejar un mínimo” (Postel y Richter, 2003), que sólo aborda un aspecto del régimen (magnitud: como un caudal mínimo, generalmente constante a lo largo del año) y que desconoce la dinámica natural de los ecosistemas acuáticos. En tal sentido, se reconoce que el caudal ambiental es un régimen de caudales o niveles con sus respectivos atributos ecológicamente relevantes, requeridos para soportar y/o regular los procesos físicos, químicos y biológicos que sostienen la biodiversidad. Dicho caudal ambiental orienta las medidas de gestión ambiental necesarias para alcanzar o mantener la condición ecológica deseada (ver numeral 1.4.3) para el cuerpo de agua. Lo anterior está contemplado en el nivel de desarrollo de “gestión” que hace parte del marco metodológico.

² De forma consistente con las unidades temporales y condiciones hidrológicas.

³ Esta variable se analiza para diferentes condiciones hidrológicas (año hidrológico seco, medio y húmedo). Las técnicas de estimación se orientan en los respectivos instrumentos de planificación o administración del recurso hídrico (e.g. guías para la formulación de POMCA y PORH).

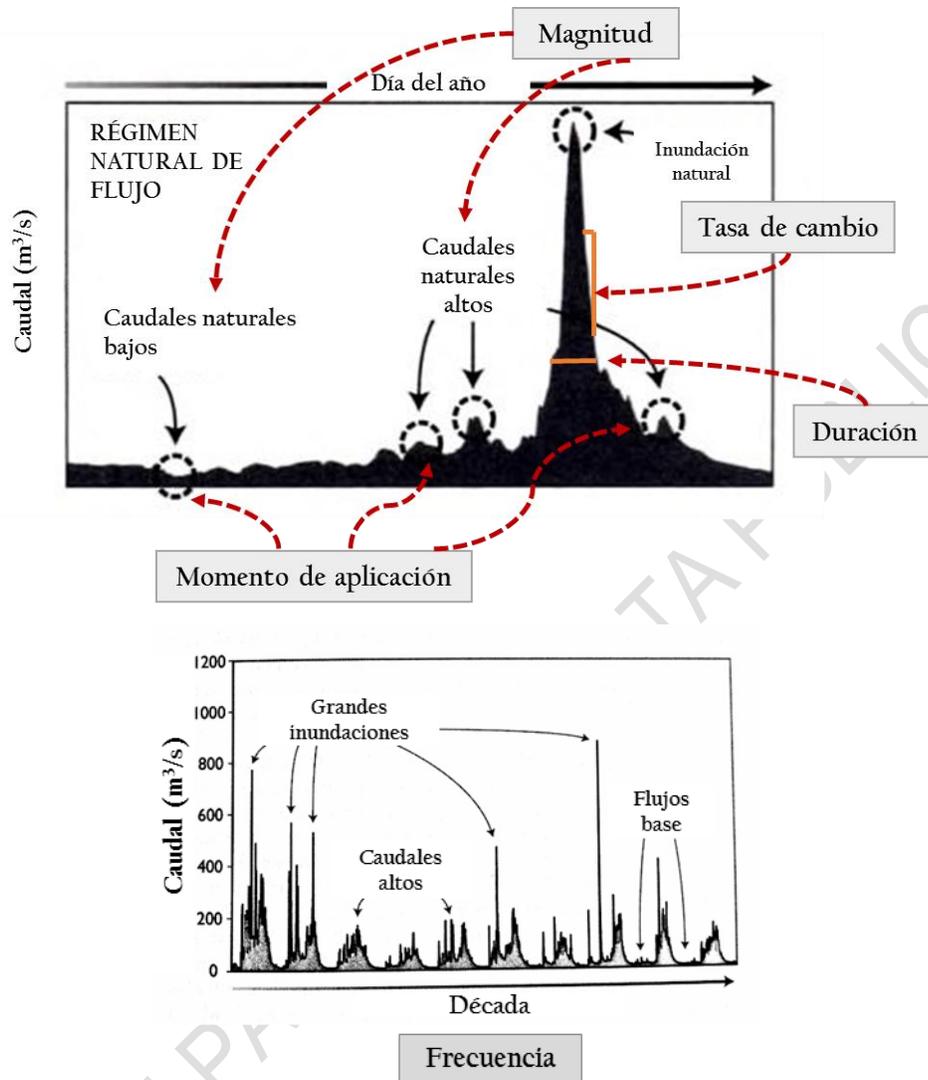


Figura 1 Elementos que componen el régimen natural de flujo. Adaptado de Postel y Richter (2003)

1.4.1 Componentes del régimen natural de flujo y su rol en el funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos⁴

De acuerdo con Poff et al. (1997), existen cinco componentes esenciales del régimen de flujo que regulan los procesos ecológicos en ecosistemas lóticos (magnitud, frecuencia, duración, momento de aplicación y tasa de cambio). En línea con lo anterior, y con lo planteado por Arthington (2012), tales componentes se utilizarán para caracterizar el régimen hidrológico y considerar eventos específicos como caudales máximos y mínimos, que son importantes para la biota y el funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos continentales. A través de la definición del rango de caudales, en términos de estas características ecológicamente relevantes, se tiene un medio explícito para cuantificar las consecuencias hidrológicas y ecológicas asociadas a las actividades humanas particulares que modifican uno o más de dichos componentes del régimen natural de flujo.

⁴ Esta sección es adaptada de Arthington, 2012. *Environmental flows: Saving rivers in the Third Millennium*. Freshwater ecology series. University of California Press, Ltd. Londres, Inglaterra. Capítulo 2, pp. 18 – 22.

1.4.1.1 Magnitud

Este componente se refiere a la cantidad de agua que discurre por un punto fijo en un intervalo de tiempo específico. Puede ser expresado en m³/s, m³/día, m³/mes, millones de m³/año, etc. La magnitud puede referirse a todo el caudal que transita en un cuerpo lóxico, al volumen que está presente en un cuerpo léxico en un momento particular, o a la cantidad relativa de agua requerida para mantener una propiedad específica de dichos cuerpos de agua. Ejemplo de ello puede ser el caudal o volumen necesario para proveer una profundidad adecuada con el propósito de mantener el paso o movimiento de peces o el transporte de sedimentos, materia orgánica y nutrientes, descubrir playas y lechos para la formación del hábitat preciso para la reproducción de ciertas especies, para inundar una zona de planicie o conectar el ecosistema acuático con otros cuerpos de agua (e.g. ríos, ciénagas, lagos) y mantener la funcionalidad de sus rondas hídricas. Los caudales y volúmenes mínimos, máximos, medios y medianos varían de acuerdo con las características climáticas regionales (e.g. régimen de temperaturas, humedad, precipitación), así como con el tamaño de la cuenca o área de drenaje aferente y sus propiedades biogeofísicas (e.g. geología, suelos, geomorfología, coberturas de la tierra).

1.4.1.2 Frecuencia de ocurrencia

Este componente hace referencia a qué tan seguido un caudal o volumen de cierta magnitud ocurre en un período de tiempo establecido. La frecuencia de un caudal o nivel de agua en particular, puede establecerse a través de una curva de duración de caudales o niveles, la cual es una curva de frecuencias acumuladas. Por ejemplo, un evento de inundación con un período de retorno de 100 años se define como aquel caudal que es excedido o igualado al menos una vez en 100 años o que tiene una probabilidad del 1% (0.01) de ocurrir en cualquier año dado. Eventos de este tipo pueden suceder seguido en el tiempo, dependiendo de las condiciones del régimen hidroclimático y sus alteraciones; sin embargo, la frecuencia relativa es tal que, en el largo plazo, dicho evento se presentará, en promedio, una vez cada 100 años. El caudal mediano tiene una probabilidad de ocurrencia del 50% (0.5). La frecuencia en el régimen natural de flujo determina aspectos como el régimen de inundaciones, qué tan seguido puede ocurrir el desove de los peces, y cada cuánto la vegetación riparia florece y se reproduce.

1.4.1.3 Duración

La duración es el período de tiempo asociado con un evento de caudal o volumen en particular, como aquellas crecientes que inundan una planicie durante semanas o estiajes que duran desde días a meses. Desde el punto de vista ecológico, es importante conocer el número de días o meses consecutivos en los que una condición particular de caudal o volumen persiste, incluyendo los casos cuando no hay agua en el cauce – lo cual es necesario para caracterizar el régimen natural de cuerpos de agua intermitentes y efímeros. La duración regula los tiempos en los cuales las comunidades biológicas pueden reproducirse, desovar o transportarse, asimismo permite que se presenten las condiciones físicas del hábitat requeridas para ello; en otros casos, la duración regula la competencia entre especies, manteniendo la supervivencia de comunidades biológicas nativas y controlando el crecimiento de poblaciones de especies invasoras e introducidas.

1.4.1.4 Momento de aplicación (“timing”) y predictibilidad

Este componente hace referencia a dos características. Por una parte, el momento de aplicación, por sí mismo, puede hacer referencia al mes o temporada en un año hidrológico, en el cual un evento particular tiene una alta probabilidad de ocurrir, como la migración o desove de peces. Por otro lado, la predictibilidad hace referencia al grado en el cual un evento de creciente o sequía está autocorrelacionado temporalmente. Los eventos con

cierto grado de predictibilidad pueden estar correlacionados con otras señales ambientales (e.g. cambios de temperatura). La mayoría de ríos en regiones tropicales presentan pulsos de creciente anuales con cierto nivel de predictibilidad (que ocurren en las épocas de mayor precipitación histórica) a las cuales, por ejemplo, muchas especies han sincronizado sus actividades de migración, reproducción y desove.

1.4.1.5 Tasa de cambio

La tasa de cambio se refiere al ritmo con el cual un caudal o volumen cambia de una magnitud a otra. Los cuerpos de agua torrenciales tienden a tener tasas muy elevadas de aumento de caudal o nivel (y en ocasiones de descenso), mientras que los cuerpos de agua estables presentan patrones de flujo relativamente uniformes, en donde, si llega a suceder algún cambio, éste ocurre de forma muy lenta. En la mayoría de cuencas hidrográficas, algo de la precipitación se infiltra y percola para convertirse en flujo subsuperficial o subterráneo, respectivamente, alimentando muy lentamente los cuerpos de agua superficial durante largos períodos de tiempo, en algunos casos manteniendo el régimen de caudales bajos (flujos base) en épocas de baja o ninguna precipitación. Por otra parte, dependiendo del evento de tormenta y de las características de la cuenca, la precipitación transformada en escorrentía superficial puede alcanzar rápidamente el cuerpo de agua y generar crecientes súbitas. La precipitación es el elemento principal que suele contribuir al régimen de caudales altos. Como resultado de estos dos procesos contrastantes, el hidrograma de un cuerpo de agua presenta típicamente, en un ciclo hidrológico anual, uno o dos períodos de caudales o niveles altos, separados por períodos más largos de caudales o niveles bajos, con transiciones graduales de caudales o niveles altos a bajos. La morfología de los cuerpos de agua, así como la estructura, composición y funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos se han ajustado a las tasas de cambio descritas. La alteración de este componente puede, por ejemplo, someter las orillas de los cauces a ciclos de humedecimiento y secado que desencadenan procesos de inestabilidad de taludes y de remoción en masa, o de cambios significativos en la dinámica y geomorfología fluvial (e.g. formación o desaparición de islas y barras), lo cual tiene consecuencias importantes sobre la formación de hábitats disponibles para el normal desarrollo de las comunidades biológicas adaptadas al ecosistema acuático.

1.4.2 Régimen alterado de flujo

Para la estimación del caudal ambiental se deberá partir de una condición de referencia del funcionamiento del régimen natural de flujo (considerando como mínimo, las cinco componentes esenciales desde el punto de vista de su influencia en la salud de los ecosistemas acuáticos). Tal condición de referencia, o de línea base, se refiere a las condiciones de flujo mínimamente alteradas (Poff et al., 2010). En contraposición, las condiciones de régimen de flujo alterado están asociadas a los efectos que, sobre el mismo, causan las actividades antrópicas de manera directa (e.g. infraestructuras hidráulicas) o indirecta (e.g. cambios las coberturas vegetales o usos de la tierra). Una de las infraestructuras hidráulicas de mayor alteración sobre el régimen son las presas, las cuales tienen efectos sustanciales en la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y en la productividad de los sistemas fluviales con sus impactos en servicios ecosistémicos, entre otros (e.g. Arthington et al., 2010). Dos de las principales consecuencias de las presas son fragmentación del sistema fluvial y regulación del régimen de flujo (Grill et al., 2015). Cuando se cumpla, al menos, alguno de los siguientes criterios se considerará que el régimen de flujo está alterado:

- El porcentaje de cuenca controlada por uno o varios embalses es mayor al 10% de la cuenca vertiente al área de estudio; o el volumen útil de uno o varios embalses

es mayor al 10% del volumen del hidrograma de la creciente con período de retorno de 10 años (adaptado de MARM, 2011).

- Valores mayores o iguales a dos (2) del índice denominado “grado de regulación” (DOR por sus siglas en inglés de “degree of regulation”) de acuerdo con Lehner et al., (2011).
- Cuencas hidrográficas en las que los índices de fragmentación (RFI por sus siglas en inglés de “river fragmentation index”) y regulación (RRI por sus siglas en inglés de “river regulation index”) son fuertes y severos de acuerdo con Grill et al., (2015).

En caso de encontrarse un régimen alterado de flujo, bajo al menos las anteriores consideraciones, se deberá proceder a simular el régimen de flujo de referencia o de línea base a través de la eliminación de la infraestructura hidráulica que este fragmentando y/o regulando el flujo (e.g. presas o grandes captaciones). Igualmente, se debe reflejar en el modelo hidrológico, de la cuenca hidrográfica de estudio, las condiciones de referencia de menor alteración de las coberturas naturales (e.g. ajustando los parámetros del modelo relacionados con capacidad de infiltración, intercepción vegetal, propagación de la escorrentía).

1.4.3 Condición ecológica deseada

La estimación de caudal ambiental se realiza sobre la base del conocimiento del cuerpo de agua, con el fin de mantener o alcanzar una condición ecológica deseada en el marco de las medidas de gestión integral del recurso hídrico en su cuenca hidrográfica. En tal sentido, en esta Guía se adapta el concepto de “integridad de cuenca” propuesto por Flotemersch et al., (2015). En este contexto, la condición ecológica es una valoración sobre el estado de la integridad del ecosistema acuático. La integridad se entiende como la capacidad que tiene un sistema y sus componentes de sostener y mantener el rango completo de procesos y funciones ecológicas que son esenciales para el sustento de la biodiversidad y de los servicios provistos para la sociedad (Flotemersch et al., 2015). Dicha valoración es multidimensional, de manera que considera funciones clave como la regulación hídrica, de las condiciones físico químicas del agua, y de los sedimentos, la conectividad hidrológica y la provisión de hábitat, y se puede abordar a partir de la valoración de los principales agentes de alteración de origen antrópico (Flotemersch et al., 2015). El conocimiento del cuerpo de agua puede obtenerse, entre otras fuentes, de los instrumentos de planificación y administración del recurso hídrico.

Las medidas de gestión que se identifican una vez se surte la evaluación del estado de intervención del cuerpo de agua de estudio (ver capítulo 2: Marco Metodológico) deben partir de la definición de los objetivos que traza la Autoridad Ambiental competente con respecto a la condición ecológica deseada para el ecosistema o cuenca hidrográfica de interés.

2 MARCO METODOLÓGICO

La estructura metodológica para la estimación del caudal ambiental está constituida por dos niveles de implementación, los cuales se han denominado como *Estimación* y *Gestión* (ver Figura 2).

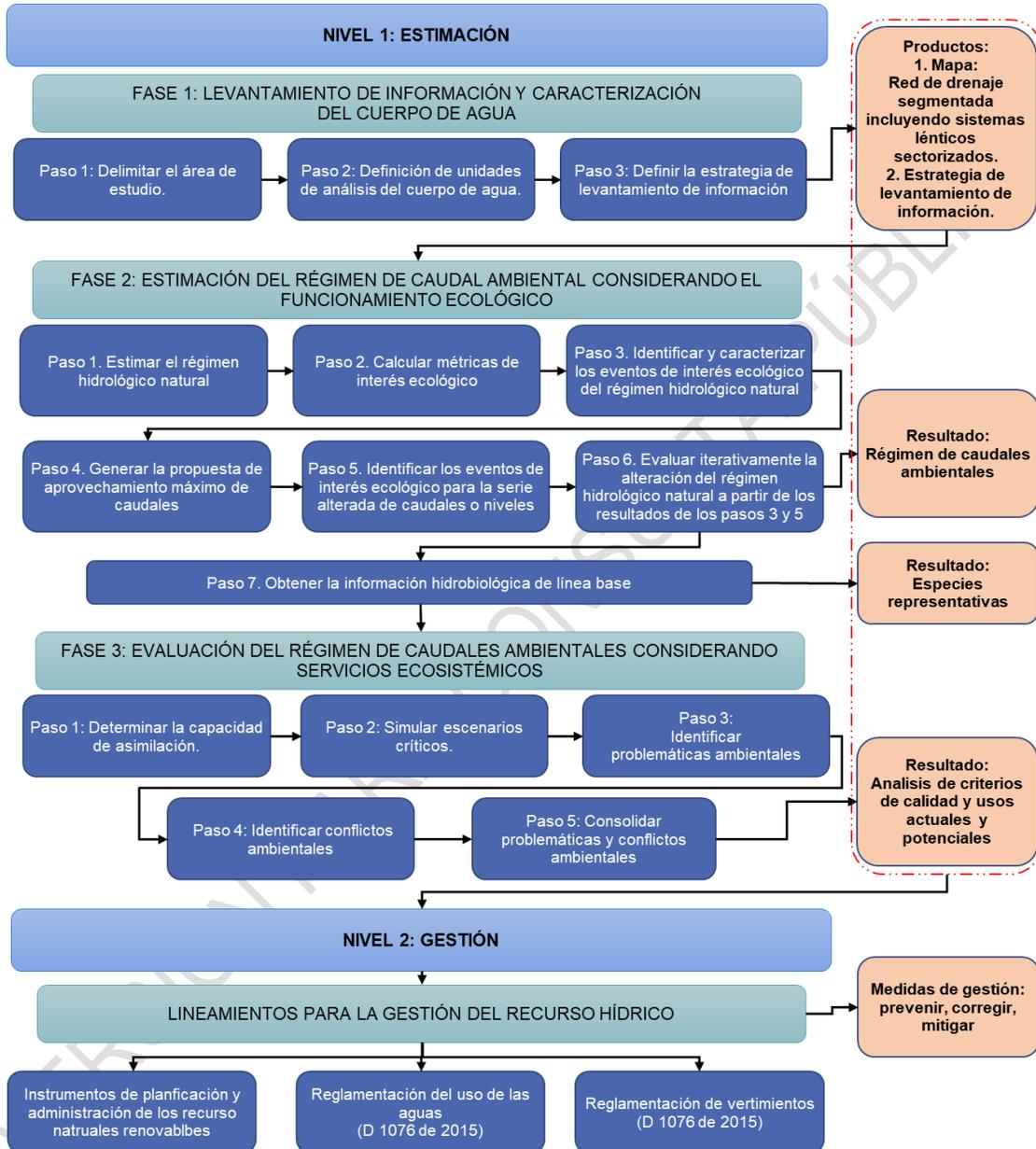


Figura 2 Estructura metodológica para la estimación del caudal ambiental en Colombia

El nivel de *Estimación* (nivel 1) está compuesto por tres fases:

- Fase 1: Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua;
- Fase 2: Estimación del régimen de caudal ambiental, considerando el funcionamiento ecológico (hidrología y ecología)

- Fase 3 - Evaluación del régimen de caudal ambiental, considerando servicios ecosistémicos (calidad del agua y bienestar humano).

El caudal ambiental se obtiene como resultado de la Fase 2, en donde se integran aspectos hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos y ecológicos del cuerpo de agua, mientras que la Fase 3 tiene como propósito principal aportar insumos para identificar las medidas de gestión ambiental requeridas para alcanzar o mantener el caudal ambiental calculado previamente⁵.

El nivel de *Gestión* (nivel 2) se desarrolla a partir de los resultados obtenidos en el nivel 1 durante la fase de evaluación de *servicios ecosistémicos*, con lo cual se determinan los lineamientos para la gestión ambiental que deben ser considerados en los instrumentos de planificación y administración de los recursos naturales renovables que involucran el recurso hídrico superficial.

2.1 NIVEL 1: ESTIMACIÓN

El nivel 1 se desarrolla a través de las tres fases que se ilustran en la Figura 3.

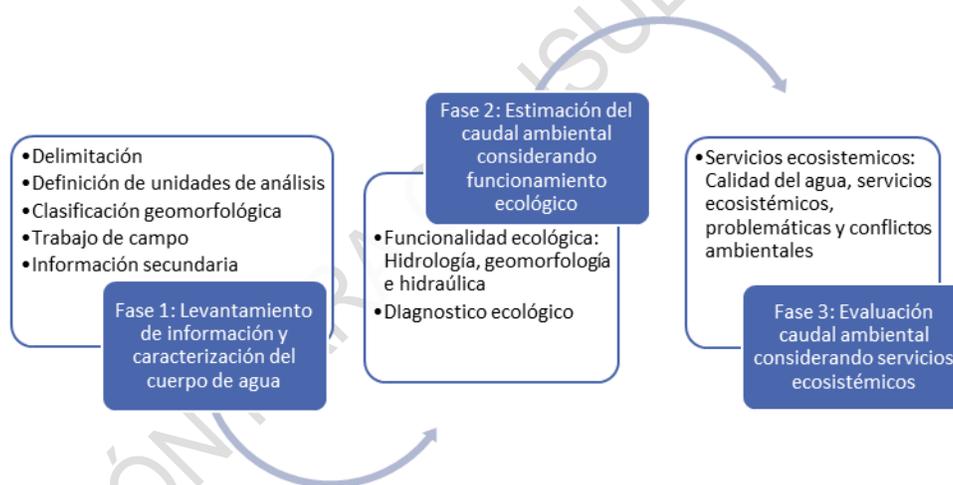


Figura 3 Fases desarrolladas en el Nivel 1 de la guía metodológica.

2.1.1 Fase 1: Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua

Los pasos que se deben llevar a cabo en esta fase son los siguientes:

Paso 1: Delimitar el área de estudio. La delimitación del área de estudio deberá representarse en un mapa de acuerdo con las escalas de trabajo establecidas para los niveles de la estructura hidrográfica para la planificación y manejo del recurso hídrico a los que se refiere el Decreto 1076 de 2015. Es importante resaltar que estimación del caudal ambiental se realiza sobre los cuerpos de agua, incorporando un análisis a nivel de cuenca hidrográfica. En la sección 3.1 del presente documento se desarrolla con mayor detalle la metodología para la delimitación del área de estudio.

⁵ Esto significa que los componentes de calidad del agua y de bienestar humano no intervienen en el cálculo matemático del caudal ambiental.

Paso 2: Definir unidades de análisis del cuerpo de agua, de forma tal que se indiquen preliminarmente las principales funciones ecológicas que podrían ocurrir. En este paso deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Para el caso de cuerpos de agua lóticos, a partir del modelo digital de elevación – MDE, es posible segmentar la red de drenaje identificando nodos de confluencia y nodos topográficos que representan barreras (presas/diques, caídas, etc.) para el tránsito de peces y para el transporte de sedimentos, materia orgánica y nutrientes. Los segmentos que serán clasificados geomorfológicamente, son aquellos segmentos acotados por dos nodos hidrológicos y/o topográficos. A partir del MDE, a cada segmento se le asignan características morfométricas, como el área aferente y la pendiente longitudinal, con las cuales se puede llevar a cabo su clasificación geomorfológica (e.g. limitado por suministro o por transporte, trenzado, duna-cruce, anastomosado, etc.). Una vez se hace dicha clasificación, se pueden identificar preliminarmente las funciones ecológicas basadas en la descripción cualitativa de cada segmento. En la sección 3.1.2 del presente documento se describen en detalle los métodos de referencia propuestos para realizar la definición de unidades de análisis del cuerpo de agua.
- Para el caso de cuerpos lénticos, se debe acudir a información batimétrica y de sensores remotos para hacer su caracterización geomorfológica y ecológica preliminar. La caracterización geomorfológica de cuerpos de agua lénticos debe tener en cuenta atributos morfológicos e hidrológicos, que permitan contar con herramientas para monitorear y hacer seguimiento a los eventuales impactos que se puedan presentar en los ecosistemas, como consecuencia de intervenciones de origen antrópico (Brinson et al., 1997). En este caso, se deberán utilizar otras técnicas disponibles en la literatura técnica especializada para la clasificación hidromorfológica de los cuerpos lénticos bajo estudio (e.g. Brinson, 1993; Smith et al., 1995; Brinson et al., 1997).

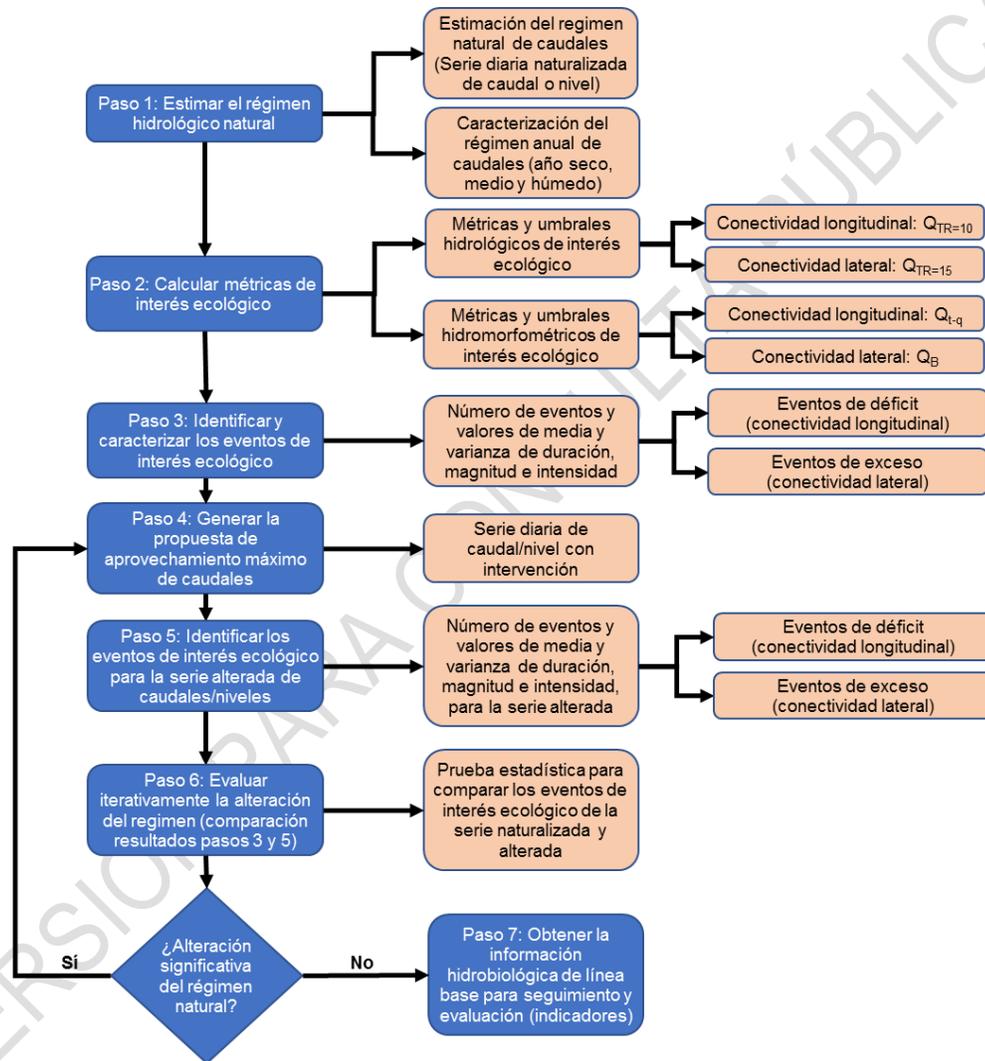
De manera complementaria, es válido llevar a cabo la clasificación geomorfológica de cada segmento utilizando diferentes criterios o índices en función de la disponibilidad de información, el tipo de cuerpo de agua estudiado (lótico o léntico) y la escala de trabajo. De cualquier forma, el objetivo de la clasificación geomorfológica es facilitar la identificación de las funciones ecológicas vinculadas al régimen natural de flujo o la respuesta ecológica esperada frente a la alteración del régimen de caudales o niveles.

Paso 3: Definir la estrategia de levantamiento de información, de manera que se maximice el aprovechamiento de los datos y recursos disponibles. Este paso se explica detalladamente en el numeral 3.1.3 (Criterios y métodos para el desarrollo del nivel 1) y corresponde al conjunto de actividades que se deben llevar a cabo antes del cálculo del régimen de caudales ambientales.

2.1.2 Fase 2: Estimación del caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico

Como resultado de esta fase, se determina el rango de variabilidad del régimen de caudales requerido para mantener la salud de los ecosistemas acuáticos, obteniendo así el régimen de caudales ambientales. Los pasos que se deben seguir se representan esquemáticamente en la Figura 4, indicando igualmente los resultados esperados al final de cada paso. Los métodos de referencia correspondientes se explican con mayor detalle

en la sección 3.2. Es importante mencionar que la variable fundamental para el caso de cuerpos de agua lóticos es el caudal, mientras que para los cuerpos de agua lénticos es el nivel o volumen. Por lo tanto, cada vez que se haga referencia a series de caudal, entiéndase que corresponde a arroyos, quebradas o ríos, mientras que las series de nivel o volumen hacen referencia a cuerpos de agua como lagos, lagunas, embalses, ciénagas o sistemas de agua con aguas relativamente quietas (lénticos) en general. No obstante, debe tenerse en cuenta que el análisis de los cuerpos de agua lénticos es integral, por lo que se deben considerar los principales cuerpos lóticos aferentes (Yang y Mao, 2011).



* Tratándose de régimen natural de flujo, en caso de presentarse un régimen de caudales alterado (ver numeral 1.3 - Definiciones) la serie debe restaurarse a condiciones naturales sin la alteración para tener en cuenta las condiciones de referencia.

Figura 4 Diagrama de flujo para la aplicación del componente de análisis de funcionamiento ecológico

Adicionalmente, se resalta que el proceso de estimación del régimen de caudales ambientales incluye la evaluación iterativa de los eventos de interés ecológico identificados para la serie natural (o naturalizada) y para la serie alterada de caudales. La identificación

de dichos eventos parte de la estimación de una serie de métricas de interés ecológico que permiten identificar eventos, de déficit y de exceso, de importancia para los ecosistemas. En la presente guía se proponen cuatro métricas de interés ecológico (ver sección 3.2.2 del presente documento): dos hidrológicas y dos hidromorfométricas, las cuales han sido aplicadas y probadas para cuerpos de agua lóticos (Minambiente – CORNARE, 2016). Para el caso de cuerpos de agua lénticos, la selección de las métricas hidromorfométricas de interés ecológico debe tener en cuenta la batimetría y la morfología del cuerpo de agua, así como las posibles condiciones de pérdida de conectividad a lo largo de la red de drenaje y con sistemas lénticos o llanuras inundables.

Para la estimación de caudales ambientales en cuerpos de agua lénticos, se deberán considerar las particularidades de cada caso, considerando su interacción o no con los cuerpos lóticos, y en función de ello aplicar índices, métodos o fórmulas que respondan a la finalidad de cada uno de los pasos presentados en esta guía (por ejemplo, la evaluación de la conectividad espacial del ecosistema acuático).

A continuación, se describe de forma general el desarrollo metodológico de la fase 2:

Paso 1: Estimar el régimen hidrológico natural, es decir, sin alteraciones, por lo que en la mayoría de los casos se requiere la "naturalización" o simulación de las condiciones de régimen sin alteración. Para ello, es necesario seleccionar e implementar las técnicas hidrológicas más idóneas en función de la disponibilidad de información y de las características de la cuenca hidrográfica correspondiente (geología, coberturas de vegetación, tipos de suelo, condiciones hidrolimáticas, etc.). Asimismo, el alcance del análisis de alteración hidrológica dependerá del estado de conservación de la cuenca hidrográfica. En este paso se debe aplicar un protocolo robusto de modelación hidrológica, previendo la generación de series diarias de mínimo 15 años de longitud.

Paso 2: Calcular métricas de interés ecológico. Para este paso se deben desarrollar las siguientes actividades:

- a. Calcular las métricas hidrológicas de interés ecológico a partir de la información de series de caudales o niveles registrados en estaciones hidrológicas (preferiblemente limnigráficas) o de los resultados de modelación hidrológica. Se deberán considerar como mínimo dos métricas básicas que corresponden al caudal mínimo con período de retorno de 10 años, el cual tiene una importancia en el funcionamiento del ecosistema relacionada con el control de especies invasoras y la generación de condiciones favorables de hábitat para especies nativas, y el caudal máximo con período de retorno de 15 años, el cual está vinculado a la conectividad lateral del río con sus planicies inundables u otros cuerpos de agua, el mantenimiento de la funcionalidad de sus rondas hídricas, el transporte de sedimentos, madera, nutrientes y materia orgánica, el lavado del cauce y la formación de nuevos hábitats.
- b. Calcular las métricas hidromorfométricas de interés ecológico, derivadas de la caracterización geomorfológica y de la geometría hidráulica. Se deberán considerar como mínimo dos métricas básicas: el caudal Q_{t-q} para mantener la conectividad longitudinal en el sistema fluvial y el caudal Q_B de banca llena, por encima del cual se garantiza la conectividad lateral entre el cauce principal y sus planicies de inundación o la fuerza tractiva requerida para el transporte de sedimentos y material orgánico. Dichas métricas se pueden obtener de relaciones disponibles en la literatura u otros estudios para algunos tipos

morfológicos, de información obtenida en campo para secciones topobatemétricas y de resultados de modelación hidráulica.

Paso 3: Identificar y caracterizar los eventos de interés ecológico del régimen hidrológico natural (o naturalizado), los cuales se determinan comparando las series generadas u observadas de caudales o niveles diarios, con las métricas obtenidas en el paso anterior.

Para cualquier tipo de cuerpo de agua se deben considerar, como mínimo, dos tipos de eventos: uno de exceso (conectividad lateral) y otro de déficit (control de especies y conectividad longitudinal o espacial). Al primer tipo de evento están vinculadas las métricas de caudales o niveles máximos y de banca llena, y al segundo las métricas de caudales o niveles mínimos y de conectividad longitudinal o espacial. A cada evento se le deben estimar sus atributos de magnitud (área bajo la curva de la diferencia absoluta entre la serie de caudales o niveles diarios y la métrica respectiva), duración e intensidad (magnitud dividida entre la duración; representa la tasa de cambio a la escala temporal de referencia). Del conjunto obtenido de eventos, se debe calcular el número total, la media y la varianza para cada atributo mencionado.

Paso 4: Generar la propuesta de aprovechamiento máximo de caudales, la cual se puede definir de forma genérica a escala regional al proponer porcentajes de aprovechamiento mes a mes con respecto al caudal medio mensual a lo largo del cuerpo de agua.

Dependiendo de la regla de aprovechamiento, se calcula la respectiva serie de caudales o niveles con intervención a lo largo del cuerpo de agua, recorriendo la red de drenaje desde aguas arriba, y sustrayendo a cada valor diario los caudales de aprovechamiento definidos.

Nota: para el caso en que el caudal de aprovechamiento sea mayor al caudal diario, deberá dejarse por defecto el caudal diario (no se permitiría aprovechamiento para ese día).

Paso 5: Identificar los eventos de interés ecológico para la serie alterada de caudales o niveles, aplicando las mismas métricas y el procedimiento indicado en el tercer paso, obteniendo así una nueva población de n eventos con valores promedio y varianza de los atributos de magnitud, duración e intensidad.

Paso 6: Evaluar iterativamente la alteración del régimen hidrológico natural a partir de los resultados de los pasos 3 y 5, de manera que la propuesta de aprovechamiento máximo de caudales no induzca la alteración significativa del régimen de caudales o niveles. Como referencia, se propone una prueba t para muestras independientes. El objetivo de la prueba estadística es obtener la regla de aprovechamiento límite para que las poblaciones derivadas de los pasos 3 y 5 sean estadísticamente similares. Como resultado, se obtendrá el régimen de caudales ambientales.

Nota: Los pasos 2 al 6 son el referente mínimo para la evaluación iterativa de la alteración del régimen natural de flujo con el propósito de estimar el régimen de caudales ambientales, considerando métricas explícitas asociadas a características hidrológicas y geomorfológicas. No obstante, en función de la disponibilidad y fiabilidad de la información disponible, se podrán aplicar, de forma complementaria, otras

aproximaciones iterativas e índices para la definición de caudales ambientales (e.g. Abouali et al., 2016a, 2016b), previendo el uso de criterios objetivos de desempeño, utilizando aproximaciones estadísticas y mediciones representativas en campo.

Paso 7: Obtener la información hidrobiológica de línea base que servirá como referencia para el seguimiento a la implementación de los caudales ambientales, lo cual sirve para:

- a. Identificar preliminarmente el efecto de la disponibilidad y calidad del hábitat sobre las comunidades biológicas bioindicadoras⁶ o representativas⁷. En esta guía se presenta como referencia el índice de idoneidad del hábitat multiespecies – MHSI, que utiliza información de abundancia y biomasa de peces. De manera complementaria se puede involucrar en el análisis la información de macroinvertebrados y perifiton, así como de vegetación de ribera. La información de macroinvertebrados y perifiton se obtiene desde las campañas de monitoreo (numeral 3.1.3.2), y la información del estado de la vegetación de ribera se obtiene desde la caracterización de las unidades morfológicas (numeral 3.1.2).
- b. Establecer criterios de calidad del agua adicionales, relacionados con el normal funcionamiento del ciclo biológico de las especies, que pueden utilizarse para la fase siguiente de evaluación (ver sección 2.1.3) sobre la base del paso anterior.
- c. Formular la respectiva estrategia de adquisición sistemática de información hidrobiológica durante el seguimiento a la implementación de los caudales ambientales.
- d. A largo plazo, la información obtenida durante el diagnóstico y el seguimiento aportará datos para análisis más robustos con los cuales se podrán verificar las hipótesis planteadas en los métodos aplicados para el cálculo del caudal ambiental.

2.1.3 Fase 3: Evaluación del caudal ambiental considerando servicios ecosistémicos

Este componente de análisis está orientado a la evaluación de los servicios ecosistémicos provistos por los cuerpos de agua objeto de estudio, haciendo énfasis en la calidad del agua requerida para mantener y permitir los usos actuales y potenciales del recurso hídrico. Dicha evaluación está sujeta al estado actual de intervención y su afectación acumulativa sobre la hidrología (alteración del régimen hidrológico natural), la ecología (afectación de especies representativas) y la calidad del agua (cumplimiento de criterios de calidad del agua asociados a los usos del agua)

La evaluación efectuada en materia de *servicios ecosistémicos* apunta a generar algunos de los elementos técnicos necesarios para definir las medidas de gestión que deben implementarse para alcanzar una condición de desarrollo sostenible, dependiendo de la condición ecológica deseada e identificada por la Autoridad Ambiental competente, para el cuerpo de agua, lo cual es materia de desarrollo del nivel 2 de la estructura metodológica.

⁶ Indicador biológico es aquel cuya presencia y abundancia señalan algún proceso o estado del sistema en el cual habita, en especial si tales fenómenos constituyen un problema de manejo del recurso hídrico (Pinilla, G., 2000. Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia: compilación bibliográfica. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá D.C., Colombia).

⁷ Entiéndase por especie representativa aquellas especies de peces que se encuentran en estatus especial de conservación (en alguna categoría de riesgo), que sean endémicas o que sean migratorias. Para el caso de especies silvestres con categoría de amenaza, se tiene la Resolución 192 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, o la norma que la modifique o sustituya.

La Fase 3 se desarrolla de acuerdo con el diagrama de flujo presentado en la Figura 5.

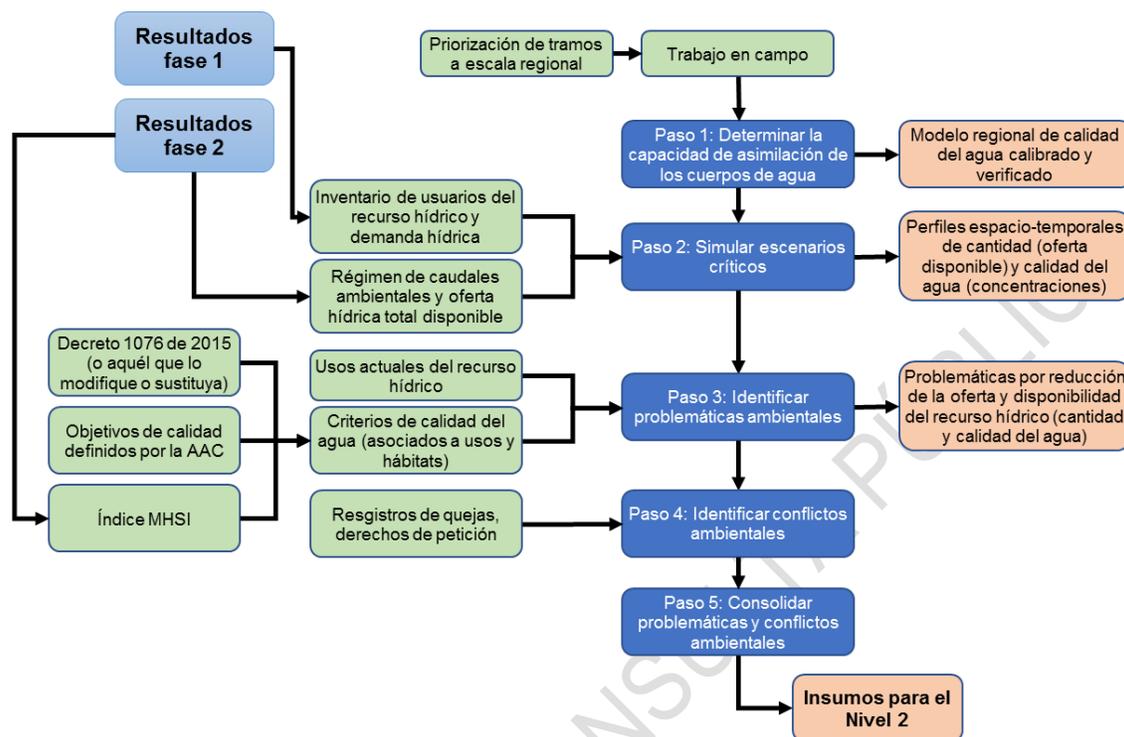


Figura 5 Diagrama de flujo para el desarrollo del componente de análisis de servicios ecosistémicos

Paso 1: Determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua. El desarrollo del componente de calidad del agua está determinado por la aplicación de un modelo de calidad del agua implementado a la escala de trabajo. Se debe tener en cuenta que la implementación del modelo implica determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua de interés, en su respectiva cuenca hidrográfica. A escala regional, se deben priorizar los tramos en los cuales se obtendrá información, de acuerdo con sus características geomorfológicas y recepción de aguas residuales. El modelo deberá aplicarse integralmente con el propósito de considerar efectos acumulativos.

Paso 2: Simular escenarios críticos. Con el modelo de calidad del agua calibrado y verificado (respecto a sus hipótesis de partida e implementación matemática y computacional), se debe llevar a cabo la simulación de escenarios que contemplen condiciones extremas de clima, cargas contaminantes y demandas de usuarios.

En primer lugar, se deberá considerar la condición actual de intervención de mayor presión sobre el recurso hídrico (aprovechando la información de usuarios del recurso hídrico). Esta condición, depende del tipo de cargas contaminantes dominantes. En cuerpos de agua afectados principalmente por vertimientos puntuales, dicha condición crítica suele considerar caudales o niveles mínimos en los cuerpos de agua receptores (obtenidos a partir del régimen de caudales ambientales estimado en la fase 2) y carga máxima en los vertimientos. En cuerpos de agua afectados principalmente por fuentes difusas de contaminación (e.g. arrastre de agroquímicos desde áreas cultivadas) la condición crítica suele ser el momento de las primeras lluvias de la respectiva temporada húmeda en la cual se lavan la mayoría de compuestos que se encuentran

en la matriz de suelo (e.g., se puede considerar como condición de carga máxima el caso de la distribución homogénea de la máxima cantidad esperada de agroquímicos en el área cultivada y el evento promedio característico de máxima precipitación anual en 24 horas). Adicionalmente se deberán simular las condiciones críticas por afectaciones de variabilidad climática en los periodos húmedos y secos más intensos registrados (e.g., La Niña y El Niño, respectivamente). De manera complementaria, se debe analizar la oferta hídrica total disponible respecto a sus demandas acumuladas para cada punto de interés del cuerpo de agua, con el propósito de identificar problemáticas ambientales asociadas a la disponibilidad del recurso hídrico en términos de cantidad.

Paso 3: Identificar problemáticas ambientales: La problemática ambiental surge cuando se dan condiciones particulares de cantidad y calidad del agua que no permiten la prestación de sus servicios ecosistémicos. Por lo tanto, para la identificación de problemáticas ambientales, se deben usar los resultados de la modelación de escenarios críticos descrita en el paso 2, junto con la información de usos, criterios de calidad y servicios ecosistémicos recopilada para el cuerpo de agua. Igualmente, se deberá evaluar si la calidad del agua es apta para los usos asignados y para las especies hidrobiológicas representativas en el ecosistema acuático. Cuando la concentración de un determinante de calidad del agua en particular no cumpla con los estándares de calidad del agua, se está identificando una problemática ambiental, la cual será materia de análisis en el nivel 2 de la guía.

Paso 4: Identificar conflictos ambientales. De forma complementaria, se debe revisar la información relativa a quejas y demás manifestaciones formales de los usuarios frente a la Autoridad Ambiental en relación con los servicios ecosistémicos identificados y el uso y aprovechamiento del recurso hídrico en el cuerpo de agua, lo cual determina la existencia de conflictos ambientales.

Paso 5: Consolidar problemáticas y conflictos ambientales. Finalmente, con la identificación de problemáticas y conflictos ambientales, se debe preparar un consolidado que facilitará la respectiva formulación de las medidas de gestión requeridas, con sus respectivos responsables, para alcanzar o mantener el caudal ambiental estimado y la condición ecológica trazada por la Autoridad Ambiental competente, lo cual es materia de desarrollo del nivel 2 del marco metodológico. Se podrán aplicar estrategias complementarias para la identificación de problemáticas y conflictos asociados a la prestación de los servicios provistos por parte de los ecosistemas acuáticos en consideración.

2.2 NIVEL 2: GESTIÓN

El nivel 2 tiene como objetivo establecer los lineamientos para la gestión integral del recurso hídrico, de manera que se alcancen o mantengan las condiciones de régimen y calidad del agua, vinculadas al caudal ambiental estimado en el nivel 1. Dado el estado actual de intervención del cuerpo de agua, el cual es evaluado en la fase 3 del nivel 1, en algunos casos es necesario formular e implementar medidas de gestión complementarias a la exigencia de un régimen de caudales en particular.

La evaluación del caudal ambiental, bajo el estado actual de intervención, permitirá identificar problemáticas ambientales que aportarán elementos de decisión respecto a la necesidad de llevar a cabo medidas de gestión del recurso hídrico como las que se presentan a continuación. Dependiendo de las problemáticas ambientales identificadas, se

podrá priorizar la realización de: i) reglamentación del uso de las aguas y/o declaratoria de agotamientos o de reservas si la demanda supera la oferta hídrica disponible; ii) reglamentación de vertimientos si calidad del cuerpo de agua no es idónea para los usos actuales y potenciales. Cuando la problemática, por cantidad y/o calidad, esté asociada a un usuario en particular se deberá revisar el respectivo permiso ambiental que aplique (e.g. concesión de agua y/o permiso de vertimiento).

De manera complementaria, la Autoridad Ambiental decidirá sobre las medidas de gestión adicionales que debe adelantar para restaurar, rehabilitar o recuperar el ecosistema acuático, en función de la condición ecológica deseada y en el marco de los instrumentos de planificación o administración de los recursos naturales renovables. Por ejemplo, una de las medidas más importantes para restaurar ecosistemas acuáticos degradados es la restauración de los principales atributos del régimen hidrológico relacionados con los ciclos biológicos de las especies, por lo que se deberá intervenir sobre los principales agentes de disturbio.

En todos los casos se debe presentar la estrategia de seguimiento y monitoreo del caudal ambiental. Dicha estrategia debe incorporar variables físico-químicas e hidrobiológicas, conforme al diagnóstico ecológico adelantado y las hipótesis utilizadas como referencia, respecto a los atributos del régimen hidrológico y la disponibilidad y calidad del hábitat.

La Autoridad Ambiental competente, en el marco de su ejercicio de control, deberá considerar, como mínimo, lo siguiente: a) la medición continua (a escala subsidiaria) de caudales o niveles en el cuerpo de agua, para el caso de proyectos objeto de licenciamiento ambiental que involucran concesiones; b) la orientación técnica del tamaño y localización de la estructura de captación, para el caso de permisos de concesiones que no están dentro de un proceso de licenciamiento ambiental.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, este segundo nivel hace parte del alcance de otros instrumentos de gestión del recurso hídrico y, por tanto, no es sujeto de desarrollo metodológico en la presente guía.

3 CRITERIOS Y METODOS PARA EL DESARROLLO DEL NIVEL 1

En este capítulo se presentan los criterios para el desarrollo de la Fase 1 del nivel 1 de la metodología propuesta (Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua). Así mismo se presentan los requisitos mínimos de información, los criterios para realizar la clasificación hidromorfométrica a diferentes escalas (cuena, unidad de paisaje, segmento, tramos, unidad morfológica) de los cuerpos de agua y las estrategias básicas de adquisición de información, con el fin de abordar el desarrollo metodológico para la estimación del caudal ambiental.

3.1 FASE 1: LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CUERPO DE AGUA

3.1.1 Paso 1: Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio deberá representarse, como mínimo, en un mapa de acuerdo con las escalas de trabajo establecidas para los niveles definidos en la estructura hidrográfica para la planificación y manejo del recurso hídrico a los que se refiere el Decreto 1076 de 2015.

La escala se define en función tanto del cuerpo de agua de estudio como del respectivo instrumento de gestión integral del recurso hídrico; para el caso específico de los POMCA, PORH y reglamentaciones del uso de las aguas y de vertimientos, se debe trabajar, como mínimo, a una escala 1:25.000⁸; para el caso de los planes de manejo ambiental de microcuencas la estimación de caudales ambientales (e.g. Planes de Manejo Ambiental de microcuencas abastecedoras), la escala de trabajo, como mínimo, será a 1:10.000⁹.

Para la definición del área de estudio y la respectiva red de drenaje en casos diferentes a los mencionados en el párrafo anterior, esta corresponderá, por lo menos, al nivel II subsiguiente al de la zona hidrográfica en donde se encuentre el cuerpo de agua de interés, de acuerdo con la zonificación hidrográfica establecida por la Autoridad Ambiental competente según las orientaciones dadas en el documento de *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia* (IDEAM, 2013). La escala de trabajo, como mínimo, será a 1:25.000.

La información cartográfica deberá partir de las planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC, las cuales se deberán complementar con otra información cartográfica disponible, fotografías aéreas y/o información de sensores remotos con que cuente la Autoridad Ambiental competente. En el caso de que la Autoridad Ambiental competente disponga de un modelo de elevación digital adecuado para la escala de trabajo definida, podrá utilizarlo para la delimitación de las áreas de estudio.

Con el fin de contar con información geoespacial a partir de la cual se puedan representar topográficamente el área de estudio y su correspondiente red hídrica superficial, se deberá adquirir o construir mediante herramientas SIG un Modelo Digital de Elevación – MDE del área de estudio, y obtener la representación *vector*¹⁰ y/o *raster*¹¹ de la red de drenaje de la

⁸ Artículo 2.2.3.1.5.4 del Decreto 1076 de 2015.

⁹ Artículo 2.2.3.1.10.3. del Decreto 1076 de 2015.

¹⁰ Formato para representar objetos geográficos mediante puntos, líneas o polígonos. A este formato corresponden archivos del tipo *.shp* y *.dxf*, compatibles con sistemas de información geográfica.

¹¹ Formato para representar objetos geográficos en un formato matricial. Son denominados comúnmente mapas o *grids*. Asociados a este tipo de formato pueden mencionarse las extensiones *.asc*, *.tif*, *.grd* y *.bgd*.

misma. En la Tabla 1 se listan algunas fuentes de información a partir de las cuales es posible obtener un MDE y su correspondiente red de drenaje.

Tabla 1 Algunas fuentes de información para la adquisición de modelos digitales de elevación

Fuente	Características
Misión satelital ASTER (<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>) de la NASA (http://asterweb.jpl.nasa.gov/)	→ Modelos digitales de elevación con resolución de aproximadamente 30 m y acceso gratuito.
Misión satelital SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) de la NASA (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)	→ Modelos digitales de elevación con resolución de aproximadamente 90 m y acceso gratuito. → Modelos digitales de elevación con resolución de aproximadamente 30 m y acceso a través de Corporaciones Autónomas Regionales o a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-
Productos <i>HydroSHEDS</i> (http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php)	→ <i>HydroSHEDS</i> ofrece una serie de conjuntos de datos georreferenciados (<i>vector</i> y <i>raster</i>) a varias escalas, incluyendo redes de drenaje, divisorias de aguas de grandes cuencas hidrográficas (ej. Magdalena, Cauca, Amazonas), direcciones de drenaje, y las acumulaciones de flujo. <i>HydroSHEDS</i> se basa en datos de elevación de alta resolución obtenidos durante un vuelo del transbordador espacial para la misión SRTM. Tomado de (http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php)
Otras fuentes	- Modelos digitales de elevación obtenidos en forma particular por la Autoridad Ambiental competente. - Rasterización de curvas de nivel 1:25000 o de mayor detalle con las que cuente la Autoridad Ambiental Competente. .

La selección de un modelo de elevación está relacionada con el tipo de aplicación y los objetivos de un proyecto (Hengl, 2006), sin embargo, algunos estudios permiten establecer la resolución (tamaño de píxel) que dichos modelos deben tener de tal forma que se lleven a cabo estimaciones confiables y representativas de atributos como el área de la cuenca y la pendiente y la longitud de las corrientes de agua superficial, todas ellas necesarias en pasos subsiguientes (ver Tabla 2).

Tabla 2 Algunas consideraciones para la selección del tamaño de píxel o resolución de un modelo digital de elevación

Consideración	Tamaño de píxel	Referencia
Cuando un MDE es construido a partir de curvas de nivel (rasterización), se requiere que el modelo obtenido represente adecuadamente la variabilidad de elevaciones	Un tamaño de píxel adecuado DX , puede obtenerse como: $DX = \frac{A}{2 \sum L}$ Donde A es el tamaño total del área de estudio y L es la longitud total acumulada de todos los contornos digitalizados.	Hengl, T. (2006). <i>Finding the right pixel size. Computers & Geosciences</i> , 32(9), 1283-1298.
Tamaño de píxel apropiado para la simulación de procesos geomórficos e hidrológicos.	Luego de análisis realizados mediante índices topográficos, se encuentra que una resolución de 10 m es una resolución adecuada para representar procesos físicos en ladera, favoreciendo, a su vez, un adecuado desempeño computacional.	Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). <i>Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water resources research</i> , 30(4), 1019-1028.

Consideración	Tamaño de píxel	Referencia
Estimación confiable de descriptores morfológicos de corrientes: sinuosidad, longitud de onda, grado de confinamiento, ancho del valle.	En sectores de la red de drenaje donde el ancho de corriente es W , un MDE con tamaño de píxel entre 1 a 4 veces W permite hacer estimaciones morfológicas confiables.	Jiménez, M., 2015. Morphological representation of drainage networks, implications on solute transport and distributed simulation at the basin scale. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

3.1.2 Paso 2: Definición de unidades de análisis del cuerpo de agua

A través de una cuenca hidrográfica es posible encontrar una gran diversidad de paisajes fluviales o configuraciones morfológicas como respuesta a la interrelación entre procesos climatológicos y biogeofísicos, por ello la existencia de diferentes tipologías de cuerpos de agua y sus interacciones.

3.1.2.1 Definición de unidades de análisis en cuerpos de agua lóticos

Para el caso de sistemas lóticos, las configuraciones morfológicas son escalables y replicables para diferentes latitudes, ya que son una expresión de la interrelación de procesos similares entre el ciclo del agua, el de sedimentos, y otros ciclos, a diferentes escalas espaciales y temporales. En la Figura 6 se ilustran, a manera de ejemplo, algunos de los patrones fluviales que pueden encontrarse en el territorio colombiano, lo cual sugiere que pese a las diferencias de los forzamientos climáticos y de las características físicas de las cuencas hidrográficas de otros lugares del mundo, en comparación con las de Colombia, las corrientes superficiales tienen puntos en común en la forma en como éstas surgen como respuesta a la interrelación entre dichos factores.



Figura 6 Patrones fluviales característicos de ríos colombianos. Fuente: Google Earth

En esta guía se introduce la clasificación morfológica de las corrientes de agua superficial como el eje articulador de los diferentes componentes de la estructura metodológica para la estimación de caudales ambientales. Lo anterior, teniendo en cuenta que la configuración morfológica de una corriente permite diferenciar la forma en que ocurren procesos morfodinámicos. Asimismo, la morfología del cauce define la estructura física del hábitat fluvial la cual, junto con el régimen de caudales, determina la idoneidad de dicho hábitat para el sustento de la biodiversidad y su provisión de servicios ecosistémicos.

Por lo anterior, es necesario contar con una clasificación morfológica robusta y escalable, que pueda ser aplicable a nivel nacional, con el fin de identificar, caracterizar y analizar las

diferentes unidades morfológicas de los cuerpos de agua, y así establecer un vínculo entre las características físicas y biológicas de los mismos (Belletti et al., 2017).

Con el fin de contar con una clasificación que ha sido aplicada y verificada en diversos ambientes a nivel mundial, en esta guía se ha adoptado el Sistema de Identificación y Clasificación de Unidades Morfológicas (GUS, por sus siglas en inglés) desarrollado por Rinaldi et al. (2015), como parte del proyecto REFORM (*REstoring rivers FOR effective catchment Management*), financiado por la Comisión Europea. Este método de clasificación tiene como objetivo principal la caracterización de los hábitats físicos y la morfología de los ríos, y fue diseñado de forma jerárquica, con miras a ser flexible y adaptable de acuerdo con los objetivos de la clasificación y la información disponible (Belletti et al., 2017).

A continuación, se presenta una descripción general del esquema de clasificación propuesto, incluyendo la definición de cada uno de los componentes del marco jerárquico respectivo. Estos componentes son el eje articulador de la estructura metodológica propuesta para la estimación de caudales ambientales, por lo que estas definiciones serán la base del desarrollo de las respectivas fases de la metodología.

La Figura 7 presenta un esquema de los componentes de la estructura jerárquica propuesta para la clasificación geomorfológica de ríos desde la escala de segmento, considerando que existen dos niveles jerárquicos superiores: unidad de paisaje y cuenca hidrográfica, respectivamente. El componente fundamental para el análisis y clasificación geomorfológica en el marco jerárquico propuesto consiste en las unidades morfológicas, las cuales representan las unidades que permiten caracterizar la morfología de los ríos a escala de tramo (Belletti et al., 2017).

Una de las ventajas de la clasificación propuesta consiste en su utilidad para establecer enlaces entre las condiciones físicas y biológicas de los cuerpos de agua, como se describe a continuación. Las escalas espaciales correspondientes a las unidades morfológicas y menores (unidades hidráulicas y elementos de río) son las más apropiadas para realizar análisis de la presencia y diversidad de hábitats físicos para especies hidrobiológicas (Rinaldi et al., 2015). Generalmente, las unidades morfológicas e hidráulicas se asocian a la escala de meso-hábitat, mientras que los elementos de río usualmente coinciden con la escala de micro-hábitat. Por lo anterior, para la estimación del régimen de caudales ambientales en un río, es de especial interés delimitar y caracterizar los segmentos, tramos y las unidades morfológicas de los cuerpos de agua.

Algunas ventajas adicionales de esta metodología, incluyen los pocos requerimientos de información para su implementación (se puede realizar a partir de análisis de sensores remotos, complementado con verificaciones de campo), así como sus múltiples aplicaciones, no sólo como herramienta de caracterización, sino también para el análisis de la calidad morfológica de los ríos, y como herramienta de monitoreo y evaluación de los efectos de intervenciones antrópicas sobre la morfología, y su respectivo vínculo con la ecología (Rinaldi et al., 2015).

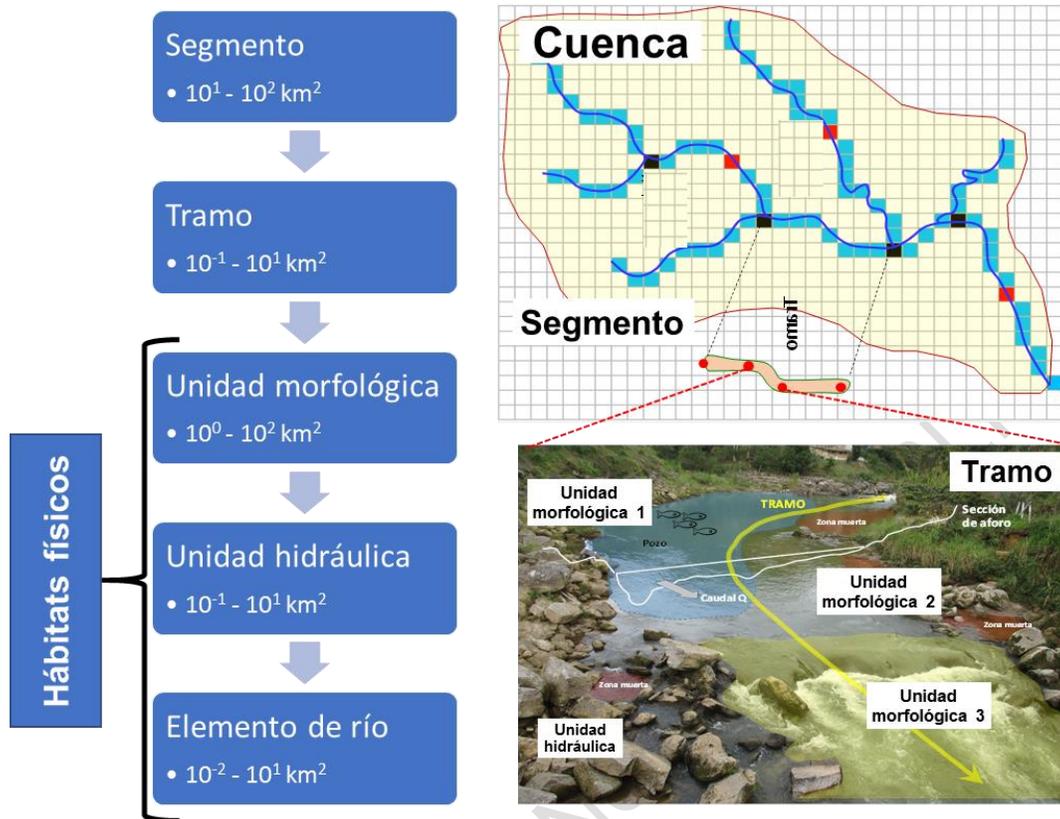


Figura 7. Unidades espaciales propuestas para la clasificación geomorfológica de ríos. Adaptado de Belleli et al. (2017)

3.1.2.1.1 Segmento

Longitud de un río con condiciones similares de energía y escala del valle, delimitados por características como cambios significativos de la pendiente del valle, confluencia de tributarios principales, cambios topográficos abruptos (barreras naturales como caídas o artificiales como presas), valles de confinamiento, aportes laterales significativos de sedimentos, entre otros factores.

3.1.2.1.2 Tramo

Longitud de un río a lo largo de la cual sus condiciones de frontera se mantienen relativamente uniformes. Por lo anterior, en un mismo tramo de río se considera que las interacciones entre procesos y formas se mantienen relativamente constantes.

Cada tramo de río se encuentra conformado por un conjunto de unidades morfológicas, con arreglos similares en tramos de río de un mismo tipo morfológico (e.g., sinuosos o anastomosados). Factores actuantes a escalas de tramo y mayores, como la pendiente, el tipo de material del lecho y la configuración del valle, tienen influencia sobre los caudales líquidos y sólidos que controlan las unidades morfológicas existentes. Por lo anterior, las características de los hábitats físicos y las condiciones bióticas asociadas se encuentran fuertemente influenciadas por factores físicos que ocurren a escala de tramo, los cuales, a su vez, se ven condicionados por los procesos que ocurren a escala de cuenca y de segmento (Rinaldi et al., 2015).

3.1.2.1.3 Unidad morfológica

También conocidas como unidades geomórficas, sub-tramos o meso-hábitats, las unidades morfológicas son los componentes fundamentales de cada tramo de río, y corresponden a áreas del río con morfologías relativamente uniformes, generadas por la erosión o depósito de sedimentos, o por lechos rocosos (e.g., cascadas, escalón-pozo, pozo-cruce, etc.). Algunas unidades morfológicas también se encuentran compuestas por elementos de vegetación, viva y muerta (e.g., troncos de árboles). Las unidades morfológicas constituyen las estructuras físicas básicas que componen el hábitat de especies en los ecosistemas acuáticos, y también proporcionan hábitats temporales a algunas especies, incluyendo refugio ante alteraciones o predadores, zonas de desove, etc. Por lo anterior, un análisis las unidades morfológicas existentes en un tramo de río arroja información sobre el rango de hábitats presentes.

En términos generales, las unidades morfológicas representan la manifestación física del efecto combinado de los caudales líquidos y el transporte de sedimentos, influenciados por factores que actúan a escala de tramo y mayores (Belletti et al., 2017). Por lo anterior, los tramos del mismo tipo morfológico (por ejemplo, sinuosos o anastomosados) usualmente contienen arreglos de unidades morfológicas similares.

Al desplazarse en el sentido del flujo a lo largo de un río, se puede observar la presencia de diferentes unidades morfológicas, como consecuencia de cambios en las condiciones de frontera, como las características del valle, la pendiente longitudinal del cauce, las magnitudes de caudal, el tamaño de los sedimentos, etc. Es así, como en las partes altas de la cuenca, en las que predominan las altas pendientes, predominan unidades de tipo erosivo, como caídas y escalones rocosos; por su parte, en las partes bajas usualmente predominan unidades de depósito como barras e islas.

3.1.2.1.4 Unidad hidráulica

Sectores de río con características relativamente homogéneas en el espacio, en términos de flujo superficial y características de los sedimentos. Una unidad morfológica puede contener una o varias unidades hidráulicas, cada una de las cuales puede estar conformada por un conjunto de elementos de río, como sedimentos, plantas, troncos, etc.

3.1.2.1.5 Elemento de río

Mínima unidad espacial de la clasificación geomorfológica propuesta, coincidente con la escala de microhábitats. Los elementos de río corresponden a conjuntos de partículas de sedimentos, vegetación, trozos de madera, ente otros.

3.1.2.2 Definición de unidades de análisis en cuerpos de agua lénticos

Para el caso de sistemas lénticos, se orienta una clasificación basada en el grado de interacción de los mismos con los sistemas lóticos para diferentes condiciones biogeográficas e hidroclimáticas.

3.1.2.2.1 Sistemas lénticos interiores

Sistemas que tienen un espejo de agua permanente o que se mantienen saturados la mayor parte del año hidrológico. Pueden ser aislados, como algunos lagos y lagunas de alta montaña, o presentarse en forma de sistemas interconectados entre sí y con los ríos, los cuales son conocidos como complejos de humedales.

- **Lagos y lagunas**

Sistemas que se encuentran generalmente en la región Andina del país y su clasificación depende del proceso que les dio origen. Los hay de origen glaciar en la alta montaña andina

y la Sierra Nevada de Santa Marta, y los generados por depresiones morfológicas, por razones tectónicas o por obstrucciones geológicas permanentes de cauces de ríos.

La forma de estos tipos de cuerpos de agua depende principalmente de su geofoma y de las condiciones de aguas máximas siendo determinante su origen y el relieve circundante. Algunos de estos cuerpos de agua pueden tener en sus alrededores acumulaciones de sedimentos lacustres fácilmente reconocibles, por su baja o nula inclinación y por su composición.

- **Afloramientos de nivel freático**

Conocidos en algunas regiones del país como "ojos de agua", representan una importante, y en ocasiones la única fuente de abastecimiento local. Ocurren principalmente en las zonas de sabana de la región Caribe y de la Orinoquia. Son sistemas de pequeñas dimensiones, existentes en las áreas de cambio de pendiente de pequeñas serranías o sistemas de colinas donde se recarga el acuífero que los alimenta. Desde el punto de vista morfológico, la existencia de suelos saturados, o que lo han estado, en la época de lluvias es un rasgo que contribuye a identificar su extensión.

3.1.2.2.2 Sistemas lénticos relacionados con la dinámica fluvial

- **Ciénagas**

Sistemas de poca profundidad, y generalmente asociados a la dinámica fluvial. Se pueden encontrar como cuerpos de agua individuales, separados en las llanuras de inundación de ríos de planicie, aunque lo más frecuente es encontrarlas como conjuntos o complejos interconectados entre sí y con el río por cauces de diverso tipo, mediante los cuales reciben y entregan agua, sedimentos, nutrientes y contaminantes al y desde el sistema principal. Estos complejos tienen funciones hidrológicas y geomorfológicas que responden a condiciones particulares como bajos gradientes y grandes caudales, razón por la cual actúan como reguladoras del sistema hídrico y hábitat físico para el recurso hidrobiológico. En especial, los peces desarrollan allí una fase clave de su ciclo biológico.

Por su dinámica, son cambiantes con el tiempo por estar sometidos a procesos naturales de inundación y sedimentación. Este tipo de sistemas lénticos tiene ciclos de vida que dependen de variables naturales y antrópicas por lo que es difícil decir cuáles de éstos permanecerán más en el tiempo, cuáles se colmatarán de sedimentos, y cuál nuevo aparecerá como consecuencia de la dinámica de los procesos que en estas zonas ocurre.

Por las condiciones anotadas, estos sistemas o "complejos" adquieren una relevancia mayor como ecosistemas valiosos y como fuente de servicios ecosistémicos para grandes comunidades asentadas en su entorno.

- **Meandros abandonados**

Sistemas que corresponden a antiguos brazos o cauces de ríos sinuosos o anastomosados, pero que debido a la dinámica de estas corrientes, han quedado aislados. Sin embargo, los mismos cumplen un papel importante, pues al encontrarse en la llanura aluvial del río, actúan como reguladores de crecientes, y son indicadores de la amplitud mínima que puede tomar el río en uno de estos eventos.

3.1.2.2.3 Sistemas lénticos relacionados con la dinámica litoral

Sistemas correspondientes al gran sistema marino costero colombiano. Los nombres que se proponen corresponden con una clasificación geomorfológica. Aunque las geofomas costeras pueden tener una amplia variación, se proponen los siguientes términos que pueden agrupar gran parte de las posibles subdivisiones.

- **Lagunas costeras**

Las lagunas costeras ("lagoons" en inglés) son cuerpos de agua separados del océano por alguna barrera como un banco de arena, un arrecife de coral, o una isla barrera. Éstos intercambian ciertas cantidades de agua con el mar cuando las mareas sobrepasan la barrera que los separa y las aguas saladas ingresan a la laguna; tienen suministro de agua dulce proveniente de corrientes y de agua lluvia. Este tipo de cuerpos de agua se considera más común en el mar Caribe por sus condiciones micro mareales.

- **Planicies de Marea**

Cuerpos de agua en litorales de meso o macro mareas, como en el Pacífico colombiano, que se caracterizan por la inundación secular de la marea, que transporta sedimentos finogranulares tipo arena y lodos, que se depositan en las llanuras mareales existentes entre los cauces. Este tipo de cuerpos de agua pueden estar asociados a los márgenes de estuarios, bordes deltaicos o litorales abiertos sometidos a oleajes suaves (French, 2004). Éstos tienen vegetación característica de aguas salobres. Su funcionalidad depende de la interacción entre los cauces de marea y las planicies lodosas, siendo la tipología de vegetación y los suelos rasgos identitarios de sus dinámicas.

3.1.2.3 Procesamiento del Modelo Digital de Elevación

Sobre la base del MDE, el siguiente paso consiste en obtener una discretización topológica de la red de drenaje del área de estudio en segmentos de corriente, como se ilustra en la Figura 8, donde cada segmento se encuentra delimitado por nodos hidrológicos o sitios de confluencia, y a los que puedan asignarse, por lo menos, los siguientes atributos morfométricos:

- Área de la cuenca tributaria
- Pendiente longitudinal del segmento
- Longitud del segmento

De forma complementaria, pueden emplearse metodologías de discretización que incluyan nodos topográficos en la estrategia de delimitación de segmentos (Giles y Franklin, 1998; Jiménez, 2015; Thompson et al. 2008), entendiendo éstos como sitios en los cuales ocurren cambios significativos en la pendiente longitudinal de una corriente, confluencia de principales tributarios, valles de confinamiento y en áreas montañosas, aportes laterales significativos de sedimentos (Gurnell et al., 2015). En particular, la estimación de la pendiente es fundamental en cualquier método de clasificación de corrientes que se emplee y, en un contexto ecológico, dichos sitios pueden representar barreras físicas naturales para la migración de especies ícticas, así como representar una de las causas para la aparición natural de endemismos.

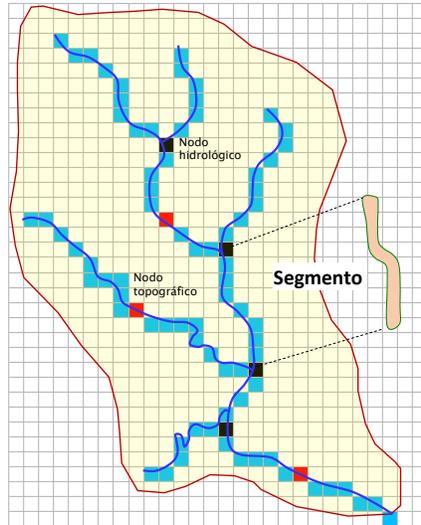


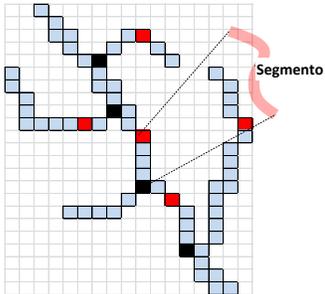
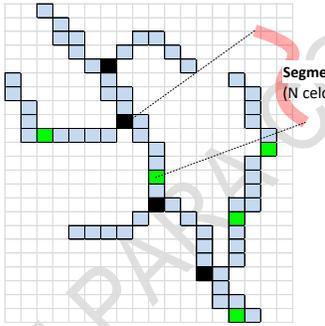
Figura 8 Delimitación de segmentos por confluencias o nodos hidrológicos y/o sitios con cambios significativos de pendiente (nodos topográficos) – Tomada y modificada de Jiménez (2015)

En la Tabla 3 se ilustran estrategias alternativas de segmentación y se señalan sus ventajas y limitaciones, al igual que la disponibilidad de algunas herramientas de referencia de Sistemas de Información Geográfica, las cuales se utilizan para explotar información contenida en el MDE, ya construido o adquirido, tal como se desarrolló en el paso anterior.

Tabla 3 Consideraciones para la segmentación de redes de drenaje

Tipo de segmentación	Esquemmatización	Ventajas	Limitaciones
Delimitación basada en confluencias o nodos hidrológicos		Es la manera más simple y la mayor parte de los sistemas de información geográfica comerciales y gratuitos cuentan con herramienta que permiten identificar sitios de confluencia ¹²	A lo largo de un segmento delimitado únicamente por confluencias o nodos hidrológicos pueden ocurrir cambios significativos de pendiente, lo cual conlleva a estimaciones de pendiente desviadas significativamente de la realidad lo cual conlleva, a su vez, a clasificación de corrientes inadecuadas.

¹² ArcMap (<http://desktop.arcgis.com/es/desktop/>): cuenta con la herramienta Stream Link, disponible en la librería Spatial Analyst Tool → Hydrology. MapWindow GIS (<http://www.mapwindow.org/>): cuenta con la herramienta Watershed Delineation. QGIS (<http://www.qgis.org/en/site/>): posee la herramienta r.watershed – Programa de análisis de cuenca hidrográfica.

Tipo de segmentación	Esquemización	Ventajas	Limitaciones
<p>Delimitación basada en confluencias o nodos hidrológicos, y en la identificación de cambios significativos de pendiente (nodos topográficos)</p>	 <p>El diagrama muestra un flujo que se mueve desde la parte superior izquierda hacia la inferior derecha a través de una cuadrícula de celdas. El flujo está representado por una línea de celdas conectadas. Los segmentos de flujo están delimitados por cambios abruptos en la pendiente, marcados con celdas de color rojo y negro. Una línea roja curva indica un segmento específico del flujo.</p>	<p>Al considerar nodos topográficos, se obtiene una mejor representación de las pendientes a lo largo del perfil longitudinal de una corriente¹³</p>	<p>Conforme la resolución de un MDE es gruesa en comparación con las corrientes de interés, la pendiente puede suavizarse y se dificulta la identificación de nodos topográficos. Debe hacer un análisis de sensibilidad para identificar, en cada resolución, los umbrales requeridos según el método que se emplee.</p>
<p>Delimitación basada en nodos definidos según un número de celdas o píxeles N</p>	 <p>Este diagrama muestra un flujo similar al anterior, pero los segmentos están delimitados por un número fijo de celdas, representado por celdas de color verde. Una línea roja curva indica un segmento específico, etiquetado como 'Segmento (N celdas)'. Los cambios de pendiente no necesariamente coinciden con los límites de los segmentos.</p>	<p>Es más simple que el esquema anterior. Puede verse como una condición intermedia entre el primer y el segundo esquema y ha sido empleada en esquemas de clasificación fluvial en un contexto regional¹⁴.</p>	<p>A lo largo de un segmento delimitado únicamente por confluencias o nodos hidrológicos pueden ocurrir cambios significativos de pendiente, lo cual conlleva a estimaciones de pendiente desviadas significativamente de la realidad lo cual conlleva, a su vez, a clasificación de corrientes inadecuadas. Por otro lado, N podría definirse de acuerdo con el tamaño de corriente esperado o como una función del área de cuenca.</p>

3.1.2.4 Caracterización morfológica del área de estudio

En este paso se busca asignar un tipo morfológico a cada segmento definido en el paso anterior. Para ello se sugiere la utilización de esquemas de clasificación morfológica basados en procesos y en información geoespacial, dentro de los cuales cabe mencionar los trabajos de Flores et al. (2006), Thompson et al. (2008) y Beechie et al. (2006). Todos ellos se basan en la disponibilidad de un modelo digital de elevación e información secundaria (ver Tabla 4).

¹³ Una aproximación en Giles y Franklin (1998) y en Hayakawa y Oguchi, T. (2006).

¹⁴ Ver Thompson y Takken (2008)

Tabla 4 Esquemas de clasificación morfológica de corrientes que se basan en información geoespacial

Método o esquema de clasificación	Tipos de corriente consideradas en el esquema de clasificación	Información requerida
Flores et al. (2006)	Cascada (<i>cascade</i>), Escalón-pozo (<i>step-pool</i>), pozo-cruce (<i>pool-riffle</i>), lecho plano (<i>plane bed</i>)	Pendiente de segmento → Puede obtenerse de un MDE del área de estudio y/o mediante información más detallada en la escala de tramo (levantamientos topográficos) Área de cuenca → Puede obtenerse mediante un Mapa de áreas acumuladas (km ²) el cual, a su vez, puede derivarse a partir de un MDE
Thompson et al. (2008)	Cascada (<i>cascade</i>), Cascada-pozo (<i>cascade-pool</i>), Escalón-pozo (<i>step-pool</i>), pozo-cruce (<i>pool-riffle</i>), lecho plano (<i>plane bed</i>), lecho rocoso (<i>bedrock</i>)	Pendiente de segmento → Puede obtenerse de un MDE del área de estudio y/o mediante información más detallada en la escala de tramo (levantamientos topográficos) Área de cuenca → Puede obtenerse mediante un Mapa de áreas acumuladas (km ²) el cual, a su vez, puede derivarse a partir de un MDE Geología y litología local → Puede obtenerse a través de Autoridades Locales Competentes y/o el IGAC.
Beechie et al. (2006)	Confinados (incluye cascada y escalón-pozo), rectos, sinuosos, anastomosados y trenzados	Pendiente de segmento → Puede obtenerse de un MDE del área de estudio y/o mediante información más detallada en la escala de tramo (levantamientos topográficos) Área de cuenca → Puede obtenerse mediante un Mapa de áreas acumuladas (km ²) el cual, a su vez, puede derivarse a partir de un MDE Grado de confinamiento → Modelo digital de elevación y área de cuenca Caudal de banca llena → Puede estimarse a partir de secciones transversales, modelos hidráulicos o relaciones de escala (ver numeral 3.2.2.2.2).

Uno de los esquemas fácilmente aplicables a partir de información geoespacial es el esquema de clasificación morfológica basado en procesos fluviales y propuesto por Flores et al. (2006) como una extensión del esquema propuesto por Montgomery y Buffington (1998). Dicho esquema está basado en el árbol de clasificación mostrado en la Figura 9, el cual permite diferenciar tipos de corriente mediante la utilización de la pendiente longitudinal S_0 y el índice de potencia específica $S_0 A^{0.4}$, donde A corresponde al área de la cuenca aferente por cada uno de los segmentos de corriente que conforman la red de drenaje.

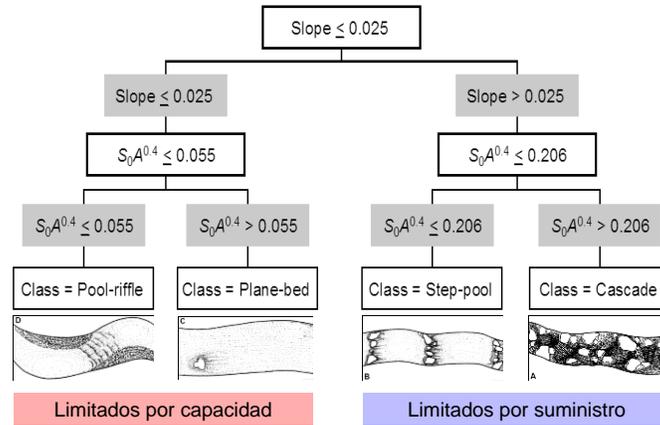


Figura 9 Árbol de clasificación morfológica propuesta por Flores et al. (2006)

Las unidades morfológicas obtenidas de acuerdo con el esquema adoptado son *cascade* (cascadas en un contexto fluvial o rápidas), *step-pool* (escalón-pozo), *plane bed* (lecho plano) y *pool-riffle* (pozo-cruce), cuya descripción cualitativa se muestra desde la Tabla 6 a la Tabla 9.

Es importante considerar que en el esquema de clasificación antes descrito debe ser complementado con otros sistemas fluviales característicos en Colombia, dentro de los que se encuentran los sistemas trenzados y los sistemas anastomosados. Así, es necesario evaluar la pertinencia de su aplicación para cada caso o su extensión para la consideración de otros sistemas de interés. En los sistemas sinuosos, trenzados y anastomosados con alta dinámica lateral, se da una fuerte influencia en las tasas de intercambio de sedimentos entre los cauces y las llanuras inundables, así como el ambiente morfológico en el cual se desarrolla el ecosistema (Beechie et al., 2006). Beechie et al., (2006) encontraron un umbral consistente de entre 15-20 metros del ancho del cauce a banca llena a partir del cual ocurre migración lateral. Para la identificación entre sistemas confinados y no confinados, Beechie et al., (2006) sugieren utilizar la relación entre el ancho del valle con el ancho del cauce a banca llena. Valores de la relación menores a cuatro (4) indican cauces confinados, y por encima de este umbral cauces no confinados. A partir de este umbral, cauces no confinados en valles pueden seguir patrones distinguibles por pendiente y caudal, y el rango de estos descriptores puede utilizarse para predecir patrones del cauce como se muestra en la Tabla 5.

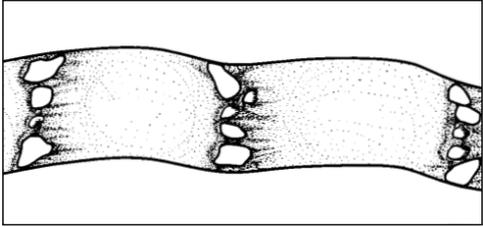
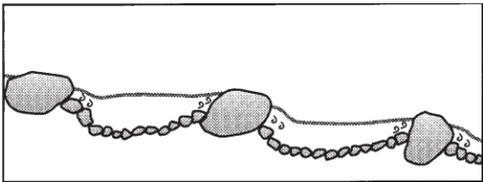
Tabla 5 Umbrales de patrones de cauces no confinados (Adaptado de Beechie et al., 2006)

Tipo de cauce	Rango de caudales-pendiente
Recto (único canal con sinuosidad < 1.5)	$Q < 15 \text{ m}^3/\text{s}$, y, $S < 0.1(Q^{-0.42})$
Sinuoso (único canal con sinuosidad > 1.5)	$Q > 15 \text{ m}^3/\text{s}$, y, $S < 0.05(Q^{-0.61})$
Anastomosado (múltiples canales separados por "islas" con vegetación)	$Q > 15 \text{ m}^3/\text{s}$, y, $0.05(Q^{-0.61}) < S < 0.1(Q^{-0.42})$
Trenzado (múltiples canales separados por barras de gravas principalmente)	$S > 0.1(Q^{-0.42})$

En la tabla anterior, S es la pendiente en m/m, y Q el caudal en m^3/s con período de retorno de dos años.

De la Tabla 6 a la Tabla 11 se presenta una descripción cualitativa de las unidades morfológicas aquí mencionadas, cuya ampliación se recomienda en Montgomery y Buffington (1998) así como en Buffington y Montgomery (2013).

Tabla 6 Características cualitativas de sistemas escalón-pozo

<p>ESCALÓN – POZO</p>	<p>Vista en planta</p>		
	<p>Perfil longitudinal</p>		
	<p>Material típico del lecho</p>	<p>Los escalones suelen estar conformados por rocas, bolas de roca, madera (troncos), y los pozos suelen tener gravas, cascajo y arenas.</p>	
	<p>Respuesta hidrológica</p>	<p>Ya que poseen alta pendiente, durante tormentas en la cuenca, responden de forma rápida y torrencial. Son capaces de transportar materiales de tamaños comparables con los que se observen en el lecho y/o márgenes.</p>	

Río Cocorná (Cocorná, Antioquia). Fuente: Minambiente-CORNARE, (2015).

Tabla 7 Características cualitativas de sistemas de cascada

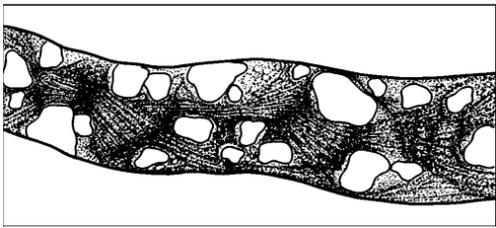
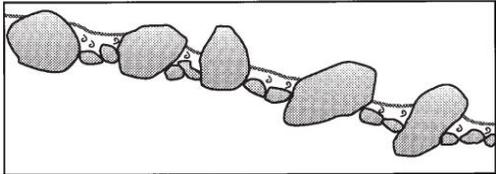
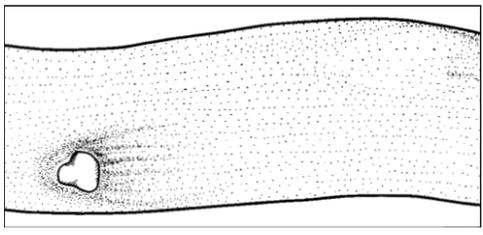
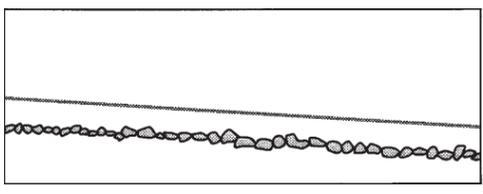
CASCADA	Vista en planta		 <p>Río Cocorná (Cocorná, Antioquia). Fuente: Minambiente-CORNARE, (2015)</p>
	Perfil		
	Material típico del lecho	Poseen un lecho conformado en su mayor parte de rocas mayores a 6 cm y a diferencia de los sistemas escalón-pozo, el material está dispuesto en el lecho de forma desorganizada.	
	Respuesta hidrológica	Debido a su alta pendiente, durante tormentas en la cuenca estos sistemas responden de forma rápida y torrencial. Son capaces de transportar materiales de tamaños comparables con los que se observen en el lecho y/o márgenes.	

Tabla 8 Características cualitativas de sistemas de lecho plano

LECHO PLANO	Vista en planta		
	Perfil		
	Material típico del lecho	Se observan en segmentos con pendiente moderada. El material del lecho contiene rocas y arena, pero posee con mayor frecuencia gravas y guijarros. No desarrollan formas características como en los sistemas escalón-pozo cascada.	
	Respuesta hidrológica	Por tener pendientes bajas, su respuesta hidrológica no es torrencial como aquella en sistemas de mayor pendiente.	

Río Negro (Antioquia) – Estación de monitoreo E18. Fuente: Minambiente-CORNARE, (2015).

Tabla 9 Características cualitativas de sistemas pozo-cruce

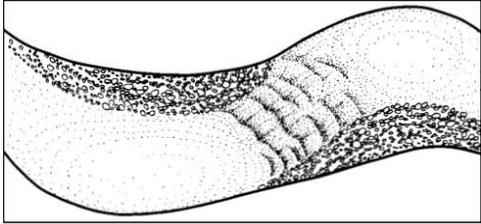
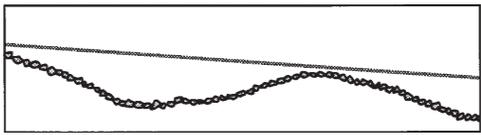
POZO-CRUCE	Vista en planta		 <p>Río Concepción – Municipio de Alejandría, Antioquia. Fuente: Minambiente-CORNARE, (2015).</p>
	Perfil		
	Material del lecho	Es común encontrar en las zonas de menor curvatura gravas y material grueso. En tanto que en las zonas de mayor curvatura pueden encontrarse arenas y, en general, material más fino que en los cruces.	
	Respuesta hidrológica	Su respuesta es lenta ya que generalmente posee llanuras inundables anchas que amortiguan las crecientes que vienen desde aguas arriba.	

Tabla 10 Características cualitativas de sistemas trenzados

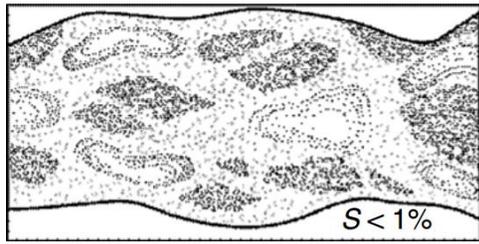
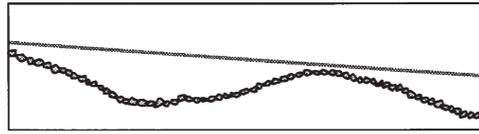
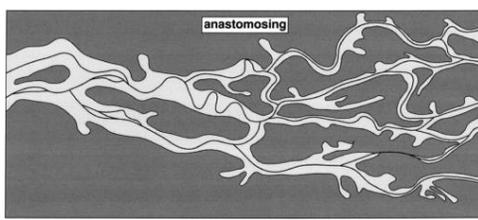
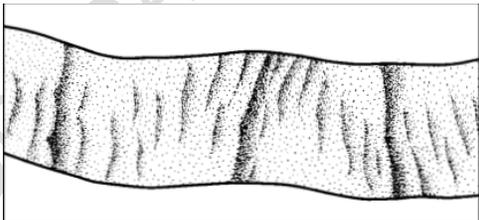
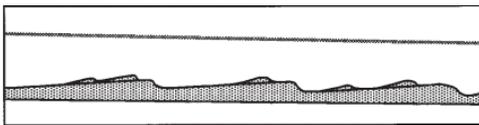
TRENZADO	Vista en planta		 <p>Río Chicamocha en inmediaciones al Parque Nacional del Chicamocha (fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rio_Chicamocha_on_PANACHI_05.JPG)</p>  <p>Río Tonusco – a la derecha – (Santa Fe de Antioquia). Fuente: Minambiente-CORNARE, (2015).</p>
	Perfil		
	Material típico del lecho	El material de lecho puede ser arena, grava o guijarros, con tamaños relativamente menores que las profundidades características de condiciones de flujo bajas. Dicho material es susceptible de ser transportado en condiciones de flujo cercanos a la condición de banca llena, por lo cual este tipo de sistemas tiene una configuración del lecho altamente cambiante.	
	Patrón de alineamiento	Los ríos trenzados se caracterizan por tener múltiples canales de flujo interconectados y separados por barras o islas que se sumergen en condiciones de banca llena o superiores. Es por ello que estos canales pueden considerarse embebidos en un mismo cinturón, a diferencia de los sistemas anastomosados en los que cada uno de los cales posee su propio cinturón característico en condiciones de agua altas.	

Tabla 11 Características cualitativas de sistemas anastomosados y sistemas de dunas

ANASTOMOSADO	Vista en planta		DUNAS Y ANTIDUNAS	Vista en planta	
	Perfil	Cada uno de los canales puede adquirir formas del lecho transicionales <i>pool-riffle</i> y <i>dunne-ripple</i> teniendo en cuenta las características del material transportado y las bajas pendientes		Perfil	
	Material típico del lecho	La primera definición de sistemas anastomosados fue dada por Schumm (1968) para referirse a corrientes con múltiples canales dominados por cargas de sedimento en suspensión.		Material típico del lecho	Es el tipo morfológico más común asociado a bajas pendientes y lechos de arena. La frecuencia de la movilidad del lecho para amplios rangos de caudal diferencia a los sistemas <i>dunne-ripple</i> de los sistemas <i>pool-riffle</i> .
	Patrón de alineamiento	Los canales en sistemas anastomosados se encuentran separados por islas extensas y estables que, a diferencia de las barras en sistemas trenzados, no son inundadas durante condiciones por debajo del caudal de banca llena. Por ello es común que en dichas islas se encuentre vegetación abundante que provee resistencia adicional al perímetro de las mismas.		Patrón de alineamiento	Ocupan valles aluviales no confinados y normalmente se encuentran desacoplados de laderas adyacentes.

3.1.3 Paso 3: Definición de estrategias de adquisición de información

Luego de caracterizar morfológicamente la red de drenaje, se procede a recopilar la respectiva información secundaria y primaria. Como síntesis, en la Tabla 12 se presentan las necesidades básicas de información, su uso dentro del esquema metodológico y sus posibles fuentes de obtención.

Tabla 12 Síntesis de información básica requerida para la estimación y evaluación de caudales ambientales

Fases	Información	Fuentes de información	Uso principal en la guía
Fase 2: Estimación de caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico	Secciones topobatómetricas y mediciones de caudal/nivel por segmento.	Trabajo en campo.	Identificación de métricas hidromorfométricas de interés ecológico.
		Aforos (sección mojada y orillas).	
		Estudios anteriores (ronda hídrica, adecuación hidráulica).	
		Permisos de ocupación de cauces.	
Series de tiempo hidrometeorológicas.	Catálogo IDEAM.	Identificación de métricas hidrológicas de interés ecológico	
	Productos globales.	Evaluación de la alteración del régimen natural de flujo	
Fase 3: Evaluación caudal ambiental considerando servicios ecosistémicos	Inventario de usuarios del recurso hídrico y obras de infraestructura.	Bases de datos / SIRH / RURH / Permisos y licencias ambientales.	Usos del agua, impactos acumulativos en la cantidad y calidad del agua.
	Datos de calidad del agua (aguas superficiales y vertimientos).	Instrumentos de planificación y administración de los recursos naturales renovables.	Caracterización de las propiedades asimilativas del cuerpo de agua.
	Talleres y entrevistas.	Trabajo en campo.	Identificación de problemáticas y conflictos ambientales.

3.1.3.1 Información secundaria

La información secundaria incluye toda aquella información proveniente de la consolidación de productos generados en el marco de los principales instrumentos de planificación y administración de los recursos naturales renovables, y que debe emplearse en el desarrollo e implementación de los diferentes componentes del Nivel 1 de la estructura metodológica.

3.1.3.1.1 Redes de monitoreo

Incluye registros históricos de calidad de agua en cuerpos de agua superficial, de precipitación total diaria y de caudal medio diario, para los cuales se debe llevar a cabo un inventario que contenga la georreferenciación de los sitios de monitoreo, el período de registro y las variables monitoreadas.

3.1.3.1.2 Obras de infraestructura

Las obras de infraestructura que requieren intervención del cauce natural traen consigo diferentes niveles de afectación que van desde la reducción de caudales hacia aguas abajo, la modificación de las propiedades de las corrientes para asimilar la contaminación y la generación de barreras físicas que impiden el movimiento de especies migratorias. Dichos efectos, a su vez, son acumulativos en la red de drenaje, y de ahí la importancia de contar

con la georreferenciación de cada nueva intervención. Las obras de infraestructura incluyen, entre otras, las siguientes:

- Pequeñas centrales hidroeléctricas
- Centrales hidroeléctricas
- Acueductos
- Obras de paso (puentes, box culverts, etc.)
- Diques laterales
- Compuertas
- Canalizaciones
- Derivaciones y desviaciones del cauce

La consideración de dicha información es relevante ya que, dependiendo de las características de la intervención que se realice, puede modificarse significativamente la conectividad longitudinal y/o lateral del sistema fluvial de cuerpo de agua.

3.1.3.1.3 Vertimientos puntuales

Teniendo en cuenta el componente de calidad de agua, se deben recopilar los registros históricos de la caracterización de vertimientos puntuales (efluentes directos a fuentes receptoras) sobre los cuerpos de agua.

Con miras a integrar los efectos de dichos vertimientos para el objeto del análisis, es necesario contar con los siguientes atributos:

- Identificador del usuario (código, expediente, nombre, etc.)
- Georreferenciación del sitio de vertimiento, la cual debe guardar correspondencia con la red de drenaje del área de estudio.
- Ciclo diurno del caudal vertido a la fuente receptora.
- Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas vertidas de acuerdo con las variables sugeridas en la
- Tabla 14 (ver numeral 3.1.3.2.3).

3.1.3.1.4 Información hidrométrica

El objetivo detrás de la adquisición de esta información es poder asignar propiedades geométricas y morfológicas a la red de drenaje del área de estudio, para lo cual podrá consultar la información de modelos hidráulicos implementados y evaluados en los permisos de ocupación de cauce, la definición de las rondas hídricas, estudios de amenaza por inundación o adecuación hidráulica, la evaluación ambiental de vertimientos y los PORH, entre otros que le aplique.

La información descrita es uno de los posibles insumos para estimar el caudal de banca llena asociado a cada tramo modelado, retroalimentando su regionalización junto con las estimaciones basadas en las secciones transversales levantadas en los sitios de monitoreo que se definan en el marco de cualquier programa de monitoreo (Ver numeral 3.1.3.2.1).

3.1.3.1.5 Servicios ecosistémicos

A partir de la definición de caudales ambientales, y de la necesidad de identificar las funciones o servicios vinculados a los ecosistemas que son esenciales para la salud de los mismos y del bienestar humano, se deben considerar las siguientes categorías de servicios ecosistémicos: servicios de soporte y regulación –componentes hidrología, calidad de agua y ecología-, de aprovisionamiento y culturales

De acuerdo con la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos – PNGIBSE (2012), los servicios ecosistémicos son los beneficios

directos e indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad y que son el resultado de la interacción entre los diferentes componentes, estructuras y funciones que constituyen la biodiversidad. En esta política los servicios ecosistémicos se clasifican en los siguientes tipos:

- ***Servicios de regulación***

Se refieren a los beneficios producidos por la regulación o los procesos ecosistémicos, tales como la regulación hídrica y almacenamiento y captura de carbono. En la guía se abordan estos servicios en los componentes de hidrología y ecología.

- ***Servicios de soporte***

Son necesarios para la prestación de los demás servicios, especialmente los de aprovisionamiento. Aunque este tipo de servicios no han sido suficientemente estudiados, entre ellos se pueden incluir la producción primaria, la formación del suelo y el ciclo de nutrientes. En la guía, estos servicios se abordan tanto en la caracterización geomorfológica, como en los componentes de hidrología, calidad de agua y ecología.

- ***Servicios de aprovisionamiento***

Son los bienes y productos que se obtienen de los ecosistemas. Generalmente los bienes se separan de los servicios para efectos de los estudios de valoración que se realizan como requerimiento de los instrumentos para planificación (e.g. POMCA, PORH) y de los de administración del recurso hídrico (e.g. reglamentación del uso de las aguas, licencias ambientales).

Dentro de estos servicios están los diferentes usos del recurso hídrico. Considerando su importancia en el análisis para la identificación de problemáticas y conflictos, se dedica un apartado específico (3.1.3.1.6) para la respectiva estrategia de adquisición de información.

- ***Servicios culturales***

Son beneficios no materiales, tales como la recreación, la contemplación y el turismo, que involucran en muchos casos las decisiones sobre la conservación o protección de ecosistemas. Estos beneficios son obtenidos a través del enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, la reflexión, la recreación y las experiencias estéticas.

3.1.3.1.6 Información de usos y usuarios

Los usos del agua están definidos el Decreto 1076 de 2015, el cual establece los usos y sus definiciones con base en las actividades que se realizan.

Para identificar los usos del agua, la Autoridad Ambiental debe revisar sus bases de datos y sistemas de información, especialmente el Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH. Esto porque la calidad de los resultados en la identificación de los usos y usuarios dentro de la estimación del caudal ambiental, dependerá de la disponibilidad y calidad de la información disponible. En este sentido, es importante realizar una revisión previa de la información, para determinar así su validez y consistencia y, de ser necesario, complementarla con trabajo en campo. Dicha información también puede obtenerse de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico – PORH, cuando estos instrumentos existan.

Posterior a la revisión de la base de datos de usos y usuarios, se deberá analizar, según el uso, el número de concesiones¹⁵ y la demanda acumulada y por tramo a través del caudal concesionado. A partir de este análisis, se podrán determinar: los principales usos del agua,

¹⁵ Ver Decreto 1076 de 2015.

los usuarios que demandan más cantidad de agua en un tramo, o aquellos usuarios que, siendo más numerosos, son quienes menos cantidades de agua demandan.

El uso de los sistemas de información permite determinar cuáles son las concesiones localizadas en el área de estudio (el expediente contiene datos como: tipo de uso, usuario, caudal concesionado). Según el uso, se contabilizan las concesiones que se otorgan en cada tramo y se suma el caudal concesionado de todas éstas. Los usos con mayor número de concesiones otorgadas y volumen de agua concesionado permiten definir quiénes son los principales usuarios.

Para cada usuario se requiere:

- Identificador del usuario (código, expediente, nombre, etc.)
- Georreferenciación del sitio de captación y del vertimiento asociado, la cual debe tener correspondencia con la red de drenaje del área de estudio.
- Caudal concedido, especificando claramente su magnitud y unidades.
- Uso del recurso hídrico. Otras fuentes de información permiten caracterizar con mayor detalle los usos y usuarios del recurso hídrico, especialmente la de los acueductos municipales. Al respecto, se pueden consultar anuarios estadísticos o la información proveniente de los Prestadores de Servicios Públicos de acueducto sobre caudal concesionado, usuarios, volumen de agua facturado o caudal, tipo de usuarios y localización (cabeceras urbanas o zona rural).

Asimismo, para la identificación de usos no consuntivos del agua, es necesario hacer una búsqueda y revisión de Planes Turísticos, Planes de Desarrollo, estudios académicos, páginas web de los municipios, Planes o Esquemas de Ordenamiento Territorial, entre otros. Al respecto, es importante que la Autoridad Ambiental competente avance en la georreferenciación de estos sitios, para facilitar el proceso de planeación y administración de los recursos naturales renovables con importancia socio-cultural.

Por otro lado, se requiere el acceso a la información de los determinantes ambientales establecidos por la Autoridad Ambiental competente, en tanto definen usos de protección sobre el recurso hídrico en ciertas zonas con importancia ecológica. Los determinantes ambientales, sean parques naturales, reservas forestales, áreas forestales protectoras, reservas de la sociedad civil, rondas hídricas, distritos de manejo, entre otros, definen usos con importancia para la estimación del caudal ambiental, los cuales deben ser tenidos en cuenta en la Fase 3 de la estructura metodológica.

3.1.3.1.7 Problemáticas y conflictos ambientales

Las fuentes de información secundarias sobre problemáticas y conflictos ambientales provienen básicamente de la base de datos sobre quejas que administra la Autoridad Ambiental competente, las cuales dan cuenta de los conflictos existentes en torno al uso y manejo del recurso hídrico. En cuanto a la información de problemáticas, ésta se puede consultar en los estudios de los instrumentos de planificación y administración. Igualmente, se deben revisar otros estudios regionales y locales: investigaciones académicas, tesis, consultorías, entre otros, referidos al recurso hídrico.

3.1.3.2 Información primaria

La información primaria puede obtenerse a través de estudios en donde se lleven a cabo campañas de monitoreo que incluyen no sólo variables hidrométricas e hidráulicas, sino también variables físicas, químicas, microbiológicas e hidrobiológicas, como es el caso de la mayoría de instrumentos de planificación del recurso hídrico y los estudios de impacto ambiental.

3.1.3.2.1 Información hidrométrica en sitios de monitoreo

En esta guía se propone, como referencia, emplear la ficha de recopilación y consolidación de información mostrada en la Figura 10. En ésta recoge la información señalada a continuación y apunta, a su vez, hacia una caracterización objetiva (hidrométrica y morfológica) en cada uno de los sitios de monitoreo que se definan en el marco de cualquier instrumento de planificación y administración del recurso hídrico. La ficha contiene:

- *Localización y descripción del sitio de monitoreo:* mediante la georreferenciación del sitio es posible estimar el área de cuenca que drena a la altura de un sitio de monitoreo, la cual es un parámetro de escala fundamental en procesos hidrológicos, teorías de escalamiento y regionalización de procesos.
- *Propiedades de sección transversal y tramo:* éstas proveen información local, es decir, en la sección transversal, y además proveen elementos mínimos necesarios para aplicar estrategias de regionalización y estimar componentes ambientales del régimen de caudales en cualquier sitio en el área de estudio. Se obtienen luego de la realización de aforos líquidos en los sitios de monitoreo. Dichos aforos pueden realizarse considerando las sugerencias dadas por el IDEAM en sus guías técnicas vigentes, incluyendo las tecnologías recientes basadas en medidores acústicos (Mueller y Wagner, 2009).
- *Tipo morfológico:* mediante una identificación visual y categorías de clasificación preestablecidas, es posible identificar las unidades morfológicas existentes en cada tramo de corriente dentro del cual se encuentra el sitio de monitoreo. Esta información permite llevar a cabo diferenciación de procesos conforme se posea mayor información a nivel local, regional y nacional.
- *Sección transversal:* el levantamiento de la sección transversal en el sitio de monitoreo permite apoyar métodos de parametrización de secciones transversales en sitios desprovistos de información en los cuerpos de agua. Se requiere el levantamiento de la sección húmeda y seca, tal como se ilustra en la Figura 11, de tal forma que sea posible a) identificar el estado de banca llena y b) hacer inferencia en condiciones hidrológicas diferentes a aquellas encontradas durante los monitoreos que se realicen.

PROYECTO	Nombre del proyecto	LIDER DE COMISIÓN			COMISIÓN / LIDER DE CAMPO / ENTIDAD																				
CARGAR		LOCALIZACIÓN																							
<p>SECCION DE AFORO</p>		Este (m) / Long. (°)		Norte (m) / Lat. (°)																					
		Estación/Sitio		Corriente																					
		Fecha		Hora																					
MORFOLOGÍA DE TRAMO (cualitativo) 		PROPIEDADES DE TRAMO Y SECCIÓN																							
		Pendiente, S_0 (m/m)		Area flujo, A (m ²)																					
		W banca, W_b (m)		W flujo, W (m)																					
		H banca, H_b (m)		prof. de flujo, H_{max} (m)																					
		W valle, W_v (m)		Caudal, Q (m ³ /s)																					
		Q banca llena, Q_b (m ³ /s)		Vel. media, V_m (m/s)																					
Radio hidráulico, R_h (m)		Vel. máx, V_{max} (m/s)																							
MATERIAL DEL LECHO (Marque con una X) <table border="1"> <tr> <td>Rocas (>256 mm)</td> <td>Cantos (>64 mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Grava (>2 mm)</td> <td>Arena</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Limo</td> <td>Arcilla</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hojarasca</td> <td>Madera</td> <td></td> </tr> </table>		Rocas (>256 mm)	Cantos (>64 mm)		Grava (>2 mm)	Arena		Limo	Arcilla		Hojarasca	Madera		MATERIAL DEL LECHO (Granulometría) <table border="1"> <tr> <td>D_{50} (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D_{83} (mm)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>$Ln (D_{83}/D_{50})$</td> <td></td> </tr> <tr> <td>H_{exp} (m) -Si Aplica-</td> <td></td> </tr> </table>				D_{50} (mm)		D_{83} (mm)		$Ln (D_{83}/D_{50})$		H_{exp} (m) -Si Aplica-	
		Rocas (>256 mm)	Cantos (>64 mm)																						
		Grava (>2 mm)	Arena																						
		Limo	Arcilla																						
Hojarasca	Madera																								
D_{50} (mm)																									
D_{83} (mm)																									
$Ln (D_{83}/D_{50})$																									
H_{exp} (m) -Si Aplica-																									
CONDICIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN EL TRAMO (In-Situ)																									
Tagua (°C)		OD (mg/L)		Cond. (µS/cm)																					
OD (%)		pH (UPH)		Turbiedad (UNT)																					
CONDICIONES METEOROLÓGICA EN EL SITIO (In-Situ)																									
HR (%)		Tamb (°C)		% Sombra cauce																					
OBSERVACIONES																									
PROYECTO	Nombre del proyecto	LIDER DE COMISIÓN		H_{Equipo} (m)	COTA REF																				
					100																				
SECCIÓN			Sección No. 1																						
Dist. horiz. (m)	Dist. Vert. (m)	H_{Prima} (m)	COTA (m)	Observaciones																					
			100.00																						

Figura 10 Ficha para la recolección y consolidación de información hidrométrica (Minambiente-CORNARE, 2015)

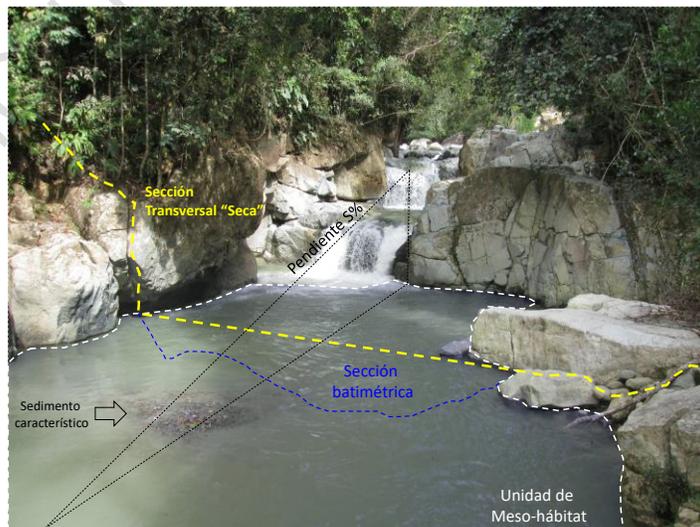


Figura 11 Esquematación de sección transversal seca y batimétrica en el sitio de monitoreo (Minambiente-CORNARE, 2015)

La información así recolectada provee insumos para la parametrización de tramos de corriente en los cuerpos de agua de estudio con miras a la evaluación de su capacidad para asimilar cargas contaminantes, al igual que para la estimación de los factores de hábitat considerados en la evaluación de las necesidades de los ecosistemas acuáticos. En cualquier caso, se recomienda obtener, como mínimo, el conjunto de descriptores hidrométricos señalados en la Tabla 13.

Tabla 13 Variables hidrométricas requeridas, como mínimo, para cada sitio de monitoreo

Variable	Descripción
Q (m ³ /s)	Caudal
A (m ²)	Área de flujo
Y _{max} (m)	Profundidad máxima
Y _{media} (m)	Profundidad media
V _{media} (m/s)	Velocidad media
V _{max} (m/s)	Velocidad máxima
W (m)	Ancho de flujo
F	Número de Froude
R _H (m)	Radio hidráulico
^a DF= (1-V _{media} /V _{max})	Fracción dispersiva en la sección transversal
Sección trasversal	Levantamiento topo-batimétrico en el sitio de aforo, incluyendo zona seca
^a No es necesariamente representativa en la escala de tramo, pero es un proxy en ausencia de información.	

3.1.3.2.2 Información hidrométrica a escala de tramo

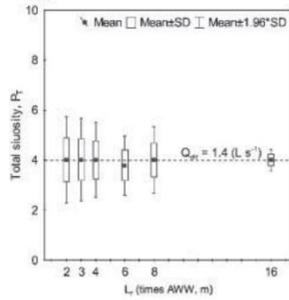
Si bien los planes de monitoreo a los que hace referencia esta guía están orientados a sitios de monitoreo, la información hidrométrica levantada en los estudios en los que se requiere simulación hidráulica se debe hacer en la escala de tramo.

Para la aplicación de las estrategias metodológicas descritas en esta guía y para fortalecer el conocimiento en torno a los sistemas fluviales del país, de la Figura 12 a la Figura 14 se presentan algunas consideraciones para el levantamiento topográfico de secciones transversales, siempre que el acceso a la corriente lo permita, orientadas a una adecuada estimación de las propiedades morfológicas del tramo.

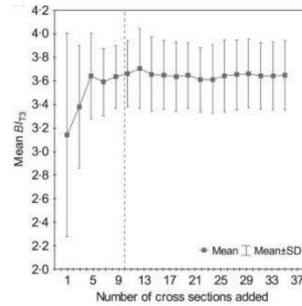
Para corrientes trenzadas, Egozi y Ashmore (2008) proponen levantar secciones transversales con una separación equivalente a la cantidad al ancho medio de flujo para condiciones de caudal alto – AWW (por las siglas en inglés de *Average Wetted Width*), en una longitud como mínimo de 10 veces AWW (ver Figura 12). Con valores por encima de dicha longitud y nivel de detalle, es posible estimar con precisión descriptores del nivel de trenzamiento y de tipo morfológico para este tipo de corrientes.



(a) Río trezado y esquematización de la longitud mínima y nivel de detalle para una adecuada caracterización morfológica



(b) Minimización de la varianza de la sinuosidad total (*total sinuosity*) estimada conforme se aumenta la longitud de segmento



(c) Estabilización del índice de trezamiento (BI) conforme se incorporan secciones transversales en el análisis

Figura 12 Ríos Trezados (Tomada y modificada de Egozi y Ashmore, 2008)

En cuerpos de agua de alta pendiente en los que es común encontrar arreglo de rápidas, caídas y pozos, se ha encontrado que la separación entre caídas varía típicamente entre menos que uno y una vez el ancho característico de la corriente (Chin, 1999; Chin y Wohl, 2005). Dicho ancho corresponde al ancho de banca llena, de acuerdo con los resultados obtenidos en Jiménez y Wohl (2013). No obstante, una regla simple para obtener secciones transversales y/o perfiles longitudinales representativos de las formas del lecho en este tipo de corrientes, es definirlos en las zonas de caída (cresta) y en la zona más profunda de los pozos, siempre que las condiciones de acceso y seguridad así lo permitan (ver Figura 13).

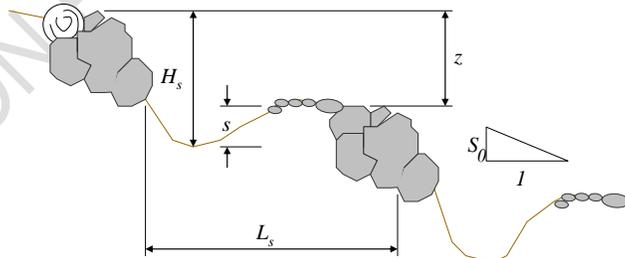


Figura 13 Sistemas escalón-pozo, o sistemas transicionales rápidas-pozo. H_s representa la altura de la caída, L_s la separación cresta a cresta, z la caída entre crestas y s la profundidad de socavación en el pozo.

En forma análoga, se ha encontrado que en cuerpos de agua de planicie la estimación de descriptores morfológicos es estable cuando se emplean secciones transversales separadas entre 4 a 6 veces el ancho de banca llena de la corriente. No obstante, una regla simple para obtener secciones transversales representativas de las formas del lecho en este tipo de corrientes, es definirlos en las zonas de máxima y mínima curvatura del alineamiento del tramo, tal como se ilustra en la Figura 14.



Figura 14 Sistemas de planicie

3.1.3.2.3 Información de calidad de agua

En este numeral se incorporan algunas consideraciones para la recolección sistemática de información de calidad de agua teniendo en cuenta que los objetivos son: la caracterización estacional de la calidad de agua en el cuerpo de agua, la caracterización de la variabilidad temporal de las cargas contaminantes incidentes y la caracterización de las propiedades del cuerpo de agua para asimilar contaminación.

- **Variabilidad estacional de la calidad del agua**

Se refiere a la variabilidad temporal de la calidad en el cuerpo de agua, como respuesta a la variabilidad media mensual de caudales, la cual, a su vez, depende de la localización geográfica de un determinado tramo de estudio.

La caracterización de dicha variabilidad puede lograrse mediante la definición de condiciones de frontera – CF o de sitios de monitoreo que capturen los efectos provenientes desde aguas arriba (CF1), en aquellas fuentes tributarias que representen aportes significativos de caudal o generen aportes significativos de carga contaminante (CF3 y CF4, respectivamente) y aguas abajo de embalses, los cuales pueden actuar como un gran reactor (CF2), tal como se muestra en la Figura 15.

- **Variabilidad temporal de cargas contaminantes incidentes**

Se refiere a la variabilidad temporal de cargas contaminantes incidentes, y aquellas fuentes tributarias que representen aportes significativos de carga contaminante, las cuales pueden representarse en forma agregada como una condición de frontera que recoja sus impactos acumulativos.

A diferencia de la caracterización estacional, ésta propende por capturar las fluctuaciones de carga contaminante debidas a los aportes de vertimientos puntuales en el cuerpo de agua. Lo anterior sugiere la recolección de muestras de agua en las condiciones de frontera definidas (ver Figura 15), con una escala de observación horaria, intra-diaria o diaria, que permita comprender las perturbaciones provenientes desde aguas arriba cuando su localización no sea claramente identificada. Alternativamente, cuando se identifiquen las fuentes contaminantes más significativas aguas arriba, éstas pueden ser caracterizadas directamente y su efecto puede ser transitado hacia aguas abajo mediante alguna estrategia de simulación.

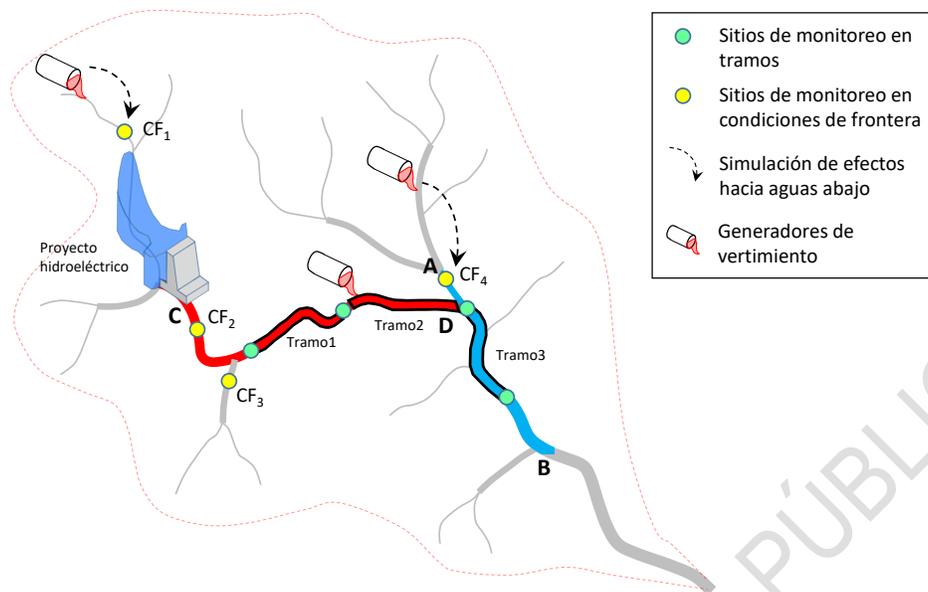


Figura 15 Definición de estaciones de registro de acuerdo con el objetivo del monitoreo (Minambiente-CORNARE, 2015)

- **Propiedades asimilativas a escala de tramo**

En este punto, los esfuerzos deben encaminarse hacia la caracterización de los mecanismos de asimilación (transporte advectivo y dispersivo, transformación físico-química y biológica, velocidades de sedimentación) a escala de tramo, y en la forma en que éstos varían con el caudal transportado.

Es importante aclarar que los tramos en los que se divide el cuerpo de agua para propósitos de modelación de la calidad del agua no necesariamente coinciden con los segmentos geomorfológicos caracterizados como parte de la metodología de estimación de caudales ambientales, teniendo en cuenta que para la definición de los tramos de modelación no sólo se consideran los cambios morfológicos significativos en el tramo de estudio, sino también la localización de fuentes significativas de carga contaminante.

Diferentes estudios a nivel nacional han demostrado que en la escala de tramo las propiedades dispersivas de una corriente pueden inferirse mediante la realización de experimentos con trazadores (e.g. Camacho y Cantor, 2006; González, 2008; Camacho y González, 2008) y que en forma complementaria pueden evaluarse mediante la configuración de modelos de simulación en la misma escala (e.g. Lees et al., 2000; Camacho, 2000).

Por otro lado, las tasas de transformación físico-química y biológica y las velocidades de sedimentación de sustancias de interés ambiental, pueden estimarse con mayor facilidad en tramos de corriente en los que efectivamente existan aportes significativos de carga contaminante, como aquellos ubicados aguas abajo de cascos urbanos o aguas abajo de descargas puntuales de aguas residuales (ver Figura 16).

- **Tipo de muestra**

Dependiendo del alcance que se persiga se considera pertinente considerar diferentes tipos de muestra durante la fase de caracterización de la calidad del agua.

En las condiciones de frontera, pueden emplearse muestras compuestas que permitan estimar la carga media durante un período de tiempo ΔT para un caudal determinado, o un

intervalo de caudal ΔQ cuando se presenten fluctuaciones de esta variable durante el período ΔT (puntos verdes en la Figura 16). De esta manera, será posible construir una aproximación de la relación Carga – Caudal en las condiciones de frontera definidas, y emplear dicha relación en la estimación de cargas para nuevas condiciones de flujo de interés. Dicha aproximación es especialmente útil en condiciones de frontera de cuencas poco intervenidas, y en las cuales las variaciones de concentración están principalmente asociadas con sustancias de origen no puntual (por ejemplo, sólidos en suspensión) y el régimen de lluvias en la cuenca.

En los sitios de monitoreo que no correspondan a condiciones de frontera (puntos rojos en la Figura 16), pueden considerarse muestreos integrados o puntuales (dependiendo del tamaño del cuerpo de agua, su navegabilidad, acceso, etc.), y cuya recolección sea programada, en la medida de lo posible, de acuerdo con los tiempos de viaje de la masa de agua y la caracterización de sus parámetros hidráulicos y dispersivos.

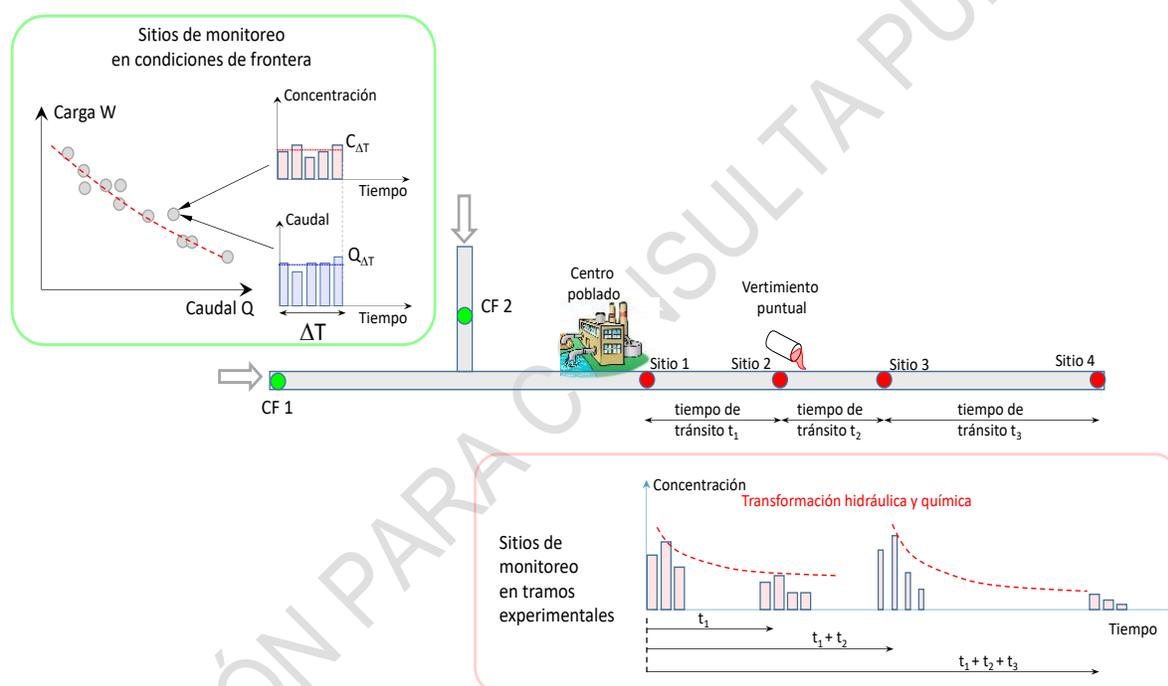


Figura 16 Uso de muestras compuestas e integradas dependiendo del sitio de muestreo definido (condición de frontera o interna). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

- **Conjunto de variables físico-químicas y microbiológicas**

En la Tabla 14 se presenta el conjunto de variables de calidad de agua mínimas para su análisis en los sitios de monitoreo que integren la red definida. En función de los tipos de forzamiento sobre la calidad del agua existentes, se deberán priorizar otras variables indicadoras a monitorear (e.g. organoclorados y organofosforados en caso de actividades agropecuarias intensivas). Todos los muestreos de calidad del agua deben estar acompañados de la respectiva medición de caudal, de lo contrario la información de calidad del agua no podrá ser tenida en cuenta para la implementación de la presente guía metodológica.

Tabla 14 Variables físico-químicas y microbiológicas mínimas para análisis en sitios de monitoreo y vertimientos

No.	Variable	Unidades	Analizar en	
			Vertimientos	Cuerpos de agua
<i>In Situ</i>				
1	pH ¹	[Unidad]	X	X
2	Conductividad	[μ S/cm]	X	X
3	Oxígeno disuelto ¹	[mg/L O ₂]	X	X
4	Temperatura del agua ¹	[°C]	X	X
<i>Fisicoquímicos básicos</i>				
5	Alcalinidad ¹	[mg/L CaCO ₃]	X	X
6	DBO ₅ Total ^{1,2}	[mg/L O ₂]	X	X
7	DQO Total/COT ¹	[mg/L O ₂]/ [mg/L	X	X
8	Sólidos suspendidos	[mg/L]	X	X
9	Nitrógeno total ¹	[mg/L N]	X	X
10	Fósforo total ¹	[mg/L P]	X	X
<i>Microbiológicos</i>				
11	Coliformes totales ¹	[NMP/100mL]	X	X
12	E. Coli ¹	[NMP/100mL]	X	X
<p>Notas (superíndices):</p> <p>1. La medición de los parámetros señalados se requiere para la modelación de la calidad del agua, por lo tanto, su medición es obligatoria tanto en cuerpos de agua como en vertimientos.</p> <p>2. Se debe inhibir la nitrificación en laboratorio de las DBO que sean analizadas.</p>				

- **Información hidrobiológica**

Del ecosistema acuático, los peces son los indicadores ecosistémicos más efectivos debido a que su posición en el tope de la cadena alimenticia ayuda a suministrar una visión integrada del ambiente (Wu et al., 2014). El tipo y la complejidad del hábitat, o la heterogeneidad de hábitat, influyen en el uso de los recursos para muchas especies, junto con las interacciones biológicas (competencia y depredación). Por lo tanto, entender la respuesta de los peces a la variación del hábitat en términos de hidrología y calidad de agua, es clave para orientar el manejo ambiental (Zhao et al., 2015).

Junto con la información primaria descrita en pasos precedentes, se requiere la identificación de especies ícticas en los tramos definidos (ver numeral 3.1.3.2.2), dentro de los cuales pueden darse diferentes unidades de análisis y/o hábitats físicos para las diferentes comunidades hidrobiológicas. En la Figura 17 se ilustra un tramo con diferentes unidades morfológicas (poza y rápido). Por su parte, en la Tabla 15, se presentan las variables hidrobiológicas sugeridas para análisis de sitios de monitoreo.

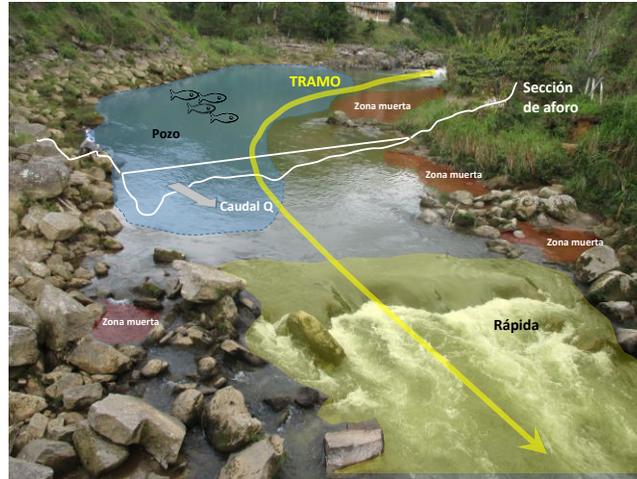


Figura 17 Esquematación del levantamiento integrado de información hidrométrica, físico-química e hidrobiológica en inmediaciones de sitios de monitoreo establecidos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Tabla 15 Variables hidrobiológicas sugeridas para análisis en sitios de monitoreo

No.	Variable	Unidades
13	Ictiofauna	[# individuos] por especie
		[g] por especie

3.1.3.2.4 Información institucional para la identificación de problemáticas y conflictos ambientales

De acuerdo con la disponibilidad y cantidad de información existente en las bases de datos de la Autoridad Ambiental competente, la metodología para la evaluación del caudal ambiental puede considerar como una fuente de información el conocimiento y la experiencia de la entidad. La memoria institucional debe ser aprovechada con la finalidad de comprender las problemáticas y conflictos en torno al recurso hídrico, así como para definir los lineamientos y criterios de gestión que se derivan de la estimación del caudal ambiental para ser utilizados en los respectivos instrumentos de planificación y administración del recurso hídrico.

En línea con lo anterior, se pueden aplicar distintas técnicas de recolección de información, tales como: talleres, entrevistas semi-estructuradas, entrevistas grupales, paneles de discusión, conversatorios, con el fin de acopiar los datos necesarios para analizar las problemáticas y conflictos que se abordan en el componente del estado actual de intervención.

Nota: Cuando la estimación del caudal ambiental se adelante en el marco de instrumentos de planificación y administración del recurso hídrico, se deberán aprovechar las instancias de coordinación y participación correspondientes, haciendo énfasis en la información aportada por los actores de la cuenca en cuanto la condición ecológica deseada.

3.2 FASE 2: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL CONSIDERANDO EL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO

3.2.1 Paso 1: Estimar el régimen hidrológico natural

El paso 1 consiste en realizar una caracterización de los principales atributos del régimen natural del flujo los cuales tiene particular influencia en la salud de los ecosistemas acuáticos. Los enfoques a utilizar dependerán de la información hidrológica disponible y pertinente, razón por la cual es la primera actividad a realizar para el posterior análisis hidrológico con los métodos que apliquen.

3.2.1.1 Escenarios de disponibilidad de información hidrológica

En función del nivel de instrumentación hidrometeorológica disponible en la cuenca hidrográfica, de los cuerpos de agua objeto de análisis, se tendrán diferentes escenarios que condicionarán el método a utilizar para la caracterización del régimen hidrológico.

El primer escenario será la disponibilidad de información para un tramo de interés en particular (estación Q_1 en el tramo A-B en la Figura 18); los datos de tal estación para que sean pertinentes deben tener una longitud de registros sistemáticos a escala diaria de al menos 10 años, y no tener dentro de esta longitud más del 10% de datos faltantes; cumplidos tales criterios, se deberán considerar los respectivos análisis de calidad en la información (homogeneidad, consistencia y detección de datos anómalos).

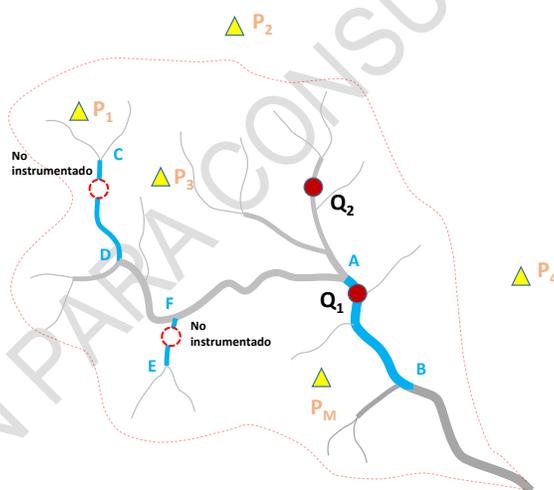


Figura 18 Escenarios de disponibilidad de información hidrológica. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

El segundo escenario será la caracterización del régimen hidrológico a lo largo de toda la red drenaje más allá del tramo A-B de la Figura 18 (ejemplos de los tramos C-D y E-F); para ello se puede utilizar un modelo de transformación-lluvia escorrentía, teniendo en cuenta, además de las estaciones Q_1 y Q_2 , la disponibilidad de estaciones de registro de precipitación P_1 a P_M las cuales cumplan con los criterios anteriormente mencionados respecto de longitud, datos faltantes, calidad. En los casos que no se cuente con información ni de precipitación ni de caudal en la cuenca hidrográfica objeto de estudio, se deberán aplicar técnicas de estimación en cuencas no aforadas (ver por ejemplo Blöschl et al., 2013).

El IDEAM provee un listado del catálogo de las estaciones de registro de variables hidroclimáticas administradas tanto por dicha institución como por otras entidades (gubernamentales y privadas) en el plano nacional. En cada caso, la adquisición de dicha

información (caudal, precipitación y demás variables climáticas requeridas) deberá tramitarse ante la(s) entidad(es) que corresponda.

Para la información disponible, se hará un inventario que incluya:

- Código y nombre de la estación de registro
- Fuente de información
- Nombre de la estación de registro
- Período de registro
- Elevación (msnm)
- Estado (activa o suspendida)

3.2.1.2 Métodos de referencia

Todo el rango de caudales que circula por una corriente juega un rol importante en el sostenimiento de las necesidades ecosistémicas. De ahí que, independientemente de los métodos para evaluar cualquier grado de alteración hidrológica, los esfuerzos iniciales deban concentrarse en la caracterización del régimen natural de caudales que existen en una corriente, antes de cualquier intervención antrópica. Dicha caracterización provee el entendimiento del régimen de caudales para el cual las especies nativas de un ecosistema se han adaptado (Mathews y Richter, 2007).

3.2.1.2.1 Estimación del régimen natural de caudales

El propósito inicial de la fase 2 de esta guía apunta hacia la obtención de series de caudal medio diario, de tal forma que sea viable llevar a cabo una caracterización del régimen de caudales en condiciones no alteradas o de referencia.

Identificación de alteración del régimen de flujo cuando existen series de tiempo

En los casos de disponibilidad de series de tiempo de caudales, se procederá a identificar si existe algún grado significativo de alteración del régimen de flujo desde el punto de vista de regulación o fragmentación. Para ello, se sugieren como mínimo los siguientes criterios:

- El porcentaje de cuenca controlada por uno o varios embalses es mayor al 10% de la cuenca vertiente a un tramo de estudio, o el volumen útil de uno o varios embalses es mayor al 10% del volumen del hidrograma de la creciente con período de retorno de 10 años (adaptado de MARM, 2011).
- Valores mayores o iguales a dos (2) del índice denominado “grado de regulación” (DOR por sus siglas en inglés de “degree of regulation”) de acuerdo con Lehner et al., (2011). Dicho índice es la proporción del volumen de flujo anual de un tramo de un río que puede ser almacenado aguas arriba por la operación de uno o varios embalses, y calculado para todos los tramos de la red de drenaje. Para la estimación del índice se tiene como referencia la siguiente expresión: $DOR_i = \frac{\sum s_i V_e}{Q_i}$, donde DOR_i es el grado de regulación en un tramo i del río, s_i el número de embalses aguas arriba del tramo i con almacenamiento total V_e de cada uno, y Q_i es el volumen de escorrentía media anual en el tramo i (ver una aplicación para el río Magdalena en Angarita et al., 2015).
- Cuencas hidrográficas en las que los índices de fragmentación (RFI por sus siglas en inglés de “river fragmentation index”) y regulación (RRI por sus siglas en inglés de “river regulation index”) son fuertes y severos de acuerdo con Grill et al., (2015).

Obtención de caudales medios diarios a través de registros de caudal existentes.

En el numeral 3.1.3.1.1 se incluyó como información secundaria disponible aquella correspondiente a estaciones de registro de caudal. En este caso solo aplica a cuencas hidrográficas en las que la densidad de información hidrológica cumple con los mínimos estándares de calidad y no presenta alteraciones el régimen de flujo acorde con los criterios mínimos establecidos anteriormente.

Igualmente, se deberá considerar la densidad espacial mínima de estaciones de registro de caudales, para que éstas sean representativas del comportamiento hidrológico en la cuenca hidrográfica objeto de estudio. Criterios para ello son los siguientes:

- i) Según la OMM (2011) la máxima superficie, en km² por estación, por unidad fisiográfica debe ser: 2750 en costas, 1000 en montañas, 1875 en zonas de planicie interior y onduladas, 300 en islas pequeñas, y 20000 en tierras áridas;
- ii) Según IDEAM (2013) el número mínimo de estaciones se puede estimar considerando la expresión $y = 0.0029x + 3.8667$ donde “y” es el número de estaciones y “x” el área de la cuenca en estudio.

Obtención de caudales medios diarios a través de simulación

Independientemente del modelo de transformación lluvia - escorrentía que se emplee, se recomienda que la simulación de caudales incluya las siguientes fases (Refsgaard, 1990; Dingman, 2002; ver Figura 19):

- Descripción conceptual del modelo

Se hará una descripción de la forma en la que el modelo representa el proceso a través del cual la precipitación que ingresa a una cuenca se convierte en caudal. Asimismo, es importante conocer la estrategia de discretización topológica del modelo (tanques, celdas, volúmenes, subcuencas, etc.) al igual que los parámetros requeridos para representar cada una de las unidades topológicas. Los modelos de cuenca pueden ser: considerando la representación de la variabilidad espacial del soporte físico (geología, topografía, suelos, coberturas vegetales y usos de la tierra) pueden ser de tipo distribuido o agregado; considerando la representación de la variabilidad temporal de los procesos preponderantes pueden ser de tipo evento o continuos. Teniendo en cuenta que se requiere caracterizar el régimen hidrológico se utilizarán modelos continuos, igualmente para la mayoría de los casos se requiere conocer el comportamiento del régimen hidrológico a lo largo de la red drenaje, por tanto se sugiere el uso de modelos distribuidos que a su vez ya incorporan la influencia de la variabilidad espacial del soporte físico, lo cual redundará en una mejor representación de los procesos hidrológicos predominantes en la cuenca de interés.

Finalmente, y con miras a evaluar la posibilidad de replicar el modelo en diferentes casos, se debe describir la información de entrada requerida por el modelo, al igual que los parámetros del mismo.

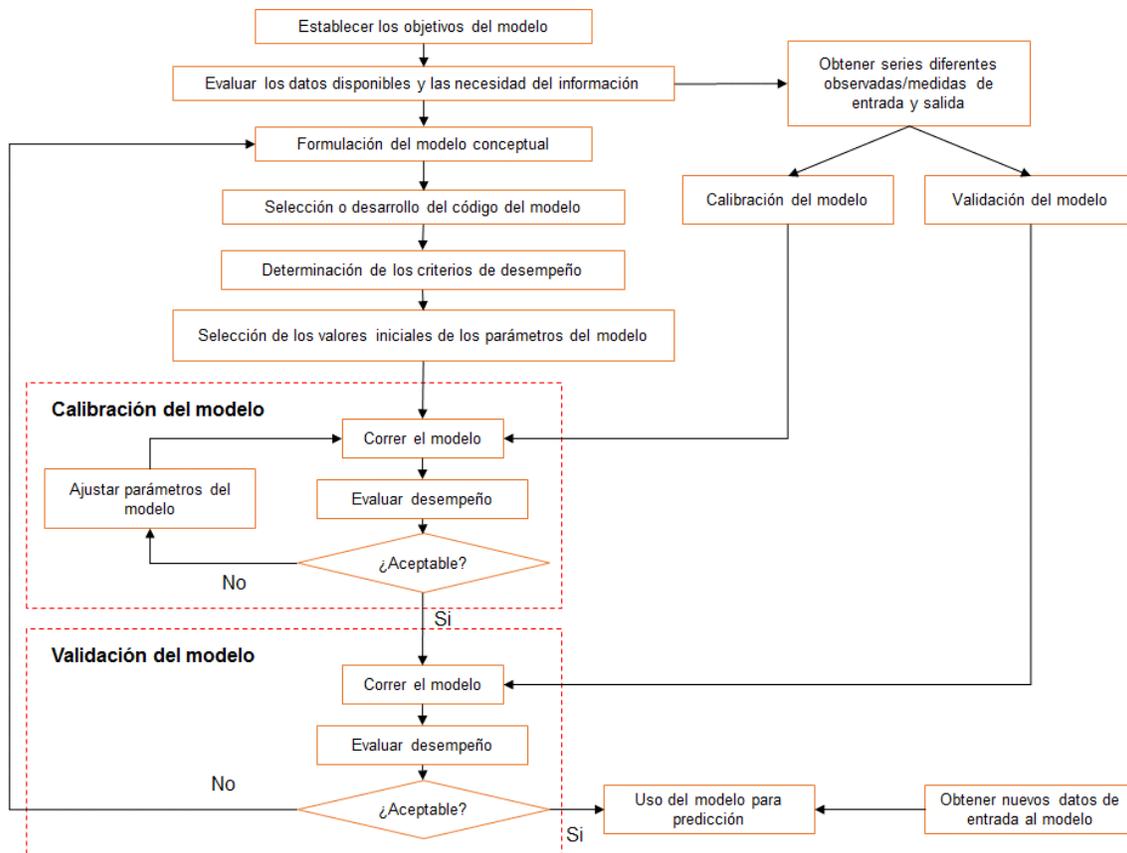


Figura 19 Protocolo de modelación hidrológica. Adaptado de Dingman (2002)

- Selección o desarrollo de la herramienta de simulación

Este paso se refiere a la descripción del programa de computador (comercial o desarrollo propio) que se emplea para implementar el esquema conceptual definido, indicando las ventajas y limitaciones del mismo en relación con la generación de series de caudal medio diario en el área de estudio.

- Configuración del modelo

Se refiere a la preparación de información de entrada¹⁶, y la definición de las cuencas donde serán realizadas las simulaciones. En dicho sentido deben establecerse los sitios del área de estudio en los que serán simuladas series de caudal medio diario. Éstos incluyen como mínimo:

- Sitios instrumentados con estaciones de registro de caudal medio diario
- Sitios de monitoreo de calidad del agua en el marco del instrumento de gestión o administración en los que la estimación de caudal ambiental se emplee como insumo
- Sitios específicos de aprovechamiento del recurso hídrico en los que se requiera la estimación del caudal ambiental como condicionante de aprovechamiento.

¹⁶ Deberá hacerse un análisis preliminar de las series de tiempo que se utilicen, con el fin de identificar su homogeneidad y consistencia, de tal forma que se alimente el modelo conceptual con información representativa de la variabilidad climática natural de la lluvia y los caudales en el área de estudio.

- Estrategia de interpolación de la lluvia

Cuando el escenario de escasez de información así lo exija (ver numeral 3.3.1.), es necesario acudir a técnicas de interpolación para generar series de precipitación en lugares específicos del área de estudio. En dicho sentido, pueden considerarse técnicas de interpolación de la lluvia ya sea mediante técnicas determinísticas o geoestadísticas (Álvarez, 2007; Álvarez, 2009).

- Criterios de desempeño del modelo

En este paso deben definirse las métricas (función objetivo) a través de las cuales se evaluará cuantitativamente el desempeño del modelo para representar la variabilidad de caudales. En general, se busca que el modelo represente adecuadamente las condiciones medias de flujo (balance de largo plazo), al igual que la magnitud y la duración de eventos extremos máximos y mínimos. Algunos criterios de desempeño pueden encontrarse en Vélez et al. (2010).

- Estrategia de calibración y validación

Una vez configurado el modelo, se procede a su calibración y validación, para lo cual debe describirse la forma en que se emplean los registros de caudal disponibles, así como la forma en que se obtiene el conjunto óptimo de parámetros que permite optimizar los indicadores de eficiencia previamente seleccionados.

Para el proceso de calibración – validación se puede utilizar algunas de la pruebas estándar sugeridas por Klemeš, (1986) y de uso generalizado, en función de la información disponible: i) prueba de división de la muestra de datos en un mismo punto de registro (una parte para calibración otra para validación); ii) pruebas de cuencas próximas para verificar si se puede extrapolar geográficamente el modelo de cuenca en los caos que no se tiene registros (si tiene un punto de interés no aforados, y se tiene dos puntos A y B con registros, se calibra en un punto A y se valida en un punto B, y si los resultados son satisfactoria se puede utilizar en el punto no aforado); iii) prueba diferencial de división de la muestra de datos (utilizado cuando se requiere simular condiciones diferentes a las existentes en un punto de interés con registros como cambios en el clima o en el suelo, por ejemplo si se quiere simular condiciones húmedas, se calibra en el período de la serie en condiciones húmedas y se valida en el periodo de la serie en condiciones secas); iv) prueba diferencial de división de la muestra de datos y cuencas cercanas (aplicado en los casos en que el modelo pueda ser extrapolable geográficamente y que se refleje cambios en el clima o uso del suelo.)

3.2.1.2.2 Caracterización del régimen anual de caudales

La respuesta hidrológica, en condiciones normales, está mediada por las variaciones del régimen climático a diferentes escalas temporales: tanto por la variabilidad intranual como interanual. Tales variaciones producen un régimen bimodal o monomodal de lluvias (principalmente por el paso de la zona de convergencia intertropical), que modula la respuesta hidrológica, la cual puede a su vez ser modulada por períodos secos o húmedos debido a la afectación de fenómenos macroclimáticos asociados a la variabilidad climática (entre otros fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur – “ENOS”). En tal sentido, las series de tiempo hidrológicas deben considerar tal variabilidad natural, por lo que deben ser clasificadas por condición hidrológica normal, húmeda o seca.

Considerando la disponibilidad de información de los efectos de la variabilidad climática en el territorio colombiano, uno de los fenómenos con mayor documentación es la influencia del fenómeno ENOS. Considerando lo anterior, este paso consiste en categorizar el período de registro disponible en cada sitio en tres categorías: normal (e.g. *Neutral*), seca (e.g. *El*

Niño) y húmeda (e.g. *La Niña*). Para ello, pueden considerarse diferentes indicadores empleados por investigadores del clima, la hidrología y la meteorología, dentro de los que cabe mencionar los siguientes:

- Índice Oceánico El Niño (*Oceanic Niño Index*, ONI)

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

- Índice de Oscilación del Sur (*Southern Oscillation Index*, SOI)

<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>

- Índice ENOS Multivariado (*Multivariate ENOS Index*, MEI)

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>

Para la selección del indicador más apropiado en el área de estudio, se recomienda evaluar cuál de éstos posee mayor correlación con variables medias mensuales (precipitación, caudal, temperatura, etc.) en el área de estudio. En la Figura 20 se ilustra lo anterior.

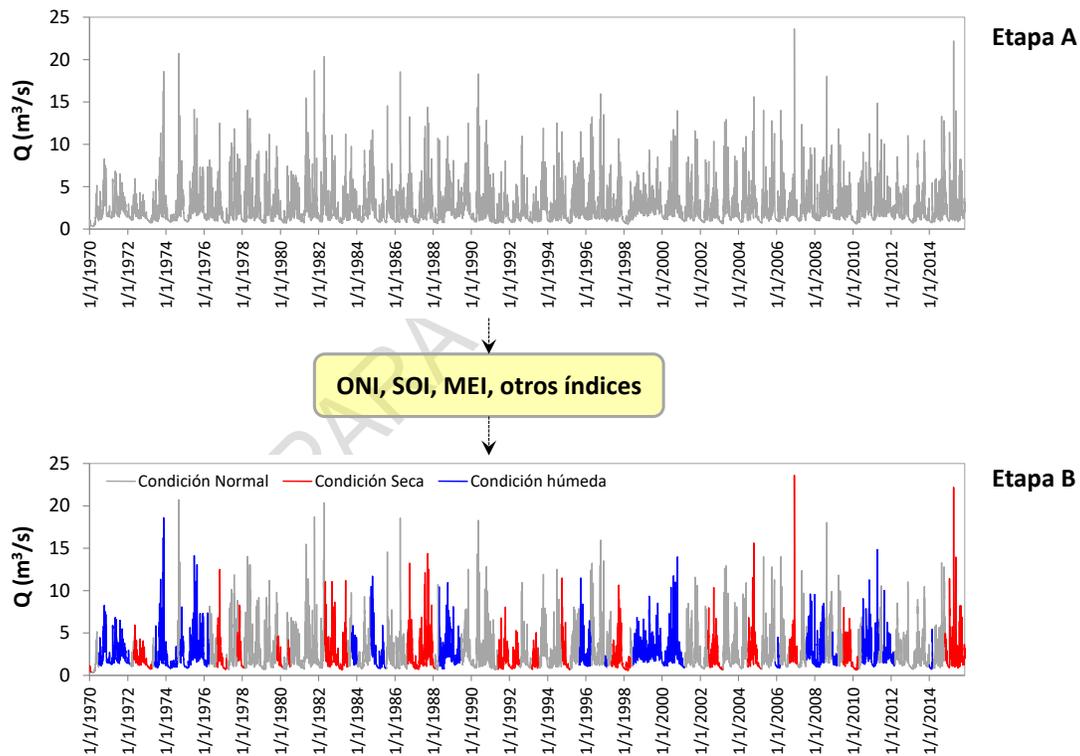


Figura 20 Categorización de caudales medios diarios en las condiciones hidrológicas normal, seca y húmeda (en este caso Neutral, El Niño, y La Niña). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

En los casos que se cuente con información que documente la influencia de otros fenómenos de variabilidad climática (e.g. Oscilación Decadal del Pacífico) sobre la respuesta hidrológica, tal información debe ser considerada en el análisis para la clasificación de la condición hidrológica (normal, húmeda o seca).

Una vez conformada la muestra de caudales medios diarios correspondiente a cada una de las condiciones hidrológicas, se estima para cada mes y cada condición hidrológica el valor

medio de los caudales mínimos anuales, tal como se ilustra en la Figura 21, en donde comparan dichas cantidades con los caudales medios multianuales.

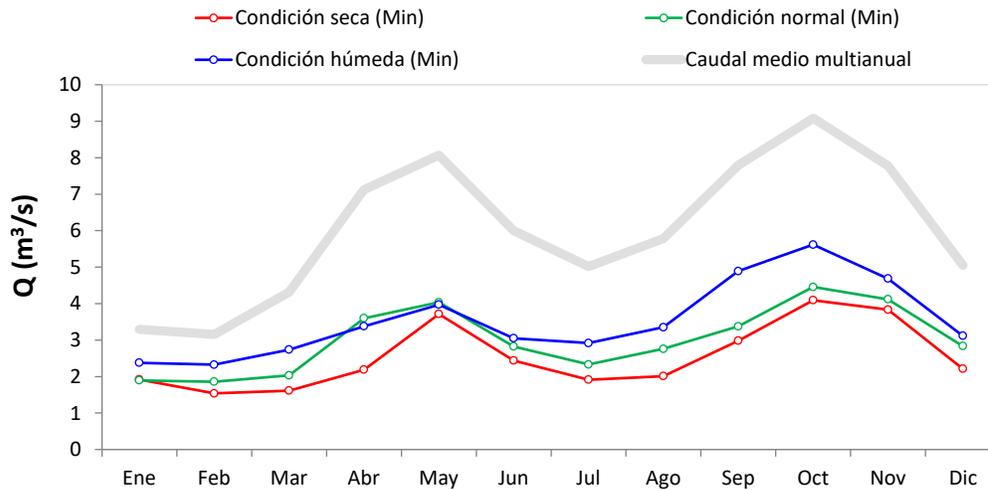


Figura 21 Media de los caudales mínimos anuales para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

En forma análoga, se requiere la estimación de caudales máximos representativos de cada mes y cada condición hidrológica. Sin embargo, a diferencia de los caudales mínimos, la magnitud de los caudales máximos instantáneos puede subestimarse con una resolución diaria de observación o simulación, dependiendo de factores que incluyen el tamaño de una cuenca, el tipo de respuesta hidrológica, la duración del evento de creciente y la configuración morfológica del segmento de corriente dentro del cual se encuentra el sitio de interés de la estimación de caudal ambiental.

De acuerdo con lo anterior, la siguiente etapa consiste en estimar, para cada mes y cada condición hidrológica, los caudales máximos representativos. Para condición *normal*, éste corresponde, para cada mes, al mayor valor entre el caudal máximo correspondiente a un período de retorno de 2.33 años (estimado con toda la serie de caudales asumiendo que se ajusta a una función de distribución tipo Gumbel, de lo contrario será el correspondiente al estimado por la función de distribución del mejor ajuste) y la media de los caudales máximos para dicha condición. Para condiciones *húmedas*, este corresponde, para cada mes, al valor más alto entre el caudal máximo correspondiente a 15 años de período de retorno (estimado con toda la serie de caudales) y la media de los caudales máximos para dicha condición, y para condiciones *secas* a la media de los caudales máximos para dicha condición. En la Figura 22 se ilustra lo anterior, junto con los valores mínimos estimados en la etapa anterior.

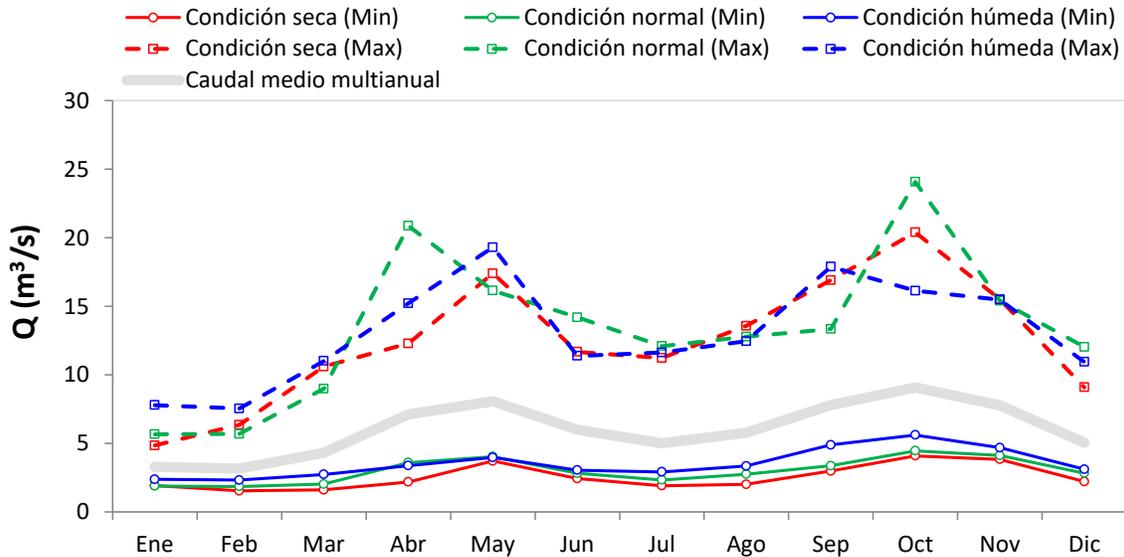


Figura 22 Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Los valores extremos (máximos y mínimos) definen el rango inicial de variación de caudales dentro del cual debe garantizarse el régimen de caudales ambientales que condicionará cualquier aprovechamiento hídrico en un sitio específico de la red de drenaje.

3.2.2 Paso 2: Calcular métricas de interés ecológico

En este paso se establecen las métricas hidrológicas e hidromorfométricas que serán utilizadas en pasos posteriores para la identificación y caracterización de eventos de interés ecológico del régimen natural e intervenido de caudales.

En esta guía se consideran cuatro componentes ambientales fundamentales del régimen de caudales (una simplificación de la propuesta original de Mathews y Richter, 2007), las cuales corresponden a valores singulares o específicos de caudal que permiten describir “(...) la forma en la cual un organismo experimenta la variabilidad de caudales de una corriente”. Debido a su carácter ecológico, dichos componentes se proponen como punto de partida para evaluar el máximo caudal aprovechable que permita preservar las propiedades del régimen (magnitud, duración, intensidad y momento de ocurrencia) para el cual las comunidades hidrobiológicas se han adaptado, cuando éstas efectivamente existen en un sector específico de la red de drenaje. En la Tabla 16 se describen los componentes ambientales del régimen, al igual que las funciones vinculadas al rango de caudales por encima o por debajo de los mismos.

En particular se resaltan los dos primeros componentes que se obtienen de las características hidromorfométricas del segmento de interés:

- El primer componente definido en este estudio corresponde al caudal de **conectividad longitudinal** – Q_{t-Q} , denotado como tal ya que para su estimación se emplea la relación tiempo-caudal en la escala de tramo o, de otra forma, a partir de la relación de geometría hidráulica para el tiempo de tránsito. Caudales por debajo de dicha magnitud se traducen en la aparición de barreras hidráulicas, entendiéndose éstas como condiciones locales que pueden ser permanentes, temporales, naturales o

inducidas, que restringen el movimiento de peces en la red de drenaje, ya sea hacia aguas arriba o hacia abajo (Cote et. al, 2009).

- El segundo componente corresponde al caudal de banca llena – Q_B o de **conectividad lateral**, el cual puede asociarse (como una variable indicadora) con la maximización del transporte de sedimentos a lo largo de una corriente, así como con la ocurrencia de eventos de desbordamiento de agua y sedimento hacia planicies de inundación o ecosistemas de transición (como humedales y rondas hídricas). Asimismo, dicha magnitud puede emplearse como característica de los eventos que favorecen la conexión entre cuerpos de agua lóticos y lénticos.

Tabla 16 Componentes ambientales del régimen de caudales. Adaptada de Mathews y Richter (2007)

Componente ambiental del régimen	Función / Relevancia	Definición del evento hidrológico (Mathews y Richter, 2007)	Definición del evento hidrológico (Esta guía)
Caudales extremos bajos	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden provocar cambios significativos en las propiedades físico-químicas del agua. - Secado de las zonas más deprimidas de la llanura de inundación. - Secado de riberas - Aumentos en la temperatura y disminución del oxígeno disuelto. - Reducción de conectividad, restringiendo así el movimiento de algunos organismos acuáticos. 	Percentil 10% de los caudales más bajos	Umbral (caudal) por debajo del cual se inducen barreras hidráulicas, es decir, reducción de conectividad $-Q_{t-Q}$ -. Puede estimarse a partir de la construcción de la relación de geometría hidráulica de tramo entre el tiempo medio de tránsito y el caudal (ya sea a partir de experimentos con trazadores, simulación hidráulica o relaciones empíricas)
Caudales bajos	<ul style="list-style-type: none"> - Proveen la magnitud y características (temperatura, velocidad de flujo, conectividad, etc.) de los hábitats acuáticos en la mayor parte del año. 	Caudal base en cada mes	
Pulsos de caudal	<ul style="list-style-type: none"> - Reducen el estrés al que se ven sometidos algunos organismos acuáticos durante sequías y caudales extremos mínimos. - Disminución de altas temperaturas y bajos contenido de oxígeno disuelto, alcanzados en épocas de sequía, y proveen capacidad de transporte de la materia orgánica que alimenta la red alimentaria acuática. - Favorecen el acceso hacia aguas arriba o hacia aguas abajo para organismos migratorios. 	Caudales mayores a los caudales bajos pero menores que el caudal de banca llena	Caudal de banca llena - Q_B - (ver numeral 3.2.2.2.2)
Inundaciones bajas	<ul style="list-style-type: none"> - Permiten a los peces y organismos móviles acceder a la llanura de inundación y hábitats tales como canales secundarios, humedales, etc. (áreas que proveen altos recursos 	Caudales mayores o iguales al caudal de banca llena, pero menores al caudal máximo asociado	

Componente ambiental del régimen	Función / Relevancia	Definición del evento hidrológico (Mathews y Richter, 2007)	Definición del evento hidrológico (Esta guía)
	alimenticios para el rápido crecimiento de especies, y áreas para desove).	a un período de retorno de 10 años	
Inundaciones altas	- Pueden transportar cantidades significativas de sedimento, madera y otra materia orgánica, formar nuevos hábitats y renovar las condiciones de calidad del agua, tanto en el cauce principal como en las llanuras de inundación.	Caudales mayores al caudal máximo asociado a un período de retorno de 10 años	Caudal máximo asociado un período de retorno $T_r=15$ años - $Q_{T_r=15}$. Regionalmente, puede estimarse mediante relaciones de escala Caudal vs. Área de Cuenca (UPME-UNAL, 2000).

El caudal $Q_{T_r=15}$ fue considerado en esta guía para considerar uno de los fenómenos con mayor afectación sobre el régimen hidrológico, la fase fría del fenómeno ENOS o La Niña. El fenómeno ENOS es el más estudiado a nivel mundial, y en particular para la región tropical americana donde se encuentra Colombia. De acuerdo con Rahmstorf (2002), en el clima actual la expresión más fuerte de variabilidad climática natural es el fenómeno ENOS, el cual tiene un período variable de 3-7 años y tiene impactos sociales y ecológicos a nivel mundial debido a sus efectos sobre la circulación atmosférica global. De acuerdo con los registros históricos de ocurrencia del fenómeno, las crecidas representativas de las condiciones máximas durante una temporada “normal” de La Niña se pueden asociar a una crecida con un período de retorno de 15 años.

3.2.2.1 Estimación de métricas hidrológicas de interés ecológico

Desde los resultados de la simulación del régimen natural de flujo, para el período de tiempo de referencia, se pueden obtener los valores de los eventos extremos anuales (máximos y mínimos) para el respectivo análisis de frecuencias. Para este último, deberán probarse diferentes funciones de distribución de probabilidad y las respectivas pruebas de bondad de ajuste, para definir cuál es la que mejor representa el comportamiento estadístico de la muestra.

Cuando se realiza el ajuste de una función de distribución de probabilidad, a un conjunto de datos hidrológicos, se sintetiza la información probabilística de la muestra. El ajuste puede realizarse mediante el método de los momentos o el de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros de las funciones de distribución. En la literatura técnica se pueden encontrar diferentes familias de distribuciones como por ejemplo las “Normales” (normal, lognormal, lognormal-III), las de “Valores extremos” (“Extreme Value 1-EV1” o Gumbel para máximos y mínimos, “Extreme Value 2-EV2” o Frechet, y “Extreme Value 3-EV3” o Weibull para máximos y mínimos), la exponencial, Gamma y las “Pearson” (Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III). Igualmente hay funciones de distribución particulares como las denominadas “TCEV” por sus siglas en inglés de “Two-component extreme value”, “Wakeby” o “Kappa” (ver en Naghettini y Silva, 2017) o funciones de distribución mixtas recomendadas para varias poblaciones como por ejemplo las afectadas por fenómenos de variabilidad climática (ver para Colombia la sugerencia dada por Poveda y Álvarez, 2012 tanto para caudales máximos como mínimos). Respecto a las pruebas de bondad de ajuste, unas de las más utilizadas son la Prueba Kolmogorov-Smirnov y la Prueba Chi Cuadrado. Adicionalmente, se pueden utilizar técnicas de selección de la función más apropiada a

través del test de bondad de ajuste Anderson-Darling y los criterios de información Bayesiano y de Akaike (ver Laio et al., 2009).

Teniendo en cuenta el anterior procedimiento, se obtendrán las métricas hidrológicas de interés ecológico tanto para extremos mínimos (caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años - $Q_{T=10}^{Min}$) como para extremos máximos (caudal máximo con periodo de retorno de 15 años - $Q_{T=15}^{Max}$).

3.2.2.2 Estimación de métricas morfométricas de interés ecológico

3.2.2.2.1 Relación tiempo - caudal

El caudal que fluye por una corriente alcanza una magnitud Q_{t-Q} para la cual emergen en el tramo barreras hidráulicas caracterizadas por bajas profundidades y altas velocidades (en especial en ríos de alta pendiente), tal como se ilustra en la Figura 23 para un segmento de corriente característico en zonas de alta pendiente.

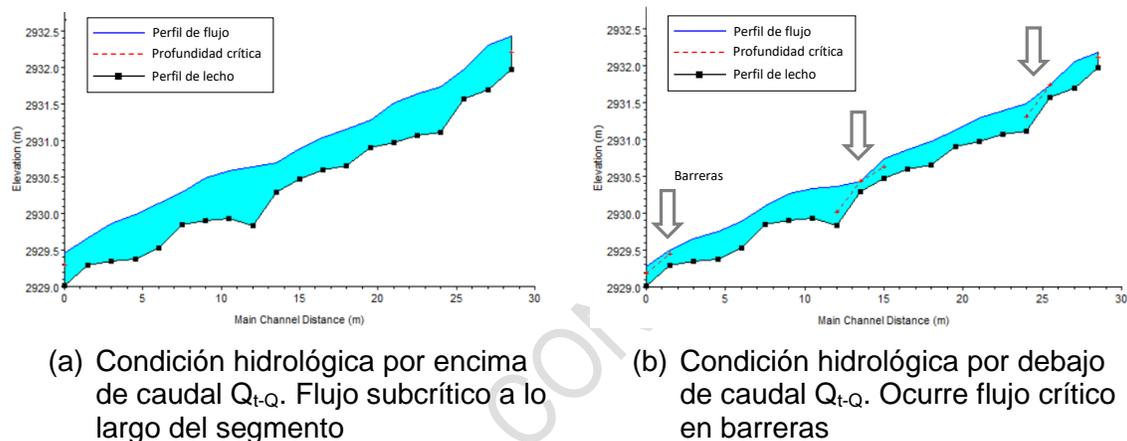


Figura 23 Perfiles de flujo en un tramo de alta pendiente y visualización de barreras hidráulicas cuando el caudal alcanza la magnitud Q_{t-Q} . Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Por debajo de dicha cantidad Q_{t-Q} , ocurren incrementos significativos del tiempo de residencia en el tramo ante pequeñas disminuciones de caudal, lo cual puede llegar a ser desfavorable cuando llegan cargas contaminantes significativas ya que en las unidades de meso-hábitat aisladas hidráulicamente, y que son a su vez refugio potencial de especies, puede agotarse rápidamente el oxígeno disponible.

Para estimar el caudal Q_{t-Q} se propone construir el diagrama tiempo de residencia vs caudal para cada uno de los tramos definidos en el numeral 3.1.2.4 o en aquellos en los que se cuente con información detallada. Dicho diagrama representa el tiempo medio de tránsito - t_m - que un soluto emplea para moverse desde el extremo aguas arriba del tramo hasta el extremo aguas abajo del mismo.

Para obtener el diagrama $t-Q$ pueden considerarse las siguientes alternativas:

- Caso 1: ausencia de información hidráulica detallada

Se propone emplear en ríos de alta pendiente (morfologías *step-pool*, *cascade* o transicionales) la aproximación propuesta por Jiménez y Wohl (2013) y para ríos de baja pendiente (*plane bed*, *pool-riffle*, *dunne-ripple*) el modelo MDLC propuesto por Camacho y Lees (1999).

Para el primer caso, una aproximación al diagrama tiempo-caudal se puede lograr mediante las relaciones adimensionales dadas en la Tabla 17. Aproximaciones análogas pueden encontrarse en Ferguson (2007).

Tabla 17 Relaciones empíricas para la estimación de tiempos de tránsito en la escala de tramo, en ríos de alta pendiente

Referencia	Relación empírica		Definición de variables
Jiménez y Wohl (2013)	$t_m^* = 1.4247q^{*-0.507};$	$q^* = \frac{Q}{W_B \sqrt{gH_s^3}}$	Q: caudal W _B : ancho de banca llena medio en el tramo g: gravedad
		$t_m^* = \frac{t_m \sqrt{gH_s}}{L_R}$	H _s : altura promedio de los escalones o caídas características del tramo L _R : longitud del tramo
Comiti et al. (2007)	$t_m^* = 1.0870q^{*-0.66};$	$q^* = \frac{Q}{W \sqrt{gD_{84}^3}}$	Q: caudal W: ancho de flujo g: gravedad
		$t_m^* = \frac{t_m \sqrt{gD_{84}}}{L_R}$	D ₈₄ : diámetro característico del sedimento, correspondiente al 84% de la curva granulométrica L _R : longitud del tramo

Para el segundo caso (corrientes limitadas por capacidad) se propone emplear el modelo MDLC (*Multilinear Discrete Lag-Cascade*). Esta aproximación, conceptualiza el transporte de caudales a lo largo de un tramo, combinando el tránsito a lo largo de *n* embalses lineales con un coeficiente de almacenamiento *K*, con un canal lineal caracterizado por un parámetro de retraso advectivo τ (Figura 24).

Una de las ventajas del modelo MDLC es que la estimación de sus parámetros puede hacerse a partir de las propiedades geométricas de un tramo para cualquier condición de flujo, de acuerdo con las ecuaciones [1] a [4], donde *c₀* denota la celeridad de onda cinématica, *U₀* la velocidad media de flujo, *F₀* el número de Froude, *L_R* la longitud del segmento, *y₀* la profundidad normal y *S* la pendiente del segmento.

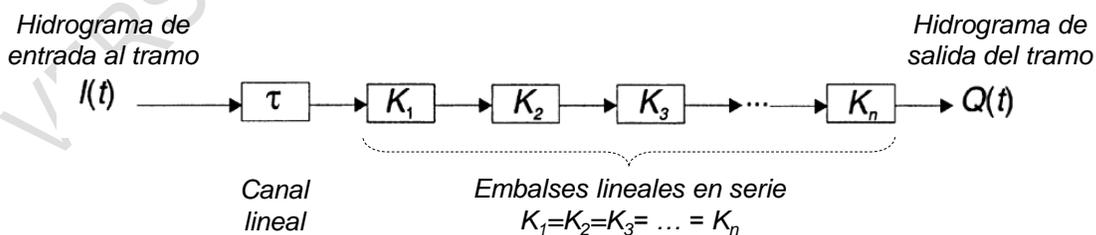


Figura 24 Estructura del modelo MDLC (tomada y modificada de Camacho y Lees, 1999)

$$m = \frac{c_0}{V_{media}}; \quad [1]$$

$$K = \frac{3}{2m} [1 + (m - 1)F_0^2] \left(\frac{y_0}{SL_R} \right) \left(\frac{L_R}{mV_{media}} \right) \quad [2]$$

$$n = \frac{\frac{4m}{9}[1-(m-1)^2 F_0^2]}{[1-(m-1)F_0^2]\left(\frac{y_0}{SL_R}\right)} \quad [3]$$

$$\tau = \left(\frac{L_R}{mV_{media}}\right) \left\{1 - \frac{\frac{2}{3}[1-(m-1)^2 F_0^2]}{[1-(m-1)F_0^2]}\right\} \quad [4]$$

De acuerdo con el modelo anterior, una aproximación al tiempo medio de viaje en el tramo, t_m , viene dado por la ecuación [5].

$$t_m = m(nK + \tau) \quad [5]$$

- Caso 2: información hidráulica detallada

Corresponde al caso en el que se cuenta con un modelo hidráulico de detalle en la escala de tramo, a partir del cual es posible llevar a cabo simulaciones para diferentes condiciones de flujo, evaluando así el correspondiente tiempo de tránsito. Asimismo, cuando se cuenta con diferentes experimentos con trazadores realizados para diferentes condiciones de flujo, tal como se ilustra en la Figura 25.

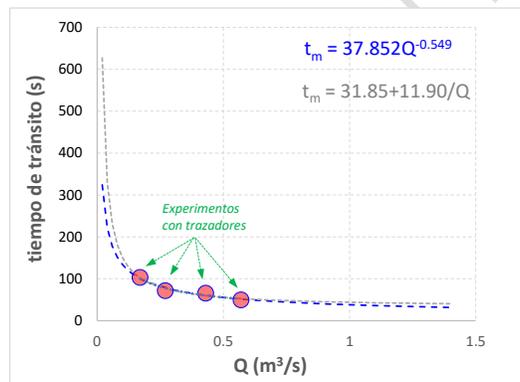


Figura 25 Aproximación al diagrama t-Q empleando experimentos con trazadores. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Una vez se cuente con el diagrama t-Q (ver ejemplo en Figura 26), resta estimar a partir de éste el caudal Q_{t-Q} , el cual viene dado por la abscisa del punto de máxima curvatura en el diagrama o punto de quiebre. Un método para identificar el punto de quiebre es seleccionar el punto en la curva donde la pendiente $\Delta t_m / \Delta Q$ alcanza un valor igual a -1 luego de normalizar ambos ejes respecto al valor máximo (Gippel y Stewardson, 1998).

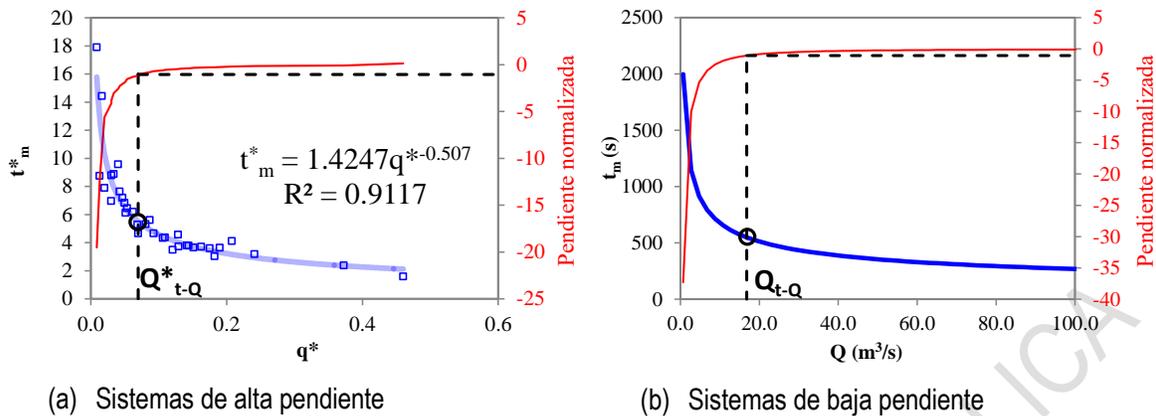


Figura 26 Identificación de métrica Q_{t-Q} a partir diagramas tiempo caudal: en sistemas de alta pendiente según Jiménez y Wohl (2013) y en sistemas de planicie de acuerdo con el modelo MDLC (Camacho y Lees, 1999)

Finalmente, el caudal Q_{t-Q} estimado en forma independiente para cada uno de los tramos puede ser regionalizado empleando como variables de escala el área de cuenca y la pendiente del tramo. Un ejemplo de ello se ilustra en la Figura 27 para la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare – CORNARE.

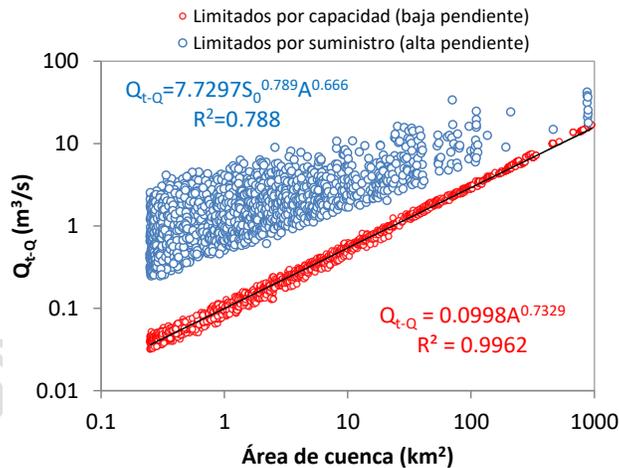


Figura 27 Regionalización del caudal Q_{t-Q} como una función del área de cuenca y la pendiente del tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

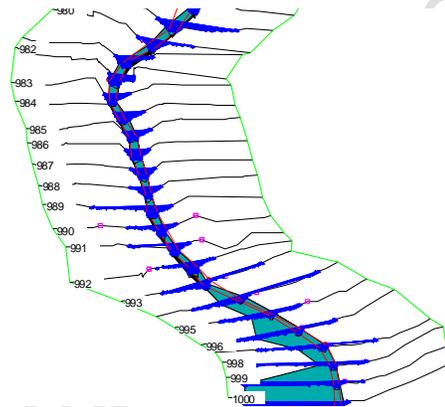
Como se aprecia en la Figura 27, la regionalización para dicho caso de estudio tiene un nivel de ajuste aceptable para ríos limitados por capacidad (ríos de baja pendiente), mientras que en ríos limitados por suministro (alta pendiente) el ajuste es pobre: para una misma área se dan diferencias entre 1 y 2 órdenes de magnitud en el valor de Q_{t-Q}

3.2.2.2.2 Caudal de banca llena

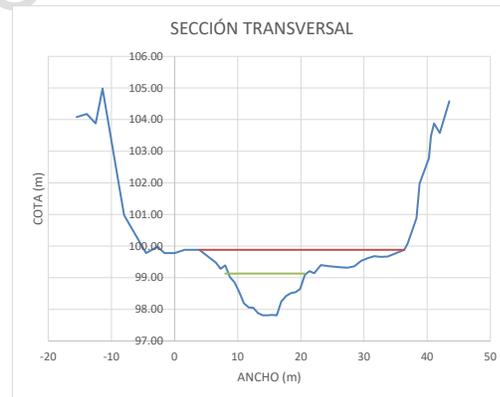
La información hidrométrica disponible (primaria y secundaria) se emplea en este paso para estimar el caudal de banca llena¹⁷ $-Q_B-$ en diferentes sitios del área de estudio, así como el ancho de flujo $-W_B$ y profundidad de flujo $-H_B$ correspondientes. Dicha información es requerida como insumo para la definición de las componentes ambientales del régimen y para la parametrización de las propiedades geométricas de la red de drenaje en sitios desprovistos de información.

En este punto cabe recordar que la información hidrométrica disponible puede incluir modelos hidráulicos configurados en el marco de estudios previos y secciones transversales y propiedades hidráulicas levantadas en el marco de planes de monitoreo y/o seguimiento, tal como se ilustra en la Figura 28.

Las propiedades de banca llena pueden estimarse como el promedio (cuando se cuenta con modelo hidráulico) o como un valor singular (cuando se cuenta sólo con una sección transversal) correspondiente al estado de flujo que maximiza la potencia específica de la corriente $\omega = \gamma Q S_o / W$, donde γ es el peso específico del agua, Q es el caudal que fluye a través del segmento o sección transversal, S_o es la pendiente media del segmento y W es el ancho superficial de flujo. Alternativamente, dicha condición puede identificarse de acuerdo con la propuesta de Radecki-Pawlik (2002), la cual sugiere la identificación de la condición de banca llena cuando la relación ancho profundidad $-W/H-$ alcanza un mínimo local.



(a) Información hidrométrica secundaria
-Modelos hidráulicos-



(b) Información hidrométrica primaria o secundaria (debe incluir zona seca)
-Secciones transversales-

Figura 28 Esquematación de la información hidrométrica disponible. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

En la Figura 29 se ilustran las etapas de los métodos sugeridos. La primera etapa consiste en determinar para cada tramo o sitio de monitoreo el área de cuenca que allí drena.

¹⁷ La condición de banca llena corresponde a aquella condición a través de la cual se puede obtener una aproximación del caudal dominante de una corriente, la cual maximiza el trabajo geomorfológico (Carling, 1988). Lo anterior implica que caudales cercanos a dicha magnitud son responsables de varios de los atributos morfológicos y geométricos a lo largo de un segmento de corriente específico. Asimismo, dicha condición geomorfológica es ampliamente empleada para llevar a cabo comparación de procesos fluviales en múltiples escalas de análisis.

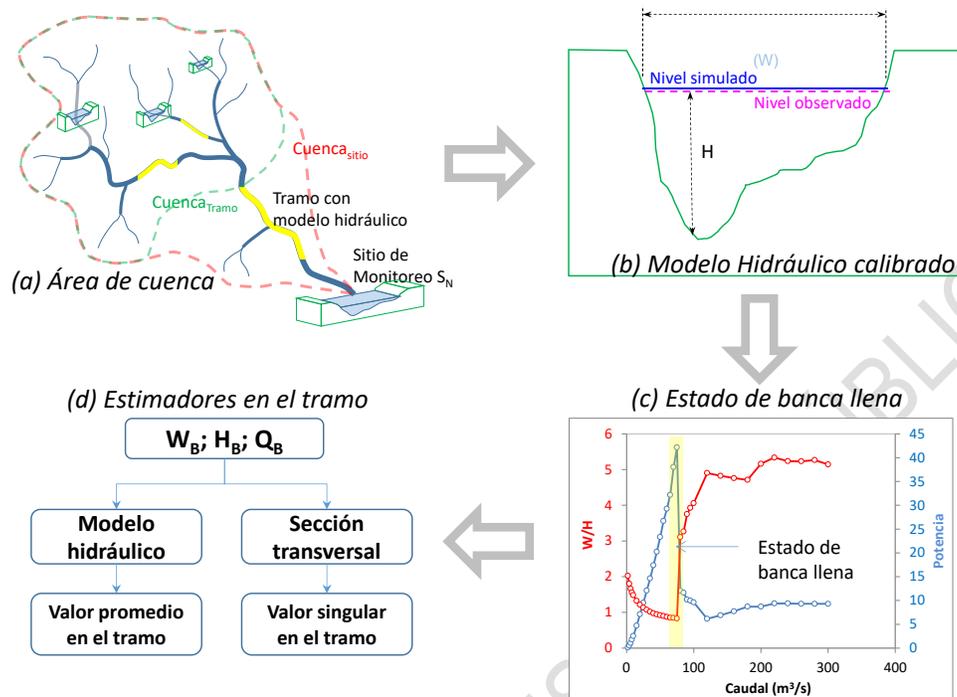


Figura 29 Esquemización de las etapas requeridas para la estimación de las condiciones de banca llena en sitios o segmentos monitoreados. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Posteriormente, se requiere que en cada una de las secciones transversales se puedan simular condiciones hidráulicas para cualquier caudal, implementando para ello un modelo hidráulico calibrado. Como alternativa, cuando se cuente con secciones transversales, se podrán emplear los atributos hidrométricos levantados durante las jornadas de aforo para simular hidráulicamente (e.g. a través de modelos de flujo uniforme) condiciones de caudal diferentes a las observadas en campo.

En la tercera etapa, se estiman para diferentes condiciones de flujo las métricas W/H y ω , las cuales permiten identificar aquel estado en el que la primera alcanza un mínimo local y la segunda un máximo local. Es importante hacer verificaciones con las observaciones y evidencias hechas en campo, ya que en una sección transversal pueden existir diferentes estados que conlleven a dicha condición numérica.

Finalmente, las propiedades de banca llena pueden estimarse de acuerdo con la etapa 4 ilustrada en la Figura 29.

Alternativas de regionalización de propiedades hidrométricas

En un contexto regional, la información hidrométrica levantada permite llevar a cabo la parametrización de la red de drenaje en términos de su *geometría hidráulica*¹⁸ (Leopold and Madock, 1953; Burns, 1998; Vianello and D'Agostino, 2007; Parker et al., 2007).

El objetivo de este paso es lograr una aproximación al dimensionamiento de tramos de corriente en sitios en donde no existe información disponible. Para dimensionar o escalar los cauces hacia aguas abajo se proponen como punto de partida las relaciones de

¹⁸ Dicho concepto se refiere a las relaciones que pueden establecerse entre las propiedades geométricas (ancho, profundidad de flujo, etc.) e hidráulicas (velocidad, rugosidad, etc.) de una corriente y el caudal transportado, de acuerdo con relaciones como las mostradas en la Figura 29 para el ancho de flujo y la profundidad de flujo en una sección transversal, o en la Figura 30 para el ancho de banca llena a lo largo de la red de drenaje.

geometría hidráulica sugeridas por Jiménez (2015), a partir de las cuales es posible estimar el ancho de banca llena $-W_B-$ como una función del área de cuenca $-A-$ y su tipo morfológico (Figura 30). Dichas relaciones se diferencian para aquellos tipos morfológicos considerados en el sistema de clasificación morfológica de Flores et al. (2006, ver numeral 3.1.2.4). Por otro lado, la información provista por dichos diagramas puede retroalimentarse a nivel nacional con las parejas de valores (A, W_B) que se obtengan para los sitios de monitoreo y/o en los tramos que poseen modelo hidráulico.

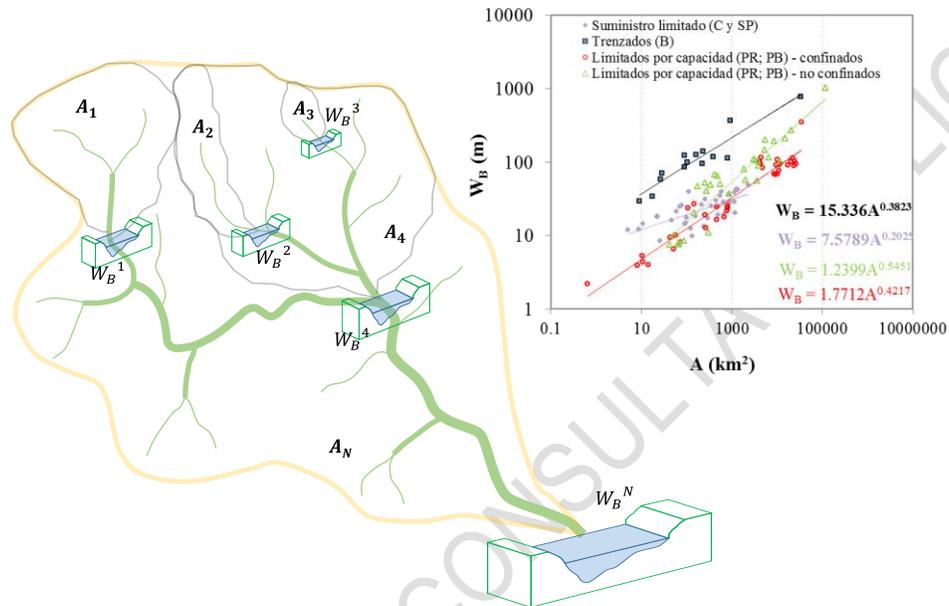


Figura 30 Esquematación de la geometría hidráulica hacia aguas abajo para el ancho de banca llena.
Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Por otro lado, en la Figura 31 se muestra que W_B y H_B por sí solos no permiten representar la variaciones de propiedades hidráulicas para otras condiciones de flujo diferentes a Q_B , para lo cual pueden emplearse las secciones transversales disponibles con el fin de establecer relaciones adimensionales de la forma dada por las ecuaciones [6] y [7] (Orlandini y Rosso, 1998; Mejía y Reed, 2011), donde W_B , H_B y Q_B corresponden a las condiciones de banca llena estimadas en las secciones transversales disponibles, W y H las condiciones asociadas a cualquier caudal Q , y a_1 , a_2 , b_1 y b_2 son los parámetros de la sección que al ser adimensionales se pueden emplear como una aproximación en otros sitios con configuración morfológica semejante.

$$\frac{W}{W_B} = a_1 \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{b_1} \quad [6]$$

$$\frac{H}{H_B} = a_2 \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{b_2} \quad [7]$$

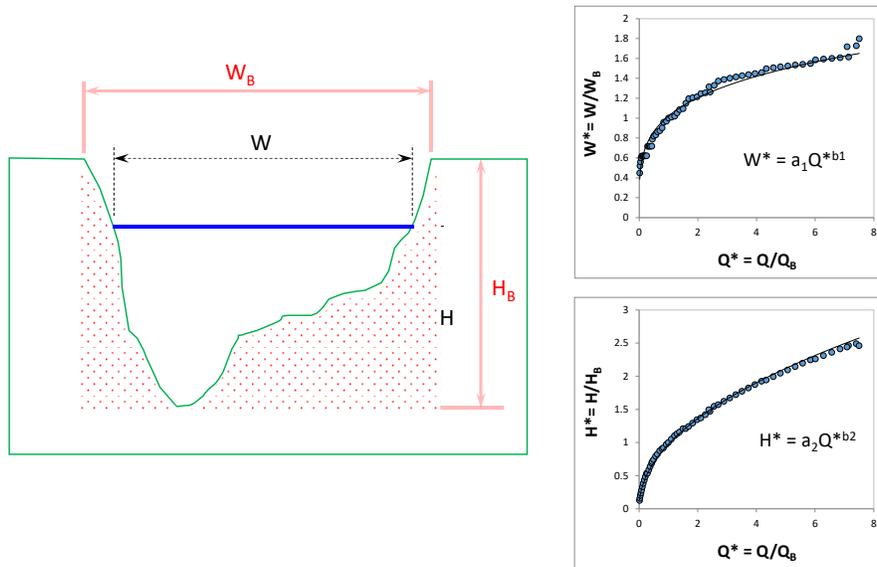


Figura 31 Esquematación de la geometría hidráulica en la estación para el ancho de banca llena. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

3.2.3 Paso 3: Identificar y caracterizar los eventos de interés ecológico del régimen hidrológico natural (o naturalizado)

De las series de caudal medio diario simuladas u observadas, se obtiene la caracterización de los eventos de interés ecológico (duración T , la magnitud D y la intensidad I) que se encuentran por encima de las métricas Q_B y $Q^{Max}_{Tr=15}$, o por debajo de los caudales Q_{t-Q} y $Q^{Min}_{Tr=10}$ tal como se recapitula en la Figura 32. El rango de valores se constituye entonces en la serie de caudales que probablemente mantendrían la sostenibilidad de dinámicas ecosistémicas similares a las establecidas históricamente, en escala ecológica, por el régimen natural de caudales del cuerpo de agua evaluado.

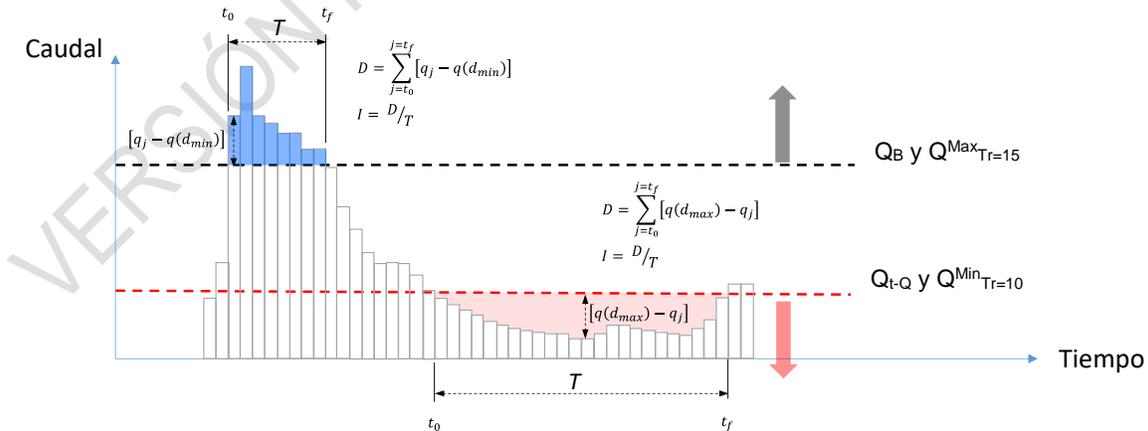


Figura 32 Esquematación de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

El procedimiento consiste en identificar y separar para cada mes cada uno de los eventos de interés ecológico esquematizados en la Figura 33, obteniendo así una muestra estadística cuya representatividad será mucho mayor conforme mayor sea la longitud de la serie de caudales simulada (u observada cuando se cuenta con éstas). La Tabla 18 presenta un ejemplo de separación y caracterización de los eventos por encima del caudal de banca llena.

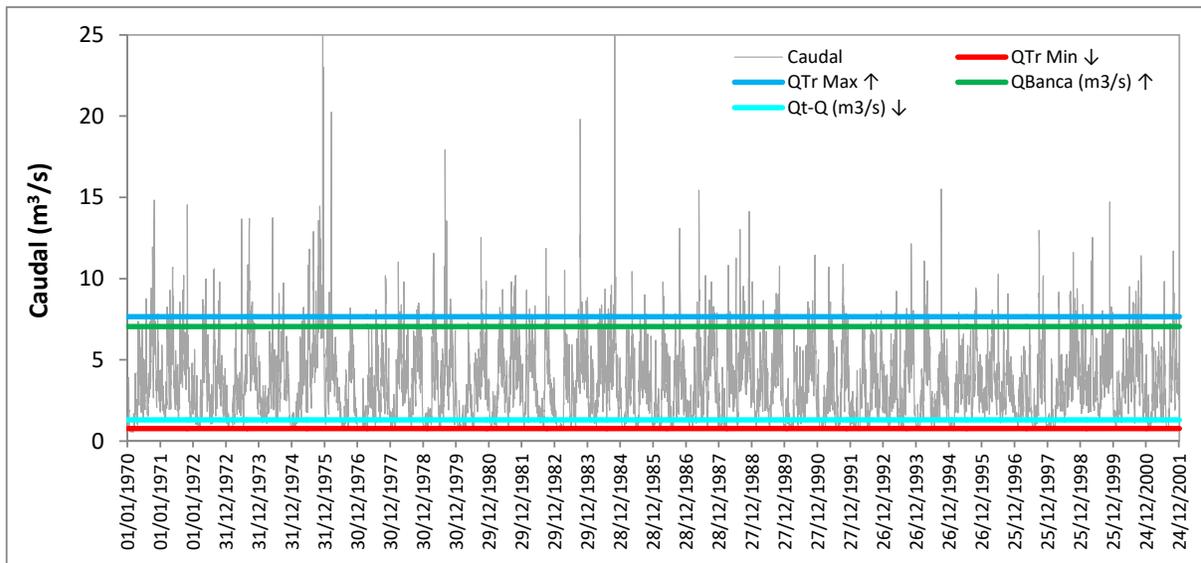


Figura 33 Visualización de serie de tiempo de caudales y métricas definidas por los componentes ambientales del régimen Q_{t-Q} y Q_B , $Q_{\max Tr=15}$ y $Q_{\min Tr=10}$. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Tabla 18 Ejemplo de separación y caracterización de los eventos por encima del caudal de banca llena Q_B

Evento	Mes	Fecha Inicial	Fecha Final	Duración (días)	Magnitud (m^3)	Caudal ($m^3/día$)
1	1	04/01/1989	06/01/1989	3	13.2983	4.4327666
2	1	21/01/1989	21/01/1989	1	1.005917	1.0059169
3	1	23/01/1989	23/01/1989	1	2.821806	2.82180556
4	2	20/02/1982	22/02/1982	3	4.681198	1.56039927
5	2	09/02/1993	10/02/1993	3	4.236127	2.11806359
6	2	15/02/1999	16/02/1999	2	1.186896	0.59344804

La muestra conformada permite definir para cada mes el número de eventos, la media, desviación estándar, cuartiles y valores extremos para la duración T , magnitud D , e intensidad I , estableciendo así una línea base del régimen de dichos eventos analizados.

3.2.4 Paso 4: Generar la propuesta de aprovechamiento máximo de caudales

Una vez caracterizada la duración, la magnitud y la intensidad de los eventos de interés ecológico en condiciones naturales, es posible hacer la siguiente pregunta: ¿Cuál es la magnitud máxima de caudal que puede extraerse (captarse, desviarse, etc.) sin alterar significativamente dicho régimen? Para responderla, en esta guía se propone un proceso iterativo a partir del cual es posible estimar mes a mes el porcentaje máximo de caudal que podría extraerse (captarse, desviarse, etc.), sin alterar significativamente el régimen en condiciones naturales, es decir, sin afectar los principales atributos relacionados con la salud del ecosistema.

El primer paso consiste en definir el caudal extraído mes a mes como un porcentaje P del caudal medio mensual, tal como se ilustra en la Figura 34.

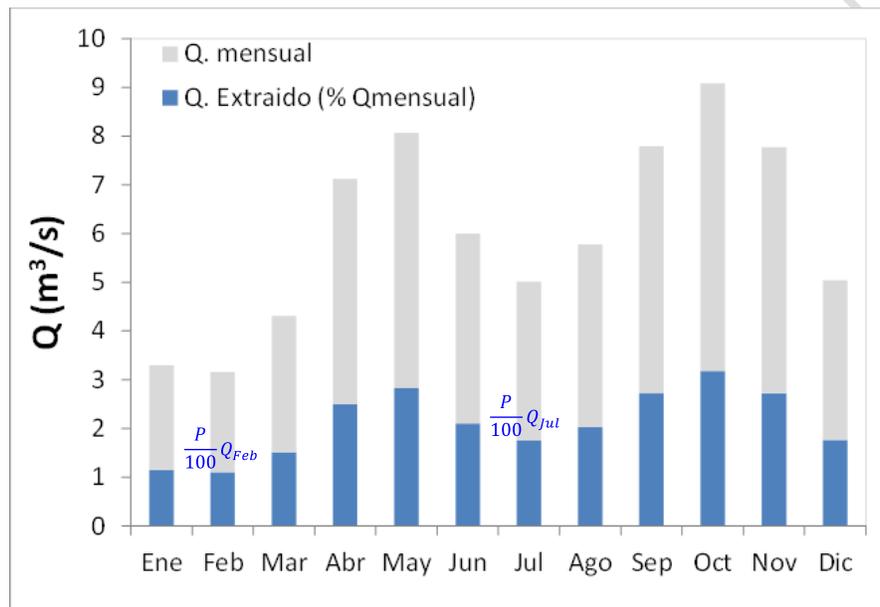


Figura 34. Caudal de aprovechamiento mensual como un porcentaje P del caudal medio mensual. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Posteriormente, a partir de la serie de caudales naturales $Q(t)$, simulados u observados, se emplea una estrategia de aprovechamiento para obtener una serie de caudales aprovechados $q(t)$ y su correspondiente serie de tiempo de caudales aguas abajo $Q^*(t)$, como sigue:

$$q_j = \frac{P}{100} Q_{\text{mensual}}^j ; \forall j = 1, \dots, 12 \text{ mes}$$

$$Q_{i,j}^* = \begin{cases} Q_{i,j} - q_j ; & \text{si } Q_{i,j} - q_j > Q_{\text{minimo}}^j \\ Q_{\text{minimo}}^j ; & \text{si } Q_{i,j} - q_j < Q_{\text{minimo}}^j \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, N \text{ días y } \forall j = 1, \dots, 12 \text{ mes}$$

Donde P es el porcentaje de aprovechamiento mensual definido, q_j es el caudal aprovechable y $Q_{i,j}^*$ es el caudal aguas abajo.

3.2.5 Paso 5: Identificar los eventos de interés ecológico para la serie alterada de caudales o niveles

Partiendo de la serie de caudales obtenida aguas abajo $Q^*(t)$, es posible aplicar nuevamente el proceso de identificación y caracterización de los estadísticos de los eventos de interés ecológico, y comparar éstos con aquellos correspondientes a las condiciones naturales. En la Figura 35 se ilustra la comparación entre la variabilidad mensual de las duraciones de un evento en condiciones naturales (diagrama de cajas azules) y luego del aprovechamiento P (diagrama de cajas rojas).

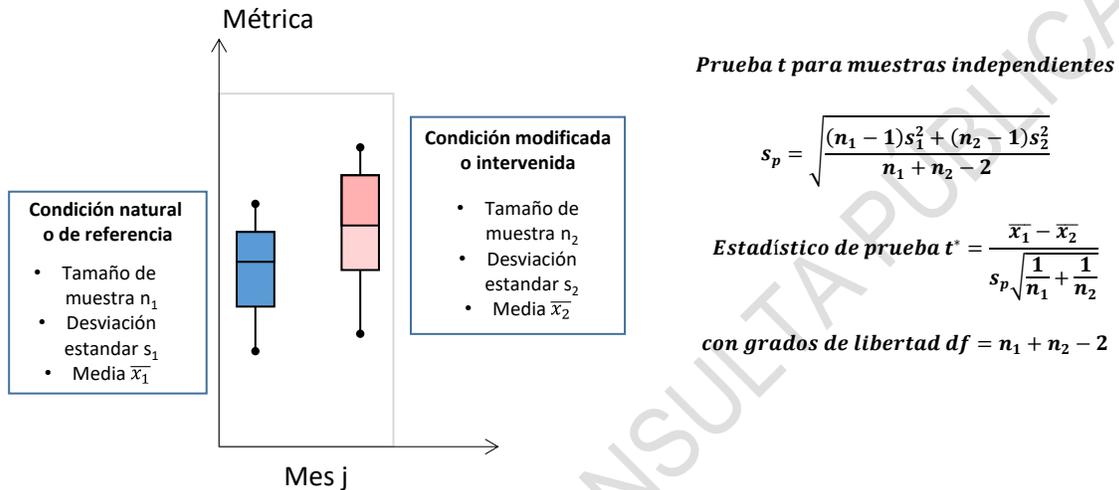


Figura 35. Prueba t para evaluar si la distribución de una métrica (duración, intensidad, magnitud) es significativamente diferente para dos escenarios diferentes. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.

3.2.6 Paso 6: Evaluar iterativamente la alteración del régimen hidrológico natural a partir de los resultados de los pasos 3 y 5

La comparación entre las condiciones naturales y las posteriores al aprovechamiento puede hacerse mediante una prueba estadística t para muestras independientes, la cual se lleva a cabo mes a mes para cada uno de los eventos ($Q_B \uparrow$; $Q_{Tr=15} \uparrow$; $Q_{t-Q} \downarrow$; $Q_{Tr=10} \downarrow$) y métricas (duración, magnitud e intensidad) analizadas. De esta manera es posible definir para cada mes el máximo caudal aprovechable que no induce alteración del régimen hacia aguas abajo. Es importante anotar que se sugiere la prueba t por su facilidad en la aplicación y agilidad en el proceso iterativo; esta prueba ha mostrado resultados satisfactorios en muestras donde su tamaño no es muy pequeño y no existe mucha asimetría en la distribución alrededor de la media (Larsen y Marx, 1986); sin embargo, dada la usual asimetría de las distribuciones de probabilidad asociadas con las variables hidrológicas y los pequeños tamaños de las muestras de datos, tal aproximación tiene limitación en su aplicación (Naghetini y Silva, 2017). Para solucionar tal inconveniente, se sugiere el uso de pruebas alternativas como las de Spearman (Spearman, 1904) o Kendall (Kendall, 1938), las cuales no asumen normalidad en la distribución de probabilidades ni están limitadas por el tamaño de la muestra. Igualmente, son de fácil implementación y amplio conocimiento y aplicación.

Los resultados que se obtienen en un sitio específico de análisis, luego de la aplicación del método antes descrito, se ilustran en la Figura 36a y Figura 36b. Allí se compara el rango intercuartil [Q25% - Q75%] mensual para condiciones naturales y para condiciones de máximo aprovechamiento, desde el punto de vista del régimen de caudales.

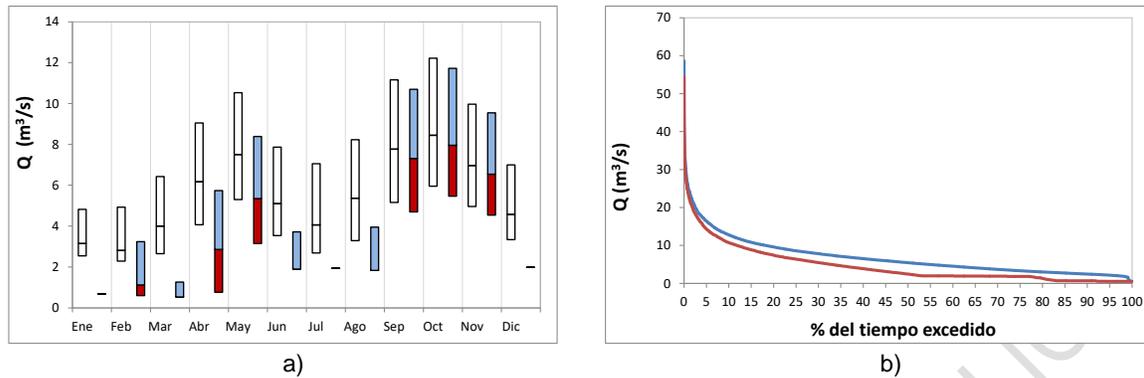


Figura 36. Régimen de caudales en condiciones naturales y alteradas: (a) Régimen de caudales medios en condición natural (cajas blancas) y luego del aprovechamiento máximos considerando el régimen de los componentes del régimen $QB\uparrow$; $Q_{Tr}=15\uparrow$; $Q_t-Q\downarrow$; $Q_{Tr}=10\downarrow$; (b) Curvas de duración en condición natural (azul) y luego del aprovechamiento máximos considerando el régimen de los componentes del régimen. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.

Una vez determinado el máximo caudal aprovechable que no induce alteración del régimen, se debe clasificar la serie de tiempo de caudales aguas abajo $Q^*(t)$ obtenida para los tres periodos hidrológicos: normal (e.g. *Neutral*), seco (e.g. *El Niño*) y húmedo (e.g. *La Niña*), siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 3.2.1.2.2.

En la Figura 37 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos para condición hidrológica seca. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

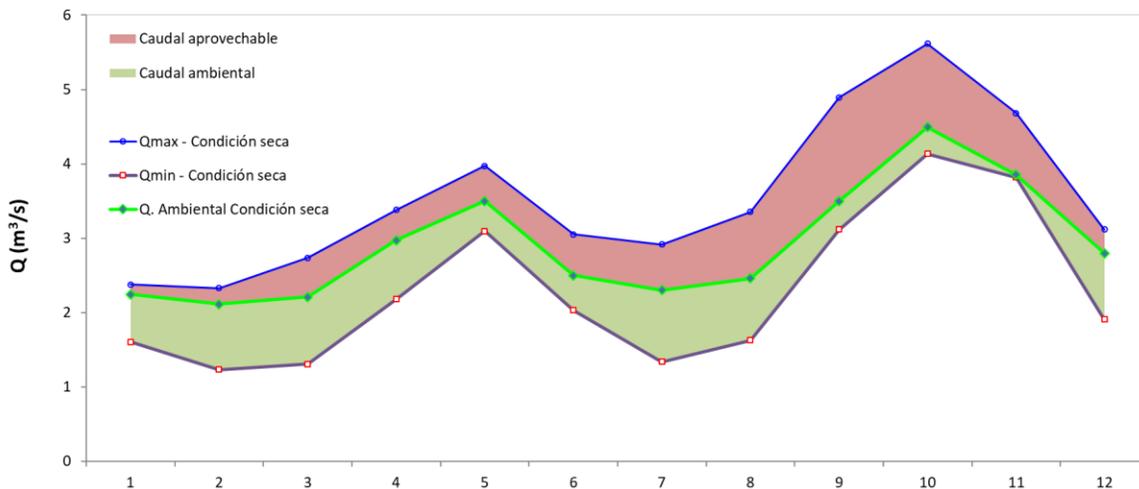


Figura 37. Caudales ambientales y aprovechables para condición hidrológica seca en un punto de la red de drenaje.

3.2.7 Paso 7: Obtener la información hidrobiológica de línea base que servirá como referencia para el seguimiento a la implementación de los caudales ambientales

Con el fin de conocer los requerimientos de hábitat para la ictiofauna se emplea el Índice de Idoneidad de Hábitat con análisis Multi-Especies (MHSI por sus siglas en inglés) propuesto por Zhao et al. (2015), el cual permite realizar recomendaciones de manejo sobre cuáles variables ambientales son necesarias para mantener en cierto rango de condición las poblaciones.

Para la estimación del índice es necesaria la información de abundancia y biomasa de las especies ícticas, así como la información hidráulica, fisicoquímica y microbiológica de los sitios de monitoreo, con el fin de los obtener rangos de preferencia por parte de las especies ícticas para estas variables. El procedimiento para la estimación del MHSI es el siguiente:

1. Agrupar los sitios de monitoreo, de acuerdo con las unidades morfológicas del tramo correspondiente (Figura 38). Cada grupo tendrá asociado el conjunto de especies allí encontradas, su abundancia $-N_r$ y su biomasa $-B_r$.

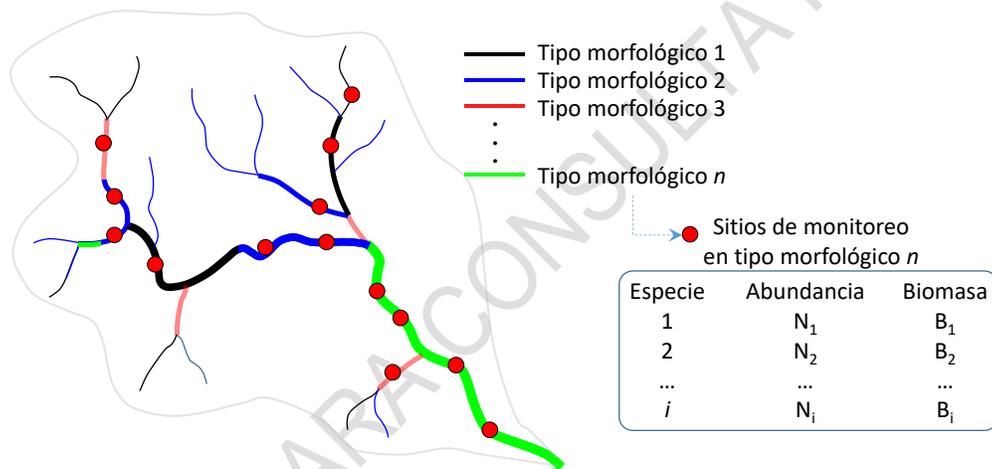


Figura 38. Agrupación de sitios de monitoreo de acuerdo con el contexto hidro-morfológico del área de estudio. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.

2. Estimar el factor de importancia I_i , para cada especie

$$I_i = \omega_1 P_{a,i} + \omega_2 P_{b,i}$$

$$P_{a,i} = \frac{N_i}{\sum N_i}$$

$$P_{b,i} = \frac{B_i}{\sum B_i}$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \quad \text{y} \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{a}{b}$$

Donde:

- ω_1 y ω_2 : pesos relativos de la abundancia y la biomasa, respectivamente
- $P_{a,i}$ y $P_{b,i}$: abundancia y biomasa normalizadas de la especie i

Las constantes a y b son las coordenadas del centroide en el campo adimensional P_a y P_b , las cuales pueden estimarse directamente: (Figura 39).

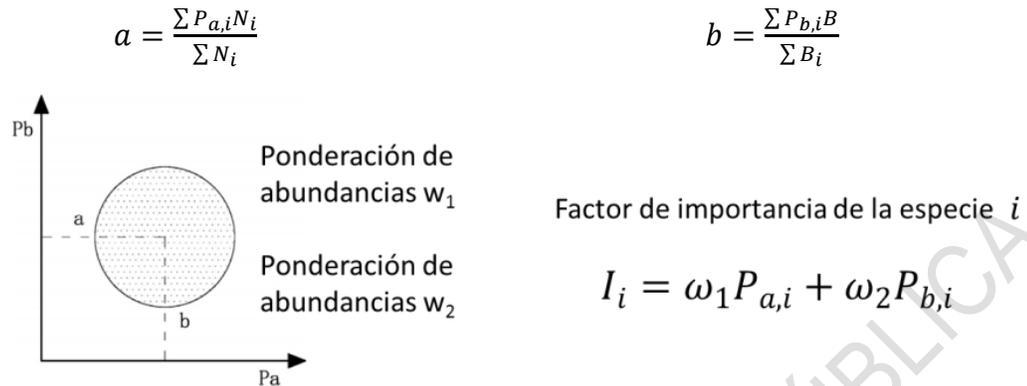


Figura 39. Valoración de la importancia de cada especie de acuerdo con su abundancia y biomasa. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.

3. Organizar los valores del factor de importancia I_i , descendientemente y construir una curva de importancias acumuladas o curva de rarefacción.
4. A partir de la curva identificar las especies dominantes como aquellas ubicadas antes del punto de quiebre de la curva (Figura 40). Para identificar el punto de quiebre, puede usarse el procedimiento descrito en el numeral 3.2.2.1 para identificar el caudal Q_{t-Q} .

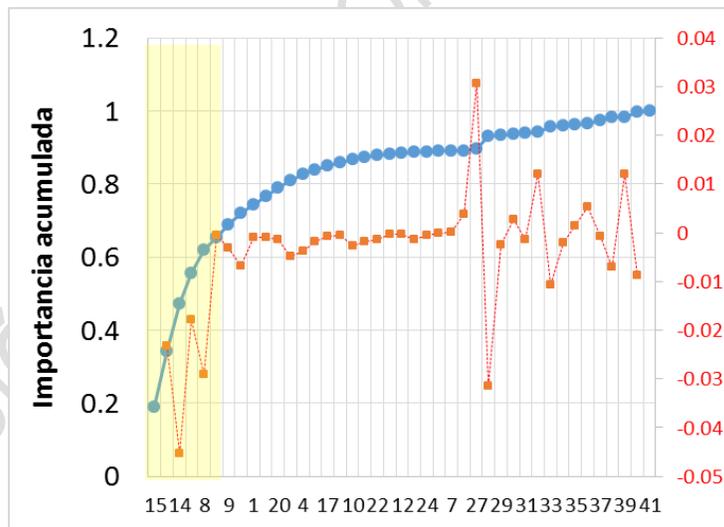


Figura 40. Selección de especies representativas o dominantes. Fuente: MinAmbiente-CORNARE, 2015.

5. Estimar el MHSI para cada uno de los factores de hábitat

$$MHSI_k = \sum_{i=1}^I \frac{n_{ki}}{IN_i} ; \text{ con } N_i = \sum_{k=1}^K n_{ki}$$

Donde:

- $MHSI_k$: índice de idoneidad de hábitat para el k -ésimo gradiente del factor de hábitat analizado,
- i : i -ésima especie dominante
- I : abundancia total de especie dominantes
- n_{ik} : abundancia de la i -ésima especie en el k -ésimo gradiente
- N_i : abundancia de la i -ésima especie en todos los factores del factor de hábitat analizado.

En la Figura 41 se ilustra la obtención del MHSI para tres factores de hábitat diferentes, uno de ellos del grupo de variables físico-químicas (oxígeno disuelto) y los dos restantes del grupo de variables hidrométricas. Teniendo en cuenta que los atributos geométricos de un cauce (profundidad, ancho, radio hidráulico, perímetro mojado, área, etc.) dependen del tamaño del cauce, se propone la utilización de cantidades adimensionales (por ejemplo, Y_{\max}/H_B , siendo Y_{\max} la profundidad máxima y H_B la profundidad de banca llena).

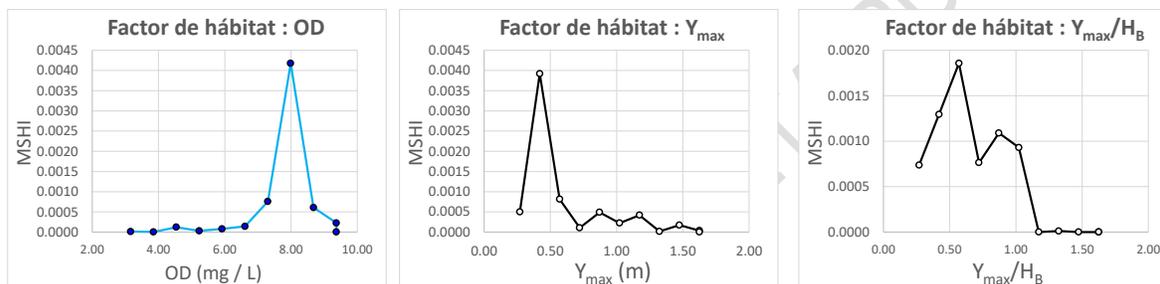


Figura 41 Índice MSHI para diferentes factores de hábitat (oxígeno disuelto, profundidad máxima y profundidad de banca llena). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

3.3 FASE 3: EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL CONSIDERANDO SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

3.3.1 Paso 1: Determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua

La estructura topológica y morfométrica de la red de drenaje de una cuenca tiene alta influencia en la respuesta hidrológica del sistema y, en general, determina los mecanismos a través de los cuales se transporta agua y sedimentos hacia aguas abajo. Del mismo modo, los mecanismos a través de los cuales se transportan y asimilan solutos (conservativos y no conservativos) en la red de drenaje, están influenciados por la variabilidad espacial y temporal del régimen de caudales, la estructura morfológica de la red de drenaje, y las variables que susciten interés ambiental.

Dichos factores definen el factor de asimilación (Chapra, 1997), el cual permite establecer la respuesta del sistema fluvial ante las perturbaciones (cargas contaminantes) introducidas desde aguas arriba, de acuerdo con la ecuación [8], donde W representa la carga contaminante al inicio del tramo (ver Figura 42), c la concentración al final del tramo y a el factor de asimilación. Éste último depende de características físicas (hidráulicas), químicas y biológicas de la fuente receptora.

$$c = \frac{1}{a}W \quad [8]$$

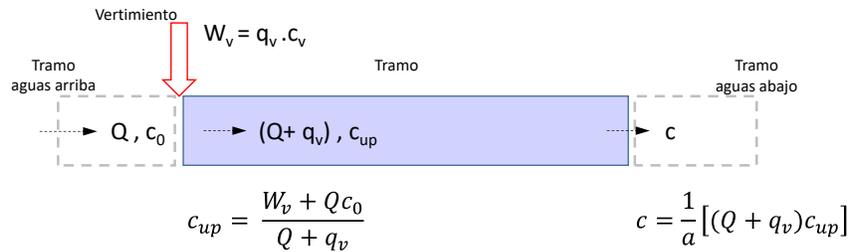


Figura 42 Esquematación de la aplicación del factor de asimilación en la escala de tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

Desde la propuesta para la estimación de caudales ambientales realizada por UNAL (2007) se ha señalado que el funcionamiento de un ecosistema acuático depende no sólo de un régimen hidrológico adecuado, sino de la provisión de agua con una calidad apropiada (King and Louw, 1998; en UNAL, 2007). Asimismo, dicha calidad determina o condiciona los usos del agua en un contexto socioeconómico.

3.3.1.1 Establecimiento del modelo de calidad del agua a escala de tramo

Con el fin de evaluar el régimen de caudales ambientales estimado en la Fase 2 de la metodología, es necesario implementar un modelo de calidad del agua que permita estimar las condiciones esperadas en el cuerpo de agua ante la implementación de dicho régimen. Para esto, se requiere la implementación de un modelo de calidad del agua a escala de tramo, el cual será posteriormente ampliado a escala regional, tal como se describe más adelante.

La modelación de calidad del agua debe realizarse siguiendo un protocolo estricto de modelación que permita calibrar y modelar un modelo predictivo a escala de tramo, que represente de manera adecuada los procesos y transformaciones que ocurren en los cuerpos de agua de interés. Para esto, deben priorizarse los tramos que permitan caracterizar las transformaciones de calidad más relevantes en el cuerpo de agua estudiado, es decir, aquellos tramos en los que se presenten los aportes de carga contaminante más significativos.

3.3.1.2 Extensión del modelo a escala regional

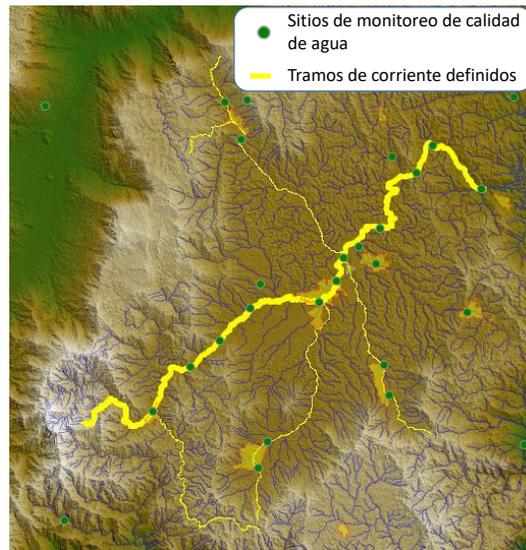
Una vez definida la estrategia de simulación de calidad de agua en la escala de tramo, se procede con la extensión del modelo a la escala regional de tal forma que sea posible simular perfiles de calidad de agua a lo largo de los cuerpos de agua de interés en el área de estudio. Para ello puede llevarse el procedimiento ilustrado en la Figura 43.

Inicialmente deben definirse los tramos de corriente a lo largo de los cuales se evaluarán las posibles problemáticas o conflictos relacionados con la disponibilidad hídrica y la calidad del agua. Estos tramos pueden seleccionarse teniendo en cuenta tramos priorizados en el marco de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, o en su ausencia, en relación con el tipo de presión sobre el recurso hídrico considerando:

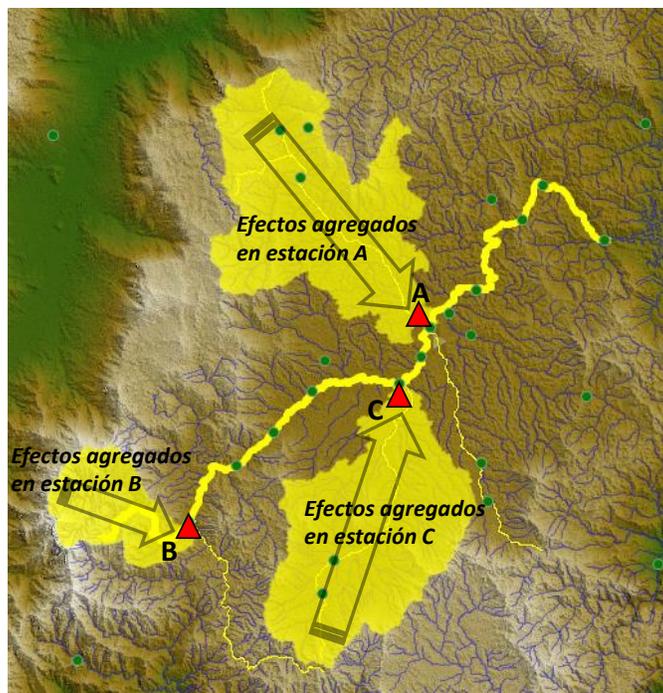
- Localización espacial de captaciones superficiales
- Localización espacial de vertimientos puntuales
- Localización espacial de obras de infraestructura hidroeléctrica
- Sitios de monitoreo

En la Figura 43-a, se ilustran los tramos de corriente en un área de estudio, en donde se observa la mayor disposición de estaciones de registro de calidad de agua.

Es posible no contar con registros de calidad de agua en la totalidad del área de estudio ni tampoco con identificación de todas las fuentes puntuales de contaminación en la misma. Por ello, el siguiente paso consiste en identificar aquellas estaciones de monitoreo de calidad de agua que, por su ubicación, recogen los efectos acumulativos de subzonas específicas, para definir las como condiciones de frontera del modelo de calidad de agua que se emplee. En la Figura 43-b se ilustra la definición de tres condiciones de frontera que recogen los efectos acumulativos al inicio del tramo de análisis (estación B) y dos cuencas tributarias a lo largo del mismo. Cabe agregar que conforme se tenga mayor conocimiento de la localización espacial de fuentes puntuales de contaminación en dichas cuencas, podrá prescindirse de las estaciones A, B y C como condiciones de frontera y en su lugar integrarlas al conjunto de sitios de monitoreo que pueden emplearse para verificar, calibrar y validar el modelo de calidad de agua empleado.



(a) Definición de tramos de análisis de acuerdo con la disponibilidad de información.



(b) Esquematzación de condiciones de frontera en sitios de monitoreo que recogen efectos acumulativos de subcuencas en el área de estudio

Figura 43 Evaluación de problemáticas de calidad y cantidad de agua en el área de estudio en relación con los caudales ambientales obtenidos de acuerdo con el componente ecológico e hidrológico. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

3.3.2 Paso 2: Simular escenarios críticos

El objetivo de este paso es verificar si para diferentes condiciones críticas, no emergen problemáticas asociadas con la disponibilidad de agua o la calidad del agua en el área de estudio. Asimismo, este análisis apunta hacia la identificación de los condicionamientos que deben incluirse en los instrumentos de administración y planificación del recurso hídrico.

3.3.2.1 Identificación de objetivos de calidad de agua

La simulación de la calidad del agua no es por sí sola un factor de apoyo en la evaluación de los caudales ambientales estimados mediante la articulación del componente hidrológico y ecológico, si no se incorporan criterios de calidad del agua que reflejen los requerimientos correspondientes a los diferentes usuarios del recurso hídrico.

Los objetivos de calidad de agua son una fuente de información a partir de la cual es posible consultar criterios de calidad de agua en el área de estudio o sectores de la misma. No obstante, en ausencia de dicho insumo y para efectos de la aplicación de esta guía, se deben definir criterios de calidad de agua considerando los usos de agua preponderantes en un tramo de corriente específico, a partir de la información secundaria correspondiente a la distribución espacial de los usuarios del recurso hídrico identificados (ver numeral 3.1.3.1.5). Dichos usos deben categorizarse de acuerdo con los usos y criterios de calidad del agua a los que hace referencia el Decreto 1076 de 2015 o la norma que lo modifique o sustituya (ver Tabla 19). En la Figura 44 se ilustra la asignación de criterios de calidad de agua.

Tabla 19 Usos del agua a los que hace referencia el Decreto 1076 de 2015

Consumo Humano y Doméstico
Preservación fauna y flora
Agrícola
Pecuario
Recreativo
Industrial
Estético
Pesca, Maricultura y Acuicultura
Navegación y transporte acuático

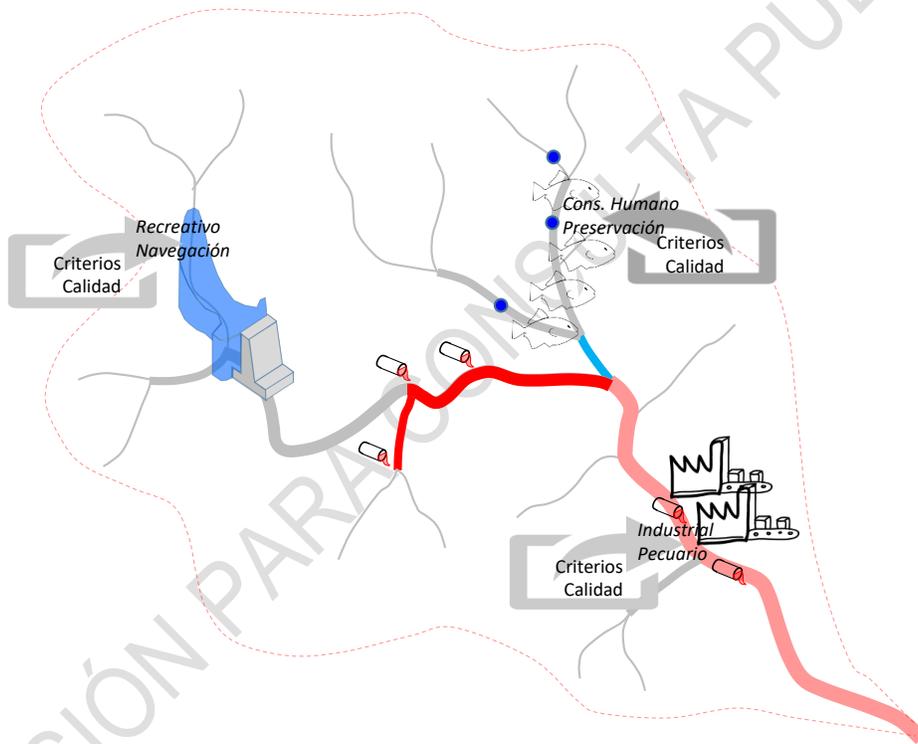


Figura 44 Esquematización de la consideración de criterios de calidad de agua, de acuerdo con los usos del agua que se identifiquen a partir de la información secundaria y la información hidrobiológica en sitios de monitoreo. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

3.3.2 Definición de escenarios críticos

Empleando el modelo de calidad de agua configurado y verificado a escala regional se debe llevar a cabo la simulación de escenarios que contemplen condiciones extremas de clima (mínimos en periodo seco y normal de la serie alterada de caudales, $Q^*(t)$), cargas contaminantes máximas y demandas de usuarios (aprovechamiento máximo de caudales). En tal sentido, este escenario consiste en asumir que se ha extraído el aprovechamiento máximo de caudales, para la condición más crítica de un periodo hidrológico normal y uno seco.

Para cada escenario, es posible obtener perfiles de calidad de agua y perfiles de oferta disponible (ver Figura 45) de agua a lo largo de los tramos previamente definidos, para verificar si para el escenario de caudal ambiental más crítico de cada mes emergen problemáticas que en condiciones actuales no existan.

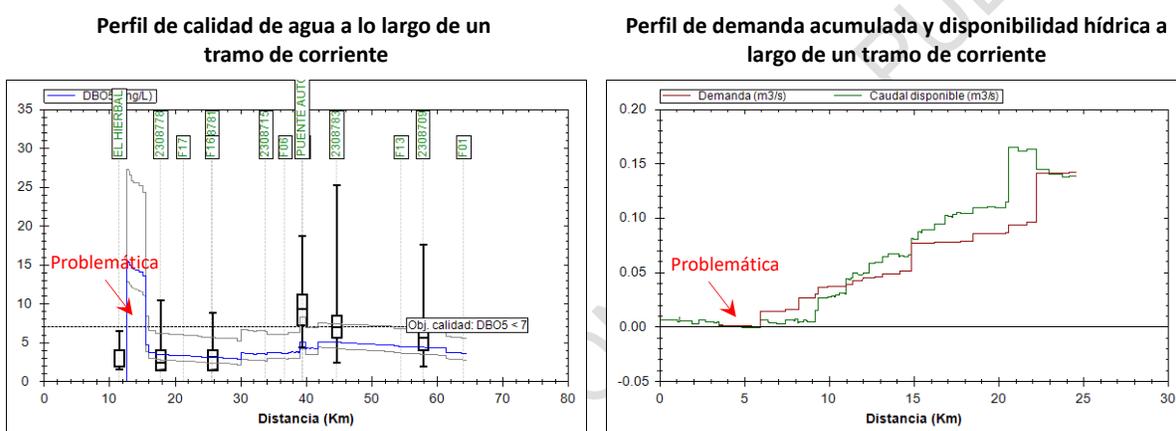


Figura 45. Perfiles de calidad de agua y de oferta hídrica disponible empleados para la verificación de problemáticas. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

3.3.3 Paso 3: Identificar problemáticas ambientales

Las problemáticas ambientales son cambios operados en el medio ambiente o en alguno de sus componentes por la acción humana. Pueden referirse a los impactos sobre el entorno físico-biótico, que tienen que ver con los usos del agua para el aprovisionamiento y la disposición de aguas residuales en los cuerpos de agua superficial.

Para la identificación de las problemáticas ambientales, es necesario recoger información primaria y secundaria. Al respecto, se propone la realización de talleres y entrevistas semi-estructuradas con la Autoridad Ambiental, quien conoce el territorio y está informada sobre las problemáticas que afectan el recurso hídrico.

Las problemáticas más comunes en torno al recurso hídrico están relacionadas con la alteración en la cantidad y la calidad, así como con la modificación morfológica de la corriente por su ocupación, intervención o desviación.

Algunas de las problemáticas que se pueden presentar en un tramo son:

- Contaminación del agua superficial por:
 - Vertimientos puntuales
 - Fuentes no puntuales o difusas
 - Contaminación atmosférica

- Residuos sólidos
- Desechos eliminados sobre o debajo de la tierra, arrastrados por efecto de la escorrentía.
- Ocupación del cauce o las riberas de las corrientes hídricas
- Aumento de la afluencia por diferentes vertimientos, trasvases, descargas o intervenciones sobre la corriente
- Disminución del flujo de agua superficial debido a la desviación, captación y/o uso de la misma.

3.3.4 Paso 4: Identificar conflictos ambientales

Los conflictos ambientales son un tipo particular de conflicto social en los que la temática en disputa se refiere a aspectos ambientales. Los temas convocantes usualmente tienen que ver con la calidad de vida de las personas o las condiciones del ambiente, o de alguno de sus componentes: el agua, el suelo, la flora, la fauna, los derechos, etc. Santandreu y Gudynas (1998) señalan varios aspectos en su concepción de conflicto:

- El conflicto es un proceso, no es estático, posee un desarrollo temporal con modificaciones y cambios.
- Este proceso se desarrolla en el ámbito público. Lo que excluye disputas del espacio privado.
- Involucran acciones colectivas. Grupos de personas desarrollan las disputas. Se trata de grupos contra otros grupos organizados: asociaciones civiles, comisiones barriales, empresas comerciales, entes estatales a nivel nacional o municipal.
- Resulta de diferentes valoraciones, percepciones o significados -representaciones- que los actores otorgan a acciones o circunstancias que afecta, o pueden afectar, el medio ambiente.
- Alude a una dinámica de oposición, controversia, disputa o protestas entre esos actores.
- Hay un reconocimiento de que los actores en oposición del conflicto, más allá de que se consideren legítimos o atendibles los reclamos

Considerando que la tipología de conflictos ambientales es diversa y particular para cada contexto, se presenta un marco de clasificación sugerido por Martín y Justo (2015), el cual puede ser de utilidad a efecto de su tratamiento posterior en el desarrollo del nivel 2. Esta clasificación diferencia los tipos de conflictos ambientales en torno al recurso hídrico, teniendo en cuenta su gestión: conflictos entre usos, usuarios, con actores no usuarios, intergeneracionales, interjurisdiccionales e institucionales.

- Entre usos: cuando el recurso no satisface (cuantitativa, cualitativamente o en el tiempo) las demandas que generan los diferentes usos en una cuenca. Son conflictos entre usos actuales, y entre éstos y nuevos usos.
- Entre usuarios: No se refieren tanto al uso, sino al comportamiento de los usuarios. Este tipo de conflictos se centra en las características de los diferentes actores que comparten el recurso, incluyendo sus intereses.
- Con actores no usuarios: Se producen frente a actores que no comparten o no usan el recurso, pero quienes realizan algún tipo de intervención sobre la cuenca (proyectos de desarrollo que implican la deforestación, construcciones, etc.), la cual afecta su capacidad natural para captar, retener, depurar, infiltrar, recargar, evacuar, transportar y distribuir agua.
- Intergeneracionales: Involucra la tensión entre las necesidades y preferencias actuales en torno al recurso hídrico, frente a la preservación del mismo para las generaciones futuras

- Interjurisdiccionales: Tensión entre los objetivos y competencias de diferentes entidades respecto a la gestión del recurso hídrico, considerando la falta de correspondencia con los límites físicos, territoriales y administrativos de las cuencas.

El insumo principal para el análisis de los conflictos ambientales es la base de quejas de la Autoridad Ambiental, en tanto constituyen una expresión pública frente a una problemática determinada. Es necesario que las quejas se encuentren georreferenciadas o que, en su defecto, contengan una descripción del sitio afectado. Por consiguiente, se deberán identificar las quejas interpuestas por una afectación al recurso hídrico (contaminación del agua, intervención del cauce, ocupación de la ronda hídrica, uso ilegal del agua, residuos sólidos, tala de árboles, entre otros).

3.3.5 Paso 5: Consolidar problemáticas y conflictos ambientales

A partir de los resultados de la simulación de escenarios críticos descrita en el paso 2, y los resultados consolidados de los pasos 3 y 4, se debe identificar la tipología de medidas de gestión a implementar en el nivel 2 de la metodología, considerando principalmente las problemáticas y los conflictos asociados a la disponibilidad del recurso hídrico por cantidad y calidad.

Este paso es fundamental para identificar los factores exógenos que afectan la prestación de los servicios ecosistémicos de los cuerpos de agua objeto de estudio, como por ejemplo demandas de usuarios mayores a la oferta hídrica total, o fuentes puntuales y difusas de contaminación que sobrepasan la capacidad de asimilación del cuerpo de agua. En tal sentido, se deberá identificar el instrumento que contribuya a la solución integral de tales problemáticas o conflictos.

4 CRITERIOS ADICIONALES PARA PROYECTOS ESPECÍFICOS SUJETOS DE LICENCIAMIENTO AMBIENTAL

La estimación de caudales ambientales para efectos de proyectos objeto de licenciamiento ambiental que involucren regulación, trasvases y retornos, requiere unos criterios adicionales, los cuales se describen a continuación, considerando la estructura metodológica genérica desarrollada en los capítulos 2 y 3.

4.1 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para la estimación de caudales ambientales en este tipo de proyectos corresponde al área de influencia de los mismos, y debe delimitarse teniendo en cuenta el procedimiento descrito en el numeral 3.1.1, complementado con los siguientes criterios.

Para la delimitación del área de influencia se consideran dos características del proyecto: si tiene o no regulación y si tiene o no retorno al cuerpo de agua en donde se hace la captación (ver Figura 46).

	Con retorno de agua	Sin retorno de agua
Sin regulación		
Con regulación		

Figura 46 Clasificación de proyectos utilizada para la delimitación del tramo de estudio

4.1.1 Proyectos con retorno de agua a la fuente de captación

Para los proyectos en donde se retornan las aguas captadas a la fuente original, el área de influencia se define en función de la configuración general del proyecto, lo cual se sintetiza en los siguientes cuatro escenarios:

4.1.1.1 Caso A – Proyecto sin regulación y con retorno a pie de presa

Este caso corresponde cuando el retorno se hace a una distancia muy corta desde donde se realiza la captación, de manera que no hay una disminución perceptible del nivel de agua en el cuerpo de agua, en el sector comprendido entre el sitio de toma y el sitio de descarga.

Bajo este escenario, el área de influencia está delimitada, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico aguas abajo (ver sección 3.1.2.3), identificado a la escala de trabajo (ver Figura 47).

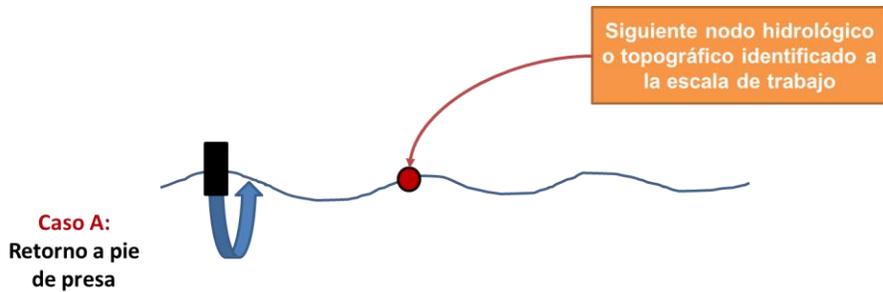


Figura 47 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con retorno a pie de presa

4.1.1.2 Caso B – Proyecto sin regulación y con retorno con conducción

En este caso, el agua captada es conducida a través de un canal o tubería y descargada aguas abajo del sitio de captación a una distancia superior a varias veces el ancho de la corriente de agua superficial. Ejemplos de este tipo de proyectos son las pequeñas centrales hidroeléctricas que generan energía a filo de agua (ver Figura 48).

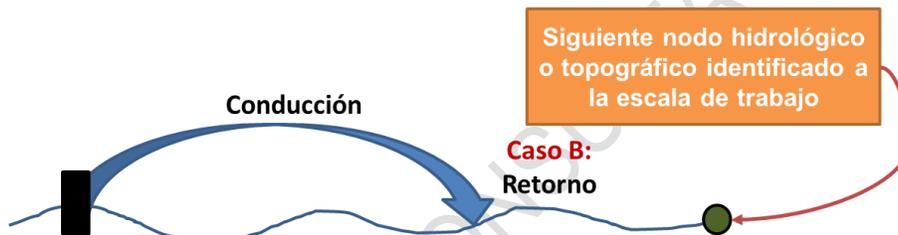


Figura 48 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con retorno con conducción

Bajo este escenario, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico aguas abajo del sitio de retorno, identificado a la escala de trabajo.

4.1.1.3 Caso C – Proyecto con regulación y con retorno a pie de presa

En este caso, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico aguas abajo, identificado a escala 1:100000 (ver Figura 49).

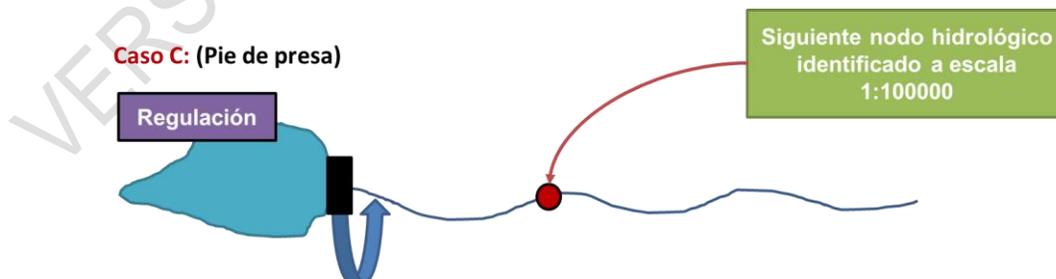


Figura 49 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con retorno a pie de presa

4.1.1.4 Caso D – Proyecto con regulación y con retorno con conducción

Bajo este escenario, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico aguas abajo del sitio de retorno, identificado a escala 1:100000 (ver Figura 50).

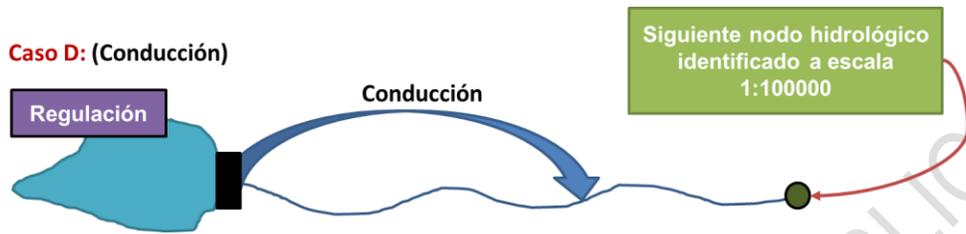


Figura 50 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con retorno con conducción

4.1.2 Proyectos sin retorno de agua a la fuente de captación

Dentro de esta categoría se encuentran aquellos proyectos que captan agua y no la retornan a algún cuerpo de agua sin antes cambiar su estado o características físico-químicas, así como aquellos proyectos que la retornan a cuerpos de agua diferentes a la fuente de abastecimiento (trasvases) sin alterar drásticamente su calidad del agua. Cuando se trata de un trasvase, se deberá estimar el caudal ambiental tanto en el cuerpo de agua en donde se realiza la captación, así como en el cuerpo de agua receptor. A continuación, se presentan los cuatro casos asociados a este tipo de proyectos:

4.1.2.1 Caso E – Proyecto sin regulación y sin trasvase

Un ejemplo de este tipo de proyectos puede ser una derivación para cualquier propósito, que no retorne sus aguas a otro cuerpo de agua. En este caso, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico identificado a la escala de trabajo, previendo que antes de dicho sitio se haya restituido naturalmente el valor de la captación o derivación, en condiciones de año hidrológico seco (ver Figura 51).

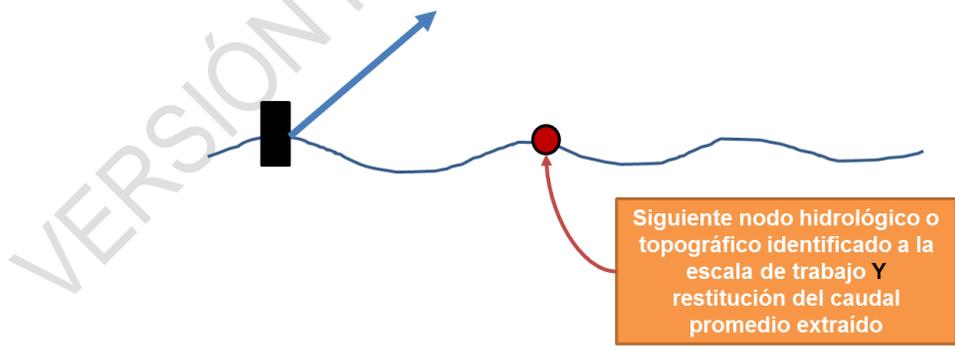


Figura 51 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y sin trasvase

4.1.2.2 Caso F – Proyecto con regulación y sin trasvase

Un ejemplo de este tipo de proyectos es la construcción de un embalse para un propósito determinado, que no retorne sus aguas al cuerpo de agua de origen o a otro cuerpo de agua. En este caso, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente

nodo hidrológico o topográfico identificado a escala 1:100000, previendo que antes de dicho sitio se haya restituido naturalmente el caudal promedio captado, en condiciones de año hidrológico seco (ver Figura 52).

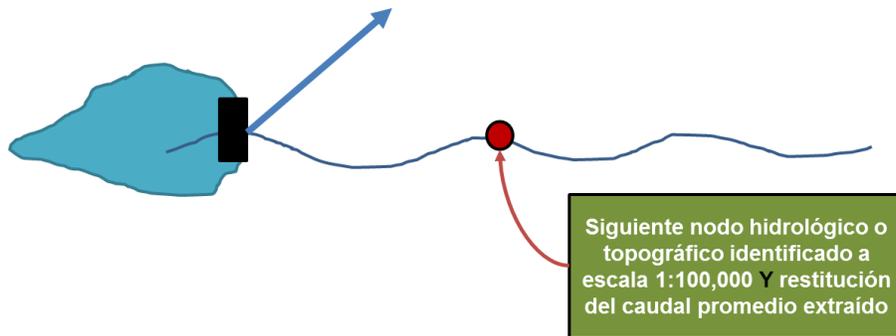


Figura 52 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y sin trasvase

4.1.2.3 Caso G – Proyecto sin regulación y con trasvase

Bajo este escenario, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico identificado a la escala de trabajo, previendo que antes de dicho sitio se haya restituido naturalmente el valor de la captación o derivación, en condiciones de año hidrológico seco. El área de influencia en el cuerpo de agua receptor se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico identificado a la escala de trabajo (ver Figura 53).

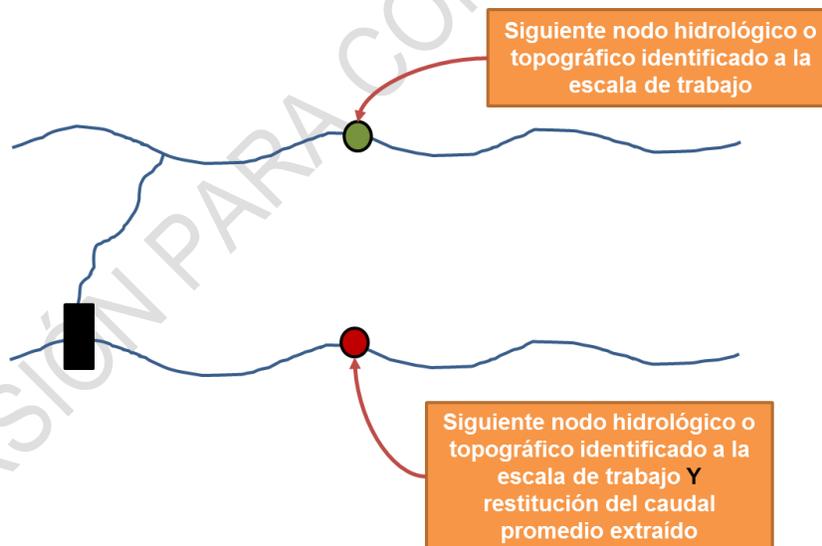


Figura 53 Tramo de estudio para un proyecto sin regulación y con trasvase

4.1.2.4 Caso H – Proyecto con regulación y con trasvase

Para este caso, el área de influencia se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico identificado a escala 1:100000, previendo que antes de dicho sitio se haya restituido naturalmente el valor de la captación o derivación, en condiciones de año hidrológico seco. El área de influencia en el cuerpo de agua receptor se extenderá, como mínimo, hasta el siguiente nodo hidrológico o topográfico identificado a escala 1:100000 (ver Figura 54).

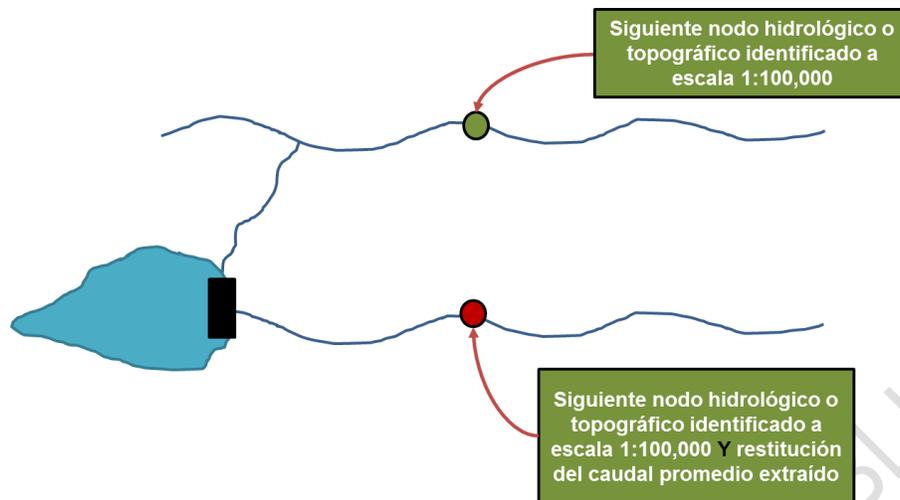


Figura 54 Tramo de estudio para un proyecto con regulación y con trasvase

4.2 CRITERIOS ADICIONALES EN LA FASE DE ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

4.2.1 Métricas adicionales de interés ecológico

En la Tabla 20 se establecen las métricas complementarias a las descritas en el numeral 3.2.2, para representar las funciones descritas por los componentes ambientales del régimen, cuya estimación puede lograrse a partir de información detallada en la escala de tramo. Adicionalmente, se contextualiza su aplicación en relación con diferentes tipos de configuración morfológica.

Tabla 20 Métricas discretas de integridad del hábitat sugeridas para la caracterización de la estructura física del hábitat y la estructura del flujo (régimen de caudales), en relación con el contexto morfológico y ecológico de la red de drenaje del área de estudio

Organismo acuático	Función	Métricas		Descripción	Características del sistema fluvial (Tipo morfológico)						
		Objetivo	Cuantificación		Escalón-Pozo	Cascada	Lecho-plano	Pozo-Cruce	Dunas y Antidunas	Trenzados	Barreras
► Peces ► Vegetación ribereña	Conectividad lateral	Estructura física del hábitat	$^1 W_v / W_B \begin{cases} < 4; \text{Confinado} \\ > 4; \text{No confinado} \end{cases}$	Permiten evaluar el nivel de confinamiento del cauce como requerimiento para la ocurrencia de eventuales desbordamientos.			x	x	x	x	
			$^2 L_b / W_B \begin{cases} < 13; \text{No Confinado} \\ > 13; \text{Confinado} \end{cases}$	W_v : ancho del valle aluvial W_B : ancho de banca llena del segmento de corriente L_b : longitud de onda del segmento de corriente			x	x	x	x	
		Caracterización del régimen	1 Caudal máximo asociado a un período de retorno de 15 años - $Q_{Tr=15}$ -	Condición hidrogeomorfológica por encima de la cual se produce conexión hidráulica con las llanuras aluviales adyacentes y/o cuerpos de agua lénticos conexos			x	x	x	x	
			1 Caudal de banca llena - Q_B -	Condición hidrogeomorfológica por encima de la cual se produce conexión hidráulica con las llanuras aluviales adyacentes y/o cuerpos de agua lénticos conexos			x	x	x	x	
			$^2 W_v / W$	Valores bajos corresponden a menor interacción entre la zona ribereña y la corriente W_v : ancho del valle aluvial W : ancho de flujo			x	x	x	x	
			2 Sinuosidad total -S-	En sistemas trezados permite cuantificar el grado de trezamiento en							x

Organismo acuático	Función	Métricas		Descripción	Características del sistema fluvial (Tipo morfológico)						
		Objetivo	Cuantificación		Escalón-Pozo	Cascada	Lecho-plano	Pozo-Cruce	Dunas y Antidunas	Trenzados	Barreras
				<p>relación con un caudal específico transportado.</p> $S = \sum L_i / L_V$ <p>Donde $\sum L_i$ es la suma sumatoria de la longitud de canales independientes para un caudal Q, y L_V es la longitud del valle.</p>							
	Flujo de sedimentos y nutrientes	Caracterización del régimen de flujo de sedimentos hacia la llanura de inundación	$D = W \frac{Q_{mo}}{Q_{mo} + Q_B} \left[1 - e^{-\left(\frac{vA_f}{Q_{mo}}\right)} \right]$	<p>Para condiciones de largo plazo, Wilkinson et al. (2009), proponen estimar el depósito anual de sedimento, D. Donde Q_{mo} es la mediana de los caudales de exceso por encima del estado de banca llena, Q_B el caudal de banca llena, W la carga anual de sedimento al inicio del segmento analizado, A_f el área (extensión) de la llanura de inundación y v la velocidad de sedimentación característica del sedimento transportado en suspensión.</p>				x	x	x	
► Peces	Conectividad longitudinal	Estructura física del hábitat	¹ Índice de conectividad dendrítica (Cote et al., 2009)	<p>Permiten establecer el grado de fragmentación que naturalmente se presenta en un área de estudio, como punto de partida para evaluar la fragmentación generada antrópicamente</p>							x
		Caracterización del régimen	¹ Caudal Q_{t-Q} : Geometría Hidráulica t_m-Q	<p>Permite determinar el umbral (caudal) por debajo del cual se inducen barreras hidráulicas, y</p>	x	x		x			

Organismo acuático	Función	Métricas		Descripción	Características del sistema fluvial (Tipo morfológico)						
		Objetivo	Cuantificación		Escalón-Pozo	Cascada	Lecho-plano	Pozo-Cruce	Dunas y Antidunas	Trenzados	Barreras
				caracterizar por lo tanto su régimen (ver numeral 4.1.2.2.)							
► Macro-invertebrados bentónicos	Refugio	Estructura física del hábitat	² Fracción dispersiva –DF-	<p>Permite conocer el porcentaje de zonas muertas disponibles en un segmento, que pueden ser potencialmente empleadas como refugio.</p> $DF = 1 - \frac{V_{media}}{V_{max}}$ <p>Donde V_{media} es la velocidad media de tránsito de un soluto en la escala de tramo, y V_{max} la velocidad máxima de tránsito de un soluto en la escala de tramo.</p> <p>Dicha cantidad permanece relativamente invariante ante cambios de caudal, de modo que cambios significativos en su magnitud pueden deberse a perturbaciones (naturales o antrópicas) que reconfiguran la morfología de un segmento.</p>	x	x	x	x	x		
		Caracterización del régimen	² Variabilidad de la corriente $V_{max} / V_{media} = 1 / (1-DF)$	Mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece más oportunidades al desarrollo de una biota más diversa (UNAL, 2007)	x	x	x	x	x	x	

¹ Cuantificable con información en escala regional e información detallada en escala de tramo
² Cuantificables con información detallada en la escala de tramo

4.2.2 Propuesta de aprovechamiento máximo de caudales

Adicional a lo establecido en el numeral 3.2.4, se deberá generar la propuesta de aprovechamiento máximo de caudales, para lo cual el usuario deberá presentar en detalle la propuesta de aprovechamiento en función de las características del proyecto y de las condiciones esperadas durante su operación. Se deberán evaluar diferentes reglas de aprovechamiento en función de la fase del proyecto (e.g. construcción, llenado, operación).

4.2.3 Criterios adicionales para para minimizar la alteración del régimen de caudales

De manera particular, en esta tipología de proyectos, se deberán definir los condicionamientos para minimizar la alteración del régimen de caudales, lo cual se deriva del análisis estadístico de los atributos de magnitud, duración e intensidad encontrados para la serie naturalizada de caudales o niveles, así como la clasificación de dichas series de acuerdo con la influencia de fenómenos de variabilidad climática (condición hidrológica de año seco, medio y húmedo).

Para cada uno de los sitios que disponen de una serie de caudal medio diario (observada o simulada) se deberá caracterizar, para cada condición hidrológica, el número n y duración T de los eventos de interés ecológico que se encuentran por encima o por debajo de los componentes ambientales del régimen (métricas hidromorfométricas e hidrológicas) $Q_{Tr=10}$, Q_{t-Q} , Q_B y $Q_{Tr=15}$, tal como se ilustra en la Figura 55.

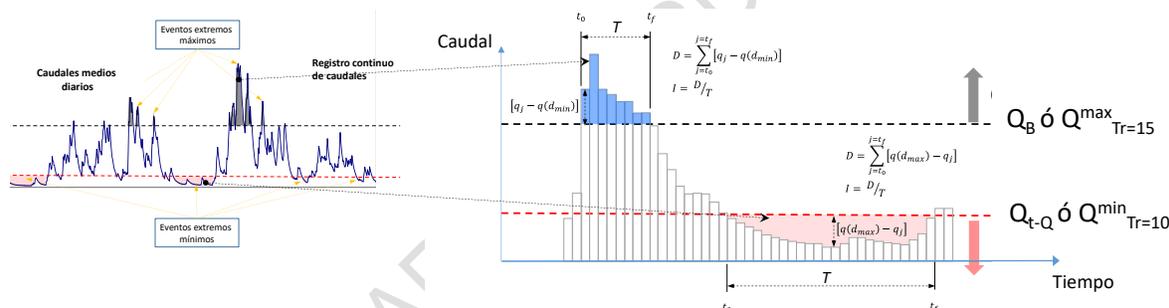


Figura 55 Esquemática de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015

El procedimiento consiste en identificar y separar para cada mes y cada condición hidrológica (seca, húmeda y promedio) cada uno de los eventos de interés ecológico esquematizados en la Figura 55, obteniendo así una muestra estadística cuya representatividad será mucho mayor conforme mayor sea la longitud de la serie de caudales simulada u observada. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Tabla 21.

En la Figura 56 se muestra un ejemplo para la condición hidrológica *El Niño*, en donde se indica para cada mes el número de eventos observados al igual que la media y la desviación estándar de su duración. Con la información así obtenida, es posible definir, para cada mes y cada condición hidrológica, el conjunto de recomendaciones que se ilustran de la Figura 56 a la Figura 58. El primer condicionamiento que surge para cada mes, es garantizar caudales ambientales con magnitudes contenidas entre los valores mínimo y máximo definidos en el numeral 3.2.3, salvo que condiciones naturales conlleven al incumplimiento de dicha condición. Adicionalmente, empleando la media y la desviación estándar de la duración T de los eventos de interés ecológico, la recomendación adicional se centra en garantizar al menos un (1) evento con una duración igual a la media más el 25% de la desviación estándar, cuando éstos efectivamente ocurren en condiciones naturales.

Tabla 21 Ejemplo de separación y caracterización de la cantidad y duración (días) de los eventos de interés ecológico

Mes	Tipo de Evento	# Eventos			Tipo de Evento	# Eventos			Tipo de Evento	# Eventos			Tipo de Evento	# Eventos		
1	QTr_Min_↓	19	19.74	22.35	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	17	22.47	23.47
2	QTr_Min_↓	15	13.47	13.90	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	14	16.00	16.18
3	QTr_Min_↓	14	6.36	5.67	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	16	6.19	6.35
4	QTr_Min_↓	8	3.75	4.65	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	9	3.89	4.34
5	QTr_Min_↓	2	2.00	1.41	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	4	2.75	2.06
6	QTr_Min_↓	8	5.88	6.69	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	2	1.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	14	4.79	5.60
7	QTr_Min_↓	22	8.05	8.59	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	26	8.23	9.94
8	QTr_Min_↓	22	4.82	3.75	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	2	1.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	24	5.50	4.63
9	QTr_Min_↓	9	3.56	2.70	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	11	3.36	3.01
10	QTr_Min_↓	0	0.00	0.00	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	3	1.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	0	0.00	0.00
11	QTr_Min_↓	0	0.00	0.00	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	2	1.00	0.00
12	QTr_Min_↓	18	14.33	22.73	QTr_Max_↑	0	0.00	0.00	QBanca_(m3/s)_↑	0	0.00	0.00	Qt-Q_(m3/s)_↓	23	13.30	20.68

VERSIÓN PARA C...

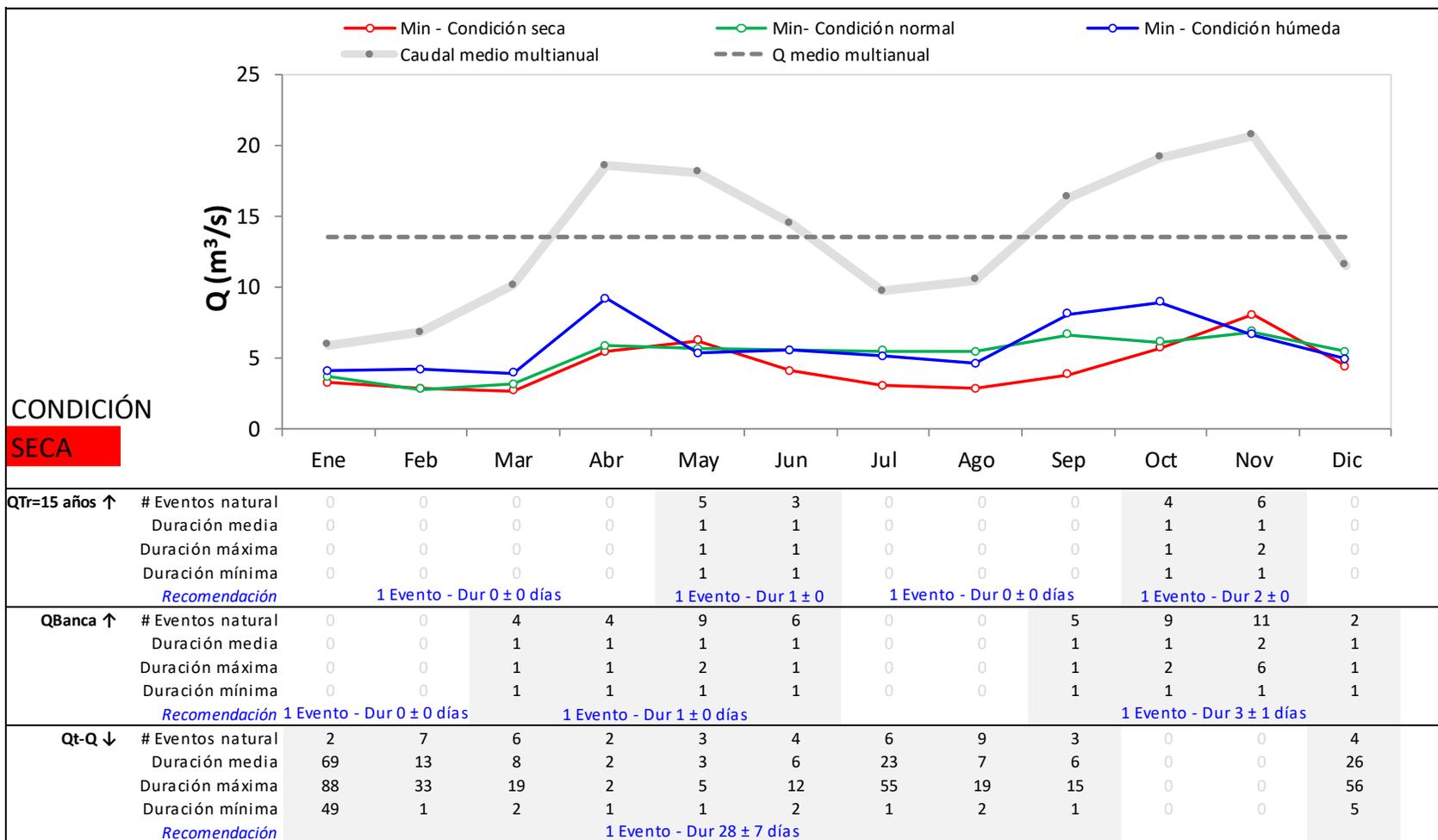


Figura 56 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica seca. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

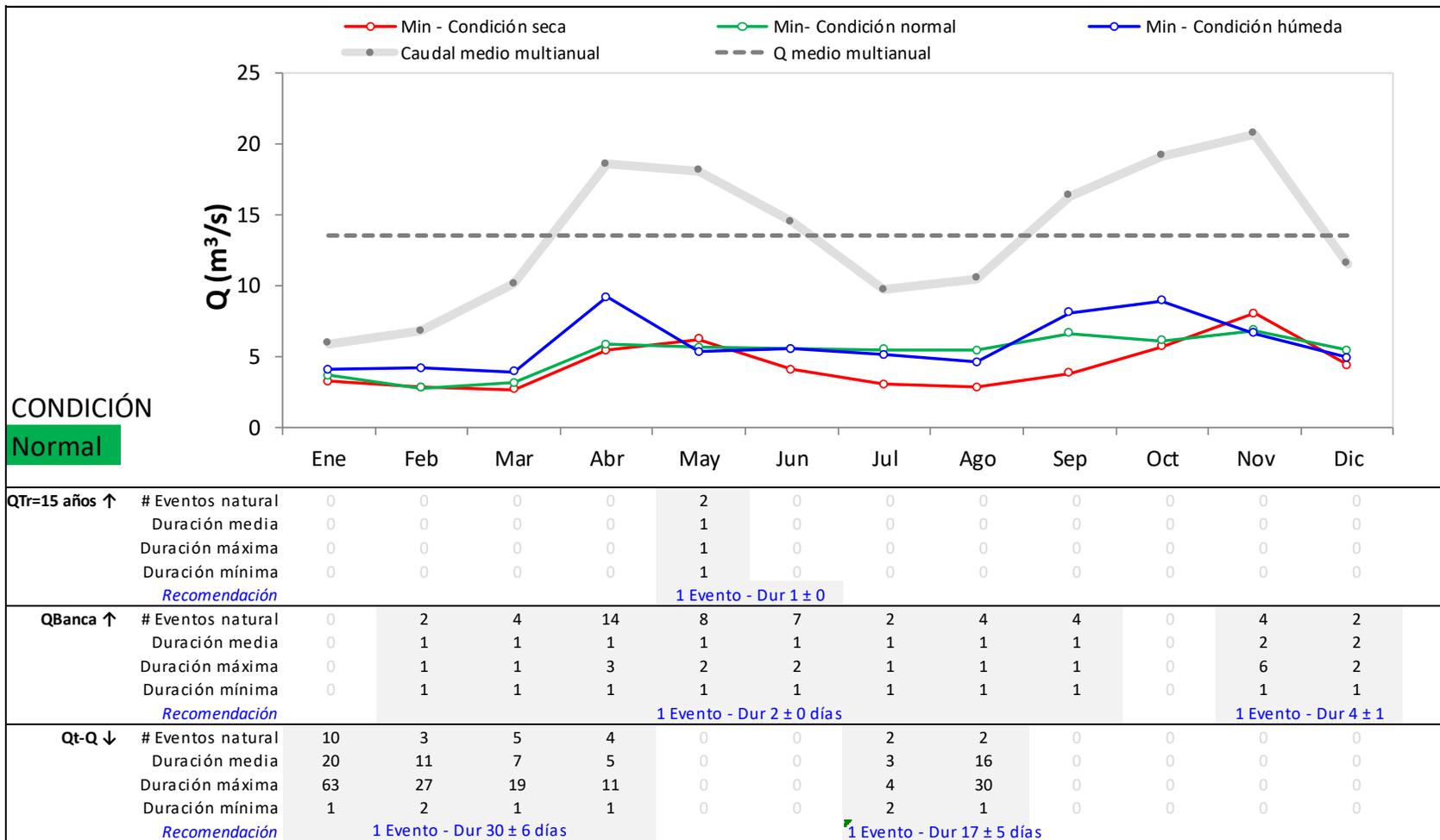


Figura 57 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica normal. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

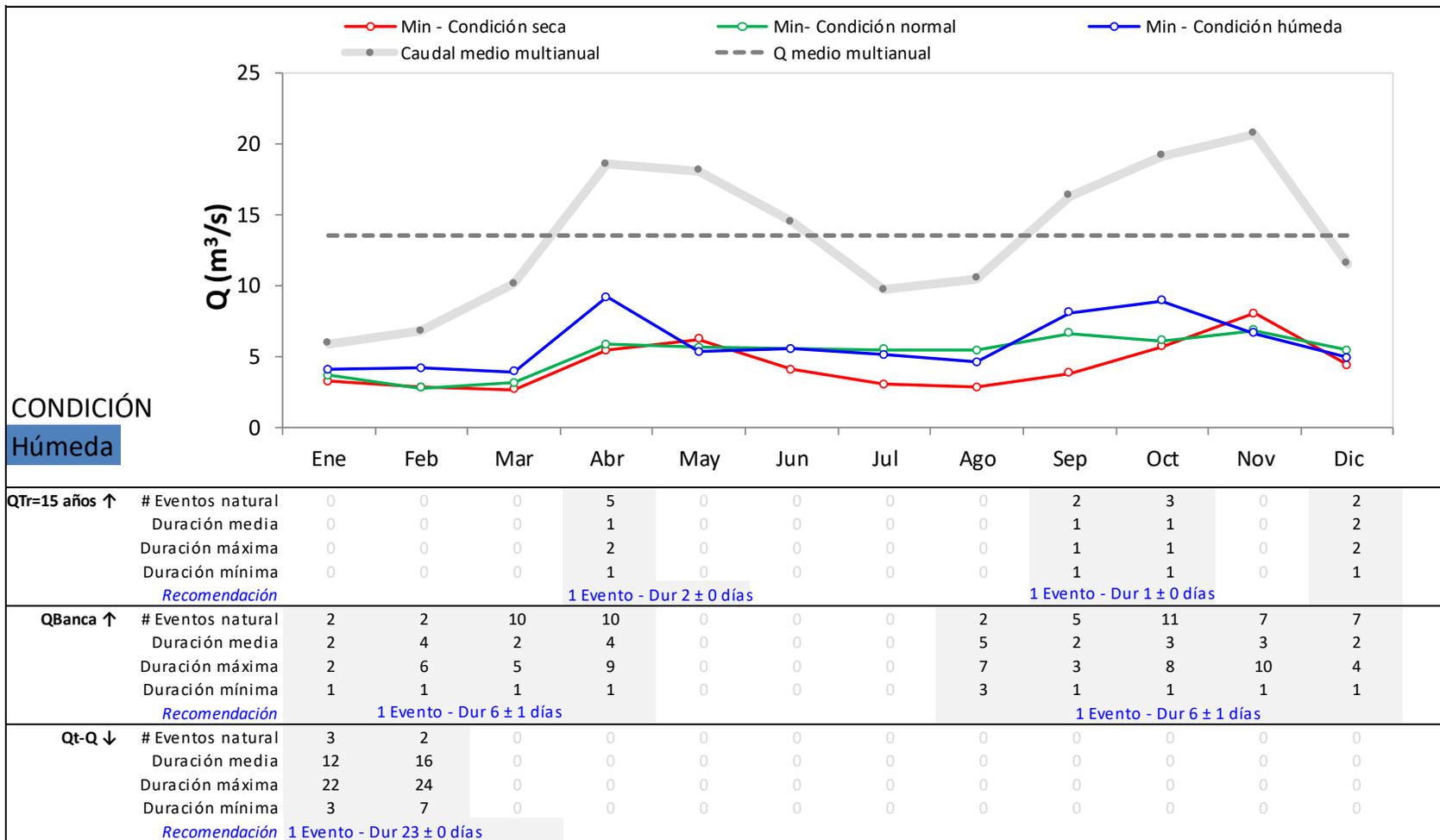


Figura 58 Ejemplo de la consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en un sitio específico en la red de drenaje del área de estudio - Condición hidrológica húmeda. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

4.3 CRITERIOS ADICIONALES PARA EL NIVEL 2

En relación con las licencias ambientales, el caudal ambiental es uno de los condicionamientos para analizar la viabilidad de los mismos y no es sujeto a medidas de compensación. 2

Para el caso de los usuarios que presentan el cálculo del caudal ambiental en el marco de procesos de licenciamiento ambiental, los resultados del nivel 1 harán parte del estudio de impacto ambiental como insumos para la formulación del Plan de Manejo Ambiental y para reportar los aspectos exógenos al proyecto que deben ser abordados por la Autoridad Ambiental competente (e.g. estado de la calidad del agua, alteración drástica del régimen de caudales por otros proyectos).

En todos los casos, se debe presentar la estrategia de seguimiento y monitoreo sistemático, dentro del respectivo Plan de Manejo Ambiental, para el cumplimiento del régimen de caudales ambientales. Es importante tener presente que la ubicación y manejo de las estaciones de monitoreo es competencia de la Autoridad Ambiental. En dicha estrategia se deben incorporar las variables físicas, químicas e hidrobiológicas, identificadas en la información de línea base (numeral 3.2.7) y la determinación de la capacidad de asimilación del cuerpo de agua (numeral 3.3.1).

VERSIÓN PARA CONSULTA PÚBLICA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abouali, M., Daneshvar, F., & Nejadhashemi, A. P. (2016a). MATLAB Hydrological Index Tool (MHIT): A high performance library to calculate 171 ecologically relevant hydrological indices. *Ecological Informatics*, 33, 17-23.
- [2] Abouali, M., Nejadhashemi, A. P., Daneshvar, F., & Woznicki, S. A. (2016b). Two-phase approach to improve stream health modeling. *Ecological Informatics*, 34, 13-21.
- [3] Adams, J. (2012). Determination and implementation of environmental water requirements for estuaries. Ramsar Technical Report No. 9/CBD Technical Series No. 69. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland & Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada. ISBN 92-9225-455-3 (print); 92-9225-456-1 (web).
- [4] Allan, J. D. (1995). *Stream ecology. Structure and function of running waters*. Chapman & Hall, New York. ISBN 0-4 12-35530-2. 388 p.
- [5] Álvarez, O.D. (2007). Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos. Aplicación al balance hidrológico de largo plazo. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- [6] Álvarez, O.D. (2009). Desarrollo de una librería computacional para la estimación espacial utilizando objetos geográficos y programación orientada a objetos espaciales. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Angarita H, Wickel AJ, Chavarro J, Escobar-Arias M, Delgado J. (2015) SCI SBI I CONGRESO NACIONAL RÍOS Y HUMEDALES HONDA, TOLIMA, 26 AL 28 DE NOVIEMBRE, 2015.
- [8] Arthington ÁH, Naiman RJ, McClain ME, & Nilsson C. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*. 2010 Jan 1;55(1):1-6.
- [9] Arthington, A. H. (2012). *Environmental flows: saving rivers in the third millennium*. Freshwater ecology series. University of California Press, Ltd. Londres, Inglaterra.
- [10] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, 2013a. Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial, Bogotá D.C.
- [11] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, 2013b. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Bogotá D.C.
- [12] Beechie TJ, Liermann M, Pollock MM, Baker S, Davies J., 2006. Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology* 78: 124–141
- [13] Beer, T., and P.C. Young (1983), Longitudinal dispersion in natural streams, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, No. 5, pp. 1049-1067.
- [14] Belletti, B., Rinaldi, M., Bussetini, M., Comiti, F., Gurnell, A.M., Mao, L., Nardi, L., Vezza, P., 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology*, 283, pp.143-157.
- [15] Bencala, K.E. & Walters, R.A., 1983. Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream with a kinetic mass transfer model for sorption. *Water Resources Research*, 19(3), p.732.
- [16] Bisson P.A. & Montgomery D.R. (1996) Valley segments, stream reaches, and channel units. In: *Methods in Stream Ecology* (Eds F.R. Hauer & G.A. Lanberti), pp. 23–52. Academic Press, San Diego, CA.

- [17] Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H., (Eds.), 2013. *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales*, Cambridge University Press, Science, 484 pages.
- [18] Brinson, M.M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetlands, Technical Report WRP-DE-4, U.S. Army Corps of Engineers Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- [19] Brinson, M.M., L.C. Lee, R.D. Rheinhardt, G.G. Hollands, D.F. Whigham, and W.D. Nuttler. (1997). A summary of common questions, misconceptions, and some answers concerning the hydrogeomorphic approach to functional assessment of wetland ecosystems: scientific and technical issues. Draft of paper published as a Bulletin of the Society of Wetland Scientists 17(2):16–21.
- [20] Brown, L.C. & Barnwell, T.O., 1987. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual, Athenas.
- [21] Buffington, J.M., Montgomery, D.R., 2013. Geomorphic classification of rivers. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 9, Fluvial Geomorphology, pp. 730–767.
- [22] Burns, M.M., 1998. Limitations of Hydraulic Geometry Techniques in Stream Restoration Design. In *Engineering Approaches to Ecosystem Restoration*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 126–132. Available at: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40382%281998%2920>.
- [23] Camacho Botero, L. A.; Jiménez, M. A., Vélez Upegui, J. I. (2010). A Stream Morphology Classification for Eco-hydraulic Purposes Based on Geospatial Data: a Solute Transport Application Case. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, Poster #B33F-0445.
- [24] Camacho, L A y Cantor, M., Calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río de montaña colombiano. *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*, N° 14, 2006.
- [25] Camacho, L. A., and R. A. González (2008), Calibration and predictive ability analysis of longitudinal solute transport models in mountain streams, *Environ. Fluid. Mech.*, 8(5), 597-604, doi: 10.1007/s10652-008-9109-0.
- [26] Camacho, L. A., M. A. Díaz-Granados, et al. (2001). Contribución al desarrollo de un modelo de calidad del agua apropiado para evaluar alternativas de saneamiento del río Bogotá. Bogotá, Colombia Universidad de Los Andes.
- [27] Camacho, L.A., 2000. Development of a hierarchical modeling framework for solute transport under unsteady flow conditions in rivers. Imperial College of Science Technology and Medicine.
- [28] Carling, P. (1988). The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth surface processes and landforms*, 13(4), 355-367.
- [29] Carvajal, L. F., y Roldán, E. (2007) Calibración del modelo lluvia-escurrentía agregado GR4j aplicación: cuenca del río Aburrá. *Dyna*, 74(152), 73-87.
- [30] Chapra, S. C., 1997. *Surface water quality modeling*. McGraw-Hill. New York. P. 844.
- [31] Chapra, S.C. & Pelletier, G.J., 2003. QUAL2K: a modeling framework for simulating river and stream water quality: documentation and user's manual. , p.121.
- [32] Chapra, S.C., 1997. *Surface Water-Quality Modeling*, Tufts University: Waveland Press.
- [33] Chin, A. (1999), The morphologic structure of step-pools in mountain streams, *Geomorphology*, 27, 191– 204.
- [34] Chin, A., and E. Wohl (2005), Toward a theory for step pools in streams channels, *Progress in Physical Geography*, 29, 275-296.

- [35] Churchill, M., Elmore, H. & Buckingham, R., 1962. The prediction of stream reaeration rates. *International Journal of Air and Water Pollution*, 6(5), pp.467–504.
- [36] Colombia. Presidencia de la República - Resolución número 0192 de 2014. Por la cual se establece el listado de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana que se encuentran en el territorio nacional, y se dictan otras disposiciones.
- [37] Colombia. Presidencia de la República-D 3930, (2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
- [38] Comiti, F., L. Mao, A. Wilcox, E.E. Wohl, y M.A. Lenzi (2007), Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams, *Journal of Hydrology* (2007) 340, 48– 62.
- [39] Cote D, Kehler DG, Bourne C, Wiersma YF. (2009) A new measure of longitudinal connectivity for stream networks. *Landsc. Ecol.* 24:101–13.
- [40] Cox, B. (2003). A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Science of the Total Environment*, 314-316(3), pp.335–377.
- [41] DePhilip M., Moberg T. 2013. Ecosystem flow recommendations for the Upper Ohio River basin in western Pennsylvania. The Nature Conservancy. Harrisburg, PA. 193pp.
- [42] DIH (1992). MIKE 11 User Manual, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- [43] Dyson, M., Bergkamp, G., y Scanlon, J. (2003). *Flow. The Essentials of Environmental Flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. xiv + 118 pp.
- [44] Egozi, R. and Ashmore, P. 2008: Defining and measuring braiding intensity. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 2121–38
- [45] Ferguson, R.I., (2007), Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resources Research*. doi: 10.1029 2006WR005422.
- [46] Flores, A.N., Bledsoe, B.P., Cuhaciyán, C.O., y Wohl, E.E. (2006). Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data. *Water Resources Research*, 42(6).
- [47] Flotemersch, J. E., Leibowitz, S. G., Hill, R. A., Stoddard, J. L., Thoms, M. C., y Tharme, R. E. (2015). A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. *River Research and Applications*.
- [48] Ge, Y., Boufadel, M.C. (2006). "Solute transport in multiple-reach experiments: Evaluation of parameters and reliability of prediction". *Journal of Hydrology*, Volume 323, Issues 1-4, pp. 106-119.
- [49] Giles, P., Franklin, S. (1998). An automated approach to the classification of the slope units using digital data. *Geomorphology* 21 (1998) 251-264.
- [50] Gippel, C. J., & Stewardson, M. J. (1998). Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *Regulated rivers: research & management*, 14(1), 53-67.
- [51] Giraldo, J.D., Díaz-Granados, M. & Camacho, L.A., 2005. Modelo distribuido de tránsito de crecientes en cuencas. *Avances Hidráulicos*, (12), pp. 91–101.
- [52] González, R.A., 2008. Determinación del comportamiento de la fracción dispersiva en ríos característicos de montaña. Universidad Nacional de Colombia.
- [53] Gorman OT and Karr JR. 1978. Habitat Structure and Stream Fish Communities. *Ecology*, Vol. 59, No. 3 (Late Spring), pp. 507-515.
- [54] Gosselink, James, Gary Shaffer, Lyndon Lee, David Burdick, Daniel Childers, Nancy Leibowitz, Susan Hamilton, Roel Boumans, Douglas Cushman, Sherri Fields, Marguerite Koch, and Jenneke Visser. 1990. "Landscape conservation in a forested wetland watershed: can we manage cumulative impacts." *Bioscience* 40: 588-600.

- [55] Grill G, Lehner B, Lumsdon AE, MacDonald GK, Zarfl C, Liermann CR. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*. 2015 Jan 6;10(1):015001.
- [56] Hawkins, C. P., J. L. Kershner, P. A. Bisson, M. D. Bryant, L. M. Decker, S. V. Gregory, D. A. McCullough, C. K. Overton, G. H. Reeves, R. J. Steedman, and M. K. Young. 1993. A hierarchical approach to classifying stream habitat features. *Fisheries* 18:3–12.
- [57] Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283-1298.
- [58] Hernández, J.S. & Camacho, L.A., 2012. Una metodología para la obtención de los parámetros de transporte del modelo ADE a partir del modelo ADZ. In XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Barranquilla: Universidad Nacional de Colombia, p. 10.
- [59] Hernández, J.S. (2014) Análisis de la capacidad predictiva de un modelo dinámico de calidad del agua aplicando técnicas de computación evolutiva, optimización multiobjetivo y procesamiento recursivo de datos. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- [60] Huet M. 1959. Profiles and Biology of Western European Streams as Related to Fish Management. *Transactions of the American Fisheries Society*. Volume 88, Issue 3.
- [61] IDEAM (2010) Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C.
- [62] IDEAM (2015) Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá D.C.
- [63] Jiménez, M., 2015. Morphological representation of drainage networks, implications on solute transport and distributed simulation at the basin scale. A thesis submitted to the National University of Colombia, Department of Geosciences and Environment in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor in Engineering. Medellín, Colombia.
- [64] Jiménez, M.A. & Wohl, E., 2013. Solute transport modeling using morphological parameters of step-pool reaches. *Water Resources Research*, 49, pp.1345–1359.
- [65] Kendall, M.G. 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30: 81-93.
- [66] Kendy E. 2009. ELOHA: A New Framework for Determining and Managing Environmental Flows over Large Regions. The Nature Conservancy.
- [67] Laio, F., G. Di Baldassarre, and A. Montanari (2009), Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes, *Water Resour. Res.*, 45, W07416, doi:10.1029/2007WR006666.
- [68] Lancaster, I., and A.G. Hildrew. 1993. Characterizing in-stream flow refugia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 1 663-1 675.
- [69] Larsen, R.J., Marx, M.L., 1986. An introduction to mathematical statistics and its applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. Lees, M. J., Camacho, L. A., Whitehead, P. (1998). Extension of the QUASAR river quality model to incorporate dead-zone mixing, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2 (2-3), 353-365.
- [70] Lees, M.J., Camacho, L.A. & Chapra, S.C., 2000. On the relationship of transient storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams. *Water Resources Research*, 36(1), pp.213–224.
- [71] Lees, M.J., Camacho, L.A. & Whitehead, P., 1998. Extension of the QUASAR river quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrology and Earth System*, 2(2-3), pp.353–365.
- [72] Lehner B, Liermann CR, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, Nilsson C. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011 Nov 1;9(9):494-502.

- [73] Leopold, L.B. & Maddock Jr., T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. USGS Professional Paper, 252(252), p.57.
- [74] Magoulick D.A. & Kobza R.M. (2003). The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis. *Freshwater Biology*, 48, 1186–1198.
- [75] MARM (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino), 2011. Guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. Gobierno de España. 349 pp.
- [76] Martín, L., & Justo, J. B. (2015). Análisis, prevención y resolución de conflictos por el agua en América Latina y el Caribe.
- [77] Mathews RM, Richter B. 2007. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American Water Resources Association* 43:1400-1413.
- [78] Mejia, A. I., & Reed, S. M. (2011). Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. *J. of Hydrology*, 409, 512-524.
- [79] Melching, C.S. & Flores, H.E., 1999. Reaeration Equations Derived from U.S. Geological Survey Database. *Journal of Environmental Engineering*, 125 (May), pp.407–414.
- [80] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos.
- [81] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013). Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS.
- [82] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014). Guía Técnica para la formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico.
- [83] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los ríos Negro y Nare – CORNARE (2016). Convenio Interadministrativo MADS-CORNARE No. 366-2015. Informe Final: Propuesta metodológica de estimación de caudales ambientales a escala regional.
- [84] Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109, 596–611.
- [85] Mueller, D.S., Wagner, C.R., 2009. Measuring discharge with Acoustic Doppler Current profilers from a moving boat. *USGS Techniques and Methods* 3, A22.
- [86] Mulvihill, C. I., Baldigo, B. P., Miller, S. J., DeKoskie, D., and DuBois, J.: Bankfull Discharge and Channel Characteristics of Streams in New York State, U.S. Geological Survey, Reston, VA, Scientific Investigations Report 2009–5144, 2009.
- [87] Naghettini, M. y Silva, A.T., 2017. *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer International Publishing. Doi: 10.1007/978-3-319-43561-9.
- [88] OMM (Organización Meteorológica Mundial), 2011. Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I Hidrología – De la medición a la información hidrológica. OMM-N° 168 Sexta edición.
- [89] Orlandini, S., and R. Rosso (1998), Parameterization of stream channel geometry in the distributed modeling of catchment dynamics, *Water Resources Research*, 34(8), 1971–1985, doi:10.1029/98WR00257.
- [90] Parasiewicz P. 2007. Using MesoHABSIM to develop reference habitat template and ecological management scenarios. *River Research and Applications*. DOI: 10.1002/rra.1044.
- [91] Parker, G., P. R. Wilcock, C. Paola, W. E. Dietrich, and J. Pitlick (2007), Physical basis for quasi-universal relations describing bankfull hydraulic geometry of single-thread gravel bed rivers, *J. Geophys. Res.*, 112, F04005, doi: 10.1029/2006JF000549.

- [92] Pelletier, G.J., Chapra, S.C. & Tao, H., 2006. QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), pp.419–425.
- [93] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275-289.
- [94] Playán Jubillar, E. (1994). Eficiencia en el aprovechamiento del agua por el regadío. IV Jornadas sobre la organización y el funcionamiento de los riegos en Aragón. Zaragoza: Geórgica.
- [95] Poff NL, Ward JV., 1990. The physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatio-temporal heterogeneity. *Environmental Management* 14:629-646.
- [96] Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. (1997) The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47: 769-784.
- [97] Poff NL, Richter BD, Arthington AH, Bunn SE, Naiman RJ, Kendy E, Acreman M, Apse C, Bledsoe BP, Freeman MC, Henriksen J., 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*. 2010 Jan 1;55(1):147-70.
- [98] Poff, N. L., Matthews, J. H. (2013). Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 667-675.
- [99] Postel, S., Richter, B. (2003) *Rivers for life: managing water for people and nature*. Island Press.
- [100] Poveda, G., Álvarez, M., 2012. El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, (36).
- [101] Radecki-Pawlik A. (2002). Bankfull discharge in mountain streams: Theory and practice. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(2): 115 – 123.
- [102] Rahmstorf, S., 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419.6903 (2002): 207-214.
- [103] Refsgaard, J. C. (1990). Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes. In *Distributed hydrological modelling* (pp. 17-39). Springer Netherlands.
- [104] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. (1996) A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10: 1163-1174.
- [105] Richter BD, Davis MM, Apse C and Konrad C (2011) A Presumptive Standard for Environmental Flow Protection. *River Res. Applic.* 10pp.
- [106] Rinaldi, M., Belletti, B., Comiti, F., Nardi, L., Bussettini, M., Mao, L., Gurnell, A.M., 2015. The Geomorphic Units Survey and Classification System (GUS), Deliverable 6.2, Part 4, of REFORM.
- [107] Rojas, A.F. (2011), Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Colombia.
- [108] Ruiz, L.M.; Delgado, J.; Angarita H.; Salas H.; Sánchez, J.; Cortés, M.; Rueda, O. 2015. Efecto de medidas de adaptación basada en ecosistemas sobre métricas hidrológicas bajo cambio climático: río Nechí, Colombia. Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.
- [109] Runkel, R. L., & Broshears, R. E. (1991). One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): a solute transport model for small streams. CADSWES, Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems, Department of Civil Engineering, University of Colorado.

- [110] Salas, J. D., Fu, C., Cancelliere, A., Dustin, D., Bode, D., Pineda, A., & Vincent, E. (2005). Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 383-393.
- [111] Schlosser, I. J. 1991. Stream fish ecology: a landscape perspective. *BioScience* 41: 704-712.
- [112] Smith, R.D., A. Ammann, C. Bartoldus, and M.M. Brinson. (1995). An approach for assessing wetland functions using hydrogeomorphic classification, reference wetlands, and functional indices. Technical Report WRP-DE-9, U.S. Corps of Engineers, Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- [113] Southwood, T. R. E. 1977. Habitat, the templet for ecological strategies? Presidential Address to the British Ecological Society, 5 January 1977. *J. Amin. Ecol.* 46:337-65.
- [114] Southwood, T. R. E. 1988. Tactics, strategies and templets. *Oikos*, 52: 3-18.
- [115] Spearman, C. 1904. The proof and measurement of association between two things. *Am. J. Psychol.* 15: 72-101.
- [116] Stumm, W. & Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry* Wiley-Inte., New York: 3rd ed.
- [117] Swanson, F. J., Jones, J.A., Wallin, D.O., and Cissel, J.H. 1993. Natural variability – Implications for Ecosystem Management. In Jensen, M.E. and Bourgeron, P.S., eds. *Eastside Forest Ecosystem Health Assessment. Volume 2: Ecosystem management: principles and applications.* pp. 89-104. Oregon: USDA For. Service, Pacific Northwest Research Station.
- [118] Taylor, G., 1954. The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 223(1155), pp.446–468.
- [119] Thackston, E.L. & Dawson, J.W., 2001. Recalibration of a reaeration equation. *Journal of environmental engineering*, 127, pp.317–321.
- [120] Thompson, C.J., Croke, J. and Takken, I. 2008. A catchment scale model of mountain stream channel morphologies. *Geomorphology* 95: 119–144.
- [121] Townsend CR, Hildrew AG. 1994. Species traits in relation to a habitat TEMPLET for river systems. *Freshwater Biology* 31: 265-275.
- [122] UNALMED-UPME. 2000. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Unidad de Planeación Minero Energética, Atlas Hidrológico de Colombia (Informe Final), Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas.
- [123] UN-MAVDT, Universidad Nacional de Colombia - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008. Metodología para la estimación de caudales ambientales en proyectos licenciados. Bogotá: Contrato No. 0076-08 del Convenio Interadministrativo OEI-MAVDT No 004/07 de 2007.
- [124] Usma J.S., M. Valderrama, M. D. Escobar, R. E. Ajiaco-Martínez, F. Villa-Navarro, F. Castro, H. Ramírez-Gil, A.I. Sanabria, A. Ortega-Lara, J. Maldonado-Ocampo, J. C. Alonso & C. Cipamocha. (2009). Peces dulceacuícolas migratorios en Colombia. Pp. 103 - 131. En: Amaya, J.D. & L. G. Naranjo (eds.). *Plan Nacional de las Especies Migratorias: Diagnóstico e identificación de acciones para la conservación y el manejo sostenible de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia.* MAVDT– WWF, 214 pp.
- [125] Van Rijn, L., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. *Aqua publications*, 2(3), p.4.
- [126] Vélez, J.I., Restrepo, C., Correa, P. (2010). Aplicaciones de un modelo hidrológico agregado en Colombia. XXIV Congreso Latinoamericano De Hidráulica Punta Del Este, Uruguay, 2010.
- [127] Vianello, A., D'Agostino, V., 2007. Bankfull width and morphological units in an alpine stream of the dolomites (Northern Italy). *Geomorphology* 83 (2007) 266–281.

- [128] Whitehead, P. G., Williams, R. J., Lewis, D. R., 1997. Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development. *Science of the Total Environment*, 194, 447-456.
- [129] Wilkinson, S. N., Prosser, I. P., Rustomji, P., Read, A. M., 2009. Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 489-501.
- [130] Wohl, E., P. L. Angermeier, B. Bledsoe, G. M. Kondolf, L. MacDonnell, D. M. Merritt, M. A. Palmer, N. L. Poff, and D. Tarboton (2005), River restoration, *Water Resources Research*, 41, W10301, doi: 10.1029/2005WR003985.
- [131] Yang, Z., & Mao, X. (2011). Wetland system network analysis for environmental flow allocations in the Baiyangdian Basin, China. *Ecological modelling*, 222(20), 3785-3794.
- [132] Zhao, C. S., Yang, S. T., Xiang, H., Liu, C. M., Zhang, H. T., Yang, Z. L., & Lim, R. P. (2015). Hydrologic and water-quality rehabilitation of environments for suitable fish habitat. *Journal of Hydrology*, 530, 799-814.

VERSIÓN PARA CONSULTA PÚBLICA