MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTOS QUE REQUIEREN LICENCIA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2013

Contenido

1 APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA ____ 4

2 CRITERIOS Y LINEAMIENTOS ____ 4

2.1 Información climatológica ____ 6

2.2 Información hidrológica ____ 6

2.3 Evaluación de usos actuales y prospectivos del agua y articulación con instrumentos de planificación 10

2.4 Caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramo ____ 10

2.5 Evaluación del impacto en la calidad del agua y el factor de asimilación ____ 10

2.6 Enfoque biótico y no específico ____ 11

2.7 Utilización de variables que integren información de una determinada comunidad biótica 11

2.8 Empleo de las propiedades de sensibilidad o tolerancia de grupos de especies indicadoras (recurriendo a información bibliográfica) ____ 12

2.9 El Hábitat como base para el desarrollo de las comunidades bióticas: utilización de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH) ____ 12

2.10 Lineamientos de la propuesta metodológica ____ 13

***3* METODOLOGÍA ____ 15**

3.1 Paso 1: Recopilación de Información y conformación de Línea Base ____ 15

3.1.1 Información hidrométrica e hidrológica ____ 15

3.1.2 Información hidráulica y de calidad del agua ____ 17

3.2 Paso 2: Análisis de Consistencia, Homogeneidad y Calidad de la Información Hidrológica 20

3.3 Paso 3: Análisis de Correlación Hidrología – Índices de Fenómenos Macroclimáticos ____ 22

3.4 Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica ____ 25

3.5 Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95% ____ 26

3.6 Paso 6: Estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales ____ 27

3.7 Paso 7: Cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del Índice de Integridad del Hábitat, IIH 33

3.7.1 Cálculo de tiempos de viaje y factores de asimilación ____ 33

3.7.2 Cálculo del criterio de calidad del agua ____ 37

3.7.3 Cálculo del Índice de Integridad del Hábitat, IIH ____ 38

3.8 Paso 8: Revisión de la estimación inicial mensual de caudales ambientales ____ 42

4 ABREVIATURAS, NOTACIONES, SIGLAS Y ACRÓNIMOS _____42
ANEXO 1. CAUDAL AMBIENTAL -DAA-_____ 51
ANEXO 2 -CAUDAL AMBIENTAL -EIA-_____ 59

CRITERIOS Y LINEAMIENTOS PARA LA ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL EN PROYECTOS QUE REQUIEREN LICENCIA

1 APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA

La metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental contenida en el presente documento es aplicable a proyectos que requieran captar agua de fuentes superficiales y que impliquen el trasvase de aguas, la generación de energía a filo de agua y/o la formación de embalses, cualquiera que sea su propósito.

No se recomienda el uso de esta metodología para la estimación de caudal ambiental para captaciones de otro tipo sin que se haya adelantado previamente una revisión cuidadosa de la aplicabilidad de la misma bajo escenarios que reflejen las condiciones específicas según el tipo de captación que se pretenda controlar.

2 CRITERIOS Y LINEAMIENTOS

La estimación y evaluación del caudal ambiental debe cumplir criterios de objetividad[1]; flexibilidad[2]; adaptabilidad[3]; costo-efectividad[4]; precaución ambiental[5]; criterios ecosistémicos y de integralidad[6]. Hace parte del marco normativo y de gestión ambiental, entendidos éstos como instrumentos ambientales que son el nicho propicio para la determinación de los caudales ambientales.

[1] Sin convertirse en una fórmula y promoviendo la incorporación del conocimiento de los diversos actores, la Metodología debe poder ser aplicada de la manera más objetiva posible.
[2] La fexibilidad debe ser entendida como la posibilidad de ser aplicada con algún grado de ajuste bajo diferentes condiciones de información y en diversos tipos de corrientes.
[3] Se resalta la necesidad de realizar monitoreo, seguimiento y ajuste continuo de las estimaciones y de la propuesta metodológica en caso de considerarse necesario, a partir de evaluaciones periódicas de índices de estado biótico.
[4] Se entiende como costo-efectividad el adecuado balance entre la eficacia de la metodología y su sostenibilidad.
[5] Manteniendo prudencia ante el claro desconocimiento de nuestros ecosistemas y las limitaciones de información existentes en el contexto colombiano
[6] Considerando la necesidad de incorporar en los análisis los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad del agua, biótico, socioeconómico, etc.

La metodología es un instrumento técnico que permite mejorar los requerimientos de información y establece el proceso para la definición y evaluación de un caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental; debe ser aplicada con fundamento en criterios científicos sólidos.

La estimación y evaluación de caudal ambiental deberá realizarse con base en criterios espécíficos que permitan definir las características generales de la intervención sobre la corriente, la escala de estudio, los estudios específicos requeridos, la longitud del tramo afectado, así como la identificación de los usos actuales y prospectivos del agua, aguas abajo del sitio afectado.

Adicionalmente se han identificado los siguientes criterios:

Información preliminar:

- Información climatológica
- Evaluación de usos actuales y prospectivos del agua y articulación con instrumentos de planificación

Criterios hidrológicos:

- Información hidrológica

Criterios hidráulicos y de calidad del agua:

Dado que las alteraciones de los caudales en un ecosistema acuático pueden modificar la calidad del agua (Smith et. al., 1996) y tener un efecto importante sobre la biota acuática (Dallas y Day, 1993), y dado que los usos del recurso están limitados por valores admisibles de calidad del agua, se consideran los siguientes tres criterios a tener en cuenta en la estimación y evaluación del caudal ambiental:

- Caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramo
- Evaluación del impacto en la calidad del agua y el factor de asimilación

Criterios ecológicos:

Estos son los criterios específicos, asociados con el componente ecológico que se deben considerar en la estimación y evaluación del caudal ambiental:

- Enfoque biótico y no específico
- Utilización de variables que integren información de una determinada comunidad
- Empleo de las propiedades de sensibilidad o tolerancia de grupos de especies indicadoras
- El Hábitat como base para el desarrollo de las comunidades bióticas: utilización de un Índice de Integridad del Hábitat

A continuación se presentan en detalle los criterios arriba relacionados:

2.1 Información climatológica

Antes de caracterizar la información hidrológica es necesario caracterizar la climatología de la zona de estudio e investigar a nivel mensual posibles correlaciones entre algunas de las variables meteorológicas y los caudales de la corriente; se sugiere contar con registros de temperatura, precipitación y otras variables meteorológicas en estaciones ubicadas en la cuenca aferente.

2.2 Información hidrológica

La información hidrológica que debe estar disponible para la estimación de caudal ambiental es la siguiente:

- Número mínimo de estaciones hidrométricas necesarias
- Tipo de información requerida, su nivel de agregación temporal y período mínimo de caudales registrados o estimados, para la estimación de caudales ambientales.

De preferencia, se debe contar con dos estaciones hidrométricas y considerar los datos de la estación más cercana al sitio de intervención para propósitos de caracterización del régimen

hídrico de la corriente, y los de la otra estación (ubicada aguas abajo) para propósitos de análisis del balance hídrico (determinación de aportes de escorrentía, aportes de flujo base etc.), análisis de consistencia y homogeneidad de la información y para complementación de registros faltantes, en caso de ser necesario. Se debe contar con series de caudales mínimos diarios (en lo posible) o caudales medios diarios con período de registro mayor a 10 años (en lo posible), período durante el cual, en la mayoría de los casos, se tendrían años con condiciones hidrológicas disímiles: húmeda, normal y seca.

En el evento de no contar con la información, bien sea por la falta de disponibilidad de estaciones hidrométricas o porque no se cuenta con períodos de registro superiores a 10 años, se podrán hacer estimaciones por métodos indirectos, para los sitios aguas arriba y aguas abajo de la intervención. Para las estimaciones se deberán considerar como mínimo las siguientes variables hidroclimáticas: caudal, precipitación, infiltración, evapotranspiración, temperatura y humedad; se deberá describir y justificar el método utilizado teniendo en cuenta las características específicas del proyecto y del sitio en que éste será construido.

La información hidrológica requerida para la estimación de los caudales ambientales debe ajustarse como mínimo a los siguientes requerimientos:

- Consistencia y calidad de la información hidrométrica primaria
- Considerando que las estimaciones hidrológicas de caudales ambientales se basan en la determinación de datos estadísticos de las series de tiempo, es necesario garantizar la confiabilidad, homogeneidad y consistencia de los registros disponibles, a través de análisis exploratorios de datos (Tukey, 1977), los cuales intentan detectar la existencia de períodos de registro disímiles (o no homogéneos), o la existencia de puntos anómalos en las series, que en ambos casos afectarían el cálculo de los datos estadísticos de las series, utilizados para la estimación hidrológica de los caudales ambientales.

El criterio de calidad y consistencia de la información también contempla la evaluación objetiva de la confiabilidad de los registros de nivel (a partir de los cuales indirectamente se estiman los caudales)

- Variabilidad hidrológica interanual y estacional de la corriente

Como se mencionó anteriormente, el análisis de la variabilidad del régimen hidrológico natural de una corriente, a escalas interanual e intranual, resulta fundamental para preservar la dinámica de largo plazo de los ecosistemas asociados. Sin duda, en registros de períodos de 10 años existen variaciones importantes en los regímenes hidrológicos anuales de una corriente, ocasionados por ejemplo por la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos, los cuales definen años con condiciones hidrológicas específicas, desde años muy húmedos hasta años muy secos. Para el caso colombiano en particular, varios autores (Poveda, 2004, Mesa *et al.*, 1997) han demostrado la importante influencia que tienen fenómenos macroclimáticos como El Niño y la Niña, entre otros, en los regímenes hidrológicos de cuencas ubicadas en diversas partes del territorio colombiano. Así, y bajo este criterio, para diferentes condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), y a nivel mensual se requiere tener diferentes estimaciones de caudales ambientales. A nivel intranual, resulta particularmente clara la existencia de períodos húmedos, promedio y secos en una corriente, asociados fundamentalmente con el régimen de precipitación de la cuenca asociada, el cual, para el caso colombiano, está directamente influenciado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, determinando en algunas cuencas regímenes bimodales (dos períodos húmedos al año, caso de la zona Andina) o monomodales (un único período húmedo al año, caso de la Costa Atlántica, la Orinoquia y Amazonia). Tal como se mencionó anteriormente, al considerar que los ecosistemas de forma natural se han adaptado a las variaciones interanuales y estacionales en los caudales, resulta muy importante intentar preservar esta variabilidad después de la intervención.

Como primera aproximación para la determinación de los caudales ambientales se debe partir del mayor valor entre los índices 7Q10, Q95 y Q75 para cada mes (condiciones húmeda, promedio y seca por 12 meses), como índices hidrológicos individuales, los cuales deben ser ajustados a los demás criterios.

Comparación de características hidrológicas para las condiciones sin y con proyecto: El análisis de las características hidrológicas de una corriente, para las condiciones sin y con proyecto (series naturales y series hipotéticas o reales después de la intervención), resulta fundamental para estudiar y minimizar el posible impacto de la intervención sobre el régimen hidrológico de la corriente y su efecto sobre otros componentes (hidráulico y de calidad de agua, biótico, socioeconómico, etc.). El régimen hidrológico natural de una corriente debiera impactarse tan poco como fuese posible, garantizando, en la medida de las posibilidades, un adecuado balance entre los beneficios y costos asociados a la intervención.

En términos hidrológicos, la evaluación y minimización del impacto debe incluir el establecimiento de umbrales de alteración máxima, para las condiciones sin y con proyecto, de los percentiles de la curva de duración de caudales diarios y/o mensuales (CDC - curva de frecuencia acumulada que muestra el porcentaje del tiempo en que cierto caudal es igualado o excedido); umbrales de alteración máxima en la frecuencia de caudales extremos para condiciones sin y con proyecto, y rangos de alteración del régimen hidrológico de la corriente, para otros tipos de índices hidrológicos (como los incluidos en en el *software* Indicators of Hydrologic Alteration - IHA).

En la comparación de las condiciones hidrológicas sin y con proyecto resulta fundamental el establecimiento de la regla de operación del mismo, la cual, si bien es cierto es hipotética, puede ser estimada con un cierto nivel de certidumbre para el caso de proyectos de derivación (acueductos, distritos de riego, trasvases), pero resulta muy difícil de estimar para el caso por ejemplo de proyectos hidroeléctricos, los cuales cuentan con un conjunto de restricciones y reglas particulares, valores que deben ser ajustados teniendo en cuenta los criterios ecológicos, hidráulicos y de calidad de agua desarrollados más adelante.

2.3 Evaluación de usos actuales y prospectivos del agua y articulación con instrumentos de planificación

En forma previa a la definición del caudal ambiental de una corriente y antes de permitirse la alteración de los regímenes naturales de caudales deben conocerse claramente los usos actuales y prospectivos del agua, aguas abajo, definidos por los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, y tener en cuenta la ordenación de la cuenca y las metas y objetivos de calidad para la corriente en caso de que ellos existan. Esto con el fin de poder garantizar el uso sostenible del recurso hídrico que la sociedad o una comunidad particular hayan definido.

2.4 Caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramo

Si bien la caracterización puntual en algunas secciones transversales es importante y necesaria (por ejemplo para la elaboración de curvas de nivel *versus* caudal en estaciones hidrométricas) se debe propender porque los aspectos hidráulicos relevantes que afectan los hábitats de organismos presentes en la corriente y su calidad de agua se caractericen (midan) y/o modelen, a la escala y al nivel de tramo de corriente; esto con el fin de obtener resultados que sean realmente representativos de las características de cantidad y calidad del hábitat y de la calidad del agua en los sitios de uso o captación del recurso bajo diferentes regímenes de caudal.

En la caracterización a nivel de tramo, es relevante la estimación del grado de uniformidad del flujo y la variabilidad de la velocidad de la corriente (diversidad de hábitats) que favorecen el desarrollo de los distintos grupos de organismos y de una biota más diversa. Deberán presentarse y justificarse los criterios para la definición de tramos.

2.5 Evaluación del impacto en la calidad del agua y el factor de asimilación

En ausencia o limitación de datos suficientes, confiables y concurrentes de caudal y calidad del agua, deben evaluarse, mediante modelos matemáticos de calidad del agua[7] los impactos en la calidad para las condiciones sin y con proyecto de regulación de caudales en

[7] Tomar como referencia la Guía de Modelación del Recurso Hídrico Superficial

los sitios de captación y uso del recurso. En particular, debe evaluarse el cambio en el factor de asimilación de carga contaminante en el tramo afectado aguas abajo de la derivación o captación y/o almacenamiento.

El factor de asimilación en el tramo afectado del río con proyecto (caudal reducido) no debe disminuir significativamente si la concentración actual sin proyecto, del determinante de calidad del agua, está cercana al valor del estándar o criterio admisible correspondiente al uso del agua. Nótese que esto ocurriría si el agua en la condición previa al proyecto presenta ya una mala calidad. En esta condición podría generarse, con una alta probabilidad y riesgo, un impacto negativo en la salud pública o una limitación potencial del uso deseado del recurso hídrico por la reducción adicional del caudal.

2.6 Enfoque biótico y no específico

Los aspectos ecológicos que deben hacer parte de la determinación y evaluación de caudales ambientales deben estar relacionados con la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas (peces, macroinvertebrados, perifiton, vegetación riparia) y la integridad ecológica de dichas comunidades. Por lo tanto, se prefiere el uso de variables comunitarias (composición, riqueza, diversidad, interacciones tróficas) al empleo de parámetros de especies particulares.

2.7 Utilización de variables que integren información de una determinada comunidad biótica

La cantidad de hábitat se medirá como área disponible para cada comunidad y la calidad dependerá de variables distintas para cada comunidad. De esta manera, se deben tener en cuenta nutrientes y transparencia para el perifiton, materia orgánica para los invertebrados, nutrientes y agua en el suelo para la vegetación riparia y profundidad, velocidad de la corriente, conectividad y oxígeno disuelto para los peces. Además, la evaluación de las comunidades señaladas se basará en métricas que midan, de forma agregada, información sobre la estructura y funcionalidad de este nivel ecológico, tales como gremios funcionales y grupos tróficos.

2.8 Empleo de las propiedades de sensibilidad o tolerancia de grupos de especies indicadoras (recurriendo a información bibliográfica)

Se identificarán y utilizarán preferiblemente grupos de especies indicadoras que son cosmopolitas y se encuentran en muchos ecosistemas de aguas continentales a nivel mundial. Estos grupos de organismos tienen propiedades ampliamente reconocidas de sensibilidad o tolerancia a cambios en la calidad del agua o a variaciones en las condiciones del hábitat. Su amplia distribución (en especial en el caso de los macroinvertebrados acuáticos y los organismos del perifiton) permite utilizar la información internacional para hacer un primer acercamiento a su uso como grupos indicadores.

2.9 El Hábitat como base para el desarrollo de las comunidades bióticas: utilización de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH)

El hábitat es el espacio real donde se da la relación natural entre el ambiente físico y sus habitantes. Por ello, se debe evaluar la disponibilidad y calidad del hábitat general para establecer las posibilidades de desarrollo de la biota. Esta evaluación debe hacerse en las condiciones con y sin proyecto, para lo cual se considera apropiado utilizar los resultados de modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua. Dichas modelaciones pueden proporcionar la valoración de los cambios en una serie de variables físicas y químicas que conformen un Índice de Integridad del Hábitat (IIH).

Se debe utilizar el IIH, el cual es una medida multimétrica que permite predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río. Para ello, el IIH debe incluir variables tanto de disponibilidad como de calidad del hábitat utilizable por la biota.

2.10 Lineamientos de la propuesta metodológica

En la Tabla 1 se presentan algunos elementos iniciales para la construcción de una metodología que permita considerar los aspectos ecológicos, cuyos procedimientos se puedan acoplar a los métodos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua.

Tabla 1.- Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en ríos de Colombia

VARIABLES		METODOLOGÍA	
NOMBRE DE LA VARIABLE	**JUSTIFICACIÓN**	**DATOS REQUERIDOS (*)**	**ESBOZO DE LA METODOLOGÍA**
Disponibilidad de hábitat de cada comunidad			Cálculo de valores umbrales de reducción de hábitat general para la biota. Los umbrales se basarán en porcentajes permisibles de pérdida del medio físico, sin que se pierda la integridad general del hábitat.
Vegetación riparia Perifiton Macroinvertebrados Peces	El hábitat tiene significado biológico porque es donde se da la relación natural entre el ambiente físico y sus habitantes.	Área de hábitat de las comunidades y pérdida del mismo a causa del proyecto. Caudales medios y extremos (estiaje e inundación).	
Calidad del hábitat para un índice de integridad física del ambiente			
Vegetación riparia	La calidad indica qué tan apropiado es el hábitat para que pueda ser utilizado por los organismos.	Inundabilidad, tabla de agua freática, calidad de los suelos.	
Perifiton		Luz (profundidad), nutrientes, régimen de caudales.	
Macroinvertebrados		DBO, oxígeno disuelto, granulometría del sedimento.	
Peces		Oxígeno disuelto, velocidad de la corriente, profundidad, conectividad.	

(*)Algunas de las variables incluidas en esta columna se refieren a parámetros que podrían influir en el desarrollo de una determinada comunidad, pero no se tuvieron en cuenta para el desarrollo posterior de los índices ecológicos (IIH) debido a la dificultad de modelarlas.

La estimación o evaluación del caudal ambiental debe comenzar con la estimación de caudales mensuales a partir de un análisis hidrológico; con esta primera aproximación de caudales mensuales se realizan cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del índice de integridad del hábitat (IIH). Si se cumplen los criterios señalados anteriormente, es decir que no se prevé un cambio en la calidad del agua que afecte los usos actuales y

prospectivos predefinidos para la corriente, ni alteración sustancial del hábitat, podría reducirse el caudal del mes correspondiente al cumplimiento definido en el componente hidrológico. Por el contrario, si no se cumplen los criterios de bajo impacto negativo en la calidad del agua y de alteración del hábitat el caudal mensual correspondiente debe aumentarse.

La Figura 1 muestra la conceptualización general de la metodología propuesta, en la que se resaltan como elementos fundamentales su integralidad, la interacción y flujo de información entre los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua y biótico y el análisis de las condiciones sin y con proyecto.

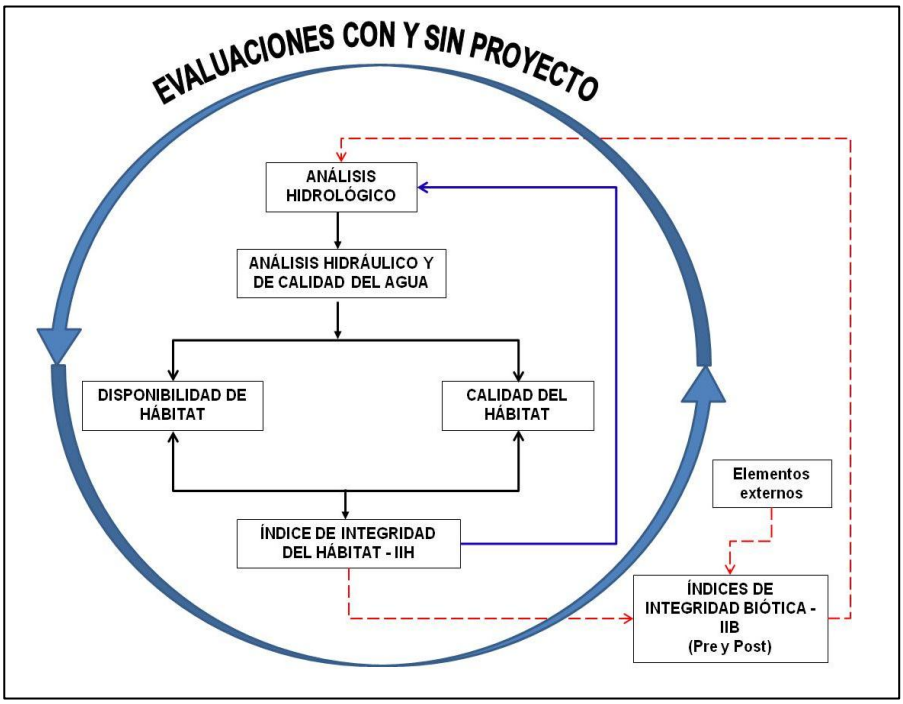


Figura 1. - Componentes principales de la propuesta metodológica

3 METODOLOGÍA

A continuación se explica la metodología a utilizar, por pasos:

3.1 Paso 1: Recopilación de Información y conformación de Línea Base[8]

3.1.1 Información hidrométrica e hidrológica

La Tabla 2 presenta la localización esquemática de las estaciones hidrométricas requeridas para efectuar las estimaciones del caudal ambiental dentro del componente hidrológico. Como puede apreciarse en la Figura 2, se debe contar con datos de dos estaciones hidrométricas (A y B), ambas ubicadas dentro del tramo en estudio, en lo posible delimitando la longitud del cuerpo de agua afectado, y localizadas la estación A lo más cerca posible al sitio de intervención y la estación B aguas abajo dentro del tramo afectado o limitando el mismo. De igual forma, y como se establece en detalle dentro de la metodología del componente hidráulico y de calidad de agua, se deberán identificar los sitios puntuales en los que existan variaciones importantes de los caudales y de su calidad, ya sea por aportes de afluentes, por vertimientos o descargas o por cambios significativos en la geomorfología de la corriente. La identificación de estos puntos permitirá subdividir la longitud del cuerpo de agua afectado en subtramos individuales.

Para las estaciones hidrométricas A y B se requiere estimar el valor del área de drenaje de la cuenca hasta el sitio de ubicación de la estación hidrométrica.

En caso de no contar con registros sino de una única estación, esta debiera estar ubicada lo más cerca posible al sitio del proyecto. De no ser así, los registros disponibles podrán ser trasladados al sitio del proyecto descontando o agregando aportes de afluentes importantes y utilizando técnicas hidrológicas sencillas como prorrateo en función del área de drenaje de la cuenca, para lo cual se deberán realizar los ajustes pertienetes por condiciones de precipitación. Los registros hidrométricos se sugiere correspondan a datos de caudales

[8] Ver anexos: Información requerida a nivel de DAA y EIA.

medios diarios, con un período de registro mayor de 10 años. Los datos de la estación A son utilizados para caracterizar el régimen hidrológico natural de la corriente, y los datos de la estación B (en caso de estar disponibles) para evaluar aportes y recarga en el tramo, así como datos de soporte para efectuar los análisis de consistencia.

Aunque es muy probable que en proyectos a licenciar el período de registro hidrométrico en la estación A sea inferior a 10 años, es posible, a partir del registro corto existente en la estación A extender el mismo, ya sea mediante análisis de regresión empleando los datos de la estación B, o utilizando los registros concurrentes de otra u otras estaciones más completas ubicadas en otra cuenca con condiciones y características similares (para datos de caudal) y estaciones vecinas dentro de la misma cuenca (para datos de precipitación). En todo caso, los métodos empleados deben estar debidamente validados y sustentados.

En caso de encontrar períodos de registro hidrométrico inferiores a 10 años en la estación A, es posible completar la serie a partir del registro corto encontrado en esta estación, bien sea utilizando análisis de regresión a partir los datos de la estación B o mediante registros concurrentes de otra estación más completa ubicada sobre la misma corriente aguas abajo de la estación B.

En el caso de no contar con registros de niveles y/o de caudales diarios, o con períodos de registro superiores a 10 años, se hace necesario la utilización de métodos indirectos para generación de caudales mensuales, para la estación A. En tal caso, la metodología propuesta de estimación de la oferta hídrica total debe obedecer a métodos de cálculo que consideren las relaciones lluvia – escorrentía, teniendo en cuenta parámetros tales como la intercepción, evapotranspiración, capacidad de almacenamiento del suelo e infiltración, en función de la cobertura del suelo, el tipo de suelo y el régimen de precipitación del área aferente[9]. .

[9] Un ejemplo es la metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service – SCS), el cual considera las pérdidas iniciales de una tormenta.

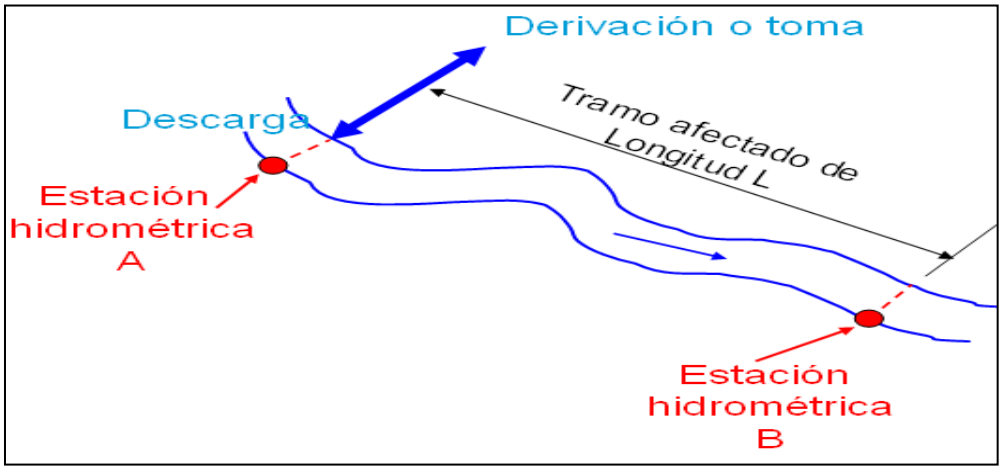


Figura 2. -Número y ubicación de estaciones hidrométricas para implementación de la metodología

Teniendo en cuenta que el análisis hidrológico implica el conocimiento del comportamiento de los caudales a nivel mensual, estimado por métodos directos o indirectos, así como la estimación de la demanda hídrica, se requiere identificar y definir los usos del recurso hídrico en el área del estudio, estableciendo la demanda hídrica actual y potencial, a partir de encuestas directas en campo y de la revisión de información disponible en las corporaciones relacionadas con los Planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca, Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico reglamentación de usos del agua, reglamenteación de vertimientos, registros de concesiones y permisos de vertimiento, entre otros.

3.1.2 Información hidráulica y de calidad del agua

Con el fin de realizar la estimación del caudal ambiental en la metodología propuesta y de acuerdo a los lineamientos descritos anteriormente, se sugiere el levantamiento de información hidráulica en subtramos representativos que conforman el tramo afectado por la alteración del régimen hídrico de la corriente. Específicamente se deben construir curvas de calibración de Profundidad (H), Área (A), Perímetro (P), Ancho Superficial (T), Velocidad media ($\overline{V}$), y Velocidad máxima (Vmax) como función del caudal en cada subtramo.

Esta información normalmente se obtiene a partir de:

1. Datos de aforos y levantamientos de secciones transversales representativas del segmento de río bajo estudio tomados bajo un rango amplio de caudales, incluyendo levantamiento topográfico y planimétrico del cauce mayor y la zona de inundación.

2. Calibración de modelos hidráulicos de flujo uniforme o flujo gradualmente variado y/o flujo no permanente según corresponda. Se calibran parámetros efectivos de tramo tales como el Ancho efectivo, la pendiente longitudinal efectiva del fondo del canal, y el coeficiente de rugosidad de Manning o de Chezy, utilizando mediciones de campo del perfil de la lámina de agua, el caudal aforado en diferentes secciones transversales y/o hidrogramas de flujo no permanente registrados en secciones transversales.

3. Calibración de parámetros hidráulicos y de transporte de sustancias disueltas a partir de experimentos con trazadores. Estos experimentos permiten conocer relaciones como Área *versus* Caudal; la Relación de Velocidad media / Velocidad máxima en el tramo; el Coeficiente de dispersión longitudinal o la Fracción dispersiva (Camacho y Cantor, 2006) *versus* Caudal; Tiempo de arribo *versus* Caudal; Tiempo medio de viaje *versus* Caudal.

Para la estimación del caudal ambiental se requiere levantar la información de usos del agua e identificar o definir los usos del agua longitudinalmente a lo largo de la corriente en el tramo afectado aguas abajo.

1. Previo al análisis de calidad de agua, es necesario tener en cuenta los usos del agua definidos por la Corporación para las diferentes fuentes hídricas del área de estudio, establecidos en los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico o en los objetivos de calidad.

2. Mediciones de Carga Contaminante (*W)* en los sitios de derivación, captación o almacenamiento y sitios de vertimientos o confluencias de afluentes de agua en el tramo afectado. La Carga Contaminante se estima a partir de datos de concentración de cada determinante de calidad del agua (*j*) propuesto multiplicados por el caudal correspondiente. Se propone la caracterización mediante la toma de muestras integradas de 24 horas durante una semana (siete muestras integradas) y cada mes del año. En la metodología propuesta se sugieren como relevantes los determinantes de calidad del agua y los procesos de degradación y transporte especificados en la Tabla 2.

Tabla 2 – Determinantes de calidad del agua considerados en la metodología

Determinantes	Procesos	Tasas de Reacción
Conservativos (Temperatura, Conductividad)	Dispersión – advección	
Materia orgánica Particulada (DBO y Demanda Béntica de oxígeno)	Dispersión – advección, descomposición de la DBO *kd*, sedimentación de la materia orgánica particulada *Vs*$_{MOP}$	$kr = kd + \frac{Vs`_{MOP}}{H}$
NH4	Dispersión – advección, nitrificación	k_{NA}
Fósforo total o Fósforo reactivo soluble	Dispersión – advección, hidrólisis	k_H
Coliformes Totales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b
Coliformes Fecales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b,
SST	Dispersión – advección, sedimentación	$k_s = \frac{Vs_s}{H}$
Oxígeno disuelto	Dispersión – advección, reaireación, descomposición DBO, nitrificación	k_a, k_d, k_{NA}
Otros de interés que se podrían definir para cada proyecto específico		

3. Mediciones de la concentración de cada determinante (*Cj*), en los sitios de uso del agua tomadas en igual forma (muestras integradas de 24 horas durante una semana de cada mes).

4. Estimaciones de las tasas de reacción y/o transformación bioquímica o física de los determinantes de calidad del agua propuestos, las cuales juegan un papel importante

en la determinación de la capacidad de asimilación de una corriente. Las tasas de reacción pueden ser obtenidas mediante la calibración rigurosa de un modelo de calidad del agua o mediante el uso de formulaciones empíricas que sean consistentes con las características del río bajo estudio.

3.2 Paso 2: Análisis de Consistencia, Homogeneidad y Calidad de la Información Hidrológica

El período inicial de análisis estará definido por el período de registro diario en la estación *A*, en lo posible concurrente con el período de registro en la estación *B*. Utilizando cualquier herramienta de tipo estadístico como por ejemplo SPSS, XLSTAT (herramienta complementaria de Excel, http://www.xlstat.com/es/home/), EDA (Exploratory Data Analysis), u otra; se propone efectuar los análisis de consistencia, homogeneidad y calidad de los registros diarios disponibles en ambas estaciones evaluando para ello:

i) Cambios en la media para detectar la existencia de posibles períodos no homogéneos en las series (a través por ejemplo de la prueba de Abbe, o la prueba de Petit), con niveles de confianza del 90% o mayores.

ii) Tendencias en la media para evaluar posibles períodos no homogéneos (a través por ejemplo de la prueba de Mann-Kendall, o la prueba T para tendencias lineales) con niveles de confianza del 90% o mayores.

iii) Existencia de puntos anómalos (outliers) (a través por ejemplo del diagrama bilineal de caudales diarios en las estaciones A y B, identificando los posibles puntos anómalos como aquellos que se salen de la tendencia general; o a través del diagrama de caja y patillas (box-plot) en el cual posibles puntos anómalos son aquellos que se salen de las patillas del diagrama (definida la patilla superior como el cuartil 75% + 1.5 *(cuartil 75%-cuartil 25%) y la patilla inferior como el cuartil 25% - 1.5 *(cuartil 75%- cuartil 25%); o a través de pruebas estadísticas no paramétricas de detección de

puntos anómalos como la prueba de Rosner, la prueba de Grubs, entre otras, con niveles de confianza del 90% o mayores.

iv) De no encontrarse homogeneidad en el período de registro en la estación A, debido a cambios en la media o tendencias en los registros, se deberá seleccionar para el análisis el período homogéneo más reciente, garantizando el criterio período de registro mayor de 10 años. De hallarse puntos anómalos en las series, quedará a criterio del analista realizar la remoción o no de dichos valores. A manera de recomendación, se propone que en caso de que dos o más métodos diferentes de detección de outliers identifiquen que un registro es posiblemente anómalo, y se soporte su posible anomalía, este sea removido de la serie.

v) Efectuado el análisis de consistencia, seleccionado el período homogéneo de registro en las dos estaciones, y removidos los puntos anómalos, se propone evaluar la correlación existente entre los datos diarios de ambas estaciones (A y B), la cual, en caso de ser importante (>0.80), permite establecer una relación funcional del tipo QA=a+bQB, (con QA siendo el caudal diario en la estación A, QB el caudal diario en la estación B, y a y b los parámetros de la regresión), útil para completar los datos faltantes en la estación A a partir de los registros de la estación B, o viceversa. Otras opciones para el llenado de datos faltantes incluirían por ejemplo el valor promedio mensual (como lo hace el software IHA) o preferiblemente simulación hidrológica siguiendo rigurosos protocolos de modelación, en los que la serie hidrométrica existente sea utilizada para propósitos de calibración y validación del modelo implementado.

vi) Una vez efectuado el llenado de datos faltantes, y con el fin de no sesgar las estadísticas al incluir registros de años incompletos (fundamentalmente el cálculo de las curvas de duración de caudales) se propone no incluir en los análisis posteriores años que tengan más del 10% de los registros faltantes (este escenario es eventualmente difícil que ocurra si se cuenta, con protocolos de mantenimiento de los equipos y de recolección y almacenamiento de la información, y, como aquí se

propone, con datos de dos estaciones hidrométricas muy cercanas, que facilitarían el llenado de los posibles datos faltantes).

vii) Seleccionado el periodo homogéneo, consistente y casi completo de análisis se propone realizar la estimación de la estadística descriptiva de las dos series (utilizando por ejemplo SPSS, XLSTAT, u otro paquete estadístico), reportando valores de media, mediana, moda, máximo, mínimo, varianza, coeficiente de asimetría, coeficiente de variación, primer cuartil, tercer cuartil, histograma etc., parámetros útiles para propósitos de caracterización inicial de la series.

viii) Con los valores de media y varianza de los registros en las estaciones A y B, y descontando los aportes de afluentes y vertimientos, podrá evaluarse la recarga promedio anual por escorrentía y por aporte de aguas subterráneas, y su variabilidad en la longitud de río impactada, entre las dos estaciones. Dicho cálculo, también podrá refinarse a nivel mensual, considerando la estacionalidad de los caudales.

Realizado el análisis de consistencia, homogeneidad y calidad de la información, el siguiente paso dentro de la metodología del componente hidrológico es efectuar el análisis de la posible influencia de fenómenos macroclimáticos sobre la hidrología de la corriente analizada, utilizando los registros depurados de la estación *A*, tal como se detalla a continuación.

3.3 Paso 3: Análisis de Correlación Hidrología – Índices de Fenómenos Macroclimáticos

Considerando que a la escala interanual la hidroclimatología de una buena parte del territorio colombiano está influenciada por la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña (ENSO), La Oscilación del Atlántico Norte (NAO), La Oscilación Quasi-Bienal (QBO), entre otros, se propone dentro de este paso de la metodología realizar la evaluación de esta influencia en dos etapas. Primero a partir del cálculo de regresiones multivariadas, entre los índices climáticos mensuales de estos fenómenos macroclimáticos, ya sean los valores reales, los estandarizados o las anomalías de índices como el SOI

(Índice de Oscilación del Sur), SST3-4 (Temperatura Oceánica Superficial en la zona Niño 3-4), ONI (Índice Oceánico del Niño), NAO (Índice de Oscilación del Atlántico Norte), QBO (Índice de la Oscilación Quasi-Bienal) todos ellos reportados desde 1951 y actualizados mensualmente por la Agencia Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA ver http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/) y la hidrología mensual de la corriente analizada (obtenida a partir del registro diario homogéneo y completo en la estación *A*); esta correlación debe partir del concepto de año hidrológico (junio año 0 – mayo año 1).

Estas regresiones multivariadas también pueden incluir datos del mes o meses antecedentes de otras variables hidrometeorológicas locales como temperatura máxima, mínima, media, precipitación, caudales, etc. De encontrarse que este tipo de regresiones explican satisfactoriamente la variabilidad de los caudales mensuales de la corriente (coeficientes de determinación $R^2 > 0.70$) ellas brindarían la posibilidad de pronosticar con cierto nivel de confianza los caudales mensuales para la corriente analizada y a partir de ellos realizar las estimaciones del caudal ambiental tal como se propone más adelante en el Paso 6 de la metodología.

En la segunda etapa, y en caso de no encontrar coeficientes de determinación apropiados para las regresiones multivariadas efectuadas, se propone evaluar la influencia entre los fenómenos macroclimáticos y la hidrología de la corriente, a partir del cálculo de correlaciones cruzadas entre los índices mensuales de estos mismos fenómenos y los caudales medios mensuales, tarea que fácilmente pueden realizarse con ayuda de alguno de los paquetes estadísticos antes mencionados.

A manera de ejemplo, la Figura 3 muestra los resultados del análisis de correlación cruzada entre la anomalía del SOI y los caudales medios mensuales (de aquí en adelante QMM) en la estación Angostura de Urrá, en la que se muestran correlaciones positivas significativas, cercanas a 0.20 para rezago (desplazamiento) igual a cero. Rezagos negativos indican que el fenómeno antecede a la hidrología y lo contrario para rezagos positivos. Correlaciones positivas indican efectos directos entre el fenómeno y la hidrología (los dos disminuyen o

aumentan), mientras que correlaciones negativas indicarían efectos inversos (uno disminuye el otro aumenta).

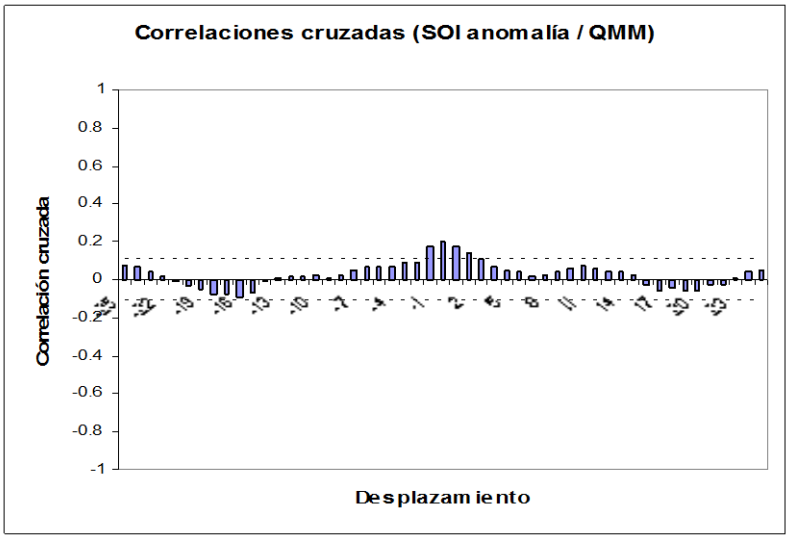


Figura 3. Ejemplo correlograma mostrando correlaciones significativas entre la anomalía del SOI y los caudales medios mensuales de la estación Angostura de Urrá para rezago igual a cero

La obtención de correlaciones estadísticamente significativas como las presentadas en la Figura 4 (por fuera de los límites para variables puramente aleatorias $\sim\pm 2/(N)^{0.5}$, con N igual al número de observaciones, y mostrados usualmente en las gráficas de correlación (correlogramas) como líneas punteadas), es un indicativo de la influencia por ejemplo del ENSO en la hidrología de la corriente, y sugeriría la posibilidad de agrupar los años bajos condiciones hidrológicas anuales diferentes, permitiendo realizar estimaciones del caudal ambiental diferentes para años secos (El Niño), húmedos (La Niña) y normales.

El empleo de esta estrategia permite la definición de un caudal ambiental adaptativo, en términos de condiciones climáticas e hidrológicas, así como la consideración de pronósticos de mediano plazo del ENSO para su determinación inicial, como los que elabora mensualmente el IDEAM.

De no encontrarse influencia de fenómenos macroclimáticos en la hidrología de la corriente (correlaciones dentro de los límites para una variable puramente aleatoria en el correlograma) se propone como primera opción no discriminar los años y considerarlos todos bajo la categoría de años promedio. Una segunda opción, basada en una adaptación de la propuesta del anteproyecto de norma oficial mexicana, sugiere retirar del registro el año más húmedo y el más seco, y considerar los restantes como promedio, y realizar estimaciones del caudal ambiental diferentes para cada tipo de año (húmedo, promedio y seco).

Evaluada la influencia de fenómenos macroclimáticos sobre la hidrología de la corriente el siguiente paso dentro de la metodología incluye la clasificación de los años bajo diferentes condiciones hidrológicas, tal como se discute a continuación.

3.4 Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica

En el caso en que exista influencia del ENSO en la hidrología de la corriente (cosa que va a suceder para un importante número de corrientes en Colombia), se propone clasificar los años en húmedos, promedio y secos, utilizando para ello las tablas basadas en el Índice Oceánico del Niño (ONI) disponibles en la página web http://ggweather.com/enso/oni.htm, las cuales son actualizadas desde el año 2007 y que utilizan información oficial publicada mensualmente por la NOAA. Dentro de la metodología, se propone que dicha información sea utilizada para clasificar los años del registro homogéneo, consistente y casi completo en la estación *A* bajo condiciones hidrológicas Niño (años secos), Niña (años húmedos), y años promedio para los años en los que no se reporta la ocurrencia de ninguna de las dos fases del ENSO.

Una vez agrupados los años por condición hidrológica, se propone calcular los caudales medios mensuales para años secos, promedio y húmedos. A partir de estos caudales promedio mensuales se hará la propuesta hidrológica mensual de caudales ambientales, tal como se explica en el Paso 6.

3.5 Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95%

Este paso de la metodología incluye la estimación de los índices 7Q10 y Q95% a partir de los registros diarios homogéneos, consistentes y casi completos de la estación *A*.

i) Estrictamente hablando el cálculo del índice 7Q10, propuesto por Chiang y Johnson (1976), se realiza a partir de caudales medios mínimos diarios. Sin embargo, y considerando que estos registros normalmente no se encuentran disponibles, se propone realizar su estimación a partir de los datos de caudales medios diarios. Para ello se debe considerar la totalidad del registro diario homogéneo, consistente y casi completo en la estación *A*, aplicar un promedio móvil de ventana 7 días (fácilmente aplicable usando las herramientas estadísticas de Excel) para estimar el caudal promedio semanal, y luego construir la serie anual de excedencias con los registros mínimos semanales de cada año. Seguidamente, realizar el análisis de frecuencias de eventos mínimos extremos para la serie anual antes construida, para la distribución de probabilidad de mejor ajuste (utilizando por ejemplo software libre de análisis de frecuencias como Distribuciones de Probabilidad Aplicadas a Hidrología (DISPAH, González, 2008), FREQ (Kite, 1988), entre otros) y seleccionar el caudal correspondiente al período de retorno de 10 años, que resulta ser el 7Q10.

ii) El cálculo del Q95% usualmente se ha propuesto en la literatura realizarlo a partir de la totalidad del registro histórico diario (caso de la mayoría de las metodologías que adoptan este índice), o calcularlo mes a mes, como lo propone el método del Northern Great Plains Resource Program (NGPRP, 1974). En la propuesta aquí presentada, se sugiere adoptar el método NGPRP, con una variación, que incluye el cálculo del índice Q95% a partir de la construcción de las curvas de duración de caudales (CDC) medios diarios (para meses de enero a diciembre) y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), agrupando los registros diarios con base en la clasificación propuesta en el Paso 4. La construcción de la CDC es un procedimiento hidrológico rutinario que no se detalla en este documento, y que es descrito en detalle por Searcy (1959) y por Vogel y Fennessey (1995).

iii) Como resultado del cálculo del 7Q10 y del Q95% se obtiene la primera propuesta de caudales mensuales ambientales, discriminada por mes y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), la cual, de acuerdo con el criterio de consistencia con estas dos metodologías internacionalmente aceptadas, resultaría para cada uno de los 36 casos (3 condiciones hidrológicas x 12 meses) como el valor máximo entre el 7Q10 y el Q95% (max (7Q10, Q95%)) para el correspondiente mes y condición hidrológica.

Esta propuesta hidrológica inicial de caudales ambientales mensuales será afinada iterativamente hasta que cumpla los criterios definidos a continuación, siguiendo la metodología que también se describe en el Paso 6.

3.6 Paso 6: Estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales

Dentro del componente hidrológico este es el paso más importante pues permite evaluar la propuesta inicial de caudales ambientales obtenida en el Paso 5 e ir afinándola de forma iterativa hasta garantizar el cumplimiento de los tres criterios que se detallan a continuación, y que esencialmente intentan preservar el régimen hidrológico de la corriente, con especial énfasis en los caudales más bajos:

i) Alteración máxima de la curva de duración de caudales (CDC) medios diarios para las condiciones sin y con proyecto. Este primer criterio intenta limitar la alteración máxima en la CDC para los caudales más bajos (percentiles mayores del 70% (Smakhtin, 2001)) y para las condiciones sin y con proyecto, estableciendo un umbral igual al 0.50 para las relación entre las CDC sin y con proyecto, específicamente para los percentiles 70%, 80%, 90%, 92%, 95%, 98%, 99% y 99.5%. Para realizar la evaluación tanto de este criterio como de los otros dos abajo expuestos, y considerando que dicha evaluación se propone se realice a nivel diario (téngase en cuenta que la propuesta hidrológica de caudales ambientales es a nivel mensual) es necesario construir las series diarias hipotéticas de caudales medios diarios post-intervención. Estas series dependerán de la regla de operación del proyecto, mucho más clara para proyectos de derivación que para proyectos de

descarga de caudales. Como primera aproximación, y a partir de las series de caudales diarios en la estación *A (Qdiario_pre)*, se propone estimar el caudal diario post intervención (*Qdiario_post*) como el valor mínimo entre el valor de la propuesta mensual de caudales ambientales (para el mes *i* y condición hidrológica *j*) y el valor del caudal diario registrado en la estación *A*, tal como se presenta a continuación:

$$Qdiario_post_{i,j} = \min(Qamb_{i,j}, Qdiario_pre)$$

Sin duda esta propuesta de estimación de los caudales diarios post intervención exige afinación a partir del conocimiento de la regla de operación del proyecto, y en ese sentido la fórmula presentada se propone como una primera aproximación. Claramente esta propuesta de estimación de los caudales post intervención penaliza los valores altos de caudal en la corriente pues para casos en los que el caudal diario sea mucho mayor que el correspondiente caudal ambiental mensual, la fórmula indicaría que la corriente después de la intervención llevaría solo el caudal ambiental mensual propuesto, y no valores mayores de caudal como realmente ocurre en la práctica. Esto de alguna forma limita los análisis que puedan realizarse para los caudales más altos, y es por esto que para los tres criterios propuestos en este paso de la metodología, el énfasis en el análisis deberá concentrarse en los caudales bajos. Indudablemente una corriente requiere de pulsos altos de caudal que permitan el desarrollo de hábitats, el mantenimiento de la morfología del cauce y el lavado de la materia orgánica acumulada, condiciones que de alguna forma se garantiza que ocurrirán al considerar la estacionalidad de los caudales y la existencia de períodos húmedos durante el año. En la medida en que la regla de operación del proyecto esté mejor definida, los análisis aquí expuestos podrán extenderse a todo el rango de caudales de la corriente.

Aplicando el procedimiento aquí descrito y esquematizado en la Figura 4 se realiza la evaluación de la propuesta inicial mensual de caudales obtenida en el Paso 5. Si se garantiza el cumplimiento de este primer criterio el procedimiento continúa con la evaluación de los otros dos criterios abajo expuestos, si no, es necesario ajustar la propuesta inicial (aumentando los caudales) hasta garantizar el cumplimiento de este

primer criterio. La propuesta inicial de caudales puede ser menor, siempre y cuando se garantice el cumplimiento de los criterios hidrológicos, de hábitat y de calidad del agua descritos en esta metodología.

Nota: Considerando el umbral de alteración propuesto (0.50) para los percentiles mayores al 70% en las CDC medios diarios para las condiciones sin y con proyecto, y estimado de forma inicial a partir del estudio, en un número muy reducido de cuencas colombianas de la fracción promedio (cruces rojas en Figura 5 - nótense variaciones entre 0.20 y 0.75) que representa el valor max(7Q10, Q95%) del caudal medio mensual (QMM) correspondiente, una propuesta que sin convertirse en regla pudiera satisfacer este primer criterio sería el valor max (7Q10, Q95%, 0,5QMM). Sin embargo, puede ser posible que simplemente la propuesta inicial max (7Q10, Q95%) garantice este primer criterio o que el mismo pueda satisfacerse utilizando una propuesta diferente a la de incluir los tres índices, simplemente modificando iterativamente las fracciones que la propuesta representa de los QMM para las tres diferentes condiciones hidrológicas, hasta garantizar el criterio.

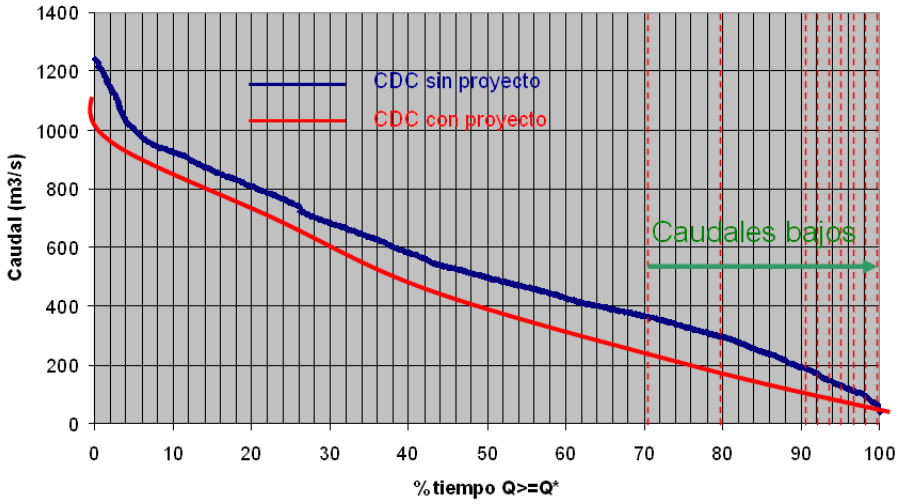


Figura 4. Evaluación de la alteración de las curvas de duración de caudales (CDC) para condiciones sin y con proyecto para los percentiles mayores al 70%

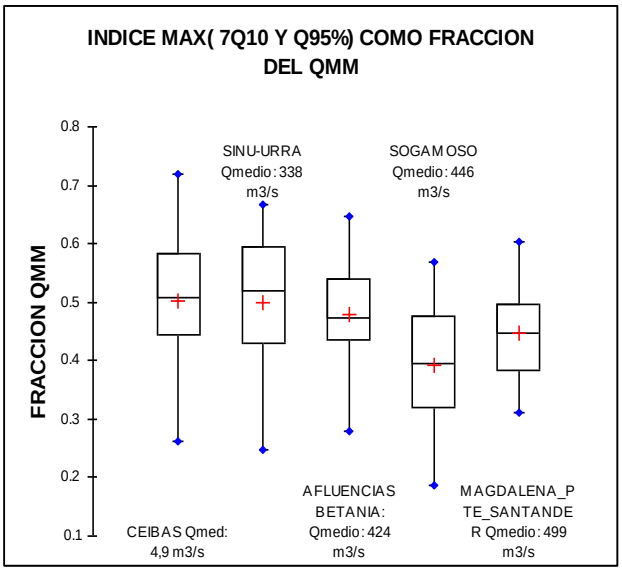


Figura 5. Comparación entre el índice hidrológico MAX (7Q10, Q95%) y el caudal medio mensual (QMM) para cinco estaciones hidrométricas con regimenes natural e influido

La importancia de afinar un umbral de alteración como el propuesto es doble. Por una parte, permitiría en casos en que la información hidrométrica es limitada (por ejemplo disponibilidad solo de información de caudales mensuales) realizar la propuesta mensual de caudales ambientales, directamente como una fracción (representada por el valor del umbral) de los caudales mensuales históricos, para cada condición hidrológica, cumpliendo con el criterio de flexibilidad de la propuesta, y por otra parte, en casos en que puedan pronosticarse satisfactoriamente los caudales mensuales de una corriente a partir de las regresiones multivariadas propuestas (ver Paso 3), este índice permitiría de forma directa pronosticar el caudal ambiental para el mes siguiente.

ii) Alteración máxima de las frecuencias de valores mínimos de caudal. Este segundo criterio intenta limitar la reducción, por efecto de la intervención sobre la corriente, de los caudales mínimos para períodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años. Para ello, y a partir de las series pre y post intervención, obtenida esta última tal como se mencionó

en el numeral previo, se propone que para cada uno de los períodos de retorno mencionados, la relación entre el caudal post y pre intervención, para el mismo período de retorno, sea siempre superior a 0.60. Nuevamente este análisis se encuentra limitado a los caudales mínimos, pero bien pudiera ser extendido a caudales máximos afinando la ecuación que permite estimar las series hidrológicas diarias para el período post intervención. Así, la propuesta mensual de caudales ambientales que cumple el primer criterio es evaluada, y si satisface este segundo criterio se continúa con el análisis, tal como se propone a continuación. En caso contrario, es necesario ajustar la propuesta mensual de caudales ambientales hasta garantizar el cumplimiento de este segundo criterio.

iii) Alteración del régimen hidrológico de la corriente. Este último criterio propone la evaluación integral del régimen hidrológico de la corriente a partir de la comparación de las condiciones sin y con proyecto. Debido al desconocimiento de la regla de operación del proyecto y a las limitaciones en la estimación de las series post intervención, este tipo de análisis se propone sea realizado a nivel exploratorio y cualitativo y fundamentalmente para los caudales bajos. Para ello se recomienda emplear el método de análisis por rangos de variabilidad (RVA), propuesto por Richter *et al.,* (1996) e implementado en el software libre de The Nature Conservancy denominado Indicators of Hydrologic Alteration (IHA); en caso de utilizar este método se deberán emplear series diarias de caudal.

Una limitación adicional en el análisis surge de la recomendación que hacen los desarrolladores de IHA acerca del período mínimo de registro de las series, para tener estimativos estadísticos confiables, y que sugiere tener series de caudales medios diarios con período de registro mayor de 20 años. No es objeto de este documento detallar acerca de la conceptualización del IHA, al respecto el lector interesado es remitido a las referencias originales del método RVA y del software IHA que puede encontrar en (http://www.nature.org/initiatives/freshwater/conservationtools/). A continuación se presenta una breve descripción del proceso de análisis con IHA que se propone realizar.

Los IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) permite evaluar tanto las alteraciones del régimen hidrológico por efecto de la intervención (a partir de la comparación de series pre y post intervención) como establecer umbrales máximos de alteración del régimen hidrológico (a partir del análisis estadístico exhaustivo de los registros de las series pre intervención). Para realizar estos análisis IHA considera la evaluación de 32 índices hidrológicos que están agrupados en cinco categorías así: *i)* Magnitud de los caudales medios mensuales (a partir del cálculo de la mediana: 12 índices). *ii)* Magnitud y duración de caudales extremos (máximos y mínimos para duraciones de 1, 3, 7, 30 y 90 días: 10 índices) *iii)* Fecha de ocurrencia de caudales extremos (máximos y mínimos: 2 índices) *iv)* Frecuencia y duración de pulsos altos y bajos de caudal (4 índices) *v)* Tasa y frecuencia de cambio en las condiciones hidrológicas (4 índices). IHA permite realizar la caracterización de la variabilidad interanual del régimen hidrológico de la corriente a partir del cálculo de estadísticas descriptivas para cada uno de los 32 índices.

A partir de estos cálculos IHA permite identificar umbrales de alteración del régimen hidrológico asumiendo que las condiciones post intervención para cada uno de los 32 índices deben encontrarse dentro del rango de variabilidad de las condiciones naturales de cada uno de ellos. La estimación de estos umbrales se realiza para cada índice a partir de propuestas iniciales iguales al valor medio más o menos una desviación estándar, para el caso de cálculos paramétricos, o cuartiles del 25% y 75%, para el caso de cálculos no paramétricos. Esta propuesta inicial de umbrales puede ser modificada por el analista contrastando resultados de análisis ecológicos de la corriente, con datos del régimen hidrológico de la misma. Los umbrales así determinados para cada índice definen los rangos en los cuales debieran encontrarse los valores del índice correspondiente para las series post intervención.

La evaluación, se reitera a nivel cualitativo y con especial énfasis en los índices de caudales bajos de la propuesta mensual de caudales ambientales obtenida en el numeral anterior, podrá realizarse siguiendo el procedimiento aquí descrito. Debe resaltarse que los índices de las categorías *iii), iv)* y *v)*, altamente sensibles a las variaciones diarias de caudal, no debieran ser investigados con rigurosidad, dadas las limitaciones en la construcción de las

series post intervención aquí expuestas. En caso de encontrar profundas alteraciones en algunos de los índices para los caudales bajos (en exceso por fuera de los umbrales estimados) la metodología sugiere realizar el ajuste de la propuesta mensual de caudales ambientales hasta reducir esta alteración a límites tolerables. Una vez se garantice este último criterio cualitativo y exploratorio de alteración del régimen hidrológico se obtiene la propuesta final de caudales ambientales medios mensuales por condición hidrológica, la cual es seguidamente analizada dentro del componente hidráulico y de calidad de agua de la metodología.

3.7 Paso 7: Cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del Índice de Integridad del Hábitat, IIH

La disponibilidad y calidad del hábitat general se evaluará para las condiciones con y sin proyecto, para lo cual se utilizarán los resultados de cálculos hidráulicos y de calidad del agua para la propuesta mensual inicial de los caudales ambientales definidos en el Paso 6. Dichos cálculos proporcionarán la valoración de los cambios en una serie de variables físicas y químicas que conformarán un Índice de Integridad del Hábitat.

3.7.1 Cálculo de tiempos de viaje y factores de asimilación

Los cálculos hidráulicos y de calidad del agua se realizarán utilizando la información recopilada y estimada en el Paso 1. En particular se utilizarán las curvas de calibración de las variables hidráulicas *versus* caudal construidas a partir de información hidráulica, modelos matemáticos o experimentos con trazadores (ver Paso 1). A partir de las relaciones hidráulicas se realizarán los cálculos de tiempos de viaje y factores de asimilación siguiendo la metodología que se sugiere a continuación.

Para el cálculo del factor de asimilación se tienen en cuenta las ecuaciones de estado estable del modelo sencillo de calidad del agua ADZ-Quasar (Lees *et al*., 1998). El modelo considera advección, y dispersión longitudinal y reacción de primer orden. La ecuación general de balance de masa para un determinante de calidad del agua *X* es:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{1}{Tr}\left(e^{-k\cdot\tau}\cdot U(t-\tau) - X(t)\right) - k\cdot X(t)$$

donde *X* es la concentración del determinante de calidad del agua a la salida del tramo, *U* es la concentración del determinante de calidad del agua a la entrada del tramo, *k* es la constante o tasa de reacción; y *Tr* es el tiempo de residencia. Este último es calculado como,

$$T_r = \bar{t} - \tau$$

donde $\bar{t}$ es el tiempo medio de viaje del soluto y τ es el tiempo de arribo, y se relacionan por la siguiente expresión que define la fracción dispersiva de una corriente *DF*,

$$DF = 1 - \cdot\frac{\tau}{\bar{t}}$$

La Fracción Dispersiva *DF* puede ser obtenida a partir de trazadores realizados en el tramo de estudio, ver Figura 6. En el caso de no disponerse de datos de trazadores puede ser aproximada como la relación de la velocidad media y la velocidad máxima en la sección transversal obtenida para los caudales ambientales mensuales propuestos,

$$DF = 1 - \bar{V}/V\max$$

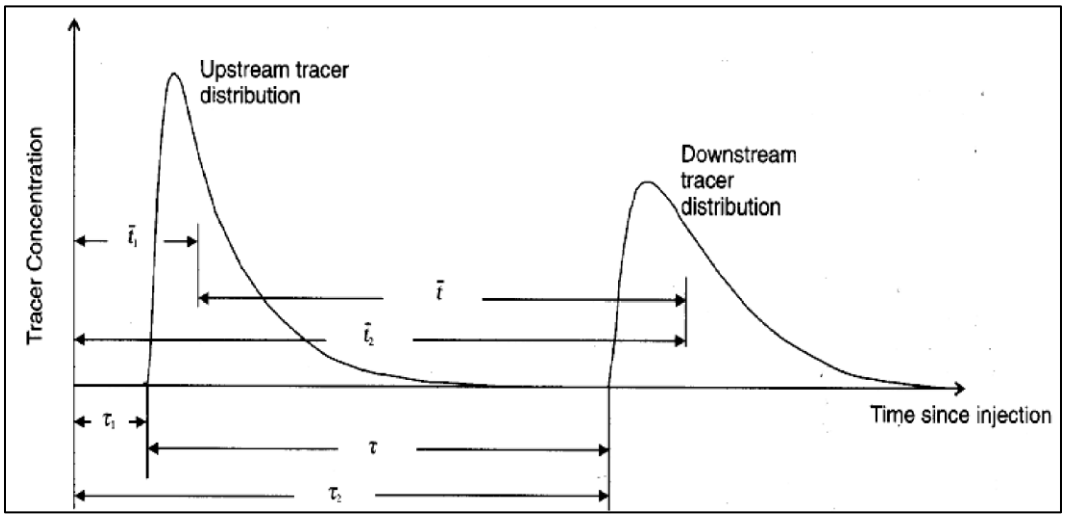


Figura 6. Relaciones del tiempo de arribo y el tiempo medio de viaje de sustancias disueltas en el tramo de un río Fuente: Lees, M. J., Camacho L.A., Whitehead P. (1998).

Por definición, el factor de asimilación permite relacionar la carga contaminante a la entrada del tramo con la concentración que resulta aguas abajo (ver Figura 7, Chapra 1997),

$$C_j = W_j / a_j$$

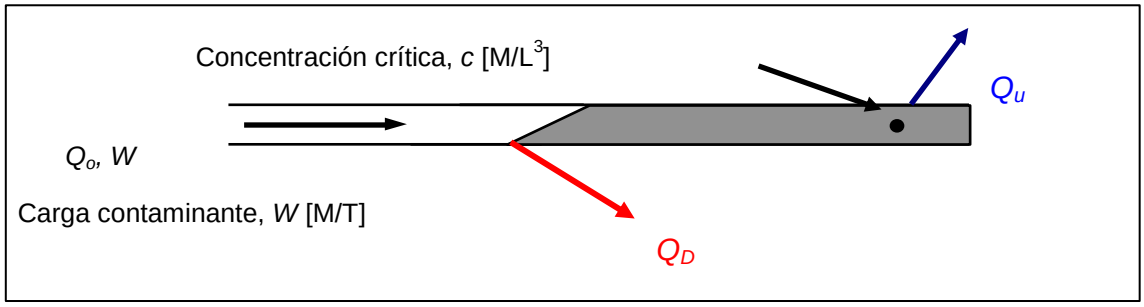


Figura 7 Carga contaminante medida a la entrada de cada subtramo de estudio

Del modelo general, para la condición de estado estable, se puede demostrar que la concentración aguas abajo y el factor de asimilación del tramo del río para un caudal determinado están dados respectivamente por,

$$c = \frac{e^{-k\tau} \cdot W}{Q \cdot (1 + k \cdot (\bar{t} - \tau))}$$

$$\Rightarrow$$

$$a = \frac{Q \cdot (1 + k \cdot (\bar{t} - \tau))}{e^{-k\tau}}$$

$$\begin{cases} \bar{t} = L / \bar{V} \\ \tau = L / V_{max} \\ \tau = (1 - DF) \cdot \bar{t} \end{cases}$$

Los factores de asimilación para los determinantes propuestos considerando los procesos que se refiren en la tabla 2 resultan ser:

$$a_c = Q \qquad \text{Sust. Conservativa}$$

$$a_L = \frac{Q \cdot (1 + k_r \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_r \cdot \tau)}} \qquad \text{DBO}$$

$$a_{NTK} = \frac{Q \cdot (1 + k_{na} \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_{na} \cdot \tau)}} \qquad \text{NTK}$$

$$a_{CT} = \frac{Q \cdot (1 + k_b \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_b \cdot \tau)}} \qquad \text{Coliformes Totales}$$

$$a_{SST} = \frac{Q \cdot (1 + k_S \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_s \cdot \tau)}} \qquad \text{SST}$$

$$a_{PT} = \frac{Q \cdot (1 - k_h \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_h \cdot \tau)}} \qquad \text{Fósforo}$$

$$a_{OD} = \frac{Q \cdot (1 + k_a \cdot (\bar{t} - \tau))}{\exp^{(-k_a \cdot \tau)} + \xi \cdot (\bar{t} - \tau)} \qquad \text{Oxígeno Disuelto}$$

$$\xi = k_a \frac{O_s}{OD_u} - 4.57 k_n \frac{NTK}{OD_u} - k_d \frac{DBO}{OD_u}$$

$$O_s = \left[14.652 - 0.41022T + 0.0079910T^2 - 0.000077774T^3 \right] (1 - 0.1148Alt)$$

Nota: Sust. Conservativa = Sustancia conservativa

O_s = Oxígeno de saturación (mg L^{-1} O)

T = Temperatura del agua (°C)

Alt = Altitud promedio del tramo (km),

OD_u = Concentración de oxígeno disuelto a la entrada del tramo.

En la expresión para ξ, las concentraciones de *NTK* y *DBO* se calculan dividiendo la carga contaminante a la entrada (W_{NTK}, W_{DBO}) entre el respectivo factor de asimilación (a_{NTK}, a_{DBO}).

3.7.2 Cálculo del criterio de calidad del agua

A continuación se calcula el criterio para determinar si la propuesta inicial de caudales ambientales mensuales para la condición con proyecto no impacta la calidad del agua de tal forma que limite los usos del agua en el tramo de estudio. El criterio adoptado se resume en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{a_{j_{con}}}{a_{j_{sin}}} \geq \frac{C_{j\,sin}}{C_{est}}$$
$$a_{jcon} = f(Q_i, L, V, V_{max}, k_j)$$
$$C_{est} = f(\text{uso del agua})$$

donde, a_{jcon} es el factor de asimilación de carga contaminante en el río para la condición con proyecto de caudal reducido; a_{jsin} es factor de asimilación de carga contaminante en el río para la condición sin proyecto (situación previa al proyecto), el cual se calcula como función del caudal Q del mes i, la longitud del tramo L, las velocidades media y máxima V y V_{max} y la tasa de reacción del determinante j; y C_{est} es la concentración estándar del determinante de acuerdo a los usos del agua de la corriente definida por los criterios admisibles de calidad especificados en el Decreto 1594 de 1984 o aquella norma que lo modifque, adicione o sustituya. Los factores de asimilación de carga contaminante de un río para un caudal dado se calculan por lo tanto a partir de las relaciones de las variables hidráulicas *versus* el caudal.

Si el criterio especificado en la ecuación anterior no se cumple debe revisarse el caudal hidrológico propuesto para cada mes en el Paso 6 de la metodología (ver Paso 8).

Los cálculos del criterio de calidad del agua permiten además calcular la concentración de los diferentes determinantes en los sitios de uso del agua donde se verifica el cumplimiento de los criterios admisibles de acuerdo al Decreto 1594 de 1984. Los deteminantes se utilizan también en el cálculo del IIH.

Mediante la modificación iterativa del caudal ambiental (caudal con proyecto) es posible lograr el cumplimiento del criterio correspondiente, que hubiera podido infringirse en relación con la calidad del agua. La metodología propuesta permite también identificar aquel determinante y uso que esté generando el problema, para el cual los valores resultantes de la concentración no permiten los usos actuales y prospectivos del agua en el tramo estudiado. En este caso debe decidirse, por ejemplo, si es necesario controlar la contaminación antes de autorizar el aprovechamiento solicitado.

Una vez se defina el caudal ambiental que cumpla el criterio especificado, o se definan las acciones necesarias de control de la contaminación, se calcula el Índice de Integridad del Hábitat y se continúa con el proceso iterativo.

3.7.3 Cálculo del Índice de Integridad del Hábitat, IIH

La disponibilidad y calidad del hábitat general se evaluará en condiciones sin y con proyecto, para lo cual se utilizarán las modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua. Dichas modelaciones proporcionarán la valoración de los cambios en una serie de variables físicas y químicas que conformarán un índice de integridad del hábitat (IIH). En los siguientes párrafos se explica en detalle la construcción y uso del IIH.

Dos aspectos generales hacen parte del IIH: la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas (peces, macroinvertebrados, perifiton, vegetación riparia). La cantidad de hábitat se mide como el área disponible para cada comunidad y la calidad depende de los requerimientos de cada comunidad. Desde el punto de vista de calidad, se tendrán en cuenta nutrientes y profundidad para el perifiton, materia orgánica para los invertebrados, disponibilidad de agua para la vegetación riparia y profundidad, velocidad de la corriente, conectividad y oxígeno disuelto para los peces.

Para el cálculo del IIH se utilizará la información que surja de los componentes hidrológico, hidráulico y de calidad del agua. Este índice multimétrico permitirá predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las cumunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río.A fin de utilizar la información que surja de los pasos previos de la metodología para la determinación de caudales ambientales (aspectos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua), se propone utilizar un Índice de Integridad del Hábitat (IIH). Este índice multimétrico permitirá predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río. Para ello, el IIH incluye métricas de disponibilidad y calidad del hábitat utilizable por la biota identificada para los grupos funcionales obetinidos en el IIB de la línea base del proyecto. A continuación se relacionan las tablas que establecen las métricas seleccionadas para la construcción del IIH (Tabla 4) y las variables utilizadas en la construcción del IIH y sus puntajes (Tabla 5).

Tabla 4. Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Métrica	Tipo	Descripción
Profundidad Relativa	Disponibilidad de hábitat	**[Ancho Medio de la Superficie del Agua] / [Profundidad Media]** del tramo estudiado. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica correspode a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho Relativo	Disponibilidad de hábitat	**[Ancho Máximo de la Planicie Inundable] / [Ancho Medio del Canal]**. El ancoho máximo de la planicie es el ocasionado por los caudales máximos. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.

Métrica	Tipo	Descripción
Diversidad de Hábitats	Disponibilidad de hábitat	**[Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo]**. Una mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) favorecerá un mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la Corriente	Disponibilidad de hábitat	**[Velocidad Promedio Máxima] / [Velocidad Media]**. Un mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para de desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de Oxígeno	Calidad del hábitat	**Porcentaje de saturación de oxígeno** disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de Nutrientes	Calidad del hábitat	**[Nitrógeno Total] / [Fósforo Total]**. Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.
Demanda Béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bentónicos para degradar la materia orgánica (**g O_2 m^{-2} d^{-1}**). Valores altos pero no exagerados indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábito bentónico.

Tabla 5. Variables físicas y químicas y sus puntajes, utilizadas en la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Métrica	Puntaje 0	Puntaje 0,5	Puntaje 1
Profundidad Relativa (PR)	>200	5 – 50	<5
Ancho Relativo (AR)	<2	2 – 5	>5
Diversidad de Hábitats (DH)	<0,2	0,2 – 4	>4
Variabilidad de la Corriente (VC)	<1,2	1,2 – 1,5	>1,5
% Saturación Oxígeno (SO)	<10%	10 – 90%	>90%
Relación de Nutrientes (RN)	<3 ó >30	3 - 6 ó 14 – 30	6 – 14
Demanda Béntica (DM)	<0,5 ó >10	2 – 10	0,5 – 2

Como se ve en la Tabla 5, el puntaje de cada variable oscila entre 0 y 1 (0 para valores que corresponden a sitios donde la variable muestra condiciones de hábitat poco apropidas para la biota y 1 para valores donde la variable muestra sitios de buenas características ambientales). El IIH es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de

variables. El IIH fluctúa por tanto entre 0 y 1. Los umbrales propuestos a priori deberán confirmarse o modificarse con base en investigaciones posteriores de campo. Las siglas PR, AR, DH, etc., utilizadas en la siguiente ecuación, corresponden a las variables de la Tabla 5.

IIH = [Puntaje PR + Puntaje AR + Puntaje DH + Puntaje VC + Puntaje SO + Puntaje RN + Puntaje DM]/7

De acuerdo con el puntaje obtenido con el IIH la integridad del hábitat se podrá clasificar conforme se especifica en la Tabla 6.

Tabla 6. Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en rios colombianos

Puntaje del IIH	Interpretación	Implicaciones Ecológicas
0 – 0,2	Pobre integridad del hábitat	Hábitat inapropiado para el desarrollo de la biota o que genera comunidades de baja diversidad y reducida abundancia
0,21 – 0,5	Baja integridad del hábitat	Las condiciones del hábitat son poco apropiadas para el desarrollo de los organismos
0,51 – 0,8	Moderada integridad del hábitat	Las condiciones del hábitat aseguran un aceptable funcionamiento de los organismos
0,8 – 1	Alta integridad del hábitat	Hábitat con muy buenas condiciones para la biota, que estimula el establecimiento de comunidades diversas y bien representadas

El IIH se calcula para las condiciones sin y con proyecto para los caudales medios mensuales y los caudales ambientales de la propuesta hidrológica inicial. De acuerdo al criterio 9 no se permitirá que el IIH baje de categoría con el caudal ambiental propuesto, ya que esto estaría indicando un impacto potencial negativo del proyecto en la integridad del

hábitat y por ende en la integridad y calidad de las comunidades de perifiton, macroinvertebrados, vegetación riparia y peces definidas. Los resultados obtenidos reflejarán las condiciones necesarias para el establecimiento y desarrollo de las comunidades y grupos funcionales identificados.

Si se altera negativamente (disminuye) el valor del IIH para algún mes de la propuesta de caudal ambiental inicial, el caudal deberá aumentarse iterativamente hasta obtenerse el mismo valor del IIH para el caudal medio mensual.

3.8 Paso 8: Revisión de la estimación inicial mensual de caudales ambientales

A partir de los resultados del Paso 7 es posible que se requiera la modificación de la propuesta inicial de caudales ambientales mensuales generada en el Paso 6. La modificación puede ser de dos tipos. Puede requerirse aumentar el valor del caudal ambiental mensual propuesto de un mes determinado para cumplir el criterio de calidad del agua y/o de no disminución del IIH. Sin embargo, cumpliendo los dos criterios anteriores, también podrá suceder que se disminuya el valor de caudal ambiental mensual propuesto. Como resultado de este procedimiento iterativo se obtendrá la propuesta estimada de caudales ambientales mensuales para la licencia ambiental del proyecto.

4 ABREVIATURAS, NOTACIONES, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SIGLA, ABREVIATURA O ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
Correlograma	Semejante a series de tiempo
(CDC)	Curva de duración de caudales
(IHA)	Indicators of Hydrologic Alteration
(IIH).	Índice de integridad del hábitat
(IIB).	Índices de integridad biótica
(DBO)	Demanda bioquímica de oxígeno
SPSS,	herramienta complementaria de Excel, http://www.xlstat.com/es/home/),(software para análisis estadísticos,

XLSTAT	herramienta complementaria de Excel, VER Pág web http://www.xlstat.com/es/home/
EDA	(Exploratory Data Analysis),
HidroSIG	Es una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de colombia desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia- sede Medellín.
(ENSO),	Dícese de los fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña
(NAO),	La Oscilación del Atlántico Norte
(QBO),	La Oscilación Quasi-Bienal
(SOI)	Índice de oscilación del Sur
ONI	Índice Oceánico del Niño
NAO	Índice de Oscilación del Atlántico Norte -
(QBO)	Índice de la Oscilación Quasi-Bienal
(NOAA)	Agencia Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos
(QMM)	caudales medios mensuales
(IDEAM)	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales
(NGPRP)	Northern Great Plains Resource Program
(RVA),	Método de análisis por rangos de variabilidad

REFERENCIAS

Acreman M. y Dunbar M.J. (2004). Defining environmental river flow requirements – a review. Hydrology and Earth System Sciences 8(5): 861-876.

Allan JD. (1995). Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Chapman and Hall: London.

Agualimpia, Y., Castro, C., (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. Revista Tecnogestion vol 3 (1) Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Aguirre, A. & Vicuña, B. (s.f). Conceptos Básicos para la Aplicación del Caudal Ecológico en los Ríos Ibéricos.

APROMA (Asoc. Profesionales del Medio Ambiente). (2000). Primer Congreso sobre Caudales Ecológicos. Ponencias y conclusiones. Barcelona. p. 407.

Arthington A.H., Tharme R.E., Brizga S.O., Pusey B.J. y Kennard M.J. (2004). Environmental Flow Assessment with Emphasis on Holistic Methodologies. En: Welcomme R.L. y Petr T. (Editores). Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries (Volume II). Sustaining Livelihoods and Biodiversity in the New Millennium,11 - 14 February 2003, Phnom Penh, Kingdom of Cambodia. FAO, 316 p.

Autoridad Nacional del Medio Ambiente (ANAM), (2007). Resolución AG-842-2007 mediante la cual se establecen los contenidos mínimos de los Estudios Hidrológicos para las Hidroeléctricas y se dictan otras disposiciones en la República de Panamá.

Belzile, L., Berubure, P., Hang, V.D., Leclerc, M., 1997 Méthode ecohydrologique de determination des débits reservés por la protection des habitats du poisson dan le rivieres du Quebec. Informe presentado por INRS-Eau y Gròupe-conseil Genivar Inc. Al Ministerio del Medio Ambiente y Fauna de Quebec.

Bharati, L., Rodgers, C., Erdenberger, T., Plotnikova, M., Shumilova, S., Vlek, P., Martin, N., (2008). Integration of economic and hydrologic models: exploring conjunctive irrigation water strategies in the Volta basin. Agricultural Water Management vol 95 (8) pp 925-936

Caissie, D. y El-Jabi, N., (1995). Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. Canadian Journal of Civil Engineering 22: 235-246

Camacho, L. A. (2006ª). "Calibración y comparación de modelos de transporte de solutos en ríos de montaña", en Memorias Congreso Latinoamericano de Hidráulico.

Carvajal Escobar, Yesid (2007). El régimen de caudal ambiental en el marco de la gestión integrada del recurso hídrico para adaptarse al cambio climático. Universidad del Valle.

Castro, L.M., Carvajal, Y., Monsalve, E., (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Revista Ingeniería y Universidad vol 10 (2). Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana.

Chapra, S. C. (1997). Surface water - quality modeling. Mc Graw Hill.

Chiang, S.L., Johnson, F.W., (1976). Low flow criteria for diversions and impoundments. Journal of Water Resources Planning and Management Division, 102: 227-238

Colwell, R.K., (1974). Predictability, constancy and contingency of periodic phenomena. Ecology 55: 1148-1153

Dallas, H.F. y Day, J.A. (1993). The effect of water quality variables on riverine ecosystems: a review. Water Research Commission Report TT61.93. Pretoria, South Africa.

Diez-Hernández J.M. (2006). Análisis comparativo de los métodos actuales de simulación hidráulica en "PHABSIM-IFIM" y su influencia en la evaluación del hábitat fluvial. Tesis Doctoral Universidad de Valladolid, 641 p.

Diez J.M. y Burbano L. (2006). Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. Ingeniería e Investigación 26(1): 58- 68.

Dirección General de Aguas de Chile, (1999). Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponible en http://www.dga.cl

Domínguez, G.J., Rodrigues, A., (2005). Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil. 25 pp

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

Estudio Nacional del Agua (ENA), (2000). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Filipek, S., Keith, W.E., Giese, J., (1987). The status of the instream flow issue in Arkansas. Proceedings Arkansas Academy of Sciences 41: 43-48

Georgia Department of Natural Resources, (1995). A recommended method to protect instream flows in Georgia. Wildlife Resources Division. Social Circle. Georgia.

González, C.A. (2008) Software DISPAH 2.0 Distribuciones de Probabilidad aplicadas a hidrología. XI congreso Nacional de Ingeniería Agrícola y áreas afines.

Grecco, A. (2005). Metodología para la determinación de los caudales de garantía ambiental. *Revista Empresas Públicas de Medellín* 15(3): 153-173.

Heredia, L., Carvajal, Y., Monsalve, E., 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Revista Ingeniería y Universidad. Vol 10 No. 002. Pontificia Universidad Javeriana.

Hoppe, R.A., (1975). Minimum Streamflow for Fish. Paper Distributed at Soils-Hydrology Workshop, USFS, Montana State University, Bozeman, MO. 35 pp

Hu, W., Wang, G., Deng, W., Li, S., (2008). The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe river basin, China. Ecological engineering Vol 33 (3-4) pp 231-244

Karim, K., Gubbels, M.E., Goulter, I.C., (1995). Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia. Water Resources Bulletin 31 1063-1077.

King J. y Louw D. 1998. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. Aquatic Ecosystem Health and Management 1(2): 109-124.

King, J., Tharme, R., and Brown, C. (1999). Definition and Implementation of Instream flows Southern Waters, University of Cape Town, South Africa. Prepared for Thematic: Review II.1: Dams, ecosystem functions and environmental restoration. Available in: http://www.dams.org/

Kite G.W. (1988). Frequency and Risk Analyses in Hydrology. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.

Lees, M., Camacho, L. A., Whitehead, P. (1998). Extension of the QUASAR water quality model to incorporate dead-zone mixing. Hydrology & Earth System Sciences , 2 (2-3), 353-365.

Loar, J.M., Sale, M.J., (1981). Analysis of Environmental Issues Related to Small Scale Hydroelectric Development. V. Instream Flow Needs for Fisheries Resources. Environmental Sciences Division Publication No. 1829 ONRL/TM-7861. Oak Ridge National Laboratory, TE, US Department of Energy

Liu, Y, Gupta, Y., Springer, E., Wagener, T., (2008). Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modelling approach to supporting sustainable water resources management. Environmental Modelling and Software vol 23(7) pp846-858

Malan, H.; Bath, A.; Day, J.; Joubert, A.(2003).A simple flow – concentration modelling method for integrating water quality and water quantity in rivers. En Water SA, vol. 29, num. 3, pp. 305-311. Disponible en www.wrc.org.za.

Mesa, G., Poveda, G., Carvajal, L.F., (1997). Introducción al Clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas.

Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), (2004). Resolución 865 de Julio 22 de 2004.

Ministry of Environment and Energy, (1994). Deriving receiving waters based, point-source effluent requirements for Ontario waters. Queen´s printer for Ontario, PIBS 3302E 32 p

Northern Great Plains Resource Program (NGPRP), (1974). Instream needs subgroup report. Work Group C report. 35 pp.

Olden, J.D., Poff, N.L., (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indexes for characterizing streamflow regimes. River Research and Applications 19: 101-121

Ontario Ministry of Natural Resources, (1994). Natural Channel Systems. An approach to Management and Design. Queen´s printer for Ontario. Peterborough, Ontario. 103 p.

Ormazabal, C. (2004). El caso del proyecto RALCO. Presentado en el Seminario: "Caudal ecológico: metodologías y casos aplicados". 28 de abril de 2004. Santiago de Chile. Chile

Palau, A. (1994). Los mal llamados caudales "ecológicos". Bases para una propuesta de cálculo. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Nº 28. Ríos, II. p. 84 – 95. OP (Obras Públicas).

Palau, A. (2003). Régimen ambiental de caudales: estado del arte. En: Régimen Ambiental de Caudales. Del 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003. Unidad

Palmer, C.G.; Rossouw, N.; Muller, W.J.; Scherman P-A. (2005). The development of water quality method whitin ecological Reserve assessment, and links to environmental flow. En Water SA, vol. 31, num. 2, pp. 161-170. Disponible en www.wrc.org.za

Poof, N., Allan, J.D., (1997). The natural flow regime. Bioscience Vol 47 No. 11. pp 769-785

Poveda, G., (2004). La Hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. Rev. Acad. Colomb. Ciencias 28(107) 201-222.

Pyerce, R. (2004). Hydrological low flow indices and their uses. Watershed Science Center. Trent University. WSC Report No. 04-2004. Peterborough. Ontario. Canada.

Reiser, D.W., Wesche, T.A., Estes, C., (1989). Status of streamflow legislation and practices in North America. Fisheries 14 (2): 22-29

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., y Braun D.P., (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration Within Ecosystems. Conservation Biology 10:1163-1174.

Richter B.D., Baumgartner J.V., Wigington, R., y Braun D.P. (1997). How much water does a river need?. Freshwater Biology 37: 231-249.

Singh, K.P., Stall, J.B., (1974). Hydrology of 7-day 10-yr low flows. Journal of the Hydraulics Division HY12: 1753-1771.

Searcy, J.K., 1959, Flow-duration curves, Manual of hydrology—Part 2. Low-flow techniques: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1542-A, 33 p.

Secretaría Ejecutiva del Convenio Andrés Bello (SECAB). 2006. Metodología propuesta para la estimación del caudal ecológico. SECAB, 14 p.

Smakhtin, V.U. 2000. Low flow hydrology: a review. En Journal of Hydrology 240 (2001) 147–186.

Tennant, D., (1976). Instream Flow Requirements for Fish, Wildlife, Recreation and Environmental Resources. Proceedings of the Symposium on Instream Flow Needs. Osborne, J., Alman, C. (Eds.), Bethesda (Estados Unidos)

Tharme, R. E., (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. River Research and Applications, 19, 397-441

Thoms M.C. y Sheldon F. 2002. An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: the role of geomorphology. Geomorphology 47: 153–168.

Tukey, J. (1977). Exploratory Data Analysis. Addison Wesley.

UN-MAVDT, Universidad Nacional de Colombia - Ministerio de Medio 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.

United States Fish and Wildlife Service, (1981. Interim Regional Policy for New England stream flow recommendations. Region 5 of US Fish and Wildlife Service, Newton Corner, MA.

Van Delden, J. Luja, P., Engelen, G., (2007). Integration of multi-scale dynamic spatial models of socio-economic and river processes for river basin management. Environmental Modelling and Software, vol 22 (2), pp 223-238

Vogel S. (1994). Life in Moving Fluids. Princeton University Press: Princeton, NJ.

Vogel, R. M. y Fennessey, N. M.: Flow Duration Curves 2: a Review of Applications in Water-Resources Planning, Water Resour. Bull., 31, 1029–1039, 1995.

Zavala, H., Cepeda, J., (2006). Caudales ecológicos en vegas altoandinas: un estudio de caso. Geoecología de los Andes desérticos. La Alta Montaña del Valle del Elqui. Cepeda E. J. (Eds) 525-551. Ediciones Universidad de la Serena. Chile.

Directiva Marco Europea del Agua http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28002b_es.htm

ANEXO 1. *CAUDAL AMBIENTAL -DAA-*

Para la determinación del caudal ambiental y el uso eficiente del recurso hídrico en la cuenca del río que se pretende intervenir se deberá presentar un análisis con enfoque integral del cual hacen parte los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua, socioeconómico y ecológico. Para dar cumplimiento a lo anterior, se deberán determinar todos los usos del agua de la cuenca (existentes y proyectados) y tener en cuenta lo siguiente:

1 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

1.1 Series de caudales medios diarios de dos estaciones, una a la entrada y otra a la salida de la longitud de la corriente de agua impactada (tramo de estudio).

Según las características de cada proyecto (y de cada alternativa), se deberá proponer el tramo de estudio hasta el sitio en donde se normalicen las funciones físicas, bióticas y socioeconómicas de la corriente de agua, aspecto que deberá estar debidamente sustentado. Ver figura 1.

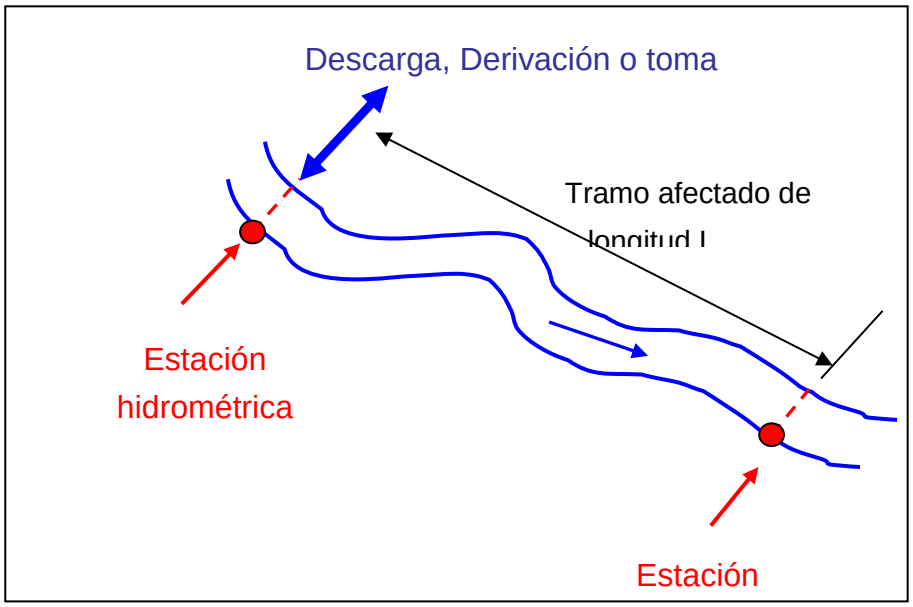


Figura 1. Esquema del tramo de estudio

Las series de caudales medios diarios podrán ser obtenidas de estaciones hidrométricas existentes en los sitios de interés, mediante ajustes estadísticos de estaciones localizadas en la misma cuenca o por medio de metodologías para la estimación de caudales de una cuenca sin registros, tal como la metodología de curvas adimensionales de duración de cuencas hidrológicamente semejantes. Se deberá reportar el valor del área de drenaje de la cuenca hasta el sitio de ubicación de la estación hidrométrica.

1.2 Se deberán identificar sitios puntuales sobre el tramo de estudio en donde existan variaciones importantes de caudal (afluentes, descargas, concesiones y/o derivaciones de caudales) y cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua; lo anterior con el fin de determinar los sub-tramos a evaluar.

1.3 En lo posible, sin ser una exigencia, y considerando que este tipo de información es insumo para los análisis ambientales, se recomienda tener datos de precipitación media mensual, temperaturas medias mensuales y de otras variables meteorológicas, en estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca, que permitan realizar la caracterización climatológica de la cuenca aportante, y puedan ser utilizadas como posibles variables predictoras en el pronóstico de caudales medios mensuales.

2 INFORMACIÓN HIDRÁULICA

Se requiere información hidráulica de los sub-tramos representativos que conforman el tramo de estudio. Específicamente se requieren curvas de calibración de Profundidad (H), Área (A), Perímetro (P), Ancho Superficial (T), Velocidad media ($\overline{V}$), y Velocidad máxima (Vmax) como función del caudal. Esta información puede ser obtenida a partir de:

1. Datos de aforos y levantamientos de secciones transversales representativas de los subtramos del segmento o tramo de la corriente de agua bajo estudio, tomados bajo un rango lo más amplio de caudales (al menos 3 mediciones por subtramo de análisis

que correspondan a invierno, verano y respectivo periodo de transición, mínimo requerido para establecer la tendencia y comportamiento de un parámetro dado).

2. Calibración de modelos hidráulicos de flujo uniforme o flujo gradualmente variado y/o flujo no permanente según corresponda. Se calibran parámetros efectivos en el tramo, tales como el Ancho efectivo (*w*), la pendiente longitudinal efectiva del fondo del canal, y el coeficiente de rugosidad de Manning (*n*), utilizando mediciones de campo del perfil de la lámina de agua, el caudal aforado en diferentes secciones transversales y/o hidrogramas de flujo no permanente registrados en secciones transversales.

3. Calibración de parámetros hidráulicos y de transporte de sustancias disueltas, a partir de experimentos con trazadores. Estos experimentos permiten conocer relaciones como:

- Área *versus* Caudal.
- Relación de Velocidad media / Velocidad máxima.
- Fracción dispersiva *DF versus* Caudal.
- Tiempo de arribo *versus* Caudal.
- Tiempo medio de viaje *versus* Caudal.

3 INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA

Para la aplicación de la metodología propuesta en el componente ambiental se requiere:

1. La identificación o definición de los usos del agua longitudinalmente a lo largo de la corriente. Esta información se debe obtener de consultas directas a la comunidad y de la revisión de información en las Corporaciones, referente a los Planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca, la definición de objetivos de calidad, los registros de concesiones y licencias de agua, entre otros.

2. Mediciones de Carga Contaminante (*W)* en los diferentes sub-tramos establecidos en el tramo en estudio (por aportes y derivación de caudales puntuales o cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua): entendida como la concentración de cada determinante de calidad del agua (*j*) propuesto por el caudal correspondiente. Se propone la caracterización mediante la toma de muestras integradas de 24 horas durante tres (3) días consecutivos, representativas de periodos de aguas bajas, aguas altas y periodo de transición (3 mediciones por sub-tramo de análisis, lo cual corresponde al mínimo requerido para establecer la tendencia y comportamiento de un parámetro dado); la toma de esta información debe ser simultánea con la determinación de los parámetros hidráulicos.

3. Mediciones de la concentración de cada determinante (*Cj*), en los sitios de entrada y salida de caudales puntuales o cambios significativos en la geomo rfología de la corriente de agua (sub-tramos) y con la misma frecuencia mencionada para la medición de la carga contaminante.

4. Estimaciones de las tasas de reacción y/o transformación bioquímica o física de los determinantes de calidad del agua propuestos, las cuales juegan un papel importante en la determinación de la capacidad de asimilación de una corriente. En la metodología propuesta se han considerado como relevantes los determinantes de calidad del agua y los procesos de degradación y transporte especificados en la Tabla 1.

Tabla 1 – Determinantes de calidad del agua considerados en la metodología

Determinantes	Procesos	Tasas de Reacción
Conservativos (Temperatura, Conductividad)	Dispersión – advección	

Determinantes	Procesos	Tasas de Reacción
Materia orgánica Particulada (DBO y Demanda Béntica de oxígeno)	Dispersión – advección, descomposición de la DBO, sedimentación de la materia orgánica particulada	$kr = kd + \frac{Vs`_{MOP}}{H}$
NH_4	Dispersión – advección, nitrificación	k_{NA}
Fósforo total o Fósforo reactivo soluble	Dispersión – advección, hidrólisis	k_H
Coliformes Totales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b
Coliformes Fecales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b'
SST	Dispersión – advección, sedimentación	$k_s = \frac{Vs_s}{H}$
Oxígeno disuelto	Dispersión – advección, reaireación, descomposición DBO, nitrificación	k_a, k_d, k_{NA}
Otros que podrán ser definidos para casos particulares.		

Las tasas de reacción pueden ser obtenidas mediante la calibración rigurosa de un modelo de calidad del agua o mediante el uso de formulaciones empíricas que sean consistentes con las características del río bajo estudio.

4 ÍNDICE DE INTEGRIDAD DEL HÁBITAT

Para evaluar el efecto que tiene la intervención en el régimen de caudales sobre la estructura del ecosistema y establecer el caudal ambiental, se propone un análisis de la disponibilidad y calidad del hábitat a nivel general, evaluando algunas variables

relacionadas con el hábitat con y sin proyecto y empleando modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua para proporcionar una valoración de los cambios en estas variables físicas y químicas por la intervención en el régimen de caudales.

Las variables se integrarán mediante el cálculo de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH), que empleará la información que surja de los pasos previos de la metodología para la determinación de caudales ambientales (aspectos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua). Este índice multimétrico permitirá predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río. Para ello, el IIH incluye métricas de disponibilidad y calidad del hábitat utilizable por la biota. En la Tabla 2 se explican de manera general las variables a emplear y a continuación se expone el método sugerido para recolectar la información.

Tabla 2. Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Métrica	Tipo	Descripción
Profundidad Relativa	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Superficie del Agua] / [Profundidad Media] del tramo estudiado. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho Relativo	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Planicie Inundable] /[Ancho Medio de la base del Canal]. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.
Diversidad de Hábitats	Disponibilidad de hábitat	Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo]. A mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la Corriente	Disponibilidad de hábitat	[Velocidad Promedio Máxima] / [Velocidad Media]. Un mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para de desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de Oxígeno	Calidad del hábitat	Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de Nutrientes	Calidad del hábitat	[Nitrógeno Total] / [Fósforo Total]. Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.
Demanda Béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bentónicos para degradar la materia orgánica (g O2 m-2 d-1). Valores altos pero no exagerados indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábito bentónico.

Para el levantamiento de esta información se debe utilizar los sub-tramos establecidos bajo los criterios de modificaciones por entradas y salidas de caudales puntuales, y cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua en el tramo de estudio.

Las variables físicas se cuantificaran en cada sub-tramo. Con los datos hidráulicos de cada uno de los sub-tramos se calculará matemáticamente las siguientes variables: el Ancho Medio de la Superficie del Agua, la Profundidad Media, el Ancho Medio de la Planicie Inundable, el Ancho Medio del Canal, la Profundidad Real, la Profundidad Normal (aquella

que tendría idealmente la corriente de agua si fuera uniforme) y la Longitud Total del tramo, así como la Velocidad Media y la Velocidad Promedio Máxima.

Para la cuantificación de las variables químicas se pueden seguir dos metodologías. La primera consiste en la toma de datos directos en campo con una sonda multiparámetro para campo (Saturación de Oxígeno) y el análisis en laboratorio de muestras en cada una de los sub-tramos para establecer la concentración de nutrientes (N Total y P Total, relación de Nutrientes) y la Demanda Béntica de oxígeno. La segunda metodología consiste en la obtención de estos parámetros a través de la modelación de la calidad del agua. Esta información se integrará en el IIH para la condición sin proyecto.

Mediante el uso de la modelación se determinarán los valores de dichas variables para la condición con proyecto, según el régimen de caudal propuesto por los componentes hidrológico e hidráulico de la metodología. Con las variables modeladas bajo el escenario de caudal ambiental se establecerá el nuevo valor del IIH con proyecto y se determinará si el régimen propuesto altera o no de manera significativa la integridad del hábitat del ecosistema. En caso de que el IIH con proyecto se reduzca de manera significativa, se planteará un nuevo régimen de caudales (desde el componente hidrológico) hasta que se obtenga un IIH con proyecto igual o superior al valor de referencia.

- La empresa deberá presentar los resultados junto con los análisis respectivos de acuerdo con lo mencionado anteriormente con respecto a las variables a cuantificar por cada una de las comunidades hidrobiológicas.

- La información deberá ir sistematizada y tabulada, representada gráficamente y que sea legible. Se deberá presentar registro fotográfico y la cartografía a una escala 1.25000 de los sectores objeto de muestreos de las comunidades hidrobiológicas

Se entiende por **Caudal Ambiental**, el volumen de agua por unidad de tiempo necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para garantizar el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y el desarrollo de las actividades socioeconómicas (actuales y potenciales) de los usuarios aguas abajo de una fuente hídrica determinada.

Se deberá realizar un análisis determinando todos los usos del agua de la cuenca existentes y proyectados, así como la descripción de los conflictos actuales y potenciales sobre la disponibilidad y usos del recurso hídrico.

Para la determinación del caudal ambiental y el uso eficiente del agua en la cuenca del río a intervenir se deberá presentar un análisis basado en un enfoque integral del cual hacen parte los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua, socioeconómico y ecológico. Para lo cual se deberán tener en cuenta los siguientes lineamientos y criterios técnicos para la estimación del caudal ambiental:

1 DATOS HIDROLÓGICOS

Series de caudales medios diarios de por los menos dos estaciones, una a la entrada y otra a la salida de la longitud del río impactada (tramo de estudio), y teniendo en cuenta tanto aguas arriba como aguas abajo, con un período de registro igual o mayor a 10 años. Se deberá reportar el valor del área de drenaje de la cuenca hasta el sitio de ubicación de la estación hidrométrica.

Según las características del proyecto (y de la alternativa seleccionada) se deberá definir el tramo de estudio hasta el sitio en donde se normalicen las funciones físicas, bióticas y socioeconómicas de la corriente de agua, aspecto que deberá estar debidamente sustentado en el EIA. Ver figura 1.

Las series de caudales medios diarios podrán ser obtenidas de estaciones hidrométricas existentes en los sitios de interés, mediante ajustes estadísticos de estaciones localizadas en

la misma cuenca o por medio de metodologías para la estimación de caudales de una cuenca sin registros, tal como la metodología de curvas adimensionales de duración de cuencas hidrológicamente semejantes. Se deberá reportar el valor del área de drenaje de la cuenca hasta el sitio de ubicación de la estación hidrométrica.

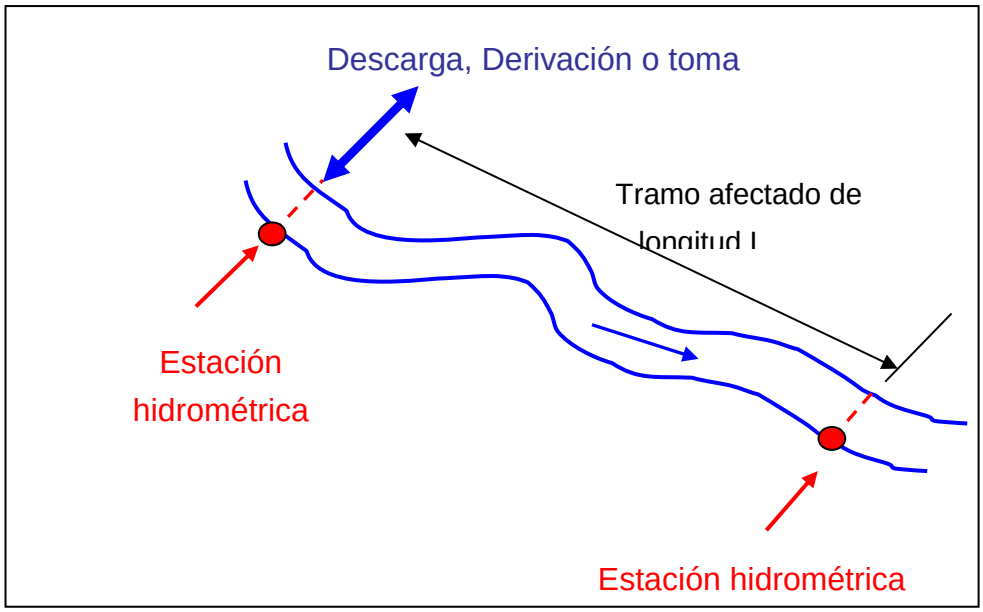


Figura 1. Esquema del tramo de estudio

En lo posible y considerando que este tipo de información es insumo para los análisis ambientales, se recomienda tener datos de precipitación media mensual, temperaturas medias mensuales y de otras variables meteorológicas, en estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca, que permitan realizar la caracterización climatológica de la cuenca aportante, y puedan ser utilizadas como posibles variables predictoras en el pronóstico de caudales medios mensuales.

Se deberán identificar sitios puntuales sobre el tramo de estudio en donde existan variaciones importantes de caudal (afluentes, descargas, concesiones y/o derivaciones de caudales) y cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua; lo anterior con el fin de determinar los sub-tramos a evaluar.

2 DATOS HIDRÁULICOS

Se requiere información hidráulica de los sub-tramos representativos que conforman el tramo de estudio. Específicamente se requieren curvas de calibración de Profundidad (H), Área (A), Perímetro (P), Ancho Superficial (T), Velocidad media (∇), y Velocidad máxima (Vmax) como función del caudal. Esta información puede ser obtenida a partir de:

1. Datos de aforos y levantamientos de secciones transversales representativas del tramo de río bajo estudio, tomados bajo un rango amplio de caudales.

2. Calibración de modelos hidráulicos de flujo uniforme o flujo gradualmente variado y/o flujo no permanente según corresponda. Se calibran parámetros efectivos en el tramo de estudio tales como: el Ancho efectivo (w), la pendiente longitudinal efectiva del fondo del canal, y el coeficiente de rugosidad de Manning (n), utilizando mediciones de campo del perfil de la lámina de agua, el caudal aforado en diferentes secciones transversales y/o hidrogramas de flujo no permanente registrados en secciones transversales.

3. Calibración de parámetros hidráulicos y de transporte de sustancias disueltas, a partir de experimentos con trazadores. Estos experimentos permiten conocer relaciones como:
   - Área versus Caudal
   - Relación de Velocidad media / Velocidad máxima.
   - Fracción dispersiva DF versus Caudal
   - Tiempo de arribo versus Caudal
   - Tiempo medio de viaje versus Caudal

3 DATOS DE CALIDAD DEL AGUA

Para la aplicación de la propuesta en el componente ambiental se requiere:

1. La identificación o definición de los usos del agua longitudinalmente a lo largo de la corriente. Esta información se debe obtener de consultas directas a la comunidad y de la revisión de información en las Corporaciones referente a los Planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca, la definición de objetivos de calidad, los registros de concesiones y licencias de agua, peticiones de permisos para cualquier uso del agua, entre otros.

2. Mediciones de Carga Contaminante (W) en los diferentes sub-tramos establecidos en el tramo de estudio (por aportes y derivación de caudales puntuales o cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua): entendida como la concentración de cada determinante de calidad del agua (j) propuesto por el caudal correspondiente. Se propone la caracterización mediante la toma de muestras integradas de 24 horas durante una semana y cada mes del año.

3. Mediciones de la concentración de cada determinante (Cj), en los diferentes sub-tramos establecidos en el tramo de estudio (por aportes y derivación de caudales puntuales o cambios significativos en la geomorfología de la corriente de agua), tomadas en igual forma. Se propone la caracterización mediante la toma de muestras integradas de 24 horas durante una semana y cada mes del año.

4. Estimaciones de las tasas de reacción y/o transformación bioquímica o física de los determinantes de calidad del agua propuestos, las cuales juegan un papel importante en la determinación de la capacidad de asimilación de una corriente. Se han considerado como relevantes los determinantes de calidad del agua y los procesos de degradación y transporte especificados en la siguiente tabla:

Tabla 1 - Determinantes de calidad del agua considerados en la metodología

Determinantes	Procesos	Tasas de Reacción
Conservativos (Temperatura, Conductividad)	Dispersión – advección	

Determinantes	Procesos	Tasas de Reacción
Materia orgánica particulada (DBO y Demanda Béntica de oxígeno)	Dispersión – advección, descomposición de la DBO, sedimentación de la materia orgánica particulada	$kr = kd + \frac{Vs`_{MOP}}{H}$
NH4	Dispersión – advección, nitrificación	k_{NA}
Fósforo total o Fósforo reactivo soluble	Dispersión – advección, hidrólisis	k_H
Coliformes Totales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b
Coliformes Fecales	Dispersión – advección, decaimiento por muerte	k_b,
SST	Dispersión – advección, sedimentación	$k_s = \frac{Vs_s}{H}$
Oxígeno disuelto	Dispersión – advección, reaireación, descomposición DBO, nitrificación	k_a, k_d, k_{NA}
Otros que podrán ser definidos para casos particulares.		

Las tasas de reacción pueden ser obtenidas mediante la calibración rigurosa de un modelo de calidad del agua o mediante el uso de formulaciones empíricas que sean consistentes con las características del tramo de río bajo estudio.

4 ÍNDICE DE INTEGRIDAD DEL HÁBITAT (IIH):

Para evaluar el efecto que tiene la intervención en el régimen de caudales sobre la estructura del ecosistema y establecer el caudal ambiental, se propone un análisis de la disponibilidad y calidad del hábitat a nivel general, evaluando algunas variables relacionadas con el hábitat antes y después del proyecto y empleando modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua para proporcionar una valoración de los cambios en estas variables físicas y químicas por la intervención en el régimen de caudales.

Las variables se integrarán mediante el cálculo de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH), que empleará la información que surja de los pasos previos de la metodología para la determinación de caudales ambientales (aspectos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua). Este índice multimétrico permitirá predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río. Para ello, el IIH incluye métricas de disponibilidad y calidad del hábitat utilizable por la biota. En la Tabla 2 se explican las variables a emplear y los métodos sugerido para recolectar la información.

Tabla 2. Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos

Métrica	Tipo	Descripción
Profundidad Relativa	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Superficie del Agua] / [Profundidad Media] del tramo estudiado. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho Relativo	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Planicie Inundable] /[Ancho Medio de la base del Canal]. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.
Diversidad de Hábitats	Disponibilidad de hábitat	Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo]. A mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la Corriente	Disponibilidad de hábitat	[Velocidad Promedio Máxima] / [Velocidad Media]. Un mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para de desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de Oxígeno	Calidad del hábitat	Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de Nutrientes	Calidad del hábitat	[Nitrógeno Total] / [Fósforo Total]. Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.

Métrica	Tipo	Descripción
Demanda Béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bentónicos para degradar la materia orgánica (g O2 m-2 d-1). Valores altos pero no exagerados indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábito bentónico.

Para el levantamiento de esta información se propone seleccionar en campo los sub-tramos a evaluar, intentando abarcar secciones que representen las distintas características del río, importantes para la biota.

Las variables físicas se cuantificaran en varias secciones a lo largo de cada sub-tramo (mínimo 4 secciones por sub-tramo). Con los datos hidráulicos de cada una de las secciones se calculará matemáticamente para cada sub-tramo las siguientes variables: el Ancho Medio de la Superficie del Agua, la Profundidad Media, el Ancho Medio de la Planicie Inundable, el Ancho Medio del Canal, la Profundidad Real, la Profundidad Normal (aquella que tendría idealmente el río si fuera uniforme) y la Longitud Total del tramo, así como la Velocidad Media y la Velocidad Promedio Máxima.

Para la cuantificación de las variables químicas se pueden seguir dos metodologías. La primera consiste en la toma de datos directos en campo con una sonda multiparámetro para campo (Saturación de Oxígeno) y el análisis en laboratorio de muestras en cada una de las secciones para establecer la concentración de nutrientes (N Total y P Total, relación de Nutrientes) y la Demanda Béntica de oxígeno. La segunda metodología consiste en la obtención de estos parámetros a través de la modelación de la calidad del agua. Esta información se integrará en el IIH antes del proyecto.

Mediante el uso de la modelación se determinarán los valores de dichas variables para la condición con proyecto, según el régimen de caudal propuesto por los componentes hidrológico e hidráulico de la metodología. Con las variables modeladas bajo el escenario de caudal ambiental se establecerá el nuevo valor del IIH con proyecto y se determinará si el régimen propuesto altera o no de manera significativa la integridad del hábitat del

ecosistema. En caso de que el IIH con proyecto se reduzca de manera significativa, se planteará un nuevo régimen de caudales (desde el componente hidrológico) hasta que se obtenga un IIH con proyecto igual o superior al valor de referencia.