

**SÍNTESIS METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS  
( $Q_e$ ), RESULTADOS Y POSIBLES CONSECUENCIAS**

**CLAUDIO S. M. CONSUEGRA MARTÍNEZ**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ D.C.  
2013**

**SÍNTESIS METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS  
( $Q_e$ ), RESULTADOS Y POSIBLES CONSECUENCIAS**

**CLAUDIO S. M. CONSUEGRA MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

**Director  
Profesor Germán Eduardo Acero Riveros**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ D.C.  
2013**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Director

Noviembre, 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento:

Al Ingeniero Germán Eduardo Acero Riveros por el apoyo y dirección brindada, por compartir su experiencia para que este trabajo fuera exitoso y por el conocimiento ofrecido durante las asignaturas de Hidrología Básica Aplicada e Hidráulica a Superficie Libre que fueron pilar en la realización de este trabajo.

A Angélica María Botías Bernal por la ayuda brindada en cada una de las consultas realizadas.

A Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA) por la comprensión y el apoyo brindado durante este proyecto de estudio, especialmente a la Ingeniera Mónica Ivett Arenas Rojas, Olga Rocío Roa Torres, Vanessa Calderón, al ingeniero Arley Contreras y Nicolás Rincón.

A mis padres, hermana y seres queridos por su plena confianza y por el cariño brindado en cada una de sus palabras.

A mi primo Fabián Alberto Díaz Consuegra, quien hizo correcciones importantes sobre la claridad de mis ideas.

A todas aquellas personas que dieron su aporte indirecto y/o directo para lograr culminar el desarrollo de este proyecto profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS .....	5
2.1. Objetivo general .....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. ANTECEDENTES.....	6
4. MARCO CONCEPTUAL.....	24
5. MARCO TEÓRICO.....	26
5.1. CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ ).....	26
5.2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ ) .....	28
5.2.1. Métodos de enfoque hidrológico.....	29
5.2.2. Métodos de valoración hidráulica .....	42
5.2.3. Métodos de enfoque hidrobiológico .....	46
5.2.4. Métodos de enfoque holístico.....	52
5.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ ) .....	56
5.4. PROCEDIMIENTOS GENERALES Y TRANSVERSALES AL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ ).....	59
5.4.1. Cálculo de caudales medios (método analógico).....	59
5.4.2. Caracterización morfométrica de cuencas.....	60
5.4.3. Curva de Duración de Caudales (CDC).....	67
5.4.4. Fórmulas empíricas de probabilidad o “plotting formulas”.....	69
5.4.5. Procedimientos de muestreo (comunidades faunísticas acuáticas, calidad físicoquímica y microbiológica del agua, aforos de caudal, muestreo de sedimentos) 71	
6. MARCO LEGAL.....	73
6.1. Marco legal Colombiano .....	73
6.2. Marco legal internacional.....	79
7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO .....	83

7.1.	GENERALIDADES .....	83
7.2.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	84
7.3.	SÍNTESIS METODOLÓGICA DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Q <sub>e</sub> )	84
7.4.	CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Q <sub>e</sub> ) – ASPECTOS PARTICULARES DE CÁLCULO .....	85
7.3.1.	Delimitación de la zona de estudio y selección de las corrientes hídricas de estudio	85
7.3.2.	Caracterización de la zona de estudio .....	86
7.3.3.	Selección de los métodos de cálculo para determinar el Q <sub>e</sub> .....	88
7.3.4.	Cálculo del Q <sub>e</sub> .....	89
7.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	92
7.5.	RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL Q <sub>e</sub> .....	92
8.	APLICACIÓN PRÁCTICA DE CAUDAL ECOLÓGICO (RÍO GUAYABERO & QUEBRADA LA RESERVA) .....	93
8.1.	Delimitación de la zona de estudio .....	93
8.2.	Caracterización de la zona de estudio .....	94
8.2.1.	Localización y red hidrográfica .....	94
8.2.2.	Especies faunísticas acuáticas .....	101
8.2.3.	Actividades socioeconómicas y usos del agua .....	104
8.2.4.	Caracterización morfométrica de cuencas.....	105
8.2.5.	Análisis temporal de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales .....	106
8.2.6.	Distribución espacial de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales .....	110
8.2.7.	Análisis temporal de los caudales medios mensuales multianuales.....	111
8.3.	Cálculo del Q <sub>e</sub> para el río Guayabero y quebrada La Reserva .....	115
8.3.1.	Método del IDEAM .....	115
8.3.2.	Método de índices con la CDC .....	117
8.3.3.	Método del perímetro mojado.....	121
8.3.4.	Resumen de resultados.....	135
8.4.	Análisis de resultados.....	136
9.	CONCLUSIONES.....	143

10.	RECOMENDACIONES .....	146
11.	BIBLIOGRAFÍA .....	147
12.	ANEXOS.....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método del perímetro mojado .....	43
Figura 2. Curva de preferencia referencial de la trucha arco iris ( <i>Onchorrhynchus mykiss</i> ) para la variable velocidad .....	47
Figura 3. Relación Q-IH para los cuatro estadios de la trucha común.....	48
Figura 4. Área de una cuenca hidrográfica .....	61
Figura 5. Curva de duración de caudales .....	68
Figura 6. Determinación de curva de duración de caudales en hoya hidrográfica sin datos de caudal.....	69
Figura 7. Localización zona de estudio.....	93
Figura 8. Localización zona de estudio.....	94
Figura 9. Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM).....	95
Figura 10. Áreas hidrográficas de Colombia .....	96
Figura 11. Zonas hidrográficas de Colombia.....	97
Figura 12. Subzonas hidrográficas de Colombia.....	97
Figura 13. Principales cuencas para la zona de estudio .....	98
Figura 14. Localización estaciones empleadas en la caracterización del comportamiento espacial de la precipitación en la zona de estudio .....	107
Figura 15. Comportamiento temporal de la precipitación media mensual multianual de la zona de estudio (1993 – 2013) .....	108
Figura 16. Distribución espacial de la precipitación total media mensual multianual en la zona de estudio (1993 – 2013) .....	110
Figura 17. Localización estaciones hidrométricas empleadas en la caracterización de caudales en la zona de estudio.....	112
Figura 18. Comportamiento temporal de los caudales medios mensuales multianuales de la zona de estudio (1983 – 2011).....	113
Figura 19. CDC río Guayabero estación BALSORA LA – Punto de cálculo 1 .....	117
Figura 20. CDC río Guayabero estación MACARENA LA – Punto de cálculo 2.....	118
Figura 21. CDC quebrada La Reserva – Punto de cálculo 3.....	120
Figura 22. Cálculo de la curva de calibración de caudales líquidos en una estación hidrométrica.....	122
Figura 23. Perfil transversal estación BALSORA LA - punto de cálculo 1 .....	123
Figura 24. Curva de calibración de caudales estación BALSORA LA – punto de cálculo 1 .....	124
Figura 25. Curva selección parámetro b de la curva de gastos, estación BALSORA LA – punto de cálculo 1.....	125
Figura 26. Curva de gastos estación BALSORA LA – punto de cálculo 1 .....	125
Figura 27. Curva P vs Q río Guayabero – estación BALSORA LA punto de cálculo 1 ...	126
Figura 28. Curva de calibración de caudales estación MACARENA LA – punto de cálculo 2 .....	127

Figura 29. Perfil transversal estación MACARENA LA – punto de cálculo 2 .....	128
Figura 30. Curva selección parámetro b de la curva de gastos, estación MACARENA LA – punto de cálculo 2.....	129
Figura 31. Curva de gastos estación MACARENA LA – punto de cálculo 2.....	129
Figura 32. Curva P vs Q río Guayabero – estación MACARENA LA punto de cálculo 2 .	130
Figura 33. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 3.....	132
Figura 34. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 4.....	132
Figura 35. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 5.....	133
Figura 36. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 3.....	134
Figura 37. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 4.....	134
Figura 38. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 5.....	135

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Río Guayabero a la altura del casco urbano de La Macarena.....	100
Fotografía 2. Quebrada La Reserva.....	101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Cuenca del río Tempisque y tramo del río para los caudales ambientales..	10
Ilustración 2. Resumen de datos estadísticos de caudales del río Tempisque en Guardia, caudales ambientales recomendados y caudal disponible máximo a concesionar (m <sup>3</sup> /s)	11
Ilustración 3. Principales 7 sistemas ribereños de Zimbabue .....	12
Ilustración 4. Caudales ambientales requeridos como porcentaje de la escorrentía media anual.....	13
Ilustración 5. Regionalización de la cuenca del río Yellow .....	14
Ilustración 6. Zona de estudio para el río Quindío.....	16
Ilustración 7. Componentes involucrados en el caudal ecológico.....	16
Ilustración 8. Resumen de indicadores ambientales para el río Meléndez 1980-2006 .....	19
Ilustración 9. Mapa de calidad de agua del río Meléndez para el período 1980 a 1993 ..	20
Ilustración 10. Mapa de calidad de agua del río Meléndez para el período 1997 a 2006 .	21
Ilustración 11. Hidrogramas para cuencas con la misma área y diferentes formas para una lámina precipitada de igual magnitud.....	106
Ilustración 12. Procedimiento para la selección de un método de cálculo y la determinación del caudal ecológico .....	145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos de volúmenes ambientales para el río Yellow.....	15
Tabla 2. Caudales ecológicos en las cuencas media y baja de los ríos Timba, Claro, Amaime, Tuluá y Pescador.....	23
Tabla 3. Diferentes denominaciones y conceptos de caudal ambiental .....	27
Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico .....	30
Tabla 5. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidráulico .....	43
Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico.....	47
Tabla 7. Métodos de cálculo del Qe con enfoque holístico .....	53
Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes enfoques de cálculo del Qe.....	56
Tabla 9. Clasificación de cuencas de acuerdo con la pendiente media.....	64
Tabla 10. Clases de valores de masividad.....	65
Tabla 11. Fórmulas de probabilidad empírica o “plotting formulas” .....	69
Tabla 12. Valores de <i>a</i> para la fórmula de Gringorten en función de <i>n</i> .....	70
Tabla 13. Constitución ecológica de Colombia (1991) .....	74
Tabla 14. Normas colombianas relacionadas con la GIRH .....	77
Tabla 15. Marco legal internacional .....	79
Tabla 16. Etapas y descripción de actividades - metodología.....	83
Tabla 17. Puntos de trabajo para el cálculo del Qe.....	86
Tabla 18. Estaciones empleadas en el análisis temporal de precipitación total media mensual multianual.....	87
Tabla 19. Estaciones empleadas en el análisis temporal de caudales medios mensuales multianuales .....	88
Tabla 20. Cuadro de cuencas área de estudio.....	98
Tabla 21. Especies ícticas reportadas para la cuenca del río Duda .....	102
Tabla 22. Organismos perifíticos quebrada La Reserva.....	103
Tabla 23. Resultados caracterización morfométrica.....	105
Tabla 24. Valores totales medios mensuales multianuales de precipitación (mm) – 1993 a 2013 .....	109
Tabla 25. Estaciones hidrométricas empleadas y corrientes monitoreadas .....	111
Tabla 26. Valores medios mensuales multianuales de caudal (m <sup>3</sup> /s) – 1983 a 2011 .....	114
Tabla 27. Puntos de trabajo para el cálculo del Qe.....	115
Tabla 28. Resumen de caudales medios mensuales estación BALSORA LA.....	115
Tabla 29. Resumen de caudales medios mensuales estación MACARENA LA.....	115
Tabla 30. Resumen de caudales medios mensuales multianuales quebrada La Reserva – Punto de cálculo 3, 4 y 5 (m <sup>3</sup> /s) .....	116
Tabla 31. Resultados Qe río Guayabero - método de índices de la CDC .....	118

Tabla 32. Resultados del cálculo del porcentaje del tiempo empleando diferentes plotting fórmulas.....	119
Tabla 33. Resultados Qe quebrada La Reserva - método de índices de la CDC .....	121
Tabla 34. Resultados de calibración modelo hidráulico quebrada La Reserva.....	131
Tabla 35. Resultados Qe quebrada La Reserva – método del perímetro mojado .....	133
Tabla 36. Consolidado de resultados de Qe para las corrientes estudiadas y los métodos de cálculo seleccionados .....	135
Tabla 37. Qe alternos – calculados empleando métodos hidrológicos diferentes al IDEAM e índices con la CDC .....	137
Tabla 38. Correlación área – caudal ecológico .....	140
Tabla 39. Porcentaje de igualación o excedencia Qe calculados.....	141
Tabla 40. Porcentaje del Qe respecto a la oferta hídrica promedio de las corrientes .....	142
Tabla 41. Caudales ecológicos seleccionados.....	143

## RESUMEN

El siguiente documento trata la temática del caudal ecológico, para lo cual se abordarán los siguientes aspectos: una descripción de algunas experiencias de cálculo ejecutadas tanto en Colombia como a nivel internacional, exactamente en Costa Rica, Zimbabue y la China; las definiciones del caudal ecológico ;algunos métodos de cálculo y su clasificación bajo 4 enfoques (hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico), incluidas sus ventajas y desventajas; y, finalmente, los procedimientos considerados genéricos en la determinación de caudales ecológicos.

Adicionalmente se exhibe una aplicación práctica de cálculo en la cual se determina el caudal ecológico para la quebrada La Reserva y el río Guayabero ubicados en el Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM), en el departamento del Meta, por medio del método del IDEAM, de índices con la Curva de Duración de Caudales (CDC), y del perímetro mojado. Estos procedimientos permiten la selección del caudal ecológico para 5 puntos de cálculo definidos (2 para el río Guayabero y 3 para la quebrada La Reserva).

Finalmente se consignan recomendaciones sobre el *deber ser* en la determinación del caudal ecológico a partir de la aplicación de cálculo desarrollada y las consecuencias que los resultados pueden acarrear para el área de estudio.

## **ABSTRACT**

The following document presents the environmental flow subject under the scope of: some computation experiences developed in Colombia as well as internationally, more precisely in Costa Rica, Zimbabwe and China; the definitions of environmental flow; some calculation methods available and its classification under 4 different focuses (hydrologic, hydraulic, hydrobiologic and holistic), including its advantages and disadvantages; and finally the procedures seen as common in the determination of environmental flows.

Moreover this work exhibits a calculus application in which the environmental flow of La quebrada La Reserva and the Guayabero River, located in the Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM), in the department of Meta, is obtained by using the IDEAM method, the indexes with the flow duration curve method and the wetter perimeter method. All these procedure allow the designation of the environmental flow for 5 working stations (2 in the Guayabero River and 1 in the quebrada La Reserva).

Finally some recommendations are presented concerning how the determination of an environmental flow must be carried out, information that results from the practical calculation conducted and the consequences its results may have in the study area.

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda la temática del caudal ecológico ( $Q_e$ ), la cual incluye algunas experiencias de cálculo desarrolladas a nivel nacional e internacional, su definición, parte de los diferentes métodos de cálculo existentes para su determinación, las ventajas y desventajas que éstos presentan, así como los procedimientos generales y transversales que se deben tener en cuenta al momento de realizar el cálculo de un caudal ecológico. Así mismo presenta la normatividad existente al respecto en el ámbito nacional e internacional, para finalmente proceder a explicar cómo debe ser el procedimiento de cálculo para el establecimiento del caudal ecológico de acuerdo con los datos disponibles y mostrar, bajo este esquema de desarrollo, una aplicación práctica de su determinación.

Las experiencias de cálculo, expuestas en el capítulo 3, presentan diferentes aproximaciones en la determinación del caudal ecológico que permiten evidenciar la pluralidad de formas para su cálculo y la no unanimidad al respecto, y facilitan conocer propuestas de planificación del recurso hídrico teniendo como fundamento el caudal ecológico.

El marco conceptual que sirve como guía de consulta para la correcta comprensión de la información aquí depositada se sitúa en el capítulo 4, y no busca extensión sino asertividad acerca de las definiciones allí plasmadas.

El capítulo 5 expone un marco teórico donde se aborda la definición del caudal ecológico, algunos de los métodos de cálculo existentes para su determinación y que son clasificados bajo cuatro enfoques (hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico), las ventajas y desventajas que implica usar uno u otro enfoque y, por último, procedimientos considerados de uso general en los diferentes métodos de cálculo.

Por otra parte en el capítulo 6, se consigna información relacionada con el marco legal del caudal ecológico, abordando el panorama nacional con mayor detalle que el internacional, y tomando como referencia la normatividad internacional que en documentos consultados se menciona. Tal información es utilizada como soporte para presentar el camino que aún queda por avanzar, con el objetivo de sentar unas bases sólidas sobre la temática del caudal ecológico en el país, que permita su implementación de manera segura en procesos de planificación de los recursos medioambientales proveídos por las cuencas hidrográficas.

Además los capítulos 7 y 8, se plantea, de acuerdo con la información disponible, cuál debe ser el procedimiento de cálculo a seguir para la determinación del caudal ecológico, así como una aplicación práctica en la que se desarrolla el cálculo del caudal ecológico para la quebrada La Reserva y el río Guayabero ubicados en el Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM), en el departamento del Meta, por medio de tres métodos

clasificados como hidrológicos e hidráulicos (método del IDEAM y de índices con la Curva de Duración de Caudales – enfoque hidrológico, y método del perímetro mojado – enfoque hidráulico), determinación que orienta la selección de un caudal ecológico a partir de múltiples resultados.

Por otro lado los capítulos 9 y 10 presentan los resultados obtenidos de la aplicación práctica, además de recomendaciones sobre cuál debe ser el criterio para realizar el cálculo del caudal ecológico.

Finalmente el capítulo 12 permite conocer cuáles fueron los registros hidrológicos utilizados en el presente trabajo, información disponible para el lector interesado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Elaborar una síntesis metodológica para la estimación de caudales ecológicos ( $Q_e$ ), analizar sus resultados y posibles consecuencias.

### **2.2. Objetivos específicos**

Elaborar una síntesis metodológica para la determinación de caudales ecológicos teniendo en cuenta enfoques de cálculo hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico.

Aplicar el método hidrológico del IDEAM y de índices con la Curva de Duración de Caudales (CDC), así como el método hidráulico del perímetro mojado, para determinar el caudal ecológico del río Guayabero y la quebrada La Reserva, comparar y analizar los resultados obtenidos.

Determinar cuál debe ser el caudal ecológico del río Guayabero y la quebrada La Reserva calculado mediante el método hidrológico del IDEAM y de índices con la CDC, así como el método hidráulico del perímetro mojado.

Establecer lineamientos para la selección del método de cálculo por emplear para determinar el caudal ecológico de una cuenca bajo estudio, determinando implicaciones en la selección de uno u otro método.

### 3. ANTECEDENTES

La importancia del caudal ecológico ( $Q_e$ ) se evidencia de acuerdo con el siguiente listado presentado por A. Das Gupta<sup>1</sup>, que pone en evidencia el potencial resultado de excluir de la planeación y el manejo integrado de cuencas, y en últimas de los recursos medioambientales que éstas ofertan, la temática referente al caudal ecológico.

- Riesgos a la salud pública – caudales reducidos en un cuerpo de agua significan menor disponibilidad de agua para consumo y contaminación más concentrada; se pierde el potencial de dilución de las corrientes frente a descargas de residuos líquidos.
- Pérdida de la seguridad alimentaria y daño a los medios de vida – un decremento en la cantidad de agua disponible significa menor disponibilidad del recurso hídrico para fines agrícolas. Igualmente reduce las reservas del recurso íctico disponible, y deteriora la pesca comercial y artesanal. Este es un impacto directo sobre la población vulnerable, que cuenta con recursos limitados y depende de ecosistemas en buenas condiciones como ríos y humedales.
- Pérdida de biodiversidad y beneficios económicos potenciales – la pérdida de biodiversidad y la degradación de los recursos naturales impiden a los países aprovechar los beneficios asociados con la recreación y el turismo.
- Incremento de los conflictos relacionados con el agua – la degradación del recurso hídrico y su pérdida resulta en conflictos en tanto los usuarios compiten para satisfacer sus necesidades.

Menciona también la International Water Management Institute - IWMI (2005), que insuficiente agua se está quedando en las corrientes hídricas en diferentes partes del mundo y que urge a los responsables del desarrollo de las políticas, considerar la asignación de caudales ambientales como una prioridad<sup>2</sup>, situación que recalca la importancia del tema.

En el ámbito nacional, la temática del caudal ecológico y todo lo que ella reviste (conceptualización, métodos de cálculo, enfoques de clasificación, experiencias de determinación, normatividad, investigación, etc.), es de gran importancia como lo refleja la

---

<sup>1</sup> DAS GUPTA, A. Implication of environmental flows in river basin management. En: Elsevier. Physics and Chemistry of the Earth. 33 (2008); 298 – 303.

<sup>2</sup> MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E; MAKUKIRA, H. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe. En: Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 32, (2007); 995 - 1006.

publicación de KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid y CASTRO HEREDIA, Lina Mabel<sup>3</sup>, además de novedosa de acuerdo con el informe elaborado por el antiguo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) y la Universidad Nacional (UNAL) de Colombia, titulado *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados*<sup>4</sup>. En efecto, este documento representa un “marco conceptual y un instrumento técnico, que permitirá, muy posiblemente, mejorar los términos de referencia de la dirección de licencias a utilizar en proyectos de regulación o aprovechamiento de caudales”, no siendo la metodología desarrollada un documento final que se esgrima como una norma en el tema de caudales ambientales.

Referente a la metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados (ver nota al pie número 4), se debe mencionar que la misma genera el siguiente cuestionamiento: aun cuando en ella se desglosa un procedimiento iterativo bastante elaborado para la obtención de caudales ambientales, incluyendo los aspectos hidrológicos, hidráulicos, de calidad de agua y bióticos, ésta no logra incluir, dentro del proceso de establecimiento de un caudal ambiental, el aspecto socioeconómico, el cual es considerado factor de plusvalía para el desarrollo de diversos proyectos de ingeniería, entre los cuales se puede mencionar, por citar un ejemplo, la construcción de centrales hidroeléctricas. De igual forma este documento, más allá de los resultados numéricos que permita generar en materia de caudales ambientales y que pueden llegar a ser múltiples (ver numeral 8.4 – ejemplo de resultados de caudales ambientales), invita recurrentemente a trabajos posteriores de investigación y complementación (numeral 4.1.3., capítulo 4 – Información y línea base de índices de integridad biótica) que, si bien permiten refinar y lograr un mejor resultado, por otro lado lastiman objetivos de planificación y administración de los recursos hídricos de las cuencas a nivel regional y/o nacional, donde la unanimidad es una cualidad deseada. Igualmente, supone el documento publicado por la UNAL y el antiguo MAVDT, que su uso no puede ser generalizado para cualquier proyecto que requiera de licenciamiento ambiental, de acuerdo con lo consagrado en el decreto 2820/10, en tanto no es equiparable el uso y aprovechamiento del agua que realiza una central hidroeléctrica, al realizado en una perforación exploratoria del sector de hidrocarburos, donde los caudales de captación solicitados son del orden de 4 L/s. Tal escenario supone la inaplicación de una metodología tan laboriosa de aplicar como la presentada por la UNAL y MAVDT, abriendo así la brecha a nuevas propuestas, como la establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que permitan la determinación de un caudal ecológico alternativo.

---

<sup>3</sup> KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali, Colombia. Universidad del Valle. 2009.

<sup>4</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT) y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (SEDE BOGOTÁ). Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados: Informe final. Bogotá. Octubre 30 de 2008.

Como podrá indagarse en el numeral 6.1, Marco legal Colombiano, en el país aún no se ha desarrollado de manera clara y manifiesta, normatividad que instituya las pautas para la determinación del caudal ecológico y cómo éste deberá ser implementado, sino por el contrario existen un sin número de regulaciones que apuntan a la administración del recurso hídrico y que de una u otra manera incorporan la filosofía que se encuentra detrás de la temática del caudal ecológico, sin que estas regulaciones sean del todo claras y concisas al respecto. Adicionalmente, y como argumento que refuerza el estado aún en maduración de la temática del caudal ecológico en Colombia, se debe mencionar el proyecto de Ley del Agua (2005), el cual puede destacarse como el principal intento escueto por sentar las bases respecto a la temática del caudal ecológico.

Si bien la situación hasta ahora descrita tiene como referente el estado Colombiano, en otras latitudes vecinas, sin conocer a profundidad las particularidades de cada región, el escenario no dista mucho del Colombiano. Es así como en Ecuador tan solo hasta el año 2008 se expresaba en la constitución política así como en el proyecto de Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua<sup>5,6</sup>, la responsabilidad del Estado por planificar y gestionar los recursos hídricos que se destinen como caudal ecológico, y que el caudal ecológico en toda la cuenca hidrográfica es intangible y mantenerlo en cantidad necesaria es responsabilidad de la Autoridad Única del Agua y de todas las personas. Igualmente, sólo hasta el año 2005 y mediante la Ley chilena 20017, se estipulaba que es deber de la Dirección General de Aguas (DGA) velar por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo.<sup>7</sup>

A diferencia de la situación en Colombia y latitudes vecinas en las cuales la temática se ha abordado o ha empezado a abordarse más o menos a partir de los años 2000 hacia adelante, países como Francia, Suiza y España ya han establecido de forma clara aspectos relacionados con el caudal ecológico y entre los cuales cabe mencionar su conceptualización y procedimiento de determinación, siendo así que Suiza mediante la Ley Federal sobre la Protección de las Aguas (814.20 – 1993)<sup>8</sup>, define la conservación de un caudal mínimo cualitativo y cuantitativo (que hace alusión al caudal ecológico), y expresa, de manera concreta, cómo deberá realizarse su determinación. Igual situación ocurre para Francia y España, donde mediante la Ley de aguas (Ley N° 84512 de 1984)<sup>9</sup>

---

<sup>5</sup> PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA - Ecuador. Ley orgánica de recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua. [en línea]. Disponible en: [http://iepala.es/IMG/pdf/PLRH\\_Ejecutivo\\_.pdf](http://iepala.es/IMG/pdf/PLRH_Ejecutivo_.pdf)

<sup>6</sup> ASAMBLEA CONSITUYENTE – Ecuador. Constitución del Ecuador. 2008. [en línea]. Disponible en: [http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf)

<sup>7</sup> MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DE CHILE. Ley 20017 de 2005. [en línea]. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=239221&idVersion=2009-12-29>

<sup>8</sup> ANDES POWER. Proyecto Minicentral Hidroeléctrica Las Nieves. Anexo 7. Cálculo caudal ecológico. [en línea]. Disponible en: [http://seia.sea.gob.cl/archivos/c0b\\_Anexo\\_7\\_Calculo\\_Caudal\\_Ecologico.pdf](http://seia.sea.gob.cl/archivos/c0b_Anexo_7_Calculo_Caudal_Ecologico.pdf)

<sup>9</sup> Idem.

y la Ley 10 del 5 de Julio de 2001<sup>10</sup>, respectivamente, se concretan las directrices sobre el tratamiento que deberá darse a la temática del caudal ecológico.

Dentro de los esfuerzos de investigación y aplicación relacionados con la temática de caudales ecológicos se pueden mencionar los siguientes, que permiten observar la pluralidad de procedimientos existentes para determinar los caudales mínimos de una corriente y la no unanimidad respecto al tema y que al parecer presenta un campo de acción, que como fue mencionado, aún se encuentra en proceso de maduración hasta llegar a bases sólidas que permitan de manera segura el uso de los caudales ecológicos con fines conservativos, de planificación, de destinación del recurso hídrico, etc.; otra forma de observar la pluralidad de la temática a nivel mundial y lo novedoso de la misma puede ser que el caudal ecológico en los países anglosajones se conoce como “caudal recomendado” y “caudal ambiental”; en España y otros países hispanos se le llama “caudal ecológico, de mantenimiento, de compensación, básico, mínimo recomendado y mínimo”, entre otros.<sup>11</sup> También se puede hacer alusión, para observar lo novedoso del tema, que para A. Das Gupta<sup>12</sup> los caudales ambientales nunca han sido considerados de manera explícita en el manejo de recursos hídricos de una cuenca; por último cabe mencionar que para el IWMI<sup>13</sup> no existe una definición de caudal ecológico aceptada universalmente.

A nivel internacional existen una serie de experiencias de cálculo de caudal ecológico entre las cuales cabe mencionar la desarrollada en el **río Tempisque, Costa Rica**<sup>14</sup>, para la cual los autores presentan la determinación preliminar del caudal ambiental, teniendo como criterio de selección para el área de estudio, que es en esta cuenca donde se presentan los mayores conflictos entre usuarios del recurso y el ambiente a nivel nacional, y donde el gobierno Costarricense debe intervenir a muy corto plazo para regular las concesiones y uso del agua y así evitar mayores conflictos entre usuarios y la conservación.

El ejercicio de determinación del caudal ecológico se realizó empleando datos hidrológicos y batimétricos disponibles de un tramo del río Tempisque, así como los requerimientos de hábitat y las características biométricas de dos especies acuáticas seleccionadas (Guapote – *Parachromis dovii* y Cocodrilo – *Cocodylus acutus*). El enfoque

---

<sup>10</sup> JEFATURA DEL ESTADO. Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional. En: Noticias Jurídicas. [en línea]. Disponible en: [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/l10-2001.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l10-2001.html)

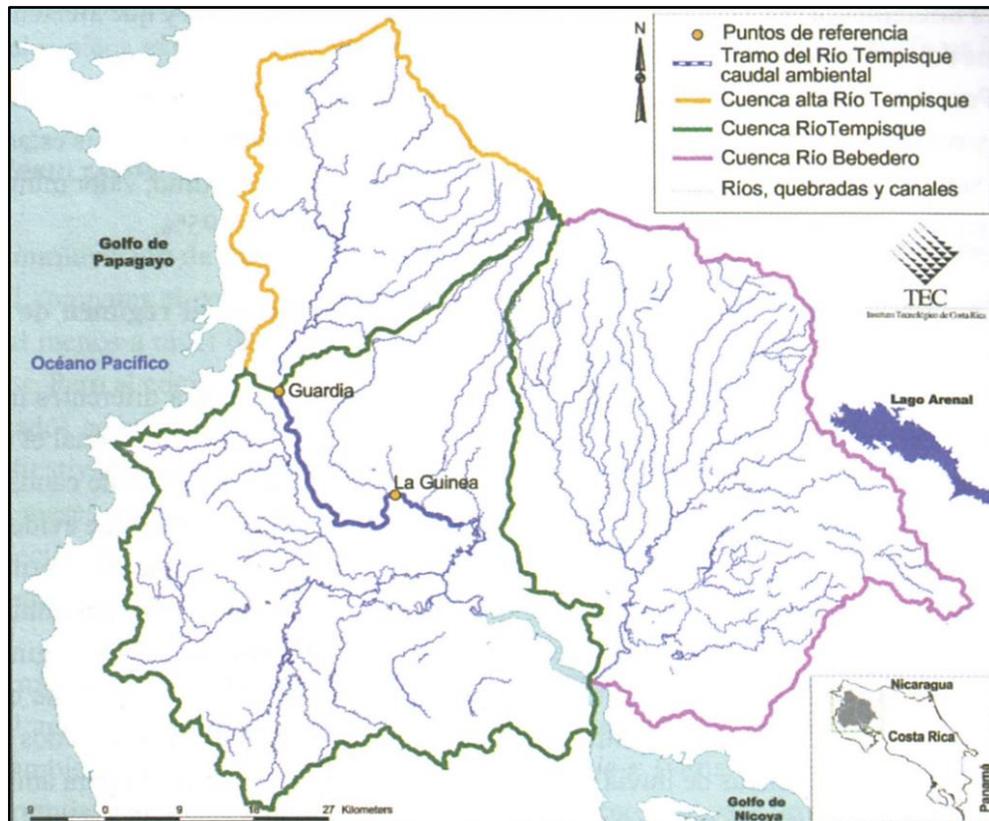
<sup>11</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Environmental flow regime in the framework of integrated water resources management strategy. En: Ecohydrology & Hydrology. Vol. 8, N° 2-4 (2008); 307-315.

<sup>12</sup> DAS GUPTA, A, Op. cit, p. 299.

<sup>13</sup> MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E; MAKUKIRA, H., Op. cit., p. 299.

<sup>14</sup> ALVARADO CALVO, Julio C.; JIMÉNEZ, Jorge; GONZÁLEZ, Eugenio. Caso 1: Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 273 – 284.

de cálculo desarrollado fue de tipo hidrobiológico para determinar varios escenarios de caudal ambiental para el tramo que se presenta en la Ilustración 1 entre los puntos Guardia y La Guinea.



**Ilustración 1. Cuenca del río Tempisque y tramo del río para los caudales ambientales**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

Como resultado se obtuvo la tabla resumen que se presenta a continuación (ver Ilustración 2), donde los autores decidieron establecer un caudal ambiental teniendo en cuenta el registro de datos hidrológicos para el periodo 1951 a 1969 y que representa el periodo durante el cual no existía la concesión de aguas y por ende la variabilidad del caudal representa el régimen natural de la corriente. La determinación de caudales se fundamentó en la realidad social y la necesidad ecosistémica de las especies faunísticas seleccionadas, proponiendo con base en los caudales máximos, medios y mínimos de la corriente, caudales ambientales máximos, medios y mínimos, así como el caudal que podrá concesionarse incorporando en dicha decisión los resultados de la determinación del caudal ambiental; para establecer cómo se generan las líneas 8 a 11 de la Ilustración 2 se recomienda consultar la bibliografía citada.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> ALVARADO CALVO, Julio C.; JIMÉNEZ, Jorge; GONZÁLEZ, Eugenio, Op. cit, p. 279 - 282.

Línea	Caudales 1951-69	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
1	Promedio	14.7	35.2	24.2	25.2	42.9	63.1	49.3	24.7	18.5	13.7	10.5	9.0
2	Desv. Sta.	10.7	25.5	11.3	11.6	29.4	49.8	43.2	7.9	5.1	3.2	2.5	1.8
3	Núm. Años	18.0	18.0	18.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
4	Valor Min.	6.7	9.3	11.6	12.0	15.2	19.8	17.4	14.7	12.8	10.4	7.1	6.4
5	Valor Max.	51.8	107.0	55.4	58.0	140.0	208.0	179.8	41.3	28.8	21.0	15.7	12.0
6	Límite Conf. -95%	9.4	22.6	18.6	19.6	28.7	39.2	28.5	20.9	16.1	12.2	9.3	8.1
7	Límite Conf. +95%	20.0	47.9	29.9	30.8	57.1	87.1	70.1	28.5	21.0	15.2	11.6	9.8
	Caudales Ambientales	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
8	Mínimo	3.4	4.6	5.8	6.0	7.6	9.9	8.7	7.4	6.4	5.2	3.6	3.2
9	Normal	8.6	17.3	11.4	11.6	21.8	33.9	29.5	11.2	8.8	6.7	4.7	4.1
10	Máximo	13.9	30.0	17.0	17.2	35.9	57.9	50.3	14.9	11.3	8.2	5.9	4.9
11	Caudal Concesionario	6.0	17.9	12.8	13.6	21.1	29.3	19.8	13.6	9.7	7.0	5.7	4.9

**Ilustración 2. Resumen de datos estadísticos de caudales del río Tempisque en Guardia, caudales ambientales recomendados y caudal disponible máximo a concesionar (m<sup>3</sup>/s)**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et al.)

Aspectos interesantes de este ejercicio de cálculo es que el caudal ecológico propuesto se refiere a su variación mensual en el rango de caudales medios, máximos y mínimos, cuando normalmente éste se establece como un valor único a nivel mensual y múltiple o único a nivel intranual. Igualmente llama la atención la determinación del caudal ecológico teniendo en cuenta la información disponible en 2 puntos de cálculo de referencia, lo cual supone que un caudal ecológico puede ser particionado, supeditando su asignación al tramo de interés seleccionado. Por último cabe resaltar como aspecto de interés el uso de la serie de caudales para un estado natural de la corriente, donde no existía intervención alguna de la misma, escenario que impone como cuestionamiento si deben emplearse series actualizada de caudal o series prístinas en cuanto a los usos del agua se refiere.

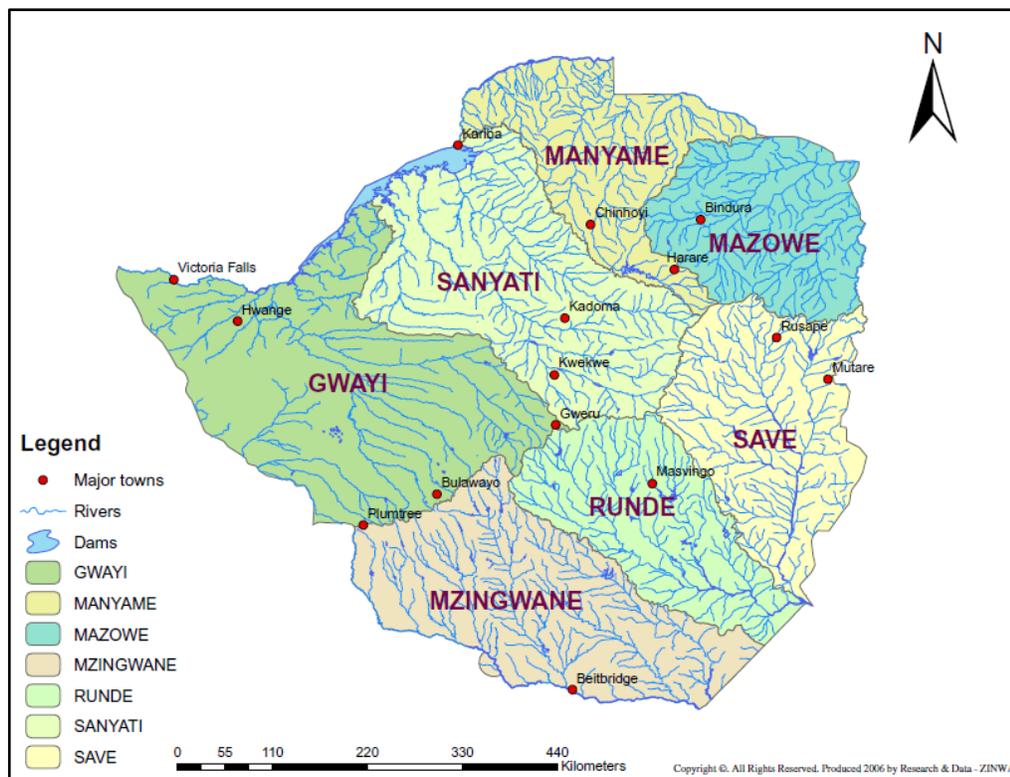
Dentro de las experiencias de cálculo desarrolladas a nivel internacional también se encuentra la trabajada en Zimbabue, en sus 7 sistemas ribereños y que se considera un claro esfuerzo por emplear en la planificación de los recursos ambientales asociados a una cuenca hidrográfica, el caudal ecológico. El propósito del artículo titulado **Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe**<sup>16</sup>, es estimar la cantidad de agua que debe ser reservada para propósitos ambientales en las 151 subcuencas o unidades de manejo de agua de Zimbabue.

El área de estudio corresponde a los 7 sistemas ribereños en los cuales ha sido dividido el país para la planificación y manejo de los recursos hídricos, los cuales a su vez han sido subdivididos en 151 subcuencas hidrográficas (ver Ilustración 3).

<sup>16</sup> MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E; MAKUKIRA, H, Op. cit.,

El procedimiento de cálculo empleado se fundamenta en un método hidrológico desarrollado por Hughes and Hannart (2003 – ver Tabla 4), bajo la base de requerimientos de caudal ambiental estimados en diferentes estudios desarrollados usando métodos holísticos en el Sur de África. El estudio desarrollado por MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E y MAKUKIRA, H. estima requerimientos de caudal ambiental para condiciones de clase A, B y C establecidas para Sudáfrica y que corresponden a los siguientes “objetivos-escenarios deseados”:

- Clase A: ríos con hábitats no modificados y que tienen condiciones naturales.
- Clase B: río con pequeñas modificaciones y grandes condiciones naturales.
- Clase C: ríos con moderadas modificaciones y con ecosistemas sin cambios.

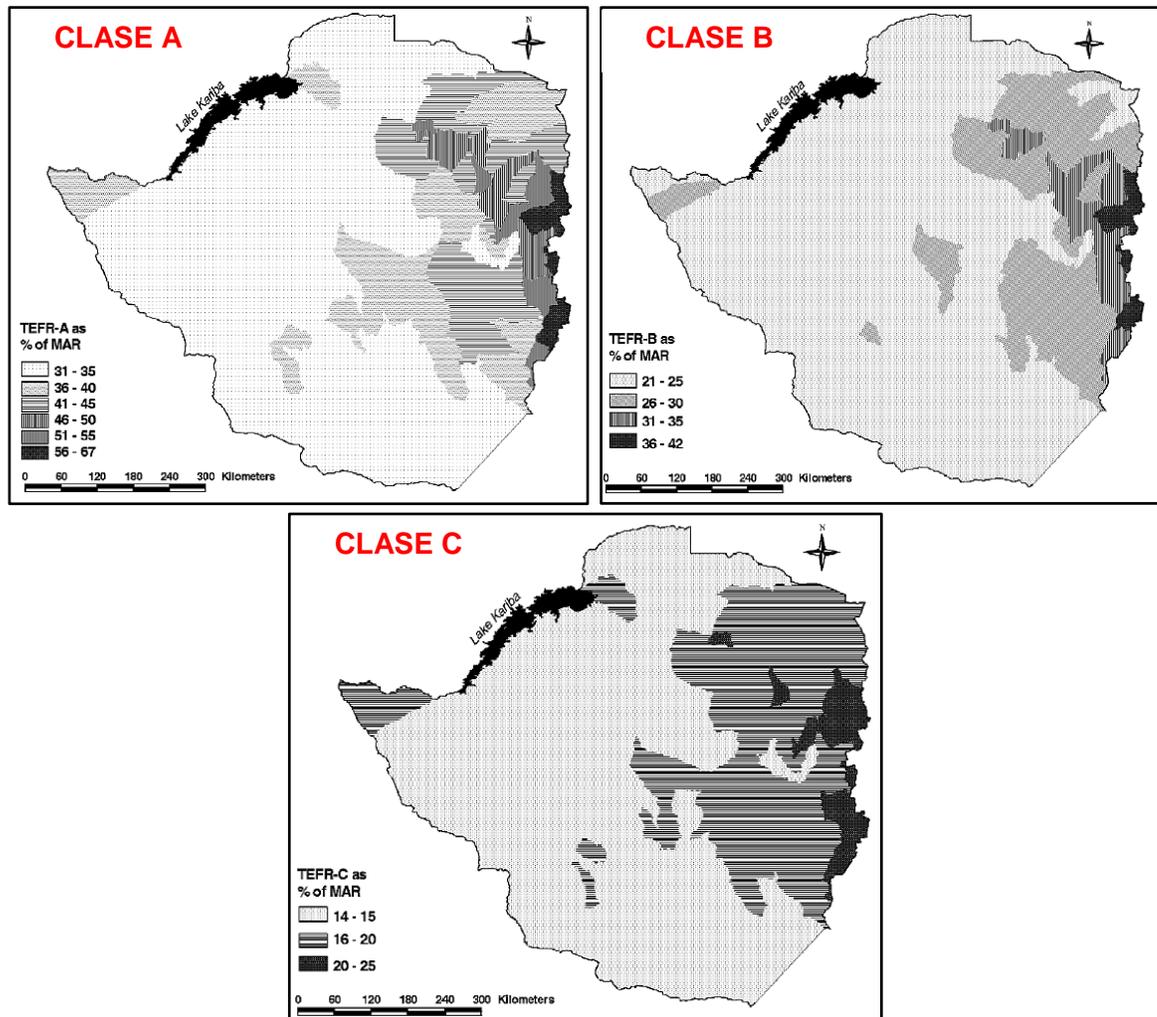


**Ilustración 3. Principales 7 sistemas ribereños de Zimbabwe**

Fuente: Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe (MAZVIMAVI, D et al.)

Como resultado de la experiencia de cálculo para Zimbabwe, se obtuvo que para mantener hábitats naturales o sin cambios y con cambios ligeros en los ríos del país, los requerimientos de caudal ambiental deberán ser del 30 – 60% de la escorrentía media anual en las regiones con ríos perennes, mientras que estos requerimientos deberán ser del 20 – 30% en las partes secas del país con ríos que transportan agua durante la temporada invernal. A continuación se presenta la distribución espacial de los caudales ambientales establecidos para el país en función de las condiciones de clase previamente

presentadas (clase A, B y C) y de la lluvia neta o efectiva media anual que varía entre 5 a 20 mm/año en el occidente del país, 50 a 150 mm/año en el centro y 150 a 400 mm/año en el oriente.



**Ilustración 4. Caudales ambientales requeridos como porcentaje de la escorrentía media anual**

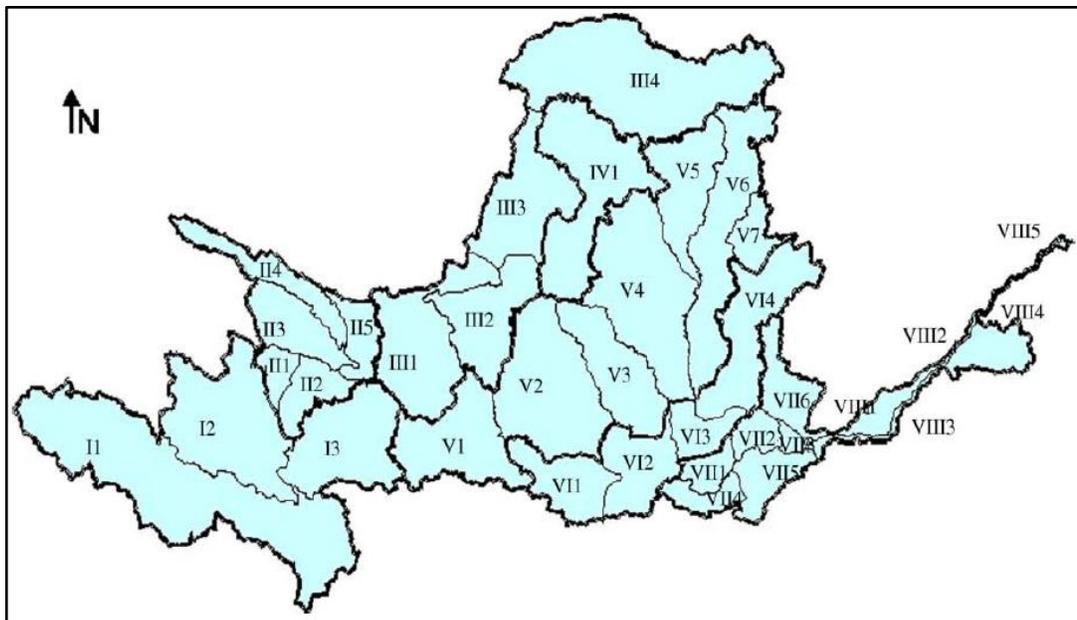
Fuente: Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe (MAZVIMAVI, D et al.)

Como fue presentado, el caudal ecológico hace parte de un conjunto de herramientas que trabajando de manera sinérgica permiten planificar el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos, siendo el ejercicio de cálculo desarrollado en Zimbabwe una muestra de ello, ya que a partir de los resultados se logra estimar la cantidad de agua que debe preservarse para diferentes propósitos ambientales, resultados que condicionarían por ejemplo una concesión de agua superficial; este tipo de trabajos se asemeja a los procesos de regionalización de caudales máximos y que permiten conocer para áreas de

gran extensión características hídricas de interés para así llegar a procesos de planificación a escala regional y/o nacional.

Las experiencias de cálculo referidas al establecimiento de caudales ambientales a nivel internacional no se limitan al continente Africano ni a Centroamérica, sino que éstas alcanzan las diferentes latitudes y longitudes del globo, donde adicional a las 2 experiencias de cálculo de caudal ecológico hasta ahora presentadas, a continuación se expone la realizada para la **cuenca del río Yellow, en China**<sup>17</sup>.

En este estudio los autores presentan la estimación de requerimientos de volúmenes ambientales para la cuenca del río Yellow, para lo cual cuantifican los requerimientos de consumo de agua (consumos artificiales: consumo por irrigación, consumo industrial y doméstico, etc.) al igual que los requerimientos de no consumo del agua (consumos naturales: consumo para transporte de sedimentos, por pérdidas de evaporación, etc.); para desarrollar la cuantificación de los requerimientos de agua se trabajó la división de la cuenca Yellow en 9 regiones y 35 subregiones tal y como se observa en la siguiente ilustración.



**Ilustración 5. Regionalización de la cuenca del río Yellow**

Fuente: Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China. (YANG, Z. F. et al.)

Una vez los requerimientos de volúmenes mencionados fueron establecidos, se obtuvo como resultado que el requerimiento de volumen ambiental mínimo es de  $317.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ , lo cual representa el 54.76% del flujo natural del río, mientras que el requerimiento de

<sup>17</sup> YANG, Z. F. et al. Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China. *En: Communication in Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. Vol. 14, (2009); 2469 - 2481.

volumen ambiental para la concesión de agua para el manejo integrado del recurso hídrico es de  $262.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ , lo cual equivale al 45.25% del flujo natural de la corriente (ver Tabla 1).

**Tabla 1. Requerimientos de volúmenes ambientales para el río Yellow**

Item	River ( $10^8 \text{ m}^3$ )	Wetland ( $10^8 \text{ m}^3$ )	Annual water requirements ( $10^8 \text{ m}^3$ )	Ratio of EFRs to natural river flows (%)
Annual EFRs	297.41	20.21	317.62	54.76
Environmental flow requirements for water resources allocation	250.00	12.47	262.47	45.25

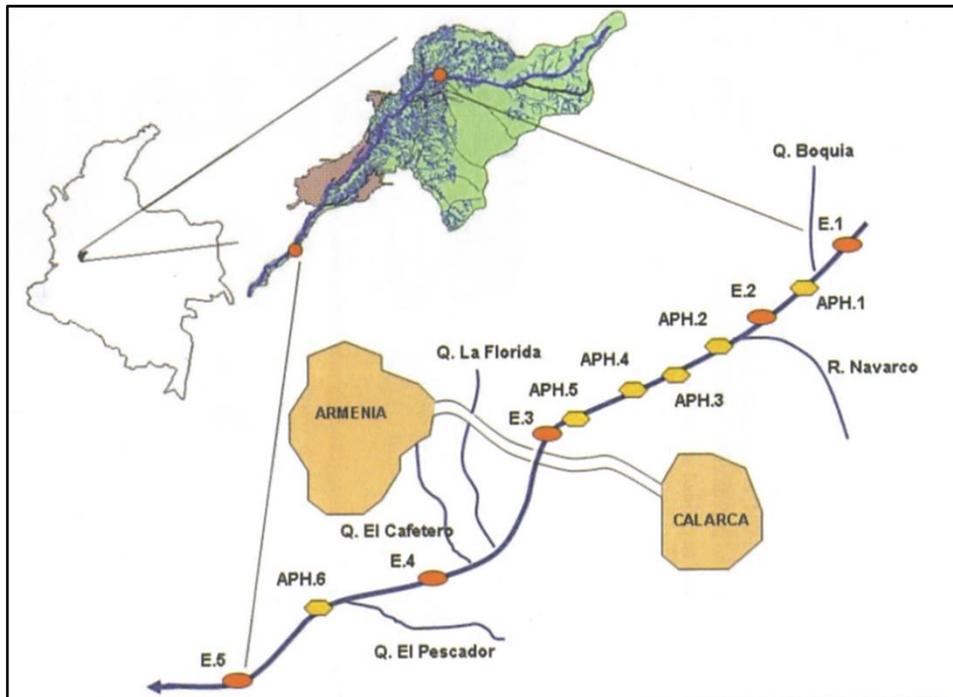
Fuente: Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China. (YANG, Z. F. et al.)

De esta experiencia de cálculo se rescata que el establecimiento de caudales ecológicos no se limita a resultados en términos de flujo, sino que éste puede calcularse en términos de volumen, lo cual permitiría relacionar la información de volúmenes ambientales mediante las áreas de drenaje de las cuencas de manera directa con datos pluviométricos y así determinar la viabilidad en el uso y aprovechamiento de agua, por ejemplo.

Si bien las experiencias de cálculo presentadas no son la totalidad de las existentes a nivel internacional, dan una idea que en la actualidad se realizan esfuerzos importantes para incluir dentro de la planificación y el manejo integrado de los recursos hídricos el caudal ecológico, y de igual forma permiten evidenciar la pluralidad de criterios-formas de obtener resultados al respecto.

Ahora bien, en materia nacional se pueden encontrar estudios referidos al cálculo del caudal ecológico y la determinación de características del medio que se interrelacionan con dicho caudal como el adelantado por MONSALVE DURANGO, Elkín Aníbal y BUSTAMANTE TORO, César Augusto<sup>18</sup>, estudio enfocado en determinar las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico considerados por los autores para el **río Quindío en el tramo Boquía-Puente Balboa** (ver Ilustración 6).

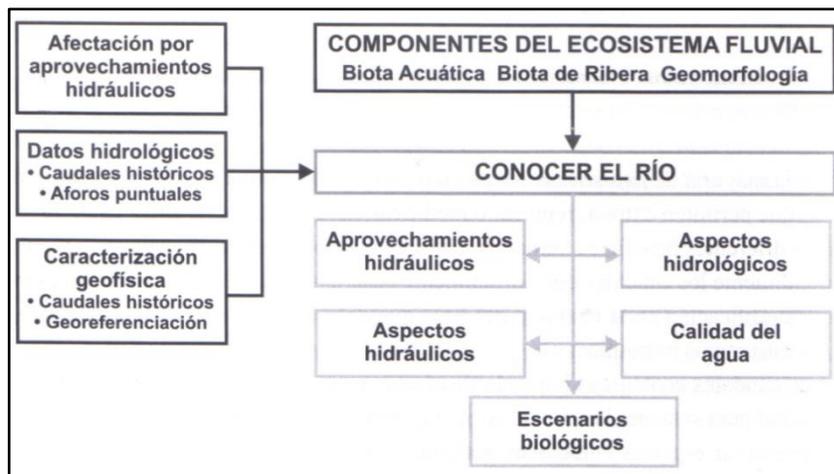
<sup>18</sup> MONSALVE DURANGO, Elkín Aníbal; BUSTAMANTE TORO, César Augusto. Caso 2: Determinación de las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía-Puente Balboa. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 285 – 302.



**Ilustración 6. Zona de estudio para el río Quindío**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

Como se indicó, los autores establecen la interrelación entre los siguientes componentes y el caudal ecológico: aprovechamientos hidráulicos, aspectos hidrológicos, hidráulicos, calidad del agua y biológicos (ver Ilustración 7).



**Ilustración 7. Componentes involucrados en el caudal ecológico**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

A través del estudio de los componentes mencionados, Monsalve y Bustamante concluyen que por ejemplo, de continuar la dinámica de aprovechamiento que se tiene

para el río Quindío, ésta ocasionará la disminución de caudales en la corriente, cambios en las condiciones hidráulicas y se verá afectado el desarrollo de los grupos faunísticos estudiados (macroinvertebrados e ictiofauna). Adicionalmente los autores indican que las variaciones en la composición, distribución y abundancia de las comunidades de macroinvertebrados y peces, están en relación con la disponibilidad de alimento, de microhábitats, de la variabilidad hidrodinámica y las condiciones fisicoquímicas del río Quindío, y por último, que las variables fisicoquímicas e hidráulicas estudiadas registran un comportamiento estable reflejando buenas condiciones biofísicas y eco-ambientales, las cuales son adecuadas para el establecimiento y desarrollo de la biota acuática, lo cual permite inferir que los caudales actuales son una aproximación al caudal ecológico requerido en la corriente.

Llama la atención de esta experiencia de cálculo, que los autores realizan un análisis descriptivo sobre las interrelaciones de los componentes del ecosistema fluvial estudiado, para concluir, de acuerdo con el estado del río al momento del estudio, que su condición en términos de dinámica hídrica debe mantenerse para preservar el equilibrio ecosistémico, determinando de forma indirecta y sin su cuantificación un régimen de caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía-Puente Balboa; se considera que este ejercicio de cálculo es una aproximación a un método de tipo holístico como se presentará más adelante en el numeral 5.2.4.

Dentro de las experiencias realizadas en Colombia cabe resaltar la ejecutada para el **río Meléndez** en el departamento del Valle<sup>19</sup>. En este trabajo la autora evalúa la evolución histórica del río entre 1980 y 2006 a través del contexto del desarrollo humano en la corriente (generación de residuos líquidos y aprovechamiento de agua para consumo) , empleando la calidad fisicoquímica, bacteriológica y ecológica como referente de la calidad ambiental; para el análisis de la calidad ambiental del río se tuvieron en cuenta tres sectores: la cuenca alta relacionada con sectores del río ubicados en la vereda Villa Carmelo, la cuenca media en donde se localiza la bocatoma del acueducto de La Reforma y la cuenca baja en la zona urbana de Santiago de Cali; la información sobre calidad fisicoquímica, bacteriológica y ecológica analizada por la autora se presenta en la Ilustración 8, información base para determinar la evolución histórica del río en términos ambientales.

De la Ilustración 8, se debe aclarar que el BMWP se refiere al método desarrollado por The Biological Monitoring Working Party y que involucra un inventario cualitativo de la presencia local de invertebrados bentónicos a nivel de familia. Todas las familias son clasificadas en una escala de 1 a 10, en relación con su referencia saprobia

---

<sup>19</sup> ZUÑIGA, María del Carmen. Caso 3: Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental: caso del río Meléndez (Valle del Cauca, Colombia). En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 303 - 310.

(disponibilidad de oxígeno) de calidad de agua. En la clase 1, las familias están principalmente en cuerpos de agua con marcada deficiencia de oxígeno, mientras que la clase 10 representa organismos que se restringen a cuerpos de agua con altos niveles de oxígeno.<sup>20</sup> En un procedimiento de muestreo los organismos capturados son identificados taxonómicamente a nivel de familia asignando su valor de 1 a 10, y mediante la sumatoria de este puntaje se obtiene el BMWP cuya escala es la siguiente: Calidad Muy Buena (BMWP  $\geq 121$ ), Buena (BMWP 101 – 120), Aceptable (BMWP 61 - 100), Dudosa (36 – 60), Crítica (BMWP 16 – 35) y Muy crítica (BMWP  $\leq 15$ ); se invita al lector interesado a consultar la bibliografía citada.<sup>21</sup>

Por otro lado el ICA o Índice de Calidad de Agua, es un índice desarrollado por la National Sanitation Foundation (NSF o FSN por sus siglas en español), que relaciona un total de 9 parámetros fisicoquímicos (oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, Demanda Biológica de Oxígeno - DBO<sub>5</sub>, nitratos, fosfatos, temperatura, turbiedad y sólidos totales), dando un peso a cada uno de éstos y que permite, mediante curvas de función específicas para cada parámetro y con escala de 0 a 100 unidades, los respectivos pesos o ponderaciones y una suma lineal ponderada, establecer la calidad del agua como Excelente (91 – 100 unidades), Buena (71 – 90 unidades), Media (51 – 70 unidades), Mala (26 – 50 unidades) o Muy Mala (0 – 25 unidades); se invita al lector interesado a consultar la bibliografía citada.<sup>22</sup>

En cuanto al ICOMO, ICOSUS e ICOMI (Índice de Contaminación por Materia Orgánica, por Sólidos Suspendidos y por Mineralización respectivamente), estos son indicadores que hacen parte de un conjunto de índices denominados ICO y trabajados por Ramírez para Colombia, cuya base responde a los resultados del análisis multivariado de componentes principales de común utilización en monitoreos en la industria petrolera colombiana. Estos índices junto con 3 adicionales (ICOTRO – Índice de Contaminación por Trofia, ICOTEMP - Índice de Contaminación por Temperatura e ICOpH - Índice de Contaminación por pH), permiten establecer la calidad del agua en términos de materia orgánica, sólidos suspendidos, mineralización, etc., determinando el grado de contaminación del recurso hídrico como: Ninguna (0 – 0.2), Baja (>0.2 – 0.4), Media (>0.4 – 0.6) Alta (>0.6 – 0.8) y Muy Alta (> 0.8 – 1); se invita al lector interesado a consultar la bibliografía citada.<sup>23</sup>

---

<sup>20</sup> Universidad de Pamplona (UNIPAMPLONA). Capítulo III - índices de Calidad (ICAs) y de Contaminación (ICOs) de importancia mundial. [en línea]. Consultado el 23/10/13. Disponible en: [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/libros/06082010/icatest\\_capitulo3.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf)

<sup>21</sup> ZAMORA GONZÁLEZ, Hildier. El índice BMWP y la evaluación biológica de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales naturales de Colombia. [en línea]. Consultado el 23/10/13. Disponible en:

[http://attachments.wetpaintserv.us/tC\\$2dHzxCU2g24n4xbeS%2Bg%3D%3D1379729](http://attachments.wetpaintserv.us/tC$2dHzxCU2g24n4xbeS%2Bg%3D%3D1379729)

<sup>22</sup> UNIPAMPLONA Op. cit.

<sup>23</sup> Idem

Parámetro /Fuente, año	Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
<b>Índice biótico BMWP</b>			
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1980.	125	93	58
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1990-1993 (n=7).	118	82	40
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1999.	110	62	17
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 2001.	100	55	22
<b>Índice de calidad de agua ICA- FSN</b>			
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1980.	80,3	66,3	53,5
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1990-1993 (n=7) (Zúñiga <i>et al.</i> , 1997).	75,6	55,7	40,4
DAGMA (1997).	-	71,0	30,0
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	70,8	44,3
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	73,8	36,6
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC.- 2006.	-	67,7	33,1
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	75,6	30,4
<b>Índice de contaminación por materia orgánica ICOMO.</b>			
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1990-1993 (n=7).	0,04	0,06	0,28
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	0,16	0,58
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC.- 2005.	-	0,09	0,69
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,12	0,68
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,18	0,74
<b>Índice de contaminación por mineralización ICOMI.</b>			
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1990-1993 (n=7).	0,01	0,02	0,09
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	0,04	0,10
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	0,04	0,11
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,03	0,08
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,05	0,52
<b>Índice de contaminación por sólidos en suspensión ICOSUS.</b>			
Archivo Programa en Entomofauna Acuática y Bioindicación de calidad de agua-Univalle 1990-1993 (n=7).	0,01	0,02	0,09
Laboratorio de Calidad Ambiental- CVC- 2005.	-	0,0	0,02
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2005.	-	0,0	0,33
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,02	0,17
Laboratorio de Calidad Ambiental-CVC - 2006.	-	0,0	0,11

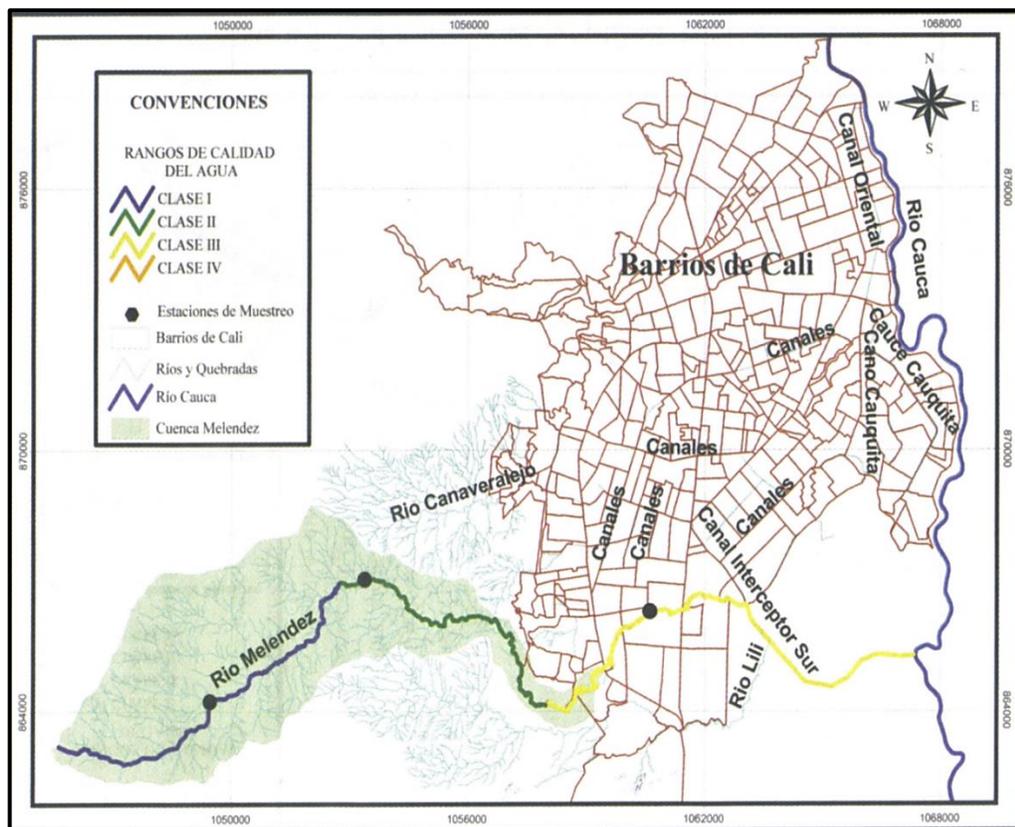
### **Ilustración 8. Resumen de indicadores ambientales para el río Meléndez 1980-2006**

Para la información derivada de varios muestreos se consigna el valor promedio del número de éstos – n=x.

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

A partir de la información presentada para el río Meléndez en los sectores de estudio en términos de indicadores ambientales, se pudo concluir que existe un detrimento en la calidad de sus aguas la cual para el periodo de estudio exhibe cambios referidos al paso

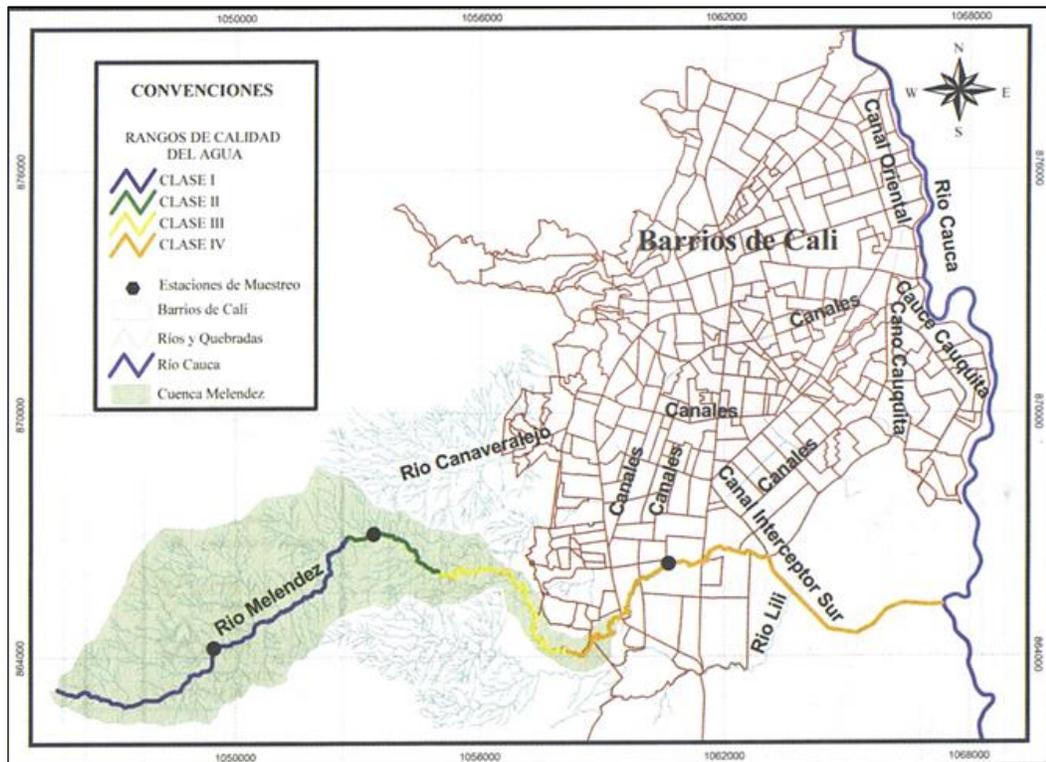
de calidad de clase tipo II a III y IV<sup>24</sup> en la cuenca media y baja (comparar Ilustración 9 e Ilustración 10), situación que se presenta debido a que existe un deterioramiento de la cuenca a causa de la pérdida de capacidad de asimilación y autodepuración por la disminución del caudal ecológico y que se explica por la puesta en marcha del acueducto La Reforma, cuya influencia se siente con mayor agudeza durante los periodos de estiaje o caudales bajos. Lo descrito queda expuesto por la interpretación de los resultados de la Ilustración 9, donde por ejemplo el Índice de Contaminación por Mineralización (ICOMO), alcanza después de la década de los 90 cifras entre 0,6 a 0,8 unidades que corresponden a valores altos de materia orgánica; en las siguientes ilustraciones se evidencia el cambio de calidad de agua de la cuenca del río Meléndez para el período de 1980 a 1993 y 1997 a 2006.



**Ilustración 9. Mapa de calidad de agua del río Meléndez para el período 1980 a 1993**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

<sup>24</sup> Cabe aclarar que las clases citadas en la Ilustración 9 e Ilustración 10 están relacionadas con las escalas presentadas para el BMWP, el ICA e ICOs, donde la clase I son aguas con ningún grado de contaminación, mientras la clase IV se refiere a aguas con nivel alto de contaminación.



**Ilustración 10. Mapa de calidad de agua del río Meléndez para el período 1997 a 2006**

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

La experiencia de cálculo para el río Meléndez exhibe una aplicación práctica del concepto de caudal ecológico abordado desde un enfoque fisicoquímico, biótico y ecológico, cuyos resultados podrían servir como fundamento teórico-científico para la planificación y toma de decisiones respecto a la gestión integral de los recursos hidráulicos de Santiago de Cali y alrededores, experiencia de cálculo que llama la atención puesto que al igual que la desarrollada para río Quindío en el tramo Boquía-Puente Balboa (presentada previamente), sus conclusiones no se fundamentan en un resultado de caudal ecológico y su orden de magnitud, sino que por el contrario describe, mediante comparación directa de dos escenarios, como ha sido afectado el ecosistema hídrico.

Por último en materia nacional se presenta la experiencia de determinación de los caudales ecológicos para el normal desarrollo de la biota acuática en las cuencas media y baja de los **ríos Timba, Claro, Amaime, Tulúa y Pescador** en el departamento del Valle del Cauca<sup>25</sup>; este trabajo es otra muestra clara y sucinta en la cual una autoridad

<sup>25</sup> VÁSQUEZ ZAPATA, Guillermo León et al. Caso 4: Determinación de los caudales ecológicos para el normal desarrollo de la biota acuática, en las cuencas media y baja de los ríos: Timba, Claro, Amaime, Tulua y Pescador, en el departamento del Valle del Cauca. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 311 – 325.

del orden regional como la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), organizó un plan de acción encaminado a la determinación de caudales ecológicos y su aplicación en programas de desarrollo regional relacionados con minería, extracción de material de arrastre, derivación de aguas para riego en programas agrícolas, y en el caso particular del río Pescador, la construcción de una represa que serviría para la captación y almacenamiento de agua del programa SARA-BRUT (Servicio de Abastecimiento Rural de Agua para los municipios de Bolívar, Roldanillo, La Unión, Toro, y otros localizados en el municipio de Bolívar).

En este trabajo y para cada sistema hídrico se analizó el marco conceptual del componente hidrológico (velocidad media de las corrientes, perfiles de las secciones transversales, planos de inundación, etc.), fisicoquímico (concentración de oxígeno disuelto, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, etc.) y biológico (estructura y composición de las comunidades acuáticas epicontinentales, índice de diversidad, de riqueza, de equidad, etc.), componentes analizados en diversas estaciones de muestreo así:

- Río Timba: El Recreo, Puente Timba.
- Río Claro: La Mina, Puente vía Jamundí-Guachinte, La Novillera.
- Río Amaime: Las Salinas, La Arcadia (“bocatoma” para los ingenieros cañeros Manuelita y Providencia), Puente El Placer y Puente vía a Rozo.
- Río Tuluá: “Mateguadua”, Puente entrada a la ciudad de Tuluá, Papayal (“bocas del Tuluá”).
- Río Pescador: Puente vía La Primavera (confluencia río Pescador y Calamar), balneario Club de Leones, puente salida de la ciudad de Bolívar (vía Robledo-Bolívar-Roldanillo).

Con fundamento en el marco conceptual de los 3 componentes previamente mencionados, el grupo de trabajo estableció por medio de un análisis de correlación múltiple, la relación estadísticamente significativa entre las variaciones ambientales y la dinámica de la comunidad bentónica acuática, aspecto considerado clave para la determinación del caudal mínimo no sólo en términos de oferta hídrica, sino también con base en la identificación de los posibles impactos ambientales que se pueden presentar. Adicionalmente, y del proceso de análisis de resultados, los autores identificaron 2 situaciones para las cuencas entre su parte baja y media, donde esta última se encuentra con menor grado de intervención y por ende con mejor calidad ambiental respecto a la cuenca baja, diferenciación que sirve para el establecimiento de los caudales ecológicos que se presentan a continuación y que son establecidos como un porcentaje fijo de la oferta media de cada corriente.

**Tabla 2. Caudales ecológicos en las cuencas media y baja de los ríos Timba, Claro, Amaime, Tuluá y Pescador**

RÍO	Cuenca media			Cuenca baja		
	Promedio (m <sup>3</sup> /s)	C. ecológico (m <sup>3</sup> /s)	%	Promedio (m <sup>3</sup> /s)	C. ecológico (m <sup>3</sup> /s)	%
Timba	9.63	5.50	58	21.80	14.0	64.2
Claro	7.00	1.3 – 2.50	19 – 37	3.28	0.5 – 1.40	15 – 43
Amaime	7.72	0.4	5.18	1.80	1.30	72
Tuluá	15.1	6.00	39.73	5.15	1.10 – 2.90	21 – 56
Pescador	0.84	0.40	47.1	0.66	0.20 – 0.40	30 - 61

Fuente: Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime et. al)

Esta experiencia de cálculo cuyos resultados se expresan en términos de flujo como “convencionalmente” se obtienen los resultados de caudal ecológico, es un ejemplo de interés que exhibe un claro escenario en el que se plantea involucrar la temática del caudal ecológico en programas de desarrollo regional relacionados con minería, extracción de material de arrastre, derivación de aguas para riego en programas agrícolas, y en el caso particular del río Pescador, la construcción de una represa que serviría para la captación y almacenamiento de agua del programa SARA-BRUT (Servicio de Abastecimiento Rural de Agua para los municipios de Bolívar, Roldanillo, La Unión, Toro, y otros localizados en el municipio de Bolívar), demostrando así los alcances potenciales que tiene el caudal ecológico en la planificación, uso y aprovechamiento de los recursos hidráulicos a nivel local, regional, nacional y porque no en el ámbito global.

## 4. MARCO CONCEPTUAL

El siguiente marco conceptual establece una serie de términos y su definición, que permiten una mejor comprensión de la información que se consigna en el presente trabajo. Los términos incluidos en el marco conceptual abarcan terminología de índole hidrológica, biológica, ambiental, entre otras.

**Biotopo:** Lugar o parte física que ocupa una comunidad. Es el componente abiótico (no biológico) de un ecosistema.

**Biocenosis:** Comunidad biológica o conjunto de especies que habitan en un área determinada.

**Comunidad bentónica:** Organismos que habitan el fondo de los ecosistemas acuáticos.

**Cuenca hidrográfica:** Entiéndase por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

**Duración:** Tiempo transcurrido entre el inicio y el fin de un proceso o fenómeno cualquier éste sea.

**Ecosistema:** Complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y de su medio no viviente que interactúan como unidad funcional.

**Epicontinental:** Se dice de las zonas marinas próximas a la costa, situadas sobre la plataforma marina.

**Frecuencia:** Número de elementos comprendidos dentro de un intervalo en una distribución determinada. En términos de caudal ésta se refiere a que tan a menudo un caudal es igualado o excedido en un determinado intervalo de tiempo.

**Hábitat:** Lugar de residencia de una población en un medio; lugar en el que de forma específica viven ciertos organismos.

**Ictiofauna:** Conjunto de especies de peces que existen en una determinada región biogeográfica.

**Magnitud:** Cantidad de una variable hidrológica, hidráulica u otra.

**Método:** Procedimiento concreto que permite alcanzar un objetivo.

**Metodología:** Estudio y selección de un método para lograr un objetivo; teoría acerca de un método o el conjunto de éstos.

**Periodicidad:** Se refiere al momento en el cual un determinado fenómeno o evento se presenta.

**Período de retorno:** Tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado por lo menos una vez.

**Resiliencia:** Capacidad intrínseca del ecosistema y/o la comunidad receptora para absorber o asimilar las perturbaciones generadas por la acción del hombre, sin alterar significativamente sus características estructurales y de funcionalidad, permitiéndole regresar a su estado original una vez que la perturbación haya terminado.

**Variabilidad interanual:** Estudio de la variabilidad de una variable hidrológica a nivel anual a lo largo de varios años.

**Variabilidad intranual:** Estudio de la variabilidad de una variable hidrológica a nivel mensual a lo largo de un año calendario.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)

El concepto de caudal ecológico o caudal ambiental (Qe) ha sido tratado por diferentes organizaciones, autores y estudiosos del tema, y existen varias versiones por lo que se considera necesario buscar claridad y unificación de su significado, base conceptual a ser empleada en este trabajo. Las diferentes definiciones tienen en común las siguientes características; más adelante en este numeral se presentan algunas de las definiciones encontradas en la literatura disponible (ver Tabla 3):

- Caudal mínimo requerido para el normal funcionamiento de un ecosistema acuático – **Cantidad**
- Caudal que garantiza una calidad específica del recurso hídrico para el normal desarrollo del ecosistema acuático así como para su uso en actividades de índole socioeconómica – **Calidad**
- Caudal que no es estático sino que por el contrario debe ser dinámico respecto a la variación del régimen hídrico – **Variabilidad temporal y espacial**
- Herramienta de planeación para el aprovechamiento del recursos hídrico – **Herramienta de planificación**

De acuerdo con la World Wildlife Fund (WWF) o Fondo Mundial para la Naturaleza, el caudal ecológico es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que propician bienes y servicios a la sociedad<sup>26</sup>.

Por otra parte, según la empresa ENDESA de Chile en su documento *Introducción al cálculo de caudales ecológicos: un análisis de las tendencias actuales*, la expresión de caudal ecológico, referida a un río o a cualquier otro cauce de agua corriente, es una expresión que puede definirse como el agua mínima necesaria para preservar los valores ecológicos del cauce entendidos como:

- Los hábitats naturales de la flora y fauna;
- Las funciones de dilución de contaminantes;
- Los parámetros climatológicos e hidrológicos;
- El paisaje; y
- Su uso antrópico (por ejemplo la recreación).

---

<sup>26</sup> World Wildlife Fund (WWF). Caudal ecológico: salud al ambiente, agua para la gente. En: Facts Sheet. Octubre de 2010. [en línea]. Octubre de 2011. p. 1.

Adicionalmente, el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT), establece en su documento *Propuestas de reglamentación de Caudales Ambientales* (2011), que el caudal ecológico o ambiental es el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas.

De igual forma, y tal y como se consigna en la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, éste se entiende como la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar los servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales, definición que se aproxima a aquella establecida por la WWF.

Por último, y en aras de presentar de manera sintetizada algunas de las diversas interpretaciones que sobre el concepto de caudal ecológico existen, a continuación se presenta una tabla resumen sobre el tema:

**Tabla 3. Diferentes denominaciones y conceptos de caudal ambiental**

DENOMINACIÓN	CONCEPTO	REFERENCIA
Caudal ecológico mínimo (Sudáfrica – España)	Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajos y mantiene la vida en el río. No aporta una solución ecológica. Se calcula de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica.	King et al. (1999)  Palau (2003)
Caudal ecológico (Chile)	Caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial, para preservar la conservación de los ecosistemas fluviales actuales, en atención a los usos de agua comprometidos, a los requerimientos físicos de la corriente fluvial, para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones tales como, dilución de contaminantes, conducción de sólidos, recarga de acuíferos y mantenimiento de las características paisajísticas del medio.	Ormazabal (2004)
Caudal de mantenimiento (España)	Caudal requerido para mantener todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo la incorporación continua y balanceada de las especies acuáticas y riparias. Es un caudal calculado y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial.	APROMA (2000)
Caudal ambiental (Sudáfrica – España)	Es el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño en el caso de ríos	King & Louw (1998)  Palau (1994)  Dyson et al.

**Tabla 3. Diferentes denominaciones y conceptos de caudal ambiental**

DENOMINACIÓN	CONCEPTO	REFERENCIA
	gravemente alterados. Se considera caudal ambiental la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida.	(2003)
Caudal de acondicionamiento (España)	Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.).	Palau (2003)
Caudal de compensación	Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido.	UNESCO (s.f.)
Régimen de caudal ambiental (Sudáfrica)	Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En él se detallan caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema.	King et al. (1999)

Fuente: Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados (MAVDT & UNAL)

## 5.2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ )

De acuerdo con CARVAJAL ESCOBAR, Yesid y CASTRO HEREDIA, Lina Mabel<sup>27</sup>, para poder establecer el valor del  $Q_e$  existen 4 enfoques:

- Hidrológico
- Valoración hidráulica
- Hidrobiológico
- Holístico

A continuación se presentan algunos de los métodos existentes para el cálculo del caudal ecológico de acuerdo con la clasificación previamente establecida, aclarando que tal y como lo presenta DIEZ-HERNÁNDEZ, Juan Manuel y BURBANO BURBANO, Liliana<sup>28</sup>, existen más de 200 formas para evaluar caudales ecológicos en más de 50 países, por lo cual los métodos se seleccionaron de acuerdo a las características de cada enfoque y buscando que en la selección se lograrán agrupar rasgos comunes o reiterativos (i.e. el

<sup>27</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid y CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Metodologías para determinar el caudal ambiental. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2013. p. 111 – 136.

<sup>28</sup> BURBANO BURBANO, Liliana y DIEZ HERNÁNDEZ, Juan Manuel. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 26, N°1 (Abril, 2006). p. 56 – 68.

método de índices con la CDC agrupa diferentes métodos que requieren calcular caudales de diferente subíndice –  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ ,  $Q_{50}$ , etc.), además de seleccionar métodos considerados “populares” o de uso frecuente.

Se debe mencionar que un quinto enfoque en el cual se agrupan las metodologías que consideran la calidad del agua no se presentan, debido a que éstas son muy pocas y se encuentran en desarrollo.<sup>29</sup>

### **5.2.1. Métodos de enfoque hidrológico**

Los métodos clasificados como hidrológicos permiten calcular el caudal ecológico a partir del tratamiento de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices, se opta por un caudal calificado o establecido previamente como normativo o se calcula a partir de recomendaciones ya establecidas; se recomienda que las series de registro no tengan extensiones inferiores a 20 años y en la medida de lo posible que sean superiores a esta cifra.

Dentro de los métodos existentes se tienen los presentados en la Tabla 4.

---

<sup>29</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT) y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (SEDE BOGOTÁ). Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados: Informe final. Bogotá. Octubre 30 de 2008.

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
Método del IDEAM (Resol. 865/04) <sup>30</sup> Colombia	Sugiere realizar la estimación de un Qe constante igual a un porcentaje de descuento o porcentaje del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente bajo estudio. El porcentaje de descuento que establece el IDEAM es del 25%.	Para su establecimiento se requiere de una serie de caudales a partir de la cual para cada mes, de Enero a Diciembre, se establece su promedio y del menor valor intranual se calcula el 25% de su magnitud y que representa el Qe; ver ejemplo de cálculo presentado en el capítulo 8.	Registro de caudales medios mensuales multianuales
Estudio Nacional del Agua (ENA, 2000) Colombia	El Estudio Nacional del Agua (2000) establece el Qe como el caudal medio diario promedio de 5 a 10 años cuya duración es igual o mayor del 97.5%, que se comprueba corresponde a un tiempo de retorno (Tr) de 2.3 años.	Con el registro de caudales medios diarios y empleando las ecuaciones de la Tabla 11, se determina el caudal con duración igual o mayor al 97.5% del tiempo y éste se define como el Qe; para el siguiente método se expone una explicación más detallada respecto al procedimiento de cálculo del $Q \geq 97.5\%$ del tiempo así como en el capítulo 8.	Registro de caudales medios diarios multianuales
Proyecto de Ley del Agua de 2005 Colombia	El artículo 21 del proyecto de Ley del Agua dicta que:  <i>Los caudales ecológicos para cada cuerpo de agua o tramo del mismo serán fijados por las autoridades ambientales competentes, de acuerdo con los criterios que establezca el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, previo concepto del Consejo Nacional del Agua, y para ello se requerirá la realización de estudios técnicos que soporten la decisión de las autoridades ambientales. Mientras no se señale el caudal para una cuenca o tramo de la misma, se considerará como tal el caudal de permanencia en la fuente durante el 95% del año.</i>	Su cálculo consiste en utilizar las fórmulas de la Tabla 11 (plotting fórmulas), para lo cual se requiere contar con una serie de caudales diarios, mensuales o anuales a nivel multianual ordenando los valores de mayor a menor y a partir de los cuales se puede establecer el caudal de permanencia en la fuente durante el 95% del tiempo.  Supónganse los siguientes datos como ejemplo de cálculo:  <b>Número total de registros - n: 30</b>	Registro de caudales diarios, mensuales o anuales a nivel multianual.

<sup>30</sup> El criterio del 25% de descuento del IDEAM se consigna en la resolución 865 de 2004, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones, puntualmente en el apartado titulado METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ, numeral 3.4.2.

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

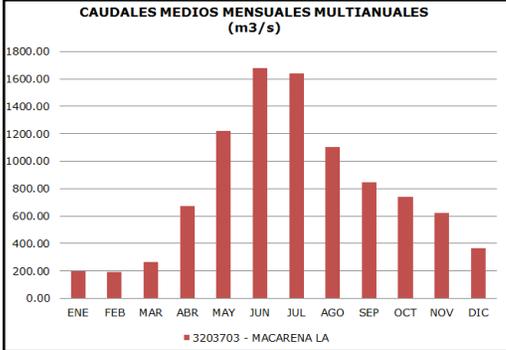
DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO																																	
		<table border="1" data-bbox="1100 456 1623 802"> <thead> <tr> <th>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</th> <th>Orden - m</th> <th>Prob. Exc. (%)<sup>31</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20</td><td>1</td><td>3.33</td></tr> <tr><td>18</td><td>2</td><td>6.67</td></tr> <tr><td>17</td><td>3</td><td>10.00</td></tr> <tr><td>10</td><td>4</td><td>13.33</td></tr> <tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr> <tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr> <tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr> <tr><td>7</td><td>28</td><td>93.33</td></tr> <tr><td>4</td><td>29</td><td>96.67</td></tr> <tr><td>2</td><td>30</td><td>100</td></tr> </tbody> </table> <p data-bbox="1100 834 1623 889">En este caso el caudal con permanencia en la fuente del 95% sería 5.50 m<sup>3</sup>/s.</p>	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Orden - m	Prob. Exc. (%) <sup>31</sup>	20	1	3.33	18	2	6.67	17	3	10.00	10	4	13.33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	7	28	93.33	4	29	96.67	2	30	100	
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Orden - m	Prob. Exc. (%) <sup>31</sup>																																		
20	1	3.33																																		
18	2	6.67																																		
17	3	10.00																																		
10	4	13.33																																		
.	.	.																																		
.	.	.																																		
.	.	.																																		
7	28	93.33																																		
4	29	96.67																																		
2	30	100																																		
Código del medio ambiente francés	En general, la Ley N° 2006-1772 del 30 de Diciembre de 2006 - art. 6 JORF 31 Diciembre 2006, establece como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual calculado para un período mínimo de 5 años.	Supóngase que el caudal promedio interanual es de 20 m <sup>3</sup> /s, por lo tanto el Qe de acuerdo con el código ambiental francés será de 2 m <sup>3</sup> /s.	Registros de caudales promedios anuales para un periodo de mínimo 5 años																																	
Índices con la curva de duración de caudales	La curva se construye a partir de los datos de caudales diarios, mensuales o anuales donde se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido (Silveira & Silveira, 2003; Jamett Dominguez & Rodrigues Finotti, 2005). En la siguiente tabla se muestran los diferentes usos que se han dado a los índices sacados a partir de las Curvas de Duración de Caudales (CDC).	La Curva de Duración de Caudales (CDC) se construye calculando para una serie de datos de caudal la probabilidad de excedencia de los mismos empleando las fórmulas de la Tabla 11. Una vez se tiene una pareja de Q vs P (X≥x) se puede construir la CDC a partir de la cual se puede conocer el caudal o índice de flujo deseado.  Para observar un ejemplo de cálculo	Registros de caudales diarios, mensuales o anuales a nivel multianual																																	

<sup>31</sup> Para el ejemplo se emplea la fórmula de California (ver Tabla 11).

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="443 459 583 516">ÍNDICE DE FLUJO</th> <th data-bbox="583 459 1064 516">USO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="443 516 583 768" rowspan="4">Q<sub>95</sub></td> <td data-bbox="583 516 1064 597">Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 597 1064 654">Condición mínima mensual en los puntos de descarga.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 654 1064 711">Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 711 1064 768">Usado para mantener la variación estacional mensual.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="443 768 583 1052" rowspan="5">Q<sub>90</sub></td> <td data-bbox="583 768 1064 800">Usado como índice de caudal base.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 800 1064 857">Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 857 1064 914">Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 914 1064 971">Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 971 1064 1052">Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="443 1052 583 1187" rowspan="3">Q<sub>50</sub> Mensual</td> <td data-bbox="583 1052 1064 1109">Caudal base para el manejo y planeación del recurso.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 1109 1064 1141">Usado para proteger la biota acuática.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="583 1141 1064 1187">Mínimo caudal recomendado en río con represas.</td> </tr> </tbody> </table>	ÍNDICE DE FLUJO	USO	Q <sub>95</sub>	Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas.	Condición mínima mensual en los puntos de descarga.	Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual.	Usado para mantener la variación estacional mensual.	Q <sub>90</sub>	Usado como índice de caudal base.	Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.	Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático.	Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante.	Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base.	Q <sub>50</sub> Mensual	Caudal base para el manejo y planeación del recurso.	Usado para proteger la biota acuática.	Mínimo caudal recomendado en río con represas.	consultar el capítulo 8.	
ÍNDICE DE FLUJO	USO																			
Q <sub>95</sub>	Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas.																			
	Condición mínima mensual en los puntos de descarga.																			
	Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual.																			
	Usado para mantener la variación estacional mensual.																			
Q <sub>90</sub>	Usado como índice de caudal base.																			
	Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.																			
	Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático.																			
	Caudal crítico considerado como el caudal mínimo limitante.																			
	Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base.																			
Q <sub>50</sub> Mensual	Caudal base para el manejo y planeación del recurso.																			
	Usado para proteger la biota acuática.																			
	Mínimo caudal recomendado en río con represas.																			

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO																													
<p>Método Montana (Tennat 1976)</p> <p>Estados Unidos de América</p>	<p>Considera la estacionalidad y determinación de los Qe a partir de la definición de un periodo seco y otro húmedo, para los cuales en cada caso el Qe será una fracción del caudal medio multianual que depende del estado ecológico deseado.</p> <p>A continuación se presenta una tabla que aclara lo expuesto con antelación:</p> <table border="1" data-bbox="451 865 1052 1263"> <thead> <tr> <th rowspan="2">DESCRIPCIÓN</th> <th colspan="2">VALORES RECOMENDADOS PARA EL Qe (%)</th> </tr> <tr> <th>Periodo húmedo</th> <th>Periodo seco</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lavado o máximo</td> <td colspan="2">200</td> </tr> <tr> <td>Rango óptimo</td> <td colspan="2">60 – 100</td> </tr> <tr> <td>Excepcional</td> <td>40</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Excelente</td> <td>30</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Bueno</td> <td>20</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Regular</td> <td>10</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Pobre o mínimo</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Degradación severa</td> <td colspan="2">10 del caudal promedio al caudal mínimo</td> </tr> </tbody> </table>	DESCRIPCIÓN	VALORES RECOMENDADOS PARA EL Qe (%)		Periodo húmedo	Periodo seco	Lavado o máximo	200		Rango óptimo	60 – 100		Excepcional	40	60	Excelente	30	50	Bueno	20	40	Regular	10	30	Pobre o mínimo	10	10	Degradación severa	10 del caudal promedio al caudal mínimo		<p>Este método implica determinar para un registro multianual de caudales medios mensuales, el caudal promedio y de éste se establece un porcentaje que deberá ser respetado en la corriente de acuerdo con el estado deseado y que se expone en la tabla a la izquierda (ver descripción).</p> <p>Para establecer el periodo húmedo o seco se emplean gráficas como la siguiente y que muestra la variación intranual de los caudales, a partir de la cual se establece un periodo de caudales máximos o húmedo y uno de caudales de estiaje o seco.</p>  <p>Ejemplo, supóngase un Q promedio de 10 m<sup>3</sup>/s y se desea un estado ecológico bueno, quiere decir que para un periodo húmedo deberá garantizarse en la corriente un caudal de 2 m<sup>3</sup>/s y para el seco de 4 m<sup>3</sup>/s.</p>	<p>Registro de caudales medios mensuales multianuales</p>
DESCRIPCIÓN	VALORES RECOMENDADOS PARA EL Qe (%)																															
	Periodo húmedo	Periodo seco																														
Lavado o máximo	200																															
Rango óptimo	60 – 100																															
Excepcional	40	60																														
Excelente	30	50																														
Bueno	20	40																														
Regular	10	30																														
Pobre o mínimo	10	10																														
Degradación severa	10 del caudal promedio al caudal mínimo																															

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO												
<p>Método de Hoppe</p> <p>Estados Unidos de América</p>	<p>Uno de los primeros métodos en desarrollarse y en el que se reconocen la relación entre los percentiles de la Curva de Duración de Caudales (CDC) y las condiciones favorables para la biota. Con el uso de la CDC se define unos caudales mínimos asociados a diferentes estadios de crecimiento como se muestra a continuación:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de caudales</th> <th>% año <math>\geq</math></th> <th>N° días <math>\geq</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lavado</td> <td>17</td> <td>Q<sub>62</sub></td> </tr> <tr> <td>Freza – desove</td> <td>40</td> <td>Q<sub>147</sub></td> </tr> <tr> <td>Producción y refugio</td> <td>80</td> <td>Q<sub>294</sub></td> </tr> </tbody> </table> <p>Una de sus desventajas es que determina caudales para la trucha a partir de experiencias en el río Frying Pan de Colorado, cuya hidrología es propia de la región donde se desarrolla.</p>	Tipo de caudales	% año $\geq$	N° días $\geq$	Lavado	17	Q <sub>62</sub>	Freza – desove	40	Q <sub>147</sub>	Producción y refugio	80	Q <sub>294</sub>	<p>Empleando una serie de registro de caudales de acuerdo con lo especificado en la columna de la derecha, se determinan los caudales Q<sub>62</sub> (caudal de lavado), Q<sub>147</sub> (caudal de freza – desove) y Q<sub>294</sub> (caudal de producción y refugio) construyendo para ello la curva CDC empleando las fórmulas de la Tabla 11, ordenando los registro de mayor a menor. De acuerdo con la condición que se desea para la biota se determina el caudal requerido.</p> <p>Para construir la CDC se puede consultar el procedimiento expuesto para el método de <i>Índices con la curva de duración de caudales</i> explicado previamente.</p>	<p>Registros de caudales diarios, mensuales o anuales a nivel multianual</p>
Tipo de caudales	% año $\geq$	N° días $\geq$													
Lavado	17	Q <sub>62</sub>													
Freza – desove	40	Q <sub>147</sub>													
Producción y refugio	80	Q <sub>294</sub>													
<p>Método del caudal medio base</p> <p>United States Fish and Wildlife Service, 1981</p>	<p>Para series con registros de más de 25 años, el Qe se define como la mediana de los caudales medios mensuales para el mes más seco.</p>	<p>Su cálculo requiere contar con el registro de caudales medios mensuales, y para el mes con el registro promedio más bajo se calcula la media de los datos.</p>	<p>Caudales medios mensuales multianuales</p>												
<p>Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP, 1974)</p> <p>Estados Unidos de América</p>	<p>Qe determinado a nivel mensual, para condiciones hidrológicas normales y para ríos con especies salmónidas, determinado a partir de las Curvas de Duración de Caudales (CDC) medios diarios para el mes analizado, considerando para meses secos el Qe como el Q<sub>90</sub> y para los meses húmedos el Q<sub>50</sub>.</p>	<p>Su cálculo depende de la construcción de la CDC de acuerdo a lo expuesto para el método de <i>Índices con la curva de duración de caudales</i> explicado previamente, con la diferencia que la CDC se construye mes a mes y de ésta se puede establecer el Q<sub>90</sub>, Q<sub>80</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>40</sub> y/o Q<sub>17</sub>.</p>	<p>Caudales medio diarios con longitud mayor de 20 años</p>												

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
		El establecimiento de los meses secos o húmedos se realiza según el procedimiento señalado para el método de Montana.	
Método de Texas (Bounds y Lyon, 1979)  Estados Unidos de América	Estima durante períodos húmedos y secos los Qe como un porcentaje de la mediana de los caudales medios mensuales (0.6 y 0.4 respectivamente).	Supóngase que la mediana de una serie de caudales medios mensuales multianuales es 15 m <sup>3</sup> /s, entonces el Qe para el período húmedo y seco de acuerdo con el método de Texas será 9 y 6 m <sup>3</sup> /s respectivamente.  El establecimiento de los períodos secos o húmedos se realiza según el procedimiento señalado para el método de Montana.	Registro de caudales medios mensuales multianuales
Método 7Q10 (Chiang y Jhonson, 1976)  Estados Unidos de América	El Qe se determina a partir del cálculo del caudal mínimo promedio con duración de 7 días y período de retorno de 10 años.  Esta metodología proporciona el valor de un caudal mínimo estadístico, que corresponde al valor que en promedio de cada diez años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivas.	Para calcular el valor del 7Q10 es necesario primero definir los valores medios móviles con ventana de 7 días, que representan los caudales promedios semanales, y posteriormente definir el valor mínimo de cada año.  Posteriormente, los datos de valores mínimos anuales se ajustan a una función de probabilidad y se identifica la magnitud de flujo que se da al décimo percentil de la distribución de probabilidad seleccionada. <sup>32</sup>	Registro de caudales mínimos diarios multianuales

<sup>32</sup> REDONDO TILANO, Sergio Andrés. Incertidumbre hidrológica en la estimación de caudales ambientales mediante metodologías basadas en series históricas. Bogotá, 2011. Tesis de investigación (Magíster en ingeniería – Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO								
<p>Método de aproximación por rangos de variabilidad – RVA (Richter et al., 1996)</p> <p>Estados Unidos de América</p>	<p>Desarrollado con el fin de conservar en la estimación de los Qe la variabilidad hidrológica natural, a partir del establecimiento de 32 Índices de Alteración Hidrológica (IHA) o parámetros.</p> <p>EL RVA por sus siglas en inglés, Range Variability Approach, tiene como meta orientar el diseño de estrategias en el manejo de ríos regulados especialmente por la construcción de represas y/o hidroeléctricas, y de esta manera mantener la biodiversidad nativa del ecosistema acuático y su integridad. Para su análisis se requieren registros de caudal antes de la construcción de la represa para describir la variabilidad hidrológica del régimen natural, la cual se compara con los registros posteriores a la entrada en funcionamiento de la represa y se determina la gravedad de la alteración, clasificada en 4 categorías: suave, moderada, media y severa. Los resultados se usan para definir políticas de gestión en el río alterado.</p> <p>Los 32 índices que se necesitan para determinar la gravedad de la alteración para un sistema hídrico regulado son los siguientes y a partir del análisis de éstos se determina el Qe por mantener.</p> <table border="1" data-bbox="548 886 1509 1450"> <thead> <tr> <th data-bbox="548 886 884 915">Parámetro</th> <th data-bbox="888 886 1509 915">Cálculo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="548 919 884 1040">                     Magnitud de condiciones mensuales                       (12 parámetros)                 </td> <td data-bbox="888 919 1509 1040">                     Media o mediana de cada mes calendario                 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="548 1044 884 1360">                     Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales                       (10 parámetros)                 </td> <td data-bbox="888 1044 1509 1360">                     Mínimo anual promedio de 1 día                      Mínimo anual promedio de 3 días                      Mínimo anual promedio de 7 días                      Mínimo anual promedio de 30 días                      Mínimo anual promedio de 90 días                      Máximo anual promedio de 1 día                      Máximo anual promedio de 3 días                      Máximo anual promedio de 7 días                      Máximo anual promedio de 30 días                      Máximo anual promedio de 90 días                 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="548 1364 884 1450">                     Duración de las condiciones extremas anuales                 </td> <td data-bbox="888 1364 1509 1450">                     Día Juliano del máximo – 1 día                      Día Juliano del mínimo – 1 día                 </td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Cálculo	Magnitud de condiciones mensuales  (12 parámetros)	Media o mediana de cada mes calendario	Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales  (10 parámetros)	Mínimo anual promedio de 1 día Mínimo anual promedio de 3 días Mínimo anual promedio de 7 días Mínimo anual promedio de 30 días Mínimo anual promedio de 90 días Máximo anual promedio de 1 día Máximo anual promedio de 3 días Máximo anual promedio de 7 días Máximo anual promedio de 30 días Máximo anual promedio de 90 días	Duración de las condiciones extremas anuales	Día Juliano del máximo – 1 día Día Juliano del mínimo – 1 día		<p>Registro de caudales diarios superior a 20 años</p>
Parámetro	Cálculo										
Magnitud de condiciones mensuales  (12 parámetros)	Media o mediana de cada mes calendario										
Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales  (10 parámetros)	Mínimo anual promedio de 1 día Mínimo anual promedio de 3 días Mínimo anual promedio de 7 días Mínimo anual promedio de 30 días Mínimo anual promedio de 90 días Máximo anual promedio de 1 día Máximo anual promedio de 3 días Máximo anual promedio de 7 días Máximo anual promedio de 30 días Máximo anual promedio de 90 días										
Duración de las condiciones extremas anuales	Día Juliano del máximo – 1 día Día Juliano del mínimo – 1 día										

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN		PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
		<p>(2 parámetros)</p> <p>Frecuencia y duración de impulsos altos/bajos</p> <p>(4 parámetros)</p>	<p>Número de impulsos bajos anuales</p> <p>Duración promedio de los impulsos bajos (días)</p> <p>Número de impulsos altos anuales</p> <p>Duración promedio de los impulsos altos (días)</p>	
<p>Hughes and Hannart Method</p> <p>Sudáfrica</p>	<p>Método hidrológico desarrollado sobre la base de caudales ambientales estimados a partir de varios estudios ejecutados bajo el enfoque holístico. Este método, de acuerdo con los autores, Hughes and Hannart, puede ser usado en la denominada Southern Africa.</p> <p>El método tiene en cuenta una serie de clases ambientales u objetivos de calidad, clases que son determinadas por las autoridades o aquellas personas encargadas de tomar decisiones. En el caso de Sudáfrica, 4 clases se han definido y son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clase A: ríos con hábitats no modificados y que tienen condiciones naturales.</li> <li>• Clase B: río con pequeñas modificaciones y grandes condiciones naturales.</li> </ul>	<p>Rango / frecuencia de los cambios en la condición del agua</p> <p>(4 parámetros)</p>	<p>Teniendo en cuenta la información presentada bajo la columna a la izquierda, Hughes and Hannart han propuesto las siguientes expresiones para determinar caudales ambientales:</p> <p>La siguiente ecuación refleja el decrecimiento de caudales ambientales con el incremento en la variabilidad de flujo (CVB):</p> $MLIFR = LP4 + \frac{(LP1 * LP2)}{(CVB^{LP3})^{(1-LP1)}}$ <p>Donde,</p> <p>MLIFR es el caudal ambiental expresado</p>	<p>Registros de caudales diarios, estimación de parámetros de acuerdo a las clases ambientales deseadas.</p>

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clase C: ríos con moderadas modificaciones y con ecosistemas sin cambios.</li> <li>• Clase D: ríos con modificaciones que han causado pérdidas substanciales de hábitat o degradación.</li> </ul> <p>El método asume que el caudal ambiental decrece con incrementos en la variabilidad del flujo, comportamiento que se tiene en cuenta a partir de un coeficiente de variación de flujo mensual (a) para 3 épocas húmedas (Enero a Marzo), y un coeficiente de variación de flujo mensual (b) para 3 épocas secas (Septiembre a Noviembre).</p> <p>Adicionalmente el método incluye un índice de flujo base o Base Flow Index (BFI) por el cual es dividido el promedio de a y b para dar un índice CVB que Hughes and Hannart usan para predecir caudales ambientales.</p> <p>Los caudales ambientales son expresados como porcentajes de la escorrentía media anual o Mean Annual Runoff (MAR).</p>	<p>como porcentaje de la MAR, y LP1, LP2, LP3, LP4 son parámetros que dependen de las clases ambientales deseadas.</p> <p>En regiones semiáridas, la mayoría de flujos grandes se deben a eventos aislados de lluvia que incrementan la variabilidad de flujo o caudal, por lo cual para esta condición de alta variabilidad de flujo e incremento de caudal, el caudal ambiental está dada por:</p> $MHIFR = \gamma * HP2 + HP3$ <p>Si CVB&gt;15 entonces,</p> $MHIFR = (\gamma * HP2 + HP3) + (CVB - 15) * HP4$ <p>Donde,</p> <p>MHIFR es el caudal ambiental expresado como porcentaje de la MAR, HP4, HP3 y HP4 son parámetros que depende de la clase ambiental deseada, mientras <math>\gamma</math> es función de CVB y otro parámetro HP1.</p>	
Legislación Suiza	<p>Propone algoritmos constituidos por un caudal mínimo base y un caudal complementario variable en función del Q347 (caudal superado 347 días del año), además hace una diferencia para encontrar el caudal mínimo, si éste es para aguas piscícolas o no piscícolas. Para aguas no piscícolas fija como caudal mínimo el valor de 50L/s o el 35% del Q347 siempre</p>	<p>Este método implica a partir de series de caudales medios diarios, determinar el Q347 el cual puede conocerse mediante el uso de las ecuaciones presentadas en la Tabla 11, a partir de las cuales se puede establecer el caudal que es igualado o superado el 95% del tiempo (Q347).</p>	<p>Registro de caudales medios diarios.</p> <p>En caso de no contarse con registros de caudales medios</p>

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO																											
	<p>que Q347 sea inferior a 1m<sup>3</sup>/s. Para aguas piscícolas se especifican valores de caudal mínimo en función de los valores de Q347 así:</p> <table border="1" data-bbox="436 548 1066 1057"> <thead> <tr> <th data-bbox="436 548 630 605">Aguas no piscícolas</th> <th colspan="3" data-bbox="630 548 1066 605">Aguas piscícolas</th> </tr> <tr> <th data-bbox="436 605 630 662">Qmin (L/s)</th> <th data-bbox="630 605 779 662">Q347(L/s)</th> <th data-bbox="779 605 919 662">Qmín(L/s)</th> <th data-bbox="919 605 1066 662">Caudal adicional</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="436 662 630 1057" rowspan="6">50 o el 35% del Q347sí y sólo sí Q347&lt;1 m<sup>3</sup>/s</td> <td data-bbox="630 662 779 719">≤ 60</td> <td data-bbox="779 662 919 719">50</td> <td data-bbox="919 662 1066 719">8L/s por cada10L/s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="630 719 779 776">≤ 160</td> <td data-bbox="779 719 919 776">130</td> <td data-bbox="919 719 1066 776">4.4L/s por cada 10L/s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="630 776 779 833">≤ 560</td> <td data-bbox="779 776 919 833">280</td> <td data-bbox="919 776 1066 833">31L/s por cada 100L/s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="630 833 779 889">≤ 2500</td> <td data-bbox="779 833 919 889">900</td> <td data-bbox="919 833 1066 889">21.3L/s por cada 10L/s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="630 889 779 946">≤ 10000</td> <td data-bbox="779 889 919 946">2500</td> <td data-bbox="919 889 1066 946">150L/s por cada 1000L/s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="630 946 779 1057">≤ 60000</td> <td data-bbox="779 946 919 1057">10000</td> <td data-bbox="919 946 1066 1057">0</td> </tr> </tbody> </table> <p>Para calcular el valor de Q347 la ley Suiza propone, para simplificar el cálculo, el uso de la siguiente ecuación que se emplea en el caso que no existan caudales medios diarios pero se cuente con información sobre el caudal medio anual:</p> $Q_{347} = \frac{a_o Q_{ma}}{10}$ <p>Donde <math>a_o</math> es un coeficiente que puede tomar los valores de 0.5, 1, 1.5 y 1.8, sin especificar en qué casos se utiliza cada uno de ellos, y <math>Q_{ma}</math> es el caudal</p>	Aguas no piscícolas	Aguas piscícolas			Qmin (L/s)	Q347(L/s)	Qmín(L/s)	Caudal adicional	50 o el 35% del Q347sí y sólo sí Q347<1 m <sup>3</sup> /s	≤ 60	50	8L/s por cada10L/s	≤ 160	130	4.4L/s por cada 10L/s	≤ 560	280	31L/s por cada 100L/s	≤ 2500	900	21.3L/s por cada 10L/s	≤ 10000	2500	150L/s por cada 1000L/s	≤ 60000	10000	0	<p>Determinado el valor de Q347 se establece el valor del caudal mínimo o ecológico para lo cual a continuación se presenta el siguiente ejemplo.</p> <p>Suponiendo que el Q347 es 10m<sup>3</sup>/s, el caudal mínimo o Qe de la corriente será 50 L/s para aguas no piscícolas, y será 58 L/s para aguas piscícolas.</p>	<p>diarios, se puede emplear el algoritmo presentado en la columna izquierda (descripción) contando con registros de caudales medios anuales.</p>
Aguas no piscícolas	Aguas piscícolas																													
Qmin (L/s)	Q347(L/s)	Qmín(L/s)	Caudal adicional																											
50 o el 35% del Q347sí y sólo sí Q347<1 m <sup>3</sup> /s	≤ 60	50	8L/s por cada10L/s																											
	≤ 160	130	4.4L/s por cada 10L/s																											
	≤ 560	280	31L/s por cada 100L/s																											
	≤ 2500	900	21.3L/s por cada 10L/s																											
	≤ 10000	2500	150L/s por cada 1000L/s																											
	≤ 60000	10000	0																											

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	medio anual.		
Ley Vasca	La Dirección general de obras públicas el país Vasco en 1980 estimó un caudal de circulación permanente para los cauces regulados consistente en el 10% del caudal medio anual.	Supóngase que el caudal medio de un año es 20 m <sup>3</sup> /s, lo cual quiere decir que el caudal ecológico será 2 m <sup>3</sup> /s.	Registro de caudales medios a nivel anual
Legislación Asturiana – Principado de Asturias	<p>Esta legislación, que se fundamenta en la legislación Suiza con especial atención en la migración y potenciación de la producción de salmónidos (<i>Salmo trutta</i> y <i>Salmo salar</i>), define el caudal ecológico como el mayor valor de caudal dado por las siguientes cuatro ecuaciones que se expresan en L/s.</p> $Q_{ec} = 50$ $Q_{ec} = \frac{150Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2}$ $Q_{ec} = 0.35Q_{347}$ $Q_{ec} = 0.25Q_{347} + 75$ <p>En caso de no contar con información de caudales medios diarios el <math>Q_{347}</math> se calcula de la siguiente manera:</p> $Q_{347} = \frac{a_o Q_{ma}}{10}$ <p>Donde,</p> <p><math>a_o</math>: coeficiente que puede tomar los valores 0.5, 1, 1.5 y 1.8 sin especificar en qué casos se</p>	<p>El caudal <math>Q_{347}</math> se calcula como ha sido presentado previamente. Asumiendo que el caudal <math>Q_{347}</math> es igual a 0.1m<sup>3</sup>/s, indicaría que el caudal ecológico es:</p> $Q_{ec} = 50 \text{ L/s}$ $Q_{ec} = \frac{150 * 100}{(\ln 100)^2} = 707.29 \text{ L/s}$ $Q_{ec} = 0.35 * 100 = 35 \text{ L/s}$ $Q_{ec} = 0.25 * 100 + 75 = 100 \text{ L/s}$ <p>Por lo anterior el Qe será igual a 0.71 m<sup>3</sup>/s.</p>	Registro de caudales medios diarios y/o caudales medios a nivel anual

**Tabla 4. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	emplea uno u otro. $Q_{ma}$ : Caudal medio anual.		

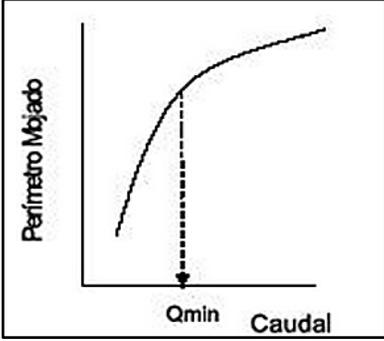
Fuente: Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados (MAVDT & UNAL), Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos (KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel), Estudio de Impacto Ambiental 08480-03-01-IISE-EIA-001, versión 0 (COLBÚN – INGENDESA) , Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas (BURBANO BURBANO, Liliana y DIEZ HERNÁNDEZ, Juan Manuel) & Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe (MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E; MAKUKIRA, H.).

### **5.2.2. Métodos de valoración hidráulica**

Los métodos de valoración hidráulica consideran la relación entre el caudal y las características físicas del cauce en el cual se desarrollan una serie de interacciones entre el medio biótico y abiótico y que configuran el ecosistema existente. Dentro de las relaciones que se estudian entre el caudal y las características físicas del cauce se encuentran el perímetro mojado ( $P$ ), la velocidad ( $V$ ) y la profundidad de la lámina de agua ( $Y$ ), el sustrato, la cobertura vegetal, entre otras. Los métodos de valoración hidráulica se basan en el estudio de una o más secciones transversales del cauce bajo estudio.

Dentro de los métodos bajo el enfoque de valoración hidráulica considerados se tienen los siguientes:

**Tabla 5. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidráulico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
Perímetro mojado	<p>Este método relaciona el caudal (Q) que transporta una corriente con el perímetro mojado (P) asociado, planteando que el punto de inflexión de la relación perímetro mojado-caudal es el punto donde se maximiza el hábitat usable por las especies del ecosistema acuático bajo estudio.</p>  <p><b>Figura 1. Método del perímetro mojado</b></p>	<p>Este procedimiento requiere relacionar una serie de registros de caudal que podrán obtenerse de mediciones directas o por métodos indirectos como los presentados en el numeral 5.4, así como la batimetría del transecto de interés. Una vez se cuenta con esta información, se determina para cada caudal su perímetro respectivo y se construye la curva P vs Q con los pares de datos hasta encontrar el punto de inflexión.</p> <p>Un ejemplo de cálculo se presenta en el capítulo 8.</p>	<p>Selección de un transecto donde se desea determinar la relación P vs Q, así como la batimetría de éste y un rango de caudales a trabajar.</p>
Múltiples transectos	<p>A diferencia del método del perímetro mojado, el método de múltiples transectos evalúa varias secciones transversales de una corriente bajo estudio. En cada una de estas secciones se miden, bajo diferentes Q la velocidad (V), el nivel de la lámina de agua (Y), el sustrato y la cobertura vegetal. Estas variables se someten a modelación hidráulica para determinar los cambios en las mismas, lo cual da una idea de la respuesta del río a las variaciones de Q para posteriormente determinar la condición de favorabilidad para establecer un Qe; la condición de favorabilidad puede responder a un caudal que garantice el</p>	<p>En el caso de múltiples transectos, se requiere la medición directa de caudales (aforos líquidos y batimetrías) así como determinar en simultánea el tipo de sustrato y cobertura vegetal asociada. Una vez recopilada esta información, de su análisis se determinará el Qe favorable a la corriente, estableciendo como criterio un caudal que ocupe el 10% del cauce, un caudal que genere</p>	<p>Selección de múltiples transectos y secciones transversales del río donde se deben estudiar la variación de la V, Y, sustrato y cobertura vegetal asociada a la corriente.</p>

**Tabla 5. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidráulico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	<p>transporte de sólidos, un caudal que minimice los cambios fisicoquímicos en la corriente por efecto de vertimientos, un caudal que asegure la posibilidad de la recreación pasiva, o aquel caudal que de acuerdo con las características del transecto sea de mayor importancia.</p>	<p>una velocidad que evite estancamientos de agua, un caudal que asegure la irrigación de la vegetación ribereña, o aquel criterio que de acuerdo con las características del transecto sea de mayor importancia.</p>	
<p>Método de Idaho</p>	<p>Formulado a partir de observaciones en varios ríos no vadeables en Idaho (Estados Unidos) para estimar la reducción de hábitat debida a la reducción del caudal circulante. El método no busca establecer caudales mínimos sino caudales recomendados en función del objetivo que se busca, en función de la especie que se estudia. Para encontrar los caudales recomendados se requiere de información de campo como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamientos topográficos de la zona de estudio.</li> <li>• Conocimiento de información en la sección de interés entre la cual se incluye: profundidad, velocidad y tipo de sustrato.</li> </ul> <p>Conocidas las mediciones de campo así como el objetivo/especie de interés, se comparan escenarios de simulación con las necesidades de hábitat para distintas especies animales, florales o especies de interés y en función de éstas se establecen los caudales recomendables.</p>	<p>Este procedimiento de cálculo implica el conocimiento topográfico y batimétrico de la zona de interés, la determinación de los caudales circulantes para la zona, y el establecimiento de las relaciones de profundidad y velocidad del agua. Adicionalmente implica determinar una especie faunística o florística de interés y entorno a la cual se determinará cuál debe ser el Qe de la corriente bajo estudio.</p>	<p>Selección de una zona de estudio y de las secciones transversales de interés, así como selección de una o varias especies de estudio.</p> <p>Conocimiento topográfico e hidráulico de la sección transversal de interés.</p> <p>Modelación hidráulica.</p>
<p>Modelación de simulación hidráulica de White (1976)</p>	<p>En distintas secciones de un tramo se establece la relación algebraica existente entre el perímetro mojado y el caudal circulante. A partir de esta</p>	<p>Este proceso requiere realizar el procedimiento del método del perímetro mojado, con la</p>	<p>La listada para el método del perímetro mojado más una o varias especies de peces</p>

**Tabla 5. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidráulico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	relación, los caudales se establecen teniendo en cuenta las condiciones de freza, cría y migración de ciertas especies de peces.	variación que existen especies faunísticas de peces que deben ser escogidas como objetivo.	objetivo y su estudio para las condiciones de freza, cría y migración.

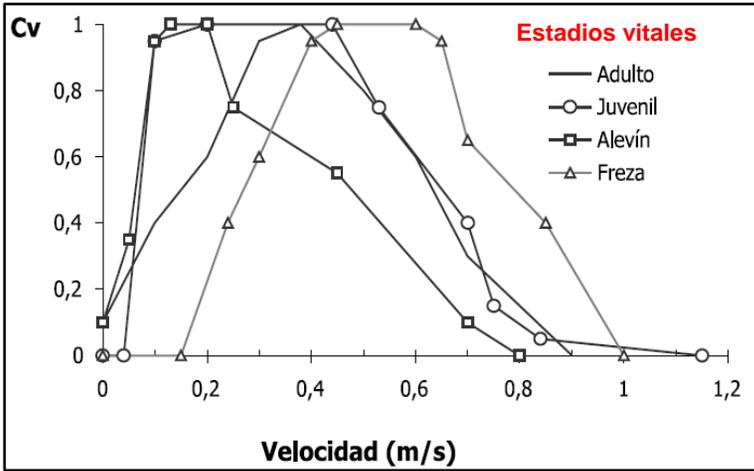
Fuente: Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados (MAVDT & UNAL), Introducción al cálculo de caudales ecológicos: un análisis de las tendencias actuales (ENDESA Chile) & Modelación hidráulica de caudales ecológico (LUIS DOCAMPO PÉREZ)

### **5.2.3. Métodos de enfoque hidrobiológico**

También conocidos como métodos de simulación de hábitat o métodos con enfoque ecológico. Aunque dentro de estos métodos se pueden incluir métodos de cálculo como el del perímetro mojado y que fue previamente presentado (ver Tabla 5), se considera apropiada la división empleada por CANTERA KINTZ, Jaime Ricardo; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid y CASTRO HEREDIA, Lina Mabel en su libro Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos y que es igualmente empleada en este trabajo.

En la Tabla 6 se presentan algunos de los métodos que pueden ser encasillados dentro del enfoque hidrobiológico.

**Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
<p>The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) – US Fish and Wildlife Service</p>	<p>Este método a partir de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos, permite modelar el efecto de los cambios en caudal sobre la estructura de la corriente en estudio, la calidad del agua y la disponibilidad de hábitats y la temperatura del agua.</p> <p>Con la información que se recolecta y que se presenta en la columna a la derecha, se desarrolla una simulación hidráulica en cada sección transversal en la que se predicen los campos de profundidades y velocidades para un rango de caudales definidos.</p> <p>El componente biológico del IFIM se maneja mediante curvas de preferencia, que reproducen el grado de adecuación de un organismo y estadio vital (adulto, juvenil, alevín, freza, etc.) respecto a las variables que determinan su hábitat, evaluado mediante un coeficiente que varía de cero a uno (<math>C_v</math> – el subíndice v responde a las abscisas donde se gráfica la velocidad), donde 1 define el estado máximo de adecuación y 0 un estado pobre o nulo de adecuación.</p>  <p><b>Figura 2. Curva de preferencia referencial de la trucha arco iris (<i>Onchorrhynchus mykiss</i>) para la variable velocidad</b></p> <p>La modelación posterior se realiza combinando los campos simulados de profundidades y velocidades con las curvas de preferencia de la(s) especie(s) objetivo, para obtener las</p>	<p>Inventario de hábitats eco-hidráulicos existentes en un tramo en concreto.</p> <p>Levantamientos topográficos en los tramos de estudio.</p> <p>Reconocimiento de sustrato y medición de velocidades medias (V) de la corriente así como de las profundidades de lámina de agua (Y).</p> <p>Curvas de preferencia asociadas a una variable de estudio (V y/o Y, por ejemplo) y una(s) especie(s) específica(s).</p> <p>Uso del modelo Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) que relaciona el caudal con los datos de hábitat.</p>

**Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	<p>relaciones entre Q y un “índice de hábitat (IH)” a partir de las cuales se determinan los caudales ecológicos convenientes para cada organismo y estadio vital estudiado.</p> <p>Finalmente se debe mencionar que de acuerdo con las curvas IH vs Q que se construyen (ver Figura 3), se identifican los puntos de inflexión donde el cambio de pendiente es más notorio y que representan los caudales mínimos permisibles para la corriente y especie(s) de interés.</p> <div data-bbox="501 609 1377 1156" data-label="Figure"> <p>Figura 3. Relación Q-IH para los cuatro estadios de la trucha común (Salmo trutta)</p> </div> <p>Dado que el uso del IFIM requiere de un sin número de procedimientos de cálculo-trabajo, se invita al lector interesado en la temática a consultar el U.S. Geological Survey (USGS), puntualmente el siguiente link de consulta que presenta bastedad de información al respecto<sup>33</sup>:</p>	

<sup>33</sup> U.S. Geological Survey (USGS). Instream Flow Incremental Methodology (IFIM). [en línea]. Consultado el 24/09/13. Disponible en: <http://www.fort.usgs.gov/products/software/ifim/Default.asp>

**Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	<p><a href="http://www.fort.usgs.gov/products/software/ifim/Default.asp">http://www.fort.usgs.gov/products/software/ifim/Default.asp</a></p>	
<p>Método basado en la geomorfología (Thoms y Sheldom, 2002)</p>	<p>Este método plantea los siguientes pasos para poder establecer el Qe:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinación de la naturaleza física (hábitat) del sistema: a partir de imágenes de sensores remotos, fotografías aéreas, datos históricos y estudios de campo se describe el sistema en múltiples escalas enfatizando e interpretando ecológica y funcionalmente los hábitats físicos dominantes y su conexión.</li> <li>• Determinación de los caudales asociados con los principales hábitats físicos y las funciones ecológicas. Estos análisis se hacen en secciones transversales representativas, en las cuales se establece la relación caudal-hábitat.</li> <li>• Identificación de conductores hidrológicos claves del sistema ribereño y determinación de las implicaciones del uso de los recursos hídricos. Para esto, se define la “firma hidrográfica” del río, la cual depende de la geomorfología, la conectividad longitudinal, los intercambios verticales, la conectividad lateral, los caudales de mantenimiento de los canales, los caudales mínimos y los caudales estacionales. Mediante modelación se analizan los impactos de la utilización de los recursos hídricos sobre la firma hidrográfica y se establece el comportamiento hidrológico a varias escalas temporales (régimen de caudales a más de 100 años, historia de los caudales entre 1 y 100 años y pulsos de inundación de menos de un año).</li> </ul> <p>Establecimiento de opciones de manejo del caudal teniendo en cuenta las características hidrográficas del río para determinar sus opciones de extracción. Aquí es necesario pronosticar si los pulsos de inundación afectarán los niveles de prioridad para la conservación del funcionamiento ecológico y en qué zonas del río ocurrirán. Los pulsos que superen el nivel de prioridad corresponden al caudal que puede ser utilizado en consumo.</p>	<p>Información de tipo geomorfológica, hídrica e hidráulica de los microhábitats que decidan ser estudiados.</p>
<p>Modelo de biomasa de Wyoming (Binns, 182)</p>	<p>Consiste en un modelo de regresión múltiple sin interacciones entre las variables independientes, que relaciona la biomasa piscícola de salmónidos (<math>\text{Kg}/\text{Ha}^{-1}</math>) versus, caudal al final del estío, rango anual de caudal, temperatura del agua, concentración de nitrato (<math>\text{NO}_3^-</math>), velocidad del agua, tipo de sustrato, cobertura, erosión en las orillas y anchura del cauce. Es de gran utilidad para la familia de los salmónidos de Wyoming, cuya extrapolación a otros estados,</p>	<p>Su implementación requiere el estudio de la biomasa de salmónidos, registros de caudales anuales, de temperatura, estudio de calidad de agua para nitratos,</p>

**Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	países y regiones biogeográficas no ha sido comprobada.	batimetrías y monitoreos de la composición del suelo y cobertura vegetal asociada a la(s) corriente(s).
Régimen Estacional de Caudales Ecológicos – RECE (Docampo, 1997)	<p>Este procedimiento de cálculo procede de la siguiente forma, donde se tiene en cuenta procesos hidrológicos e hidráulicos de cálculo así como hidrobiológicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinación del período mínimo para el cual deben estimarse los caudales ecológicos (cada mes, época del año, etc.) y ajuste de la función de distribución estadística de la serie de caudales aforados o simulados del periodo considerado.</li> <li>2. Cálculo del caudal de cambio mediante el primer punto de inflexión no nulo de la curva que ajusta la función de distribución de caudales. Este caudal de cambio está destinado a ser el caudal ecológico de cada periodo, si cumple una serie de criterios biológicos y fisicoquímicos (ver punto 4).</li> <li>3. Modelización Hidráulica que permite establecer la relación entre la hidrología (caudal de cambio) y las características fisicoquímicas y biológicas del ecosistema fluvial<sup>34</sup>.</li> <li>4. Comprobación del cumplimiento de criterios abióticos y biológicos, entre los que destacan: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Vulnerabilidad hidráulica de los cauces a la continuidad del flujo, derivada de la detracción de aguas<sup>35</sup>.</li> </ul> </li> </ol>	<p>Registro de caudales con resolución temporal diaria, mensual, anual o la que decida emplearse.</p> <p>Información batimétrica de la corriente hídrica de interés así como de los planos de inundación que se requieren conocer.</p> <p>Estudio de la cobertura vegetal ribereña.</p> <p>Estudio de especies bentónicas, peces y batracios o aquella especie faunística o vegetal que resulte de interés.</p>

<sup>34</sup> En el siguiente link puede consultarse información acerca de la propuesta de modelación hidráulica que plantea el autor y cuyo nombre - Ingeniería Hidráulica de Ríos y Acequias (IRHA): [http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo/Ingcivil/113/articulo5/modelizacion.html#1](http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/113/articulo5/modelizacion.html#1)

<sup>35</sup> El cálculo de la vulnerabilidad hidráulica puede establecerse de acuerdo con la información presentada en la nota al pie de página anterior.

**Tabla 6. Métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrobiológico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL CÁLCULO
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Irrigación de la vegetación de riberas (conservación del bosque de galería).</li> <li>✓ Conservación de la biodiversidad fluvial, estimada como riqueza de especies de invertebrados del bentos, peces y batracios.</li> <li>✓ Índice de Calidad del Hábitat (ICH) de especies biológicas catalogadas o emblemáticas, si las hubiese. El ICH es la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de una especie (o conjunto de especies) frente a un valor de una variable fisicoquímica, y es equivalente a las curvas de preferencia del hábitat del modelo IFIM (ver Figura 2), de las cuales difiere en dos aspectos fundamentales:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- El ICH se establece no solamente para las variables físicas del cauce (temperatura, calado, velocidad, coberturas, etc.) como lo hace el modelo IFIM, sino también para parámetros químicos (<math>O_2</math>, <math>Ca^{2+}</math>, <math>NO_2^-</math>, <math>NH_3</math>, etc.).</li> <li>- Las curvas de ICH no se obtienen mediante regresión polinómica como en el modelo IFIM, si no aplicando el método estadístico de la máxima verosimilitud a la familia de transformaciones de Box - Cox, 1962, que normaliza la función de distribución de frecuencias acumuladas, y tomando como ecuación universal de la integral de la curva de Gauss la publicada en la revista del Ingeniería Civil número 103 (Docampo, 1996).</li> </ul> </li> </ul>	

Fuente: Introducción al cálculo de caudales ecológicos: un análisis de las tendencias actuales (ENDESA Chile) ,Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas (BURBANO BURBANO, Lilibana y DIEZ HERNÁNDEZ, Juan Manuel) & Modelación hidráulica de caudales ecológico (LUIS DOCAMPO PÉREZ)

#### **5.2.4. Métodos de enfoque holístico**

Estos métodos desarrollados en Australia y Sudáfrica y que reciben también el nombre de métodos funcionales tienen dos enfoques:

- Aproximación “bottom-up”: diseñados para construir un régimen de caudal modificado mediante la adición de componentes de caudal a una línea base de caudal cero.
- Aproximación “top-down”: aborda la pregunta ¿Cuánto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degraden seriamente?

Algunos de los métodos que se enmarcan dentro del enfoque holístico o funcional son los presentados en la Tabla 7; el procedimiento de cálculo no se expone en tanto éste varía de uno a otro grupo de trabajo, se podría decir que es subjetivo a los profesionales involucrados en la determinación del caudal ecológico.

**Tabla 7. Métodos de cálculo del Qe con enfoque holístico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
Evaluación por Grupo de Expertos (EPAM)	<p>Es un método tipo “bottom-up” propuesto en Australia y plantea que un grupo de expertos en varios temas (ecología de peces, macroinvertebrados y geomorfología) deben llegar a un consenso sobre los efectos de los cambios en el caudal sobre el sistema. Este método está enfocado hacia la conservación de peces y requiere pocos datos de campo, confiando en el juicio de profesionales. Es un método subjetivo y simplista en términos ecológicos, al cual no puede realizarse una validación posterior.</p>
Evaluación por Equipo Científico (SPAM-Australia)	<p>También se basa en el trabajo de equipo, pero incorpora una inspección visual, colecta de información de campo y la interpretación de datos en el sitio de estudio. Es un método “bottom-up” derivado del EPAM.</p> <p>Los pasos para llegar a un acuerdo sobre los caudales requeridos son:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificación de criterios manejo por un panel de expertos para 5 componentes principales del ecosistema: peces, árboles, macrófitas, invertebrados y geomorfología.</li> <li>2. Aplicación de criterios para 3 elementos (régimen de caudales, hidrografía y estructura física) a 3 escalas espaciales.</li> <li>3. Taller para elaborar una matriz que permita identificar las respuestas e impactos para cada componente del ecosistema con respecto a cada descriptor, a fin de relacionar el régimen de caudal con la respuesta del ecosistema.</li> </ol>
Aproximación holística	<p>Es un método desarrollado en Australia que sirvió de base al Building Block Methodology (BBM) y parte de los siguientes supuestos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El agua pertenece al ambiente y otros usuarios del agua pueden satisfacerse de la cantidad de agua que el río no requiere.</li> <li>• Los ríos poseen más agua de la que es estrictamente necesaria para el mantenimiento del ecosistema.</li> <li>• Si las características esenciales del régimen de caudal natural se identifican e incorporan adecuadamente en el régimen de caudal modificado, entonces la biota existente y la integridad funcional del ecosistema se mantendrán.</li> </ul> <p>Para alcanzar los objetivos predeterminados de caudal, se hace una construcción sistemática del régimen de caudal modificado (régimen de caudal ecológico), mes a mes y elemento a elemento con base en los datos científicos disponibles. La evaluación detallada del régimen de caudales incluye la generación de curvas de desventaja para examinar las alternativas de uso del recurso hídrico.</p>

**Tabla 7. Métodos de cálculo del Qe con enfoque holístico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
<p>Building Block Methodology (BBM)</p>	<p>Es un método “bottom-up” desarrollado en Sudáfrica y cuyos supuestos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La biota presente en un río está adaptada a las fluctuaciones naturales en el caudal.</li> <li>• Los caudales que no son característicos del río, provocan una perturbación atípica en el ecosistema y pueden cambiar su carácter.</li> <li>• Para mantener la biota y funcionalidad del sistema se deben identificar los componentes principales del régimen de caudal e incorporarlos en el nuevo régimen.</li> </ul> <p>El régimen de caudal se propone teniendo en cuenta la variación natural del río. En una primera fase de esta metodología se realiza un taller de expertos, para el cual se debe organizar la información disponible y se colecta la información necesaria; el equipo de trabajo lo componen ecólogos de peces, de vegetación riparia y macroinvertebrados, especialistas en geomorfología y modelación hidráulica. El grupo de trabajo se encarga de identificar la importancia económica, social y ecológica del río a nivel local, regional, nacional e internacional.</p> <p>El trabajo por desarrollar se puede dividir en 2 fases:</p> <p><b>Primera fase</b></p> <p>Una vez conformado el grupo de trabajo e identificada la importancia económica, social y ecológica del río, se escogen de 1 a 5 transectos en los que se describen detalladamente las características del sustrato, la vegetación riparia y de las macrófitas. El análisis de la información hidrológica disponible se realiza a partir de curvas de duración de caudal y del período de retorno para diferentes magnitudes de inundación. También se estudia la entrada de agua subterránea al sistema. En el análisis de secciones transversales se establece la relación entre el caudal y las características hidráulicas, la morfología del canal y los biotopos. En esta primera fase se define cuál es el estado deseado del sistema y se genera un documento que recopila esta información.</p> <p><b>Segunda fase</b></p> <p>En esta fase el grupo de trabajo desarrolla un trabajo de campo en el que se hace la observación del sistema. A partir de la información disponible se plantea una propuesta de regulación de caudales para cada mes.</p> <p>Aunque la propuesta de regulación de caudales para cada mes la debe proponer el grupo de trabajo asignado y ésta responderá a las características de la zona de estudio determinadas en la primera fase de trabajo, los siguientes pueden ser criterios empleados para la selección de caudales ecológicos:</p>

**Tabla 7. Métodos de cálculo del Qe con enfoque holístico**

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El ciclo de vida de especies faunísticas acuáticas (bentos, perifiton, peces y macrófitas). Así por ejemplo, en las temporadas de desove de peces se debe garantizar su motilidad, por lo cual durante estos meses de desove el caudal ecológico seleccionado debe garantizar niveles de lámina de agua que permitan la movilidad de la ictiofauna.</li> <li>• La supervivencia de especies ícticas que representen algún grado de comercialidad o sustento (pesca artesanal) para los habitantes de la región de estudio. El caudal ecológico en este caso deberá garantizar que las condiciones de hábitat suplan las necesidades de aquellas especies de peces que entran en el comercio local o que son usadas como alimento.</li> <li>• Ciclos vegetativos de las especies riparias, es decir, que en caso tal que existan especies vegetales cuyo ciclo de vida tenga relación con la disponibilidad de agua, ésta deberá garantizarse para aquellos momentos del año en que el ciclo vegetativo se coordina con el ciclo hidrológico.</li> <li>• Navegabilidad. Si en una región las rutas de desplazamiento incluyen las vías acuáticas, la selección de los caudales ecológicos mes a mes debe garantizar que este medio de transporte de importancia para la población pueda ser empleado.</li> </ul> <p>Los criterios expuestos son algunos ejemplos de cómo se fundamentará la variación intranual de caudales ecológicos seleccionados por el grupo de trabajo, y que nuevamente se aclara que la selección de estos caudales estará sujeta al juicio de los profesionales involucrados en el Building Block Methodology.</p>

Fuente: Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados (MAVDT & UNAL)

### 5.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)

A continuación se presentan las ventajas y desventajas de emplear los diferentes métodos de cálculo del caudal ecológico de acuerdo con la bibliografía consultada (ver capítulo 11 BIBLIOGRAFÍA):

**Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes enfoques de cálculo del Qe**

ENFOQUE	HIDROLÓGICO	HIDRÁULICO	HIDROBIOLÓGICO	HOLÍSTICO
<b>Ventajas</b>	<p>Mayor grado de versatilidad en los métodos de cálculo.</p> <p>Facilidad de cálculo.</p> <p>Económicos en su aplicación.</p> <p>Rápidos de emplear; tiempos de trabajo de aproximadamente medio mes.</p> <p>La información que se requiere para su cálculo en la mayoría de casos existe y es de fácil acceso; registros hidrológicos.</p> <p>Registan el comportamiento histórico de las corrientes.</p> <p>Los resultados que se obtienen bajo este enfoque</p>	<p>Permite establecer nexos entre la hidráulica de una corriente (perímetro mojado, profundidad de lámina de agua, velocidad, sustrato, etc.) y el bienestar ecosistémico.</p> <p>Tiempos de trabajo relativamente cortos (2 a 4 meses).</p> <p>Son específicos al lugar de trabajo, a los transectos o secciones hidráulicas trabajadas.</p>	<p>Permiten conocer la respuesta de una especie, normalmente piscícola, a la variación del caudal.</p> <p>Sirven como herramientas específicas de estudio para especies de flora y/o fauna.</p> <p>Interrelacionan las características hidráulicas y ecológicas de las corrientes bajo estudio.</p> <p>Permiten predecir las consecuencias de los cambios físicos sobre las comunidades hidrobiológicas; puede considerarse como una herramienta de evaluación de impacto.</p>	<p>Estos métodos permiten incorporar los modelos de simulación hidrológicos, hidráulicos y/o de hábitat o hidrobiológicos, así como diferentes ramas del saber puestas a trabajar de manera interdisciplinaria, lo cual implica un trabajo de mayor cobertura en la búsqueda de encontrar una condición óptima de los ecosistemas acuáticos que se estudian en función del caudal que dichos ecosistemas transportan; el trabajo holístico se puede considerar el más completo en tanto busca tener en cuenta las múltiples interrelaciones que se presentan en el medio ambiente a nivel biótico, abiótico y socioeconómico.</p> <p>La secuencia en que se desarrollan estas metodologías, de forma rigurosa, organizada y bien estructurada, garantizan la</p>

**Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes enfoques de cálculo del Qe**

ENFOQUE	HIDROLÓGICO	HIDRÁULICO	HIDROBIOLÓGICO	HOLÍSTICO
	pueden ser empleados para otros enfoques (holístico).			reproductibilidad de los resultados <sup>36</sup> .
<b>Desventajas</b>	<p>Puesto que no tienen en cuenta el estudio de las características físicas y biológicas de las corrientes bajo estudio, ello implica que el Qe puede ser subvalorado o sobrevalorado de acuerdo con los requerimientos reales del ecosistema acuático; se asumen vínculos ecológicos.</p> <p>Proporcionan una estimación de caudales relativamente rápida, sin muchos recursos pero de baja resolución.</p> <p>Algunos métodos como el de Tennant fueron desarrollados para sitios específicos así que su aplicación debe hacerse con precaución en regiones que</p>	<p>Se asumen vínculos ecológicos que no se comprueban, caso contrario para las metodologías con enfoque hidrobiológico.</p> <p>Implica mayor inversión económica respecto a los métodos de enfoque hidrológico.</p> <p>Se asume que a través de variables como profundidad de la lámina de agua, perímetro mojado y velocidad, principalmente, se pueden determinar las condiciones óptimas para las especies del ecosistema acuático lo cual es sesgado.</p> <p>Requiere la localización</p>	<p>Su especificada limita los resultados a las especies bajo estudio; no se pueden generalizar resultados y la selección de la especie de estudio es crítica.</p> <p>Emplearlos como herramienta de planeación y conservación, por ejemplo, implicaría realizar estudios extensos y recurrentes.</p> <p>El uso de curvas de preferencia de las especies objetivo puede ser un problema puesto que en muchos países esta información no se encuentra disponible.</p> <p>Las campañas de</p>	<p>Requiere un trabajo interdisciplinar de varios profesionales y ramas del conocimiento lo cual implica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempos prolongados de trabajo (12 a 36 meses).</li> <li>• Costos muy elevados.</li> <li>• Puede resultar poco operacional.</li> <li>• Gran cantidad de información de todas las áreas del conocimiento involucradas para que los expertos en el tema hagan sus recomendaciones.</li> </ul> <p>El grupo de trabajo debe ser especializado, siendo necesario por ejemplo contar con especialista en peces, en invertebrados acuáticos, en vegetación acuática y ribereña, en hidrología, etc.<sup>37</sup>, lo cual implica que en ocasiones reunir un equipo de trabajo de tales características resulte complicado.</p>

<sup>36</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid y CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Metodologías para determinar el caudal ambiental. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2013. p. 131.

<sup>37</sup> AGUIRRE, Mario. Caudales ambientales: conceptos y metodologías. En: AGUIRRE, Mario. (1<sup>a</sup>: 2010: Bogotá). Memorias del primer curso corto de caudales ambientales. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 2010.

**Tabla 8. Ventajas y desventajas de los diferentes enfoques de cálculo del Qe**

ENFOQUE	HIDROLÓGICO	HIDRÁULICO	HIDROBIOLÓGICO	HOLÍSTICO
	<p>difieren notablemente a las de origen.</p>	<p>de secciones transversales representativas de toda la corriente bajo estudio lo cual puede resultar crítico para los resultados que se obtengan.</p>	<p>muestreo y monitoreo debido a la integración de características hidráulicas y biológicas son numerosas y costosas.</p> <p>Requiere de trabajo interdisciplinario lo cual implica tiempos de trabajo prolongados así como costos elevados; de igual forma la especificidad en diferentes áreas del conocimiento en ocasiones puede ser una restricción de trabajo.</p> <p>Tiempos prolongados de trabajo (6 a 18 meses).</p>	

## 5.4. PROCEDIMIENTOS GENERALES Y TRANSVERSALES AL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)

A continuación se presentan procedimientos necesarios para determinar el caudal ecológico de acuerdo con los métodos de cálculo presentados previamente (ver numeral 5.2) y la experiencia de cálculo propuesta en este trabajo. Es importante mencionar que la información no pretende abarcar la totalidad de material referente a cada temática sino información de referencia, tampoco se busca incluir la totalidad de información-procedimientos necesarios para desarrollar el cálculo del caudal ecológico por cualquier de los 4 enfoques mencionados en este trabajo.

### 5.4.1. Cálculo de caudales medios (método analógico)

Como puede indagarse en el numeral 5.2 referente a los métodos de cálculo del caudal ecológico, varios procedimientos requieren la obtención del caudal medio de las corrientes y que en ocasiones no puede conocerse sino mediante métodos indirectos de cálculo o mediciones directas, con la desventaja que estas últimas resultan costosas, dispendiosas y no permiten reflejar un comportamiento histórico de las corrientes; el caudal medio es una característica básica de las cuencas hidrográficas y cuya determinación exacta depende de la exactitud de los aforos, de la variación del caudal, de la duración del período de observaciones y de la densidad de estaciones de aforo<sup>38</sup>.

Dado que contar con datos de caudal medio en todos los sitios de interés es poco probable, existen métodos alternos para su cálculo y que tienen como requisito la afinidad entre cuencas, afinidad que depende de las características fisiográficas e hidrográficas de las mismas como las presentadas en el siguiente numeral, además de la topografía, geología, clima, suelo, vegetación, superficie de agua, etc.<sup>39</sup>.

Uno de los métodos que permite obtener valores de caudales medios en los sitios de interés es el denominado analógico, el cual se emplea para determinar el caudal medio de una cuenca sin estaciones de aforo. Según este método, el caudal medio está dado por:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

Donde,

$Q_2$ : Caudal medio de la cuenca en estudio

$Q_1$ : Caudal medio de la cuenca base afín

---

<sup>38</sup> LUENGAS C., Belisario. Metodología para el Balance Hídrico Nacional. En: IDEAM – Centro de Documentación e Información Científico Técnica.

<sup>39</sup> Instituto de hidrología de España-Unesco. Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos. Madrid, España, Unesco, 1981.

$A_1, A_2$ : Áreas de las cuencas relacionadas

Una variación del método análogo en el cual se tienen cuencas con características similares pero con precipitaciones medias un poco diferentes, implica que la anterior ecuación se puede modificar de la siguiente manera para tener en cuenta la diferencia en la precipitación<sup>40</sup>:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{P_2}{P_1}$$

Donde,

$P_2$ : Precipitación media de la cuenca en estudio

$P_1$ : Precipitación media de la cuenca base afín

Para el cálculo de la precipitación media de una cuenca se puede emplear el método aritmético, el método de los polígonos de Thiessen y/o el método de las isoyetas que pueden ser consultados en las referencias bibliográficas referentes a hidrología presentadas en el capítulo 11; es importante mencionar que el método aritmético debe emplearse si los pluviómetros se distribuyen uniformemente sobre el área de trabajo, sus mediciones individuales no varían considerablemente de la media y además se tiene una densidad adecuada de mediciones, mientras que el método de polígonos de Thiessen aún si es más exacto que la media aritmética, no tiene en cuenta la orografía de una región (recomendado para zonas planas), variable que sí se incluye dentro del proceso de isoyetas considerado el mejor entre los 3 métodos de cálculo de la precipitación media; por último se debe dar claridad que el método análogo en que la precipitación media no se obvia debe emplearse en aquellos casos en que se observen núcleos marcados de precipitación, o que ésta se distribuye no uniformemente sobre un área de trabajo, factor de multiplicación que permite incorporar este hecho dentro del proceso de estimación de caudales.

#### **5.4.2. Caracterización morfométrica de cuencas**

La información que a continuación se presenta tiene como base el documento Guía Básica para la Caracterización Morfométrica de Cuencas Hidrográficas<sup>41</sup>, Fundamentos

---

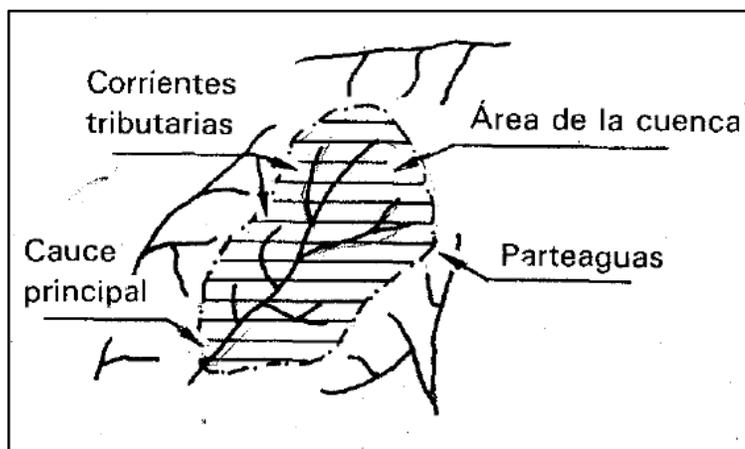
<sup>40</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo, Uruguay, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe – ROSTLAC, 1982.

<sup>41</sup> REYES TRUJILLO, Aldemar; ULISES BARROSO, Fabián; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Guía Básica para la Caracterización Morfométrica de Cuencas Hidrográficas.

de hidrología de superficie<sup>42</sup> e Hidrología en la ingeniería<sup>43</sup>. El establecimiento de cada uno de los siguientes parámetros es de utilidad para el cálculo de los  $Q_e$  así como para la descripción de las zonas de estudio donde se desea conocer su magnitud, además que permite realizar la transposición de caudales o la estimación de éstos de manera segura en sitios de interés que no cuentan con registros, al analizar la respuesta que teóricamente presentan las cuencas hidrográficas ante eventos de lluvia reflejados en últimas en la escorrentía superficial.

- **Área (A)**

El área de la cuenca es probablemente la característica morfométrica e hidrológica más importante. Está definida como la proyección ortogonal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.



**Figura 4. Área de una cuenca hidrográfica**

Fuente: APARICIO MIJARES, Francisco J., 1992

- **Perímetro (P)**

El perímetro de la cuenca o la longitud del parteaguas de la cuenca, es un parámetro importante, que en conexión con el área permite inferir sobre la forma de la cuenca.

- **Índice de compacidad o de Gravelius ( $K_c$ )**

Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca, basado en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual a la de la cuenca (círculo equivalente); de esta manera, entre mayor sea el coeficiente más distante será la forma de la cuenca con respecto del círculo. Para valores cercanos o iguales a uno, la cuenca

<sup>42</sup> APARICIO MIJARES, Francisco J. Fundamentos de hidrología de superficie. México, D. F., Editorial Limusa, S. A., 1992. N° 291.

<sup>43</sup> MONSALVE SAÉNZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. 2ª edición. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.

presenta mayor tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de aguas de escorrentía.

La ecuación que define el índice de compacidad es:

$$K_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde,

$K_c$ : Índice de compacidad o índice de Gravelius (adimensional)

P: Perímetro de la cuenca (Km)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similaridad con formas redondas, dentro de los rangos que se muestran a continuación:

Clase  $K_{c1}$ : Rango entre 1 y 1.25, corresponde a forma redonda a oval redonda.

Clase  $K_{c2}$ : Rango entre 1.25 y 1.5, corresponde a forma oval redonda a oval oblonga.

Clase  $K_{c3}$ : Rango entre 1.5 y 1.75, corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

- **Factor de forma (F)**

Es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoya. La longitud axial de la hoya se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la hoya.

Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecientes rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según su comportamiento, si tiende hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca. Un valor superior a la unidad dará el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar escurrimiento de una lluvia intensa formado fácilmente grandes crecidas.

El factor de forma se define como:

$$F = \frac{A}{L_m^2}$$

Donde,

F: Factor de forma (adimensional)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

L<sub>m</sub>: Longitud de máximo recorrido (Km)

- **Índice de alargamiento (I<sub>a</sub>)**

El índice de alargamiento es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, pero esta vez no respecto a su redondez sino a su tendencia de ser de forma alargada, en relación con la longitud axial, y con el ancho máximo de la cuenca. Aquellas cuencas que registran valores mayores a uno presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada. Igualmente, este índice permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre.

La ecuación que define el índice de alargamiento es:

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Donde,

I<sub>a</sub>: Índice de alargamiento (adimensional)

L<sub>m</sub>: Longitud de máximo recorrido (Km)

l: Ancho máximo (Km)

- **Índice asimétrico (I<sub>as</sub>)**

Es la relación del área de las vertientes, mayor (A<sub>may</sub>) y menor (A<sub>men</sub>), las cuales son separadas por el cauce principal. Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje, pues si se tiene un índice mucho mayor a 1 se observara sobre la cuenca que el río principal estará recargado a una de las vertientes, lo cual implica una heterogeneidad en la distribución de la red de drenaje aumentando la descarga hídrica de la cuenca a esta vertiente, incrementando en cierto grado los niveles de erodabilidad a causa de los altos eventos de escorrentía superficial obtenidos.

El índice asimétrico se define por:

$$I_{as} = \frac{A_{may}}{A_{men}}$$

Donde,

I<sub>as</sub>: Índice asimétrico (adimensional)

A<sub>may</sub>: Vertiente mayor (Km<sup>2</sup>)

A<sub>men</sub>: Vertiente menor (Km<sup>2</sup>)

- **Pendiente media de la cuenca ( $S_c$ )**

Esta característica controla en buena parte de la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleva el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las hoyas.

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, su determinación es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas del suelo (erosión o sedimentación), puesto que, en zonas de altas pendientes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

La siguiente tabla muestra la clasificación de las cuencas según la pendiente.

**Tabla 9. Clasificación de cuencas de acuerdo con la pendiente media**

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE RELIEVE
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Medianamente accidentado
12 – 20	Accidentado
20 – 35	Fuertemente accidentado
35 – 50	Muy fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
>75	Muy escarpado

Fuente: REYES TRUJILLO, Aldemar; ULISES BARROSO, Fabián; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, 2010

Para el cálculo de la pendiente media de una cuenca existen diferentes métodos entre los cuales cabe mencionar el método de Horton, el método de las cuadrículas asociadas a un vector y finalmente el método de Alvord el cual es empleado en el presente trabajo.

El método de Alvord establece que para estimar la pendiente media de la cuenca se realiza el siguiente cálculo:

$$S_c = \frac{D \times L_c}{A}$$

Donde,

$S_c$ : Pendiente media de la cuenca (adimensional)

D: Diferencia de nivel entre las curvas de nivel del plano topográfico empleado (Km)

A: Área total de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

$L_c$ : Longitud de la curva de nivel (Km)

Donde  $L_c$  es la sumatoria de las longitudes de todas las curvas de nivel que están dentro de la cuenca.

- **Curva hipsométrica**

Es la representación gráfica del relieve de una hoya. Representa el estudio de la variación de la elevación de los varios terrenos de la hoya con referencia al nivel medio del mar. Esta variación puede ser indicada por medio de un gráfico que muestre el porcentaje de área de drenaje que existe por encima o por debajo de varias elevaciones.

Los datos de elevación son significativos, sobre todo para considerar la acción de la altitud en el comportamiento de la temperatura y la precipitación. La curva hipsométrica refleja con precisión el comportamiento global de la altitud de la cuenca y la dinámica del ciclo de erosión; a partir de los datos de la curva hipsométrica se puede conocer la altura media de la cuenca que se emplea en parámetros como el coeficiente de masividad u orográfico.

- **Coeficiente de masividad ( $K_m$ )**

Este coeficiente representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Permite diferenciar cuencas de igual altura media pero de relieve distinto, aunque puede dar valores iguales para cuencas distintas.

A continuación se presenta cómo se realiza el cálculo del coeficiente de masividad.

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m. s. n. m.)}}{\text{Área de la cuenca (Km}^2\text{)}}$$

El coeficiente de masividad puede tomar los siguientes valores y que definen 3 rangos.

**Tabla 10. Clases de valores de masividad**

RANGOS DE Km	CLASES DE MASVIDAD
0 – 35	Moderadamente montañosa
35 – 70	Montañosa
70 - 105	Muy motañosa

Fuente: REYES TRUJILLO, Aldemar; ULISES BARROSO, Fabián; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, 2010

- **Coeficiente orográfico ( $C_o$ )**

Es la relación entre el cuadrado de la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal. Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón si el valor del coeficiente orográfico es  $<6$ ,

representa un relieve poco accidentado propio de cuencas extensas y de baja pendiente; y si el valor es >6, es un relieve accidentado.

El coeficiente orográfico se calcula como:

$$C_o = \frac{h^2}{A}$$

Donde,

$C_o$ : Coeficiente orográfico (adimensional)

$h$ : Altitud media del relieve (Km)

$A$ : Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

- **Densidad de drenaje ( $D_d$ )**

Esta se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de una cuenca y su área total. Su cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Donde,

$D_d$ : Densidad de drenaje (Km/Km<sup>2</sup>)

$\sum L_i$ : Suma de las longitudes de los drenajes que ingresan en la cuenca (Km)

$A$ : Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Usualmente toma valores entre 0.5 Km/Km<sup>2</sup> para hojas con drenaje pobre hasta 3.5 Km/Km<sup>2</sup> o valores mayores para hojas excepcionalmente bien drenadas, lo cual genera grandes volúmenes de escurrimientos, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas.

- **Constante de estabilidad del río ( $C$ )**

La constante de estabilidad de un río es el valor inverso de la densidad de drenaje. Representa, físicamente, la superficie de cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Puede considerarse, por tanto, como una medida de la erodabilidad de la cuenca.

La constante de estabilidad de un río se calcula como:

$$C = \frac{A}{\sum L_i}$$

Donde,

C: Constante de estabilidad del río (Km)

$\sum L_i$ : Suma de las longitudes de los drenajes que ingresan en la cuenca (Km)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

- **Pendiente del cauce (S)**

La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua. Para el cálculo de la pendiente del cauce se puede emplear el método de las elevaciones extremas y el método de Taylor-Schwarz.

En el caso de las elevaciones extremas, consiste en determinar el desnivel entre el punto más elevado y el punto más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce tal y como se presenta a continuación.

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Donde,

S: Pendiente media del cauce (adimensional)

H<sub>max</sub>: Altitud máxima del cauce (m.s.n.m.)

H<sub>min</sub>: Altitud mínima del cauce (m.s.n.m.)

L: Longitud del cauce principal de la cuenca (Km)

#### **5.4.3. Curva de Duración de Caudales (CDC)<sup>44,45</sup>**

La Curva de Duración de Caudales (CDC), o de permanencia, puede ser definida para caudales diarios, mensuales, anuales, etc., considerándose uno de los mejores procedimientos para representar la variabilidad de caudales a lo largo del año. A partir de esta curva se puede conocer la duración del período en el que el río suministra unos caudales mínimos o máximos; por ejemplo, por medio de la curva se puede saber qué porcentaje del año el río lleva unos caudales por encima de un valor determinado, o cuántos días del año desciende por debajo de un determinado caudal.

Se da el nombre de curva de duración o de permanencia de caudales a la representación gráfica en orden decreciente de los caudales observados Q<sub>i</sub>, duración normalmente expresada en porcentaje. Como cada dato de caudal corresponde a un intervalo de

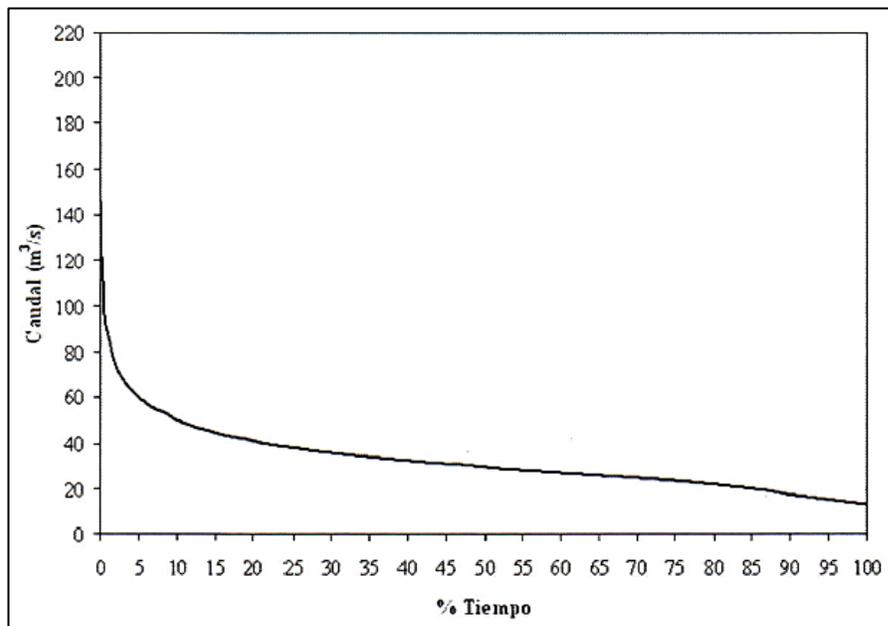
---

<sup>44</sup> MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. 2ª edición. Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999. 382 p.

<sup>45</sup> CANTERA KINTZ, Jaime Ricardo, CARVAJAL Yesid y CASTRO MABEL, Lina. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Santiago de Cali, Programa Editorial Universidad del Valle, 2009. 328 p.

tiempo (hora, día, mes, año), hay una correspondencia entre aquel porcentaje y el periodo total de datos.

Para la construcción de esta curva se grafican los valores de  $Q_i$  en el eje de las ordenadas, contra su frecuencia acumulada relativa correspondiente en el eje de las abscisas o porcentaje del tiempo en el que el caudal es igualado o superado.



**Figura 5. Curva de duración de caudales**

Fuente: CANTERA KINTZ, Jaime Ricardo, CARVAJAL Yesid y CASTRO MABEL, Lina. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos

Para determinar el porcentaje del tiempo en que cada  $Q_i$  es igualado o excedido, se obtiene de la serie histórica de caudales los datos a trabajar y se ordenan de manera descendente, calculando para cada uno de los caudales observados su probabilidad empírica haciendo uso de las fórmulas presentadas en el numeral 5.4.4.

- **Determinación de una CDC en una hoya hidrográfica en caso de inexistencia de datos de caudal<sup>46</sup>**

Para este procedimiento se requiere una hoya hidrográfica A que sea hidrológicamente semejante a la hoya de interés B, y que posea su propia curva de duración de caudales durante un período de tiempo razonable. Para la hoya B, de interés, que no posee datos, se puede deducir su propia curva, suponiendo que la relación  $Q/A$ , para cada porcentaje de tiempo, es igual a la hoya con datos de caudal, siendo A el valor correspondiente al área de drenaje:

<sup>46</sup> MONSALVE SÁENZ, Germán. Op. cit.

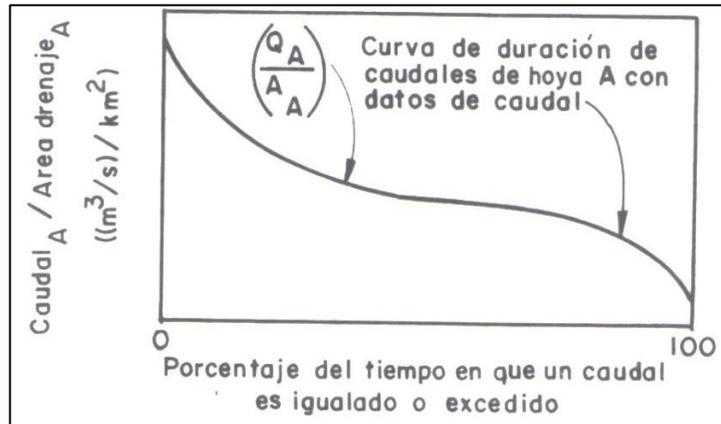
$$Q_B = \frac{A_B}{A_A} Q_A$$

Donde,

$Q_B$ : Caudal de la cuenca de interés

$Q_A$ : Caudal de la cuenca con su propia CDC

$A_1, A_2$ : Áreas de las cuencas relacionadas



**Figura 6. Determinación de curva de duración de caudales en hoya hidrográfica sin datos de caudal**

Fuente: MONSALVE SAÉNZ, Germán. Hidrología en la ingeniería

#### 5.4.4. Fórmulas empíricas de probabilidad o “plotting formulas”

La frecuencia de cualquier evento puede obtenerse usando las fórmulas empíricas de probabilidad o “plotting formulas”. Dentro de las funciones de probabilidades empíricas o conocidas como se encuentran las siguientes cuyas variables son las mismas presentadas más adelante para la fórmula de Gringorten<sup>47</sup>.

**Tabla 11. Fórmulas de probabilidad empírica o “plotting formulas”**

FÓRMULA	Probabilidad de excedencia, $P(X \geq x)$ <sup>48</sup>
California	$\frac{m}{n}$

<sup>47</sup> VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L. Introduction to hydrology. 5ª edición. Estados Unidos, Prentice Hall, 2003. p 54 – 55.

<sup>48</sup> Siempre y cuando los datos sean ordenados de mayor a menor se calcula la probabilidad de excedencia -  $P(X \geq x)$ ; si se desea conocer la probabilidad de no excedencia -  $P(X \leq x)$ , los datos se deben ordenar de menor a mayor.

**Tabla 11. Fórmulas de probabilidad empírica o “plotting formulas”**

FÓRMULA	Probabilidad de excedencia, $P(X \geq x)$ <sup>48</sup>
Hazen	$\frac{2m - 1}{2n}$
Beard	$1 - (0.5)^{1/n}$
Weibull	$\frac{m}{n + 1}$
Chegadayev	$\frac{m - 0.3}{n + 0.4}$
Blom	$\frac{m - \frac{3}{8}}{n + \frac{1}{4}}$
Tukey	$\frac{3m - 1}{3n + 1}$

Fuente: VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L. Introduction to hydrology

De acuerdo con VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L.<sup>49</sup>, la fórmula de Gringorten es una de las expresiones existentes para el cálculo de probabilidades empíricas que tiene en cuenta el tamaño de la muestra, característica considerada de importancia en tanto el principal fundamento de los métodos de cálculo del Qe con enfoque hidrológico es la tendencia de las corrientes de acuerdo con los registros históricos o extensión de los registros.

$$P(X \geq x) = \frac{m - a}{n + 1 - 2a}$$

Donde,

n: número de años de registro o de elementos de la muestra.

m: número de orden de los valores ordenados de mayor a menor (para el mayor m=1).

a: parámetro que depende de n como se observa en la Tabla 12; generalmente toma el valor de 0.4<sup>50</sup>.

**Tabla 12. Valores de a para la fórmula de Gringorten en función de n**

n	10	20	30	40	50
a	0.448	0.443	0.442	0.441	0.440

<sup>49</sup> VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L. Op. cit., p 54 – 55.

<sup>50</sup> Idem.

**Tabla 12. Valores de  $a$  para la fórmula de Gringorten en función de  $n$**

n	60	70	80	90	100
a	0.440	0.440	0.440	0.439	0.439

Fuente: VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L. Introduction to hydrology

Las “plotting formulas” presentadas permiten, entre otras, la construcción de CDC para la determinación de  $Q_e$  en sitios de interés que no cuentan con registros de caudales, donde un ejemplo de su uso puede consultarse en el capítulo octavo del presente trabajo. También cabe resaltar que aún si existen alrededor de 8 fórmulas para establecer probabilidades empíricas, como puede verificarse en la Tabla 11 y Tabla 12, el uso de una u otra tiene ligeras o nulas implicaciones por fuera de los valores de mayor magnitud de acuerdo a la variable hidrológica estudiada.

**5.4.5. Procedimientos de muestreo (comunidades faunísticas acuáticas, calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, aforos de caudal, muestreo de sedimentos)**

En vista que el presente trabajo no pretende abarcar a cabalidad la información referida a los procedimientos de muestreo para comunidades faunísticas acuáticas, de calidad de agua, de aforos sólidos y líquidos ni muestreos de sedimentos, sino por el contrario servir de referencia para ejecutar estos procedimientos de la mejor manera, a continuación se presentan documentos de consulta en los cuales puede encontrarse valiosa información para abordar la tarea del cálculo del caudal ecológico por los métodos hidráulicos, hidrobiológicos y holísticos, principalmente.

- APPHA-AWWA-WPCF. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington D.C. 21 Edition.
- Capítulos 6, 7 y 8 de KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali, Colombia. Universidad del Valle. 2009.
- CSUROS, Maria. Environmental sampling & analysis for technicians. Estados Unidos, CRC Press LLC, 1994.
- IDEAM y MAVDT. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. 2007.
- NTC-ISO 5667-1. Directrices para el diseño de programa de muestreo.
- NTC-ISO 5667-2. Técnicas generales de muestreo.

- NTC-ISO 5667-3. Directrices para la preservación y manejo de las muestras.
- NTC-ISO 5667-14. Guía para el control de la calidad en el muestreo y el manejo ambiental del agua.
- NTC-ISO 5667-16. Guía para el ensayo biológico de muestras.
- NTC 3945. Método estándar para mediciones de la velocidad del agua en canales abiertos mediante elementos rotativos, molinetes.
- RAMÍREZ, A. y G. VIÑA. 1998. Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Santafé de Bogotá.
- ROLDÁN, G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. Fondo para la protección del medio ambiente “Jose Celestino Mutis” FEN Colombia, Fondo Colombiano de investigaciones científicas y proyectos especiales “Francisco Jose de Caldas” Colciencias y Universidad de Antioquia.
- ROLDÁN, G. 1989. Manual de limnología. Editorial Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias. Medellín.
- ROLDÁN, G. 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col. Editorial Universidad de Antioquia. Colección de Ciencia y Tecnología. Medellín.
- ROLDÁN PEREZ, GABRIEL y RAMIREZ RESTREPO, JHON JAIRO. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. 2ª Edición. Colección Ciencia y Tecnología. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. Agosto 2008.
- USGS. Techniques of Water-Resources Investigations Reports. [en línea]. Consultado el 24/03/13. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/twri/>.

## 6. MARCO LEGAL

En algunos países el tema del Qe se encuentra tipificado dentro de las normativas correspondientes, mientras que en otros casos como el colombiano, aun cuando éste no se encuentra textualmente dentro del marco normativo, existen principios y directrices plasmadas en leyes, decretos, resoluciones y demás documentos, que apuntan a tener en cuenta este concepto y su aplicación dentro del marco de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), ya que como lo menciona CARVAJAL ESCOBAR, Yesid<sup>51</sup>, una parte fundamental de la GIRH es el Qe o caudal ambiental.

A continuación se realiza una recopilación, a groso modo, del marco legal colombiano relacionado con el Qe así como el marco legal a nivel internacional.

El marco legal que a continuación se presenta se encuentra inmerso en un concepto que es preciso presentar y que es la GIRH, la cual de acuerdo con la Global Water Partnership (GWP) se define como un proceso que promueve el desarrollo coordinado y el manejo del agua, el suelo y recursos relacionados, para maximizar la economía resultante y el beneficio social de una manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales.<sup>52</sup>

El documento insignia de la GIRH en Colombia es la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico del año 2010 (PNGIRH), la cual establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégicas para el manejo del recurso hídrico en el país en un horizonte de 12 años. La PNGIRH surge como la culminación de una serie de iniciativas por parte del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), hoy en día Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), por establecer las directrices unificadas para el manejo del agua en el país, que además de apuntar a resolver la actual problemática del recurso hídrico, permitan hacer uso eficiente del recurso y preservarlo como una riqueza para el bienestar de las generaciones futuras de Colombianos.<sup>53</sup>

### 6.1. Marco legal Colombiano

En el marco legal colombiano, punto de partida es la constitución política del año 1991, la cual incluye, a diferencia de la carta magna de 1986, el tratamiento amplio de la protección y cuidado del medio ambiente a tal punto que se le ha denominado la

---

<sup>51</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, op. cit.

<sup>52</sup> eFlowNet: Global Environmental Flows Network. IWRM & EIA. En: About Environmental Flows. [en línea]. Disponible en internet: <http://www.eflownet.org/viewinfo.cfm?linkcategoryid=4&linkid=14&siteid=1&FuseAction=display>.

<sup>53</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política nacional para gestión integral del recurso hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p.

constitución ecológica.<sup>54</sup> En la siguiente tabla se presentan algunos de los artículos de la constitución dentro de los cuales se consagra la protección y cuidado del medio ambiente y en el cual queda inmerso la temática del Qe.

**Tabla 13. Constitución ecológica de Colombia (1991)**

ARTÍCULO	PALABRAS CLAVES	DESCRIPCION
<b>TITULO I: De los Principios Fundamentales</b>		
8	Protección de riquezas naturales	Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.
<b>TITULO II: De los derechos las garantías y los deberes</b>		
<b>CAPITULO 3: De los derechos colectivos y del ambiente</b>		
79	Ambiente sano	Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.  <b><i>Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.</i></b>
80	Desarrollo sostenible	<b><i>El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.</i></b>  Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.  Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.
<b>CAPITULO 5: De los deberes y obligaciones</b>		
95	Deberes de la persona y del ciudadano	La calidad de colombiano enaltece a todos los miembros de la comunidad nacional. Todos están en el deber de engrandecerla y dignificarla. El ejercicio de los derechos y libertades reconocidos en esta Constitución implica responsabilidades. El ejercicio de las libertades y derechos reconocidos en esta Constitución implica responsabilidades. Toda persona está obligada a cumplir la Constitución y las leyes.  <b><i>Son deberes de la persona y del ciudadano:</i></b>

<sup>54</sup> LOZANO BARÓN, Samuel. La Constitución ecológica de Colombia. Legislación Ambiental. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de La Salle. Segundo semestre 2010.

Tabla 13. Constitución ecológica de Colombia (1991)

ARTÍCULO	PALABRAS CLAVES	DESCRIPCION
		1. Respetar los derechos ajenos y no abusar de los propios; 2. Obrar conforme al principio de solidaridad social, respondiendo con acciones humanitarias ante situaciones que pongan en peligro la vida o la salud de las personas; 3. Respetar y apoyar a las autoridades democráticas legítimamente constituidas para mantener la independencia y la integridad nacionales. 4. Defender y difundir los derechos humanos como fundamento de la convivencia pacífica; 5. Participar en la vida política, cívica y comunitaria del país; 6. Propender al logro y mantenimiento de la paz; 7. Colaborar para el buen funcionamiento de la administración de la justicia; <b>8. Proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano;</b> 9. Contribuir al financiamiento de los gastos e inversiones del Estado dentro de conceptos de justicia y equidad.
<b>TITULO XI:</b> De la organización territorial		
<b>CAPITULO 4:</b> Del régimen especial		
331	CAR Río Grande del Magdalena	<b>Créase la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena encargada de</b> la recuperación de la navegación, de la actividad portuaria, la adecuación y la conservación de tierras, la generación y distribución de energía y <b>el aprovechamiento y preservación del ambiente, los recursos ictiológicos y demás recursos naturales renovables.</b>  La ley determinará su organización y fuentes de financiación, y definirá en favor de los municipios ribereños un tratamiento especial en la asignación de regalías y en la participación que les corresponda en los ingresos corrientes de la Nación.
<b>TITULO XII:</b> Del régimen económico y de la hacienda pública.		
<b>CAPITULO 1:</b> De las disposiciones generales		
333	Limitación de libertad económica en función del medio ambiente	La actividad económica y la iniciativa privada son libres, dentro de los límites del bien común. Para su ejercicio, nadie podrá exigir permisos previos ni requisitos, sin autorización de la ley.  La libre competencia económica es un derecho de todos que supone responsabilidades.  La empresa, como base del desarrollo, tiene una función social que implica obligaciones. El Estado fortalecerá las organizaciones solidarias y

**Tabla 13. Constitución ecológica de Colombia (1991)**

ARTÍCULO	PALABRAS CLAVES	DESCRIPCION
		<p>estimulará el desarrollo empresarial.</p> <p>El Estado, por mandato de la ley, impedirá que se obstruya o se restrinja la libertad económica y evitará o controlará cualquier abuso que personas o empresas hagan de su posición dominante en el mercado nacional.</p> <p><b>La ley delimitará el alcance de la libertad económica cuando así lo exijan el interés social, el ambiente y el patrimonio cultural de la Nación.</b></p>
334	<p>Intervención del estado en la economía</p> <p>Preservación de un medio ambiente sano</p>	<p>La dirección general de la economía estará a cargo del Estado. <b>Éste intervendrá, por mandato de la ley, en la explotación de los recursos naturales</b>, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes, y en los servicios públicos y privados, para racionalizar la economía con el fin de conseguir el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, la distribución equitativa de las oportunidades y los beneficios del desarrollo <b>y la preservación de un ambiente sano.</b></p>
<b>CAPITULO 5:</b> De la finalidad social del estado y de los servicios públicos.		
366	<p>Finalidades del estado</p> <p>Saneamiento ambiental</p>	<p>El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. <b>Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable.</b></p> <p>Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación.</p>

Fuente: COLOMBIA. Constitución Política de Colombia. 1991.

De los diferentes artículos que tienen relación con la protección del medio ambiente y que fueron consignados en la Tabla 13, aclarando que no representan la totalidad de artículos de la denominada Constitución ecológica donde el medio ambiente tiene prelación, el más relevante respecto a uno de los fines del Qe es el artículo 80, ya que destina como deber del Estado la *planificación sobre el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible y su conservación*, siendo el Qe una herramienta para alcanzar dicho propósito.

Además de lo establecido en la Tabla 13, el Estado Colombiano a través de las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible y las Unidades Ambientales Urbanas (CAR y UAU), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales (IDEAM), el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), entre otras entidades, junto con documentos anexos a la Constitución, reconoce la necesidad de que el agua como bien natural de uso público sea administrada, para lo cual ha reglamentado lo consignado en la Carta Magna por medio de normas de menor jerarquía que tienen inherencia en la GIRH y dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

**Tabla 14. Normas colombianas relacionadas con la GIRH**

NORMA	DESCRIPCIÓN
Ley 23 de 1973	Plantea la necesidad de proteger los recursos naturales renovables, fija límites mínimos de contaminación y establece sanciones por violación de las normas. Se faculta al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.
Decreto-Ley 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Con este código se da inicio al marco regulatorio actual para el manejo de los recursos naturales renovables dentro de los cuales se encuentra el recurso hídrico.  Este código trabaja de manera especial la gestión del agua a través del capítulo relacionado con el manejo de cuencas hidrográficas como áreas de manejo especial.
Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. Este decreto reviste una norma de vital importancia en tanto trata, en sus diferentes títulos y capítulos, el dominio de las aguas, cauces y riberas, los modos para la adquisición al derecho de uso de las aguas y sus cauces, determina los usos que se pueden dar al recurso, entre otros temas de importancia para la GIRH.
Ley 9 de 1979	Esta ley es conocida como el Código Sanitario Nacional y que establece los procedimientos y medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos.
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se definen los límites permisibles para el vertimiento o descarga de residuos líquidos a un cuerpo de agua o alcantarillado sanitario; igualmente se establecen los conceptos de cargas combinadas, sustancias de interés sanitario, planes de cumplimiento de los usuarios contaminadores, tasas retributivas y marcos sancionatorios, entre otros aspectos.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA <sup>55</sup> .  De acuerdo con la PNGIRH, los fundamentos de la política ambiental colombiana señalados en la Ley 99 de 1993 con mayor correspondencia con la gestión ambiental del recurso hídrico son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La Declaración de Río sobre Ambiente y Desarrollo (Naciones Unidas, 1992).</li> <li>• Las zonas de páramo, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial (numeral 4, artículo 1 del Título I).</li> </ul>

<sup>55</sup> El SINA es el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambiental contenidos en la Ley 99 de 1993 (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Nuestra Ley, Nuestro Sistema, SINA 15 años: edición especial Ley 99 de 1993).

**Tabla 14. Normas colombianas relacionadas con la GIRH**

NORMA	DESCRIPCIÓN
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso (numeral 5, artículo 1 del Título I).</li> <li>• El Estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables (numeral 7, artículo 1 del Título I).</li> <li>• La acción para la protección y recuperación ambiental del país es una tarea conjunta y coordinada entre el Estado, la comunidad, las organizaciones no gubernamentales y el sector privado. El Estado apoyará e incentivará la conformación de organismos no gubernamentales para la protección ambiental y podrá delegar en ellos algunas de sus funciones (numeral 10, artículo 1 del Título I).</li> <li>• El manejo ambiental del país, conforme a la Constitución Nacional, será descentralizado, democrático y participativo (numeral 12, artículo 1 del Título I).</li> <li>• Establecer técnicamente las metodologías de valoración de los costos económicos del deterioro y de la conservación del ambiente y de los recursos naturales renovables (numeral 43, artículo 5 del Título I).</li> </ul>
Ley 112 de 1992	Por la cual se aprueba el Protocolo para la Conservación y Administración de las Áreas Marinas y Costeras Protegidas del Pacífico Sudeste.
Ley 161 de 1994	Por la cual se organiza la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, se determinan sus fuentes de financiación y se dictan otras disposiciones.
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
Decreto 3100 de 2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
Resolución 104 de 2003 (IDEAM)	Por la que se establecen los criterios y parámetros para la clasificación y priorización de cuencas hidrográficas.
Decreto 155 de 2004	Por el cual se reglamentan el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones, y sus modificaciones.
Resolución 865 de 2004	Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 1433 de 2004	Trata sobre los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y sus modificaciones.
Decreto 1900 de 2006	Por el cual se establece que todo proyecto que involucre en su ejecución el uso del agua tomada directamente de fuentes naturales y que esté sujeto a la obtención de licencia ambiental, deberá destinar el 1% del total de la inversión para la recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que alimenta la respectiva fuente hídrica; de conformidad con el parágrafo del artículo 43 de la Ley 99 de 1993.
Resolución 872 de 2006	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del Índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 1323 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política nacional para gestión integral del recurso hídrico & CONSUEGRA MARTÍNEZ, Claudio S. M.

Finalmente a nivel nacional se debe mencionar el proyecto de Ley del Agua (2005) de Colombia, que puede destacarse como el principal intento escueto por sentar las bases respecto a la temática del caudal ecológico. Dentro de sus artículos llama la atención el 21 el cual establece:

Los caudales ecológicos para cada cuerpo de agua o tramo del mismo serán fijados por las autoridades ambientales competentes, de acuerdo con los criterios que establezca el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, previo concepto del Consejo Nacional del Agua, y para ello se requerirá la realización de estudios técnicos que soporten la decisión de las autoridades ambientales. Mientras no se señale el caudal para una cuenca o tramo de la misma, se considerará como tal el caudal de permanencia en la fuente durante el 95% del año.

## 6.2. Marco legal internacional

En el ámbito internacional y a diferencia de la situación colombiana, en materia de Qe se han realizado esfuerzos puntuales y específicos en la materia, a tal punto que en diferentes herramientas de índole legislativa se ha consagrado la necesidad de incluir en el ejercicio político y de planeación, un marco referente a la protección del medio ambiente, al elemento medio ambiental del agua y consecuentemente a la flora y fauna, mediante la inclusión del Qe. A continuación se presenta un bosquejo del marco legal internacional en materia de caudal ecológico.

**Tabla 15. Marco legal internacional**

NORMA	PAÍS	OBSERVACIÓN
Constitución política del estado (2008)	Ecuador	Establece la constitución política de Ecuador, en su artículo 318, que es el Estado a través de la Autoridad Única del Agua, el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación.
Proyecto de Ley orgánica de recursos hídricos usos y aprovechamiento del agua		Este proyecto de Ley que busca establecer las condiciones para un gobierno del agua y los recursos hídricos, con un Estado constitucional de derechos y justicia social, democrático, soberano, independiente, unitario, intercultural, plurinacional y laico, determina por ejemplo en su artículo 17 (Caudal ecológico), que el caudal ecológico en toda cuenca hidrográfica es intangible y mantenerlo en la cantidad requerida es responsabilidad de la Autoridad Única del Agua y de todas las personas, sean usuarias o no usuarias del agua. Adicionalmente este proyecto de Ley trabaja el concepto de caudal ecológico mediante su artículo 53 donde se mencionan las prioridades para la destinación del recurso hídrico, donde el caudal ecológico se ranquea en tercera posición. También el artículo 56 el proyecto Ley relaciona la determinación del caudal ecológico la cual estará a cargo de la Autoridad de Cuenca, el artículo 58 habla sobre el cambio de

**Tabla 15. Marco legal internacional**

NORMA	PAÍS	OBSERVACIÓN
		<p>destinación del recurso donde el caudal ecológico se tiene en cuenta, y donde se consigna que el cambio de destino no podrá poner en riesgo el equilibrio ecológico, artículos que ejemplifican cómo el concepto de caudal ambiental se incluye dentro del proceso legislativo Ecuatoriano.</p>
<p>Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Ley 29338)</p>	<p>Perú</p>	<p>Este documento del gobierno peruano establece en su capítulo VIII (Caudales ecológicos) la definición del caudal ecológico, las características del mismo, y cuál ha de ser el procedimiento para establecer la metodología para su determinación.</p>
<p>Norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012</p>	<p>México</p>	<p>Esta norma establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Esta norma establece los criterios y metodologías para el cálculo de régimen de caudal ecológico, y éste deberá determinarse tomando como base el objetivo ambiental identificado mediante la importancia ecológico y la presión de uso, estableciendo 4 objetivos que son A, B, C y D que se relacionan con el estado de conservación deseado y que es muy bueno, bueno, moderado y deficiente respectivamente.</p>
<p>Código de aguas de 1981</p>		<p>Este código tiene en cuenta el caudal ecológico de manera indirecta de la siguiente forma: 1) Su artículo 14 habla sobre la necesidad que la extracción de las aguas se haga siempre en forma que no perjudique los derechos de terceros constituidos sobre las mismas aguas, en cuanto a su cantidad, calidad substancia, oportunidad de uso y demás particularidades (características del caudal ecológico y adicional el objetivo de éste). 2) En el artículo 22, el código de aguas menciona que la autoridad constituirá el derecho de aprovechamiento sobre aguas existentes en fuentes naturales y en obras estatales de desarrollo del recurso, no pudiendo perjudicar ni menoscabar derechos de terceros (necesidad de la disponibilidad del recurso – existencia de un caudal mínimo para aprovechamiento).</p>
<p>Ley 20017 de 2005</p>	<p>Chile</p>	<p>Esta Ley, que modifica el Código de aguas de 1981, estipula en su artículo 129 bis 1, que es deber de la Dirección General de Aguas (DGA) velar por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo, el cual sólo afectará a los nuevos derechos que se constituyan, para lo cual deberá considerar también las condiciones naturales pertinentes para cada fuente superficial. De igual forma este artículo, 129 bis 1, determina que el caudal ecológico mínimo no podrá ser superior al 20% del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial. Adicionalmente el artículo aquí mencionado, refiere que en casos calificados y previo informe favorable de la Comisión Regional del Medio Ambiente, el presidente de la República podrá fijar un valor de caudal ecológico diferente, teniendo en cuenta que el valor que se fije no podrá ser superior al 40% del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial.</p>

**Tabla 15. Marco legal internacional**

NORMA	PAÍS	OBSERVACIÓN
Ley 19.300 de 1994		Esta ley de bases generales del medio ambiente, contempla dentro de su artículo 41, que el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables se efectuará asegurando su capacidad de regeneración y la diversidad biológica asociada a ellos, lo cual es uno de los propósitos del caudal ecológico como se expuso en el numeral 5.1. Por otra parte, la ley en su artículo 42 plantea que el Ministerio del Medio Ambiente, junto con el organismo público encargado de regular el uso o aprovechamiento de los recursos naturales, exigirá, cuando corresponda, la presentación de planes de manejo a fin de asegurar la conservación de dichos recursos, teniendo en cuenta consideraciones como la mantención de caudales de aguas.
Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos (2008)		Este manual, que se acoge mediante resolución que deja exenta la resolución DGA N° 1503 del 31 de Mayo de 2002, por la cual se acogía el antiguo manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos de 1998, toca el tema del caudal ecológico de manera precisa a través del capítulo V, en tanto menciona el concepto de caudal ecológico, sus generalidades, su estimación en diferentes escenarios de acción y valores máximos que éste puede tomar. Uno de los aspectos de mayor relevancia de este manual es que para otorgar derecho al uso del recurso hídrico, se deberá garantizar la mantención del caudal ecológico – establecimiento de caudales ecológicos en todos los derechos de aprovechamiento.
Ley Federal Suiza  Ley Federal sobre Protección de las Aguas (814.20 – 1993)	Suiza	<p>La legislación Suiza define la conservación de una caudal mínimo cualitativo y cuantitativo como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El caudal mínimo cualitativo considera la calidad de agua superficial (tomando en cuenta los vertidos de aguas residuales actuales y futuros), la conservación de los biotopos y biocenosis atípicas, y el resguardo de lugares de esparcimiento, cuyo aspecto estético y ambiental depende el agua.</li> <li>• El caudal mínimo cuantitativo será de por lo menos 50L/s. A partir de esta cantidad los caudales se definen en función del <math>Q_{347}</math>, debiéndose mantener una profundidad mínima de 20cm, para permitir el movimiento migratorio de los peces, si el caudal es mayor de 50L/s.</li> </ul> <p>Información adicional respecto a cómo se define el caudal ecológico de acuerdo con la legislación Suiza se puede consultar en la Tabla 4.</p>
Código del medio ambiente francés	Francia	Esta código establece que el caudal ecológico debe ser la décima parte del caudal medio interanual evaluado con los datos de un período mínimo de 5 años, y para módulos superiores a $80m^3/s$ puede

**Tabla 15. Marco legal internacional**

NORMA	PAÍS	OBSERVACIÓN
		extenderse hasta el 20% de este módulo.
Ley Vasca	Vasco	La Dirección general de obras públicas el país Vasco en 1980 estimó un caudal de circulación permanente para los cauces regulados consistente en el 10% del caudal medio anual.
Ley 10 del 5 de Julio de 2001, Plan Hidrológico Nacional (PHN) del Estado Español	España	Esta ley establece en su Título II: Normas complementarias a la planificación, artículo 26, además de otras disposiciones relacionadas con el caudal ambiental, que <i>“a los efectos de la evaluación de disponibilidades hídricas, los caudales ambientales que se fijan en los Planes Hidrológicos de cuenca, de acuerdo con la Ley de Aguas, tendrán la consideración de una limitación previa a los flujos del sistema de explotación, que operará con carácter preferente a los usos contemplados en el sistema. Para su establecimiento, los Organismos de cuenca realizarán estudios específicos para cada tramo de río, teniendo en cuenta la dinámica de los ecosistemas y las condiciones mínimas de su biocenosis. Las disponibilidades obtenidas en estas condiciones son las que pueden, en su caso, ser objeto de asignación y reserva para los usos existentes y previsibles”</i> .
Real Decreto 1/2001 (Ley de Aguas)		Reconoce la necesidad de armonizar el uso del recurso agua con la conservación del medio ambiente. En el artículo 59.7 se añade <i>“los caudales ecológicos o demandas ambientales no tendrán el carácter de uso...debiendo considerarse como una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación...Los caudales ecológicos se fijarán en los planes hidrológicos de cuenca. Para su establecimiento, los organismos de cuenca realizarán estudios específicos para cada tramo de río”</i> .
Legislación Asturiana – Principado de Asturias		Esta legislación, que se fundamenta en la legislación Suiza con especial atención en la migración y potenciación de la producción de salmónidos ( <i>Salmo trutta</i> y <i>Salmo salar</i> ), define el caudal ecológico como el mayor valor de caudal dado por las ecuaciones presentadas en la Tabla 4.

## 7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

El presente capítulo expone las etapas que deben ser abordadas en el cálculo del caudal ecológico, etapas que excluyendo la síntesis metodológica y las recomendaciones sobre la selección del método de cálculo, son consideradas de común desarrollo para cualquier ejercicio de cómputo. También describe este capítulo, el procedimiento ejecutado para realizar la aplicación práctica que se presenta más adelante en el capítulo 8.

### 7.1. GENERALIDADES

Todo proceso de cálculo de caudal ecológico debe tener como mínimo una primera etapa de recopilación y análisis de información, una segunda etapa enfocada en conocer la zona de estudio donde se va a desarrollar el trabajo, delimitar claramente los puntos de interés, y el o los métodos de cálculo seleccionados para entrar a realizar el cómputo, para finalmente analizar los resultados y llegar a una conclusión sobre cuál debe ser el caudal ecológico (tercera etapa).

La siguiente tabla presenta una descripción particular de las etapas mencionadas, enfocándola a la aplicación práctica y los objetivos planteados en el presente trabajo, por lo cual se incluye además la etapa de síntesis metodológica y recomendaciones sobre la selección del método de cálculo.

**Tabla 16. Etapas y descripción de actividades - metodología**

ETAPA	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES
<p>RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN</p>	<p>Esta etapa consiste en la recopilación y análisis de información secundaria a nivel nacional e internacional referente a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos de cálculo del caudal ecológico (Qe).</li> <li>• Experiencias de cálculo.</li> <li>• Marco conceptual referente al Qe.</li> <li>• Marco normativo en materia de caudales ecológicos.</li> </ul>
<p>SÍNTESIS METODOLÓGICA DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)</p>	<p>Establecido el estado del arte referente a la temática del Qe en la etapa de RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN, se procede a elaborar una síntesis metodológica respecto a la determinación del Qe teniendo en cuenta 4 enfoques:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfoque hídrico.</li> <li>• Enfoque hidráulico.</li> <li>• Enfoque hidrobiológico.</li> <li>• Enfoque holístico.</li> </ul> <p>Adicionalmente se presenta información transversal al procedimiento de cálculo del Qe por uno u otro método y que tiene que ver por ejemplo con la generación de caudales en sitios no monitoreados.</p>

**Tabla 16. Etapas y descripción de actividades - metodología**

ETAPA	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES
CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Q <sub>e</sub> )	<p>Para llevar a cabo la aplicación práctica de cálculo del Q<sub>e</sub> se procede de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Delimitación de la zona de estudio y selección de las corrientes hídricas por estudiar.</li> <li>• Caracterización de la zona de estudio.</li> <li>• Selección de los métodos de cálculo para determinar el Q<sub>e</sub>.</li> <li>• Cálculo del Q<sub>e</sub> de acuerdo con la zona de estudio, las corrientes hídricas y los métodos de cálculo seleccionados.</li> </ul>
ANÁLISIS DE RESULTADOS	<p>Una vez se obtienen los resultados del cálculo del Q<sub>e</sub> para las corrientes bajo estudio, se analizan los mismos y se infiere cuál debe ser el Q<sub>e</sub> seleccionado teniendo en cuenta el contexto de la región de estudio así como la información teórica referente a la temática de caudales ecológicos.</p>
RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL Q <sub>e</sub>	<p>Desarrolladas las etapas previas donde el estado del arte de la temática de caudales ecológicos ha sido delimitado, conocidos algunos de los métodos de cálculo existentes y los enfoques en que éstos se clasifican, y desarrollada la experiencia de cálculo, se presentan lineamientos para la selección del método de cálculo del Q<sub>e</sub>.</p>

A continuación se exhibe una descripción más detallada de las etapas presentadas en la Tabla 16, explicando cómo fue el desarrollo de cada una de ellas para el presente trabajo.

## 7.2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Esta actividad consistió en contextualizar la temática del caudal ecológico a nivel nacional como internacional desde el punto de vista conceptual, normativo y de experiencias, así como reconocer los diferentes métodos de cálculo que existen para lograr la determinación del caudal ecológico.

## 7.3. SÍNTESIS METODOLÓGICA DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO (Q<sub>e</sub>)

Conocido el estado del arte referente al cálculo del caudal ecológico, se procedió a elaborar una síntesis de los métodos de cálculo existentes y su clasificación bajo los enfoques hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico.

Esta síntesis, desarrollada en el numeral 5.2, presenta información relevante a los métodos: Denominación del método, descripción, procedimiento de cálculo e información requerida (input de información).

Adicionalmente se presenta información considerada transversal a los diferentes métodos de cálculo trabajados y que tiene que ver por ejemplo con la generación de caudales en sitios donde no se cuenta con registros o series históricas de caudales (ver numeral 5.4).

#### **7.4. CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO ( $Q_e$ ) – ASPECTOS PARTICULARES DE CÁLCULO**

Teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, la información que se consigna en los siguientes numerales responde a aspectos particulares de la aplicación práctica de cálculo que puede consultarse en el capítulo 8, recordando que estos mismos pasos deben ser abordados en otros procedimientos de cómputo de caudal ecológico que se deseen desarrollar.

##### **7.3.1. Delimitación de la zona de estudio y selección de las corrientes hídricas de estudio**

Una vez establecidos los fundamentos de trabajo, se seleccionó y delimitó la zona de estudio así como las corrientes hídricas superficiales de trabajo y para las cuales se calculará el  $Q_e$ .

La región de estudio considerada para el presente trabajo es el Área de Manejo Especial La Macarena (AMEM), dentro de la cual se localizan las corrientes hídricas del río Guayabero y la quebrada La Reserva, ríos que fueron empleados para desarrollar el ejemplo de cálculo de  $Q_e$  que se presenta en el capítulo 8.

La selección del AMEM está fundamentada en que ésta es un área de especial importancia para el país, la cual de acuerdo con la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA)<sup>56</sup> es considerada como una obra maestra de la naturaleza, sin igual, y de gran interés científico e indispensable para el estudio de la flora, la fauna y la gea. Adicionalmente, mediante el Decreto 1989 del 1 de Septiembre de 1989, se declaró el AMEM como una reserva de manejo del país, en la cual se ubican 4 Parques Nacionales Naturales (PNN), 3 Distritos de Manejo Integrado de los Recursos Naturales (DMI), y por último, está circunscrita en el área de Reserva Forestal de la Amazonía declarada por la Ley 2ª de 1959, características que resaltan la importancia del área para Colombia y que sirvieron como fundamento para enfocar el trabajo.

---

<sup>56</sup> Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA). Creación e importancia del Área de Manejo Especial La Macarena – AMEM Vistahermosa, Meta, Febrero de 2010.

Para la selección de las corrientes del río Guayabero y de la quebrada La Reserva se empleó información disponible en el IDEAM para ejecutar el análisis de series históricas de caudales, así como la representatividad que éstas tienen para el área y donde por ejemplo el río Guayabero atraviesa la totalidad del AMEN, y es, junto al río Ariari, las corrientes hídricas de mayor envergadura del área de estudio. De igual forma se tuvo en cuenta la quebrada La Reserva, puesto que de ésta se dispone de información batimétrica que permite ejecutar el ejercicio de cálculo del Qe por medio del método del perímetro mojado, y puesto que es un tributario del río Guayabero ubicado en la misma región hidrográfica, lo que permite obtener caudales por medio del método analógico presentado previamente.

Finalmente y una vez determinada la zona de estudio y las corrientes hídricas, se puntualiza como área de estudio la comprendida en las coordenadas presentadas en la siguiente tabla y que conforman 2 franjas de trabajo.

**Tabla 17. Puntos de trabajo para el cálculo del Qe**

PUNTO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
		Este	Norte
1	Río Guayabero	1016529,943	761076,467
2		1032109,857	733130,248
3	Quebrada La Reserva	973445,230	829643,082
4		974071,105	829407,368
5		973661,316	829243,191

### 7.3.2. Caracterización de la zona de estudio

La caracterización de la zona de estudio se centró en conocer aquellos aspectos considerados de relevancia para la determinación del Qe en las corrientes hídricas estudiadas entre los cuales se consideraron:

- ✓ Análisis temporal de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales.
- ✓ Distribución espacial de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales.
- ✓ Análisis temporal de los caudales medios mensuales multianuales.

Adicionalmente se determinaron aspectos de índole biótica y socioeconómica, que permiten desarrollar un análisis más completo respecto al uso del agua en la zona y actividades económicas que repercuten sobre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

- **Análisis temporal de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales**

Para evaluar el comportamiento temporal de las precipitaciones medias mensuales multianuales de la zona de estudio, se emplearon las siguientes estaciones que cuentan con series históricas de precipitación y que son operadas por el IDEAM; en el anexo 1. Datos hidrológicos se presenta la información empleada en el análisis temporal.

**Tabla 18. Estaciones empleadas en el análisis temporal de precipitación total media mensual multianual**

ESTACIÓN (Código)	TIPO	DEPARTAMENTO/ MUNICIPIO	CORRIENTE	PERIODO DE REGISTRO	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
					Este	Norte
S. VCT CAGUÁN (46015010)	CP	Caquetá / San Vicente del Caguán	Caguán	1993 - 2012	925554,770	718154,598
MACARENA LA (32035010)	CP	Meta / La Macarena	Guayabero	1993 – 2013	1033102,180	731032,526
STA ROSA CAGUÁN (46015020)	CO	Caquetá / San Vicente del Caguán	Caguán	1993 - 2012	921832,530	683137,273
BALSORA LA (32035020)	CO	Meta / La Macarena	Guayabero	1993 – 2013	1018266,332	760517,625
RAUDAL UNO (32030020)	PM	Meta / La Macarena	Guayabero	1993 – 2012	1016413,874	747616,751
URIBE LA (32020020)	PM	Meta / La Uribe	Duda	1993 - 2013	969677,077	850076,703
MARIPOSA LA (32010010)	PM	Meta / La Uribe	Guayabero	1993 - 2013	997528,274	774848,581
ISLA DEL MUERTO (32040020)	PM	Guaviare / San José del Guaviaré	Guayabero	1993 - 2013	1101717,356	754019,260
PINALITO (32070040)	PM	Meta / Vista Hermosa	Ariari	1993 - 2013	1049758,236	821343,948
CATALINA LA (32040010)	PM	Guaviare / San José del Guaviaré	Guayabero	1994 - 2013	1055610,348	751827,461
MESA DE FERNANDEZ (32070120)	PM	Meta / San Juan de Arama	Ariari	1993 - 2013	1005662,892	873662,608

CP: Climatológica Principal

CO: Climatológica Ordinaria

PM: Pluviométrica

Fuente: IDEAM, 2013

- **Distribución espacial de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales**

Empleando las estaciones de la Tabla 18 y el software ArcMap 10.1, se construyó un modelo de precipitación cuyo resultado se puede observar más adelante en el capítulo 8, modelo que permite determinar la distribución espacial de la precipitación media mensual multianual en la zona de estudio.

- **Análisis temporal de caudales medios mensuales multianuales**

El análisis del comportamiento temporal de los caudales en la zona de estudio y de las corrientes hídricas objeto de determinación del Qe, río Guayabero y la quebrada La Reserva, se desarrolló teniendo en cuenta los registros de caudales medios mensuales multianuales de las siguientes estaciones hidrométricas; en el anexo1. Datos hidrológicos se presenta la información empleada en el análisis temporal.

**Tabla 19. Estaciones empleadas en el análisis temporal de caudales medios mensuales multianuales**

ESTACIÓN (Código)	TIPO	DEPARTAMENTO/ MUNICIPIO	CORRIENTE	PERIODO DE REGISTRO	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
					Este	Norte
BALSORA LA (32037010)	LM	Meta / La Macarena	Guayabero	1983 - 2011	1016529,943	761076,467
MACARENA LA (32037030)	LG	Meta / La Macarena	Guayabero	1983 - 2011	1032109,857	733130,248
PINALITO (32077070)	LM	Meta / Vista Hermosa	Guejar	1979 - 2011	1045073,737	820334,665
EL LIMON (32077110)	LM	Meta / San Juan Arama	Guejar	1983 - 2011	1005700,369	863970,045
PTO RICO (32077080)	LM	Meta / Puerto Rico	Ariari	1979 - 2011	1096674,047	816763,648

LM: Limnimétrica

LG: Limnigráfica

Fuente: IDEAM, 2013

- **Descripción biótica y socioeconómica de la zona de estudio**

La descripción biótica y socioeconómica de la zona de estudio busca ampliar el conocimiento de la misma en aspectos como usos del agua en la región, procesos económicos que se ejecutan, y por último, especies faunísticas acuáticas presentes en el área. Esta información permite conocer aspectos considerados relevantes en la determinación del caudal ecológico.

### 7.3.3. Selección de los métodos de cálculo para determinar el Qe

Para la selección de los métodos de cálculo del Qe se tuvo en cuenta en primera instancia los enfoques existentes para su desarrollo, es decir, el enfoque hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico. Una vez delimitados los enfoques de trabajo y conocidas las limitantes económicas, temporales, de información y conocimiento, se optó por no trabajar bajo el enfoque hidrobiológico ni holístico.

De los métodos de cálculo que se presentan en la Tabla 4 y Tabla 5 se seleccionaron los siguientes:

## Hidrológico

- Método del IDEAM: La selección de este método se determinó de acuerdo con la resolución de las series históricas de caudal trabajadas y que es a nivel mensual multianual, y adicionalmente puesto que este método de cálculo lo ha presentado el IDEAM y es ampliamente reconocido en el país, siendo el método de cálculo más ampliamente utilizado y aceptado en Colombia, prueba de ello es que por ejemplo la Corporación Autónoma Regional de La Orinoquía (CORPORINOQUÍA) en la resolución 200.41.10.1398 de 2010, por medio de la cual se regula el uso y aprovechamiento del recurso hídrico en el río Únete, establece que el caudal de descuento por el caudal ecológico sea determinado de acuerdo con el criterio de descuento del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.<sup>57</sup>
- Índices con la Curva de Duración de Caudales (CDC): La selección de este método de cálculo de  $Q_e$  se fundamenta en que permite de manera indirecta incluir procesos de cálculo similares o iguales como el propuesto por el Proyecto de Ley del Agua de 2005 para Colombia, el Estudio Nacional del Agua, el método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP, 1974), el método de Hoppe (Hoppe, 1975), entre otros (ver Tabla 4), y sobre los cuales se propone trabajar con porcentajes fijos de la CDC.

## Hidráulico

- Perímetro mojado: Teniendo en cuenta la disponibilidad de registros de caudal y batimétricos para el río Guayabero, y además que la quebrada La Reserva está comprendida en la cuenca del Guayabero y que existe información batimétrica de su cauce, se optó por el método de cálculo del perímetro mojado y que permite comparar resultados e inferir implicaciones que tiene realizar el cálculo del  $Q_e$  empleando un método u otro así como diferentes enfoques.

### 7.3.4. Cálculo del $Q_e$

El cálculo del  $Q_e$  para las corrientes hídricas del río Guayabero y la quebrada La Reserva se realizó de la siguiente manera:

- **Río Guayabero**

Empleando la estación BALSORA LA y MACARENA LA (ver Tabla 19) se realizó el proceso de cálculo por el método del IDEAM y por el método de índices con la CDC.

---

<sup>57</sup> CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE LA ORINOQUÍA (CORPORINOQUÍA). Resolución 200.41.10.1398. Colombia, Corporación Autónoma Regional De La Orinoquía (CORPORINOQUÍA), 2010. 9 p.

✓ Método del IDEAM

Para el método del IDEAM, la serie disponible de caudales medios mensuales multianuales fue examinada para determinar el mes del año en el cual el promedio de los caudales mensuales era mínimo, y una vez determinado cuál mes presentaba esta condición de flujo, se calculó el 25% de dicho valor obteniendo así el valor del caudal ecológico para el río Guayabero.

✓ Método de índices con la CDC

En cuanto al cálculo del caudal ecológico mediante el método de la CDC, empleando los registros históricos disponibles de la estación BALSORA LA y MACARENA LA, se seleccionó la serie de los caudales reportados, ordenados a su vez de mayor a menor y para cada uno de éstos se calculó la probabilidad empírica de ser igualado o excedido un determinado porcentaje de tiempo.

Para la construcción de la CDC (ver Figura 5) se graficaron los valores de  $Q_i$  en el eje de las ordenadas, contra su frecuencia acumulada relativa correspondiente en el eje de las abscisas o porcentaje del tiempo en el que el caudal es igualado o superado. Una vez graficada la CDC y tabulados los datos, se determinó el caudal correspondiente al 95, 90 y 50% del tiempo, encontrando de esta forma los valores de caudal ecológico propuestos por el método de cálculo

Para determinar el porcentaje del tiempo en que cada  $Q_i$  es igualado o excedido se utilizó la fórmula de Gringorten presentada en el numeral 5.4.4.

✓ Perímetro mojado

Para la construcción de la curva P vs Q (ver Figura 1), se empleó la información disponible de la estación BALSORA LA y MACARENA LA (ver Tabla 19) en términos de caudales medios mensuales multianuales, niveles medios y perfiles transversales<sup>58</sup>, con dicha información se construyó la curva en mención para determinar el punto de inflexión de la misma y que de acuerdo con la información consultada representa el  $Q_e$  de la corriente.

Para la construcción de la curva P vs Q se emplearon los registros de niveles medios mensuales para establecer la relación H vs Q y así poder determinar para cada valor de lámina de agua (H), su valor correspondiente de P y adicionalmente el valor del caudal circulante (Q). Más adelante se detallan los resultados de dicho proceso (ver capítulo 8).

---

<sup>58</sup> La información de los perfiles transversales corresponde a la generada por el IDEAM para el periodo 2012-08-11 (BALSORA LA) y 2012-08-09 (MACARENA LA).

- **Quebrada La Reserva**

La quebrada La Reserva es un tributario directo del río Guayabero, donde según la distribución temporal y espacial de la precipitación se ve influenciada de manera similar por esta variable hidrológica. Teniendo en cuenta dicha situación, que la quebrada La Reserva se ubica en la cuenca del río Guayabero y puesto que no cuenta con registros históricos de caudales que permitan analizar series mensuales multianuales de caudales medios, es necesario para calcular el Qe en esta corriente la generación de los mismos mediante métodos indirectos de generación de caudales, en este caso en particular optando por el método de Isorrendimientos, Analítico o Analógico presentado previamente (ver numeral 5.4.1).<sup>59</sup>

- ✓ Método del IDEAM

Mediante el método analógico y empleando la serie histórica de caudales medios mensuales multianuales de la estación BALSORA LA que es la más próxima a la quebrada La Reserva, se generaron los caudales medios mensuales multianuales de la misma para determinar el mes en el cual se presenta el registro más bajo de caudal y establecer como Qe el 25% de su magnitud.

- ✓ Método de índices con la CDC

Tal y como lo establece SAÉNZ MONSALE Germán<sup>60</sup>, es posible la determinación de una curva de duración de caudales en una hoyo o cuenca hidrográfica en caso de inexistencia de caudales en el sitio de interés tal y como se presentó en el numeral 5.4.3, donde las cuencas de trabajo son el río Guayabero y la quebrada La Reserva.

- ✓ Método de perímetro mojado

Para el caso de la quebrada La Reserva se cuenta con información batimétrica en un tramo de 2 Km de longitud. Para desarrollar el procedimiento de cálculo asociado con la determinación del Qe por el método del perímetro mojado, se utilizó dicha información a partir de la cual se conocen todas las características geométricas del cauce.

Para poder construir la curva de P vs Q se empleó el software especializado Hidrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) en su versión 4.1.0. Con los datos batimétricos se procedió a calibrar el modelo hidráulico de la quebrada La Reserva, ajustando el valor del coeficiente de rugosidad de Manning de tal forma que los perfiles de

---

<sup>59</sup> CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (CVC) y Universidad del Valle. Estudio de los caudales afluentes y efluentes del embalse de Salvajina. Capítulo 4. Colombia. 2007. 35 p. y LUENGAS C., Belisario. Metodología para el Balance Hídrico Nacional. En: IDEAM – Centro de Documentación e Información Científico Técnica.

<sup>60</sup> MONSALVE SAÉNZ, Germán. Op. cit., 306 p.

lámina de agua modelados fueran lo más próximo a los perfiles obtenidos por medición directa durante aforo de caudal en 3 puntos de la corriente.

Una vez establecido el modelo hidráulico de la quebrada La Reserva y calibrado, se ejecutó la modelación de los caudales hasta encontrar el punto de inflexión de la curva P vs Q y que teóricamente representa el  $Q_e$  de la corriente bajo estudio.

#### **7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Obtenidos los resultados del cálculo del  $Q_e$  para las corrientes bajo estudio, río Guayabero y quebrada La Reserva, se analizan los resultados y se infiere cuál debe ser el  $Q_e$  seleccionado teniendo en cuenta el contexto de la región de estudio así como la información teórica referente a la temática de caudales ecológicos.

#### **7.5. RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DEL $Q_e$**

Desarrolladas las etapas previas donde el estado del arte de la temática de caudales ecológicos ha sido delimitado, conocidos algunos de los métodos de cálculo existentes y los enfoques en que éstos se clasifican, y desarrollada la experiencia de cálculo o aplicación práctica, se presentan lineamientos considerados necesarios para la selección del método de cálculo del  $Q_e$  así como una crítica y reflexión acerca de las implicaciones que puede tener la selección de uno u otro método.

## 8. APLICACIÓN PRÁCTICA DE CAUDAL ECOLÓGICO (RÍO GUAYABERO & QUEBRADA LA RESERVA)

La información que a continuación se presenta se refiere a delimitación de la zona de estudio, caracterización de la misma, cálculo del  $Q_e$  por los diferentes métodos seleccionados, y por último, análisis de los resultados de acuerdo con los métodos y enfoques de cálculo seleccionados.

### 8.1. Delimitación de la zona de estudio

La zona de estudio se refiere al AMEM, puntualmente a los 5 puntos y 2 franjas definidas por las coordenadas de la Tabla 17, sitios ubicados en los municipios de La Uribe y La Macarena en el departamento del Meta (ver Figura 7).

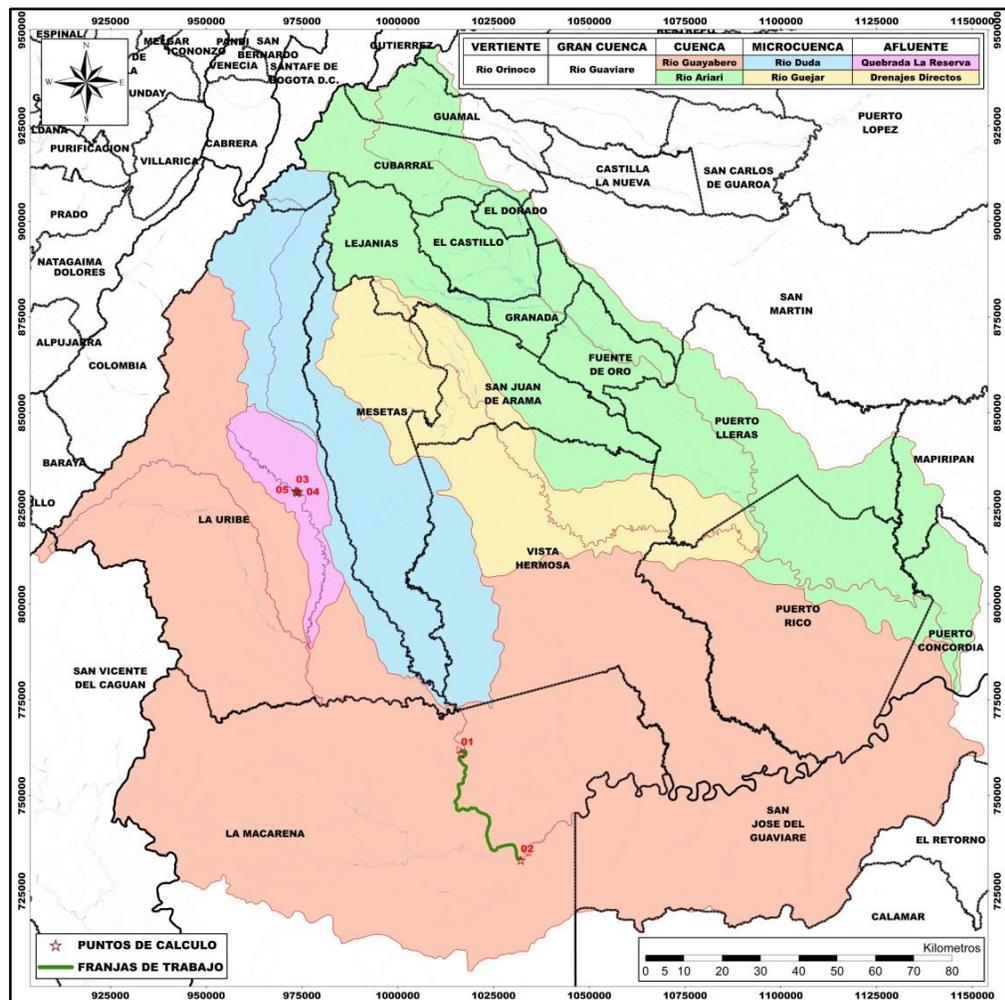
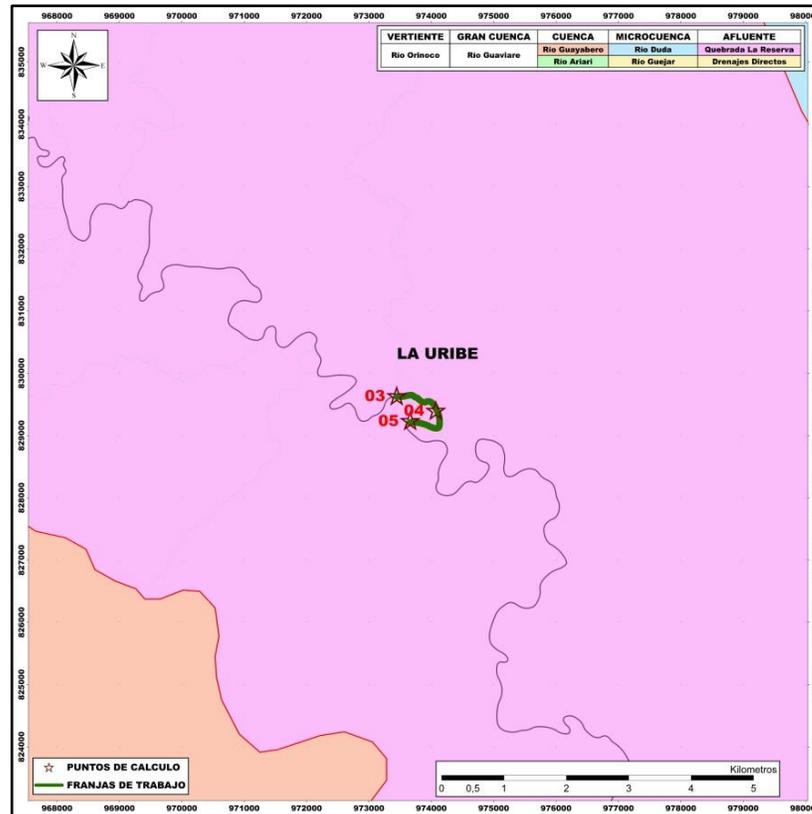


Figura 7. Localización zona de estudio

Adicionalmente, en la siguiente figura se realiza un zoom sobre los puntos de cálculo ubicados en la quebrada La Reserva y que complementa la información ya presentada.



**Figura 8. Localización zona de estudio  
Ubicación puntos de cálculo quebrada La Reserva**

## 8.2. Caracterización de la zona de estudio

### 8.2.1. Localización y red hidrográfica

A nivel regional, la zona de estudio se ubica en el Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM), la cual es un ecosistema estratégico para Colombia y que se ubica en su 90% en el departamento del Meta y el 10% restante en el del Guaviare. Está ubicada en la región centro-oriental de Colombia y yace sobre la convergencia de tres bioregiones: Amazonía, Orinoquía y los Andes. El AMEM tiene cobertura parcial sobre los municipios de Guamal, Granada, Fuentedeoro, Puerto Lleras y San Luis de Cubarral, así como cobertura total sobre los municipios de El Castillo, El Dorado, La Macarena, Lejanías, Puerto Concordia, Puerto Rico, Mesetas, San Juan de Arama, Uribe y Vista Hermosa (ver Figura 9).<sup>61</sup>

<sup>61</sup> CORMACARENA. Creación e importancia del Área de Manejo Especial La Macarena – AMEM Vistahermosa, Meta, Febrero de 2010.

Cabe mencionar de igual forma que dentro del AMEM se ubican 4 parques nacionales naturales (La Macarena, Picachos, Tinigua y Sumapaz), lo cual detalla el grado de importancia de la zona para el país y en especial para la conservación del medio ambiente.

Por último se debe mencionar que el AMEM queda circunscrita dentro de la zona Reserva Forestal de La Amazonía, la cual cubre los departamentos de Amazonas, Putumayo, Nariño, Caquetá, Guainía, Guaviare, Huila, Meta y Vaupés y que es igualmente una zona de gran importancia para Colombia.

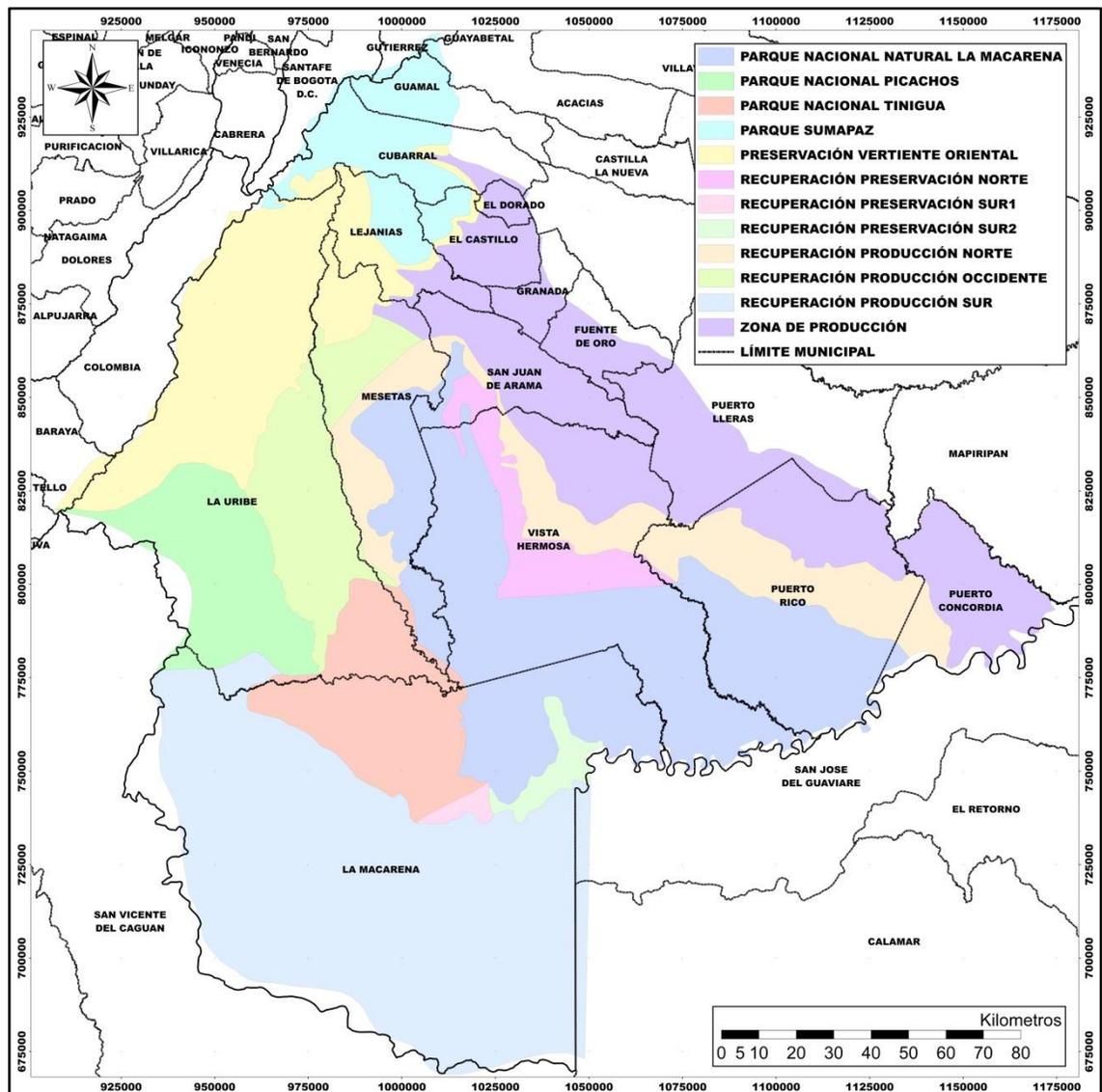
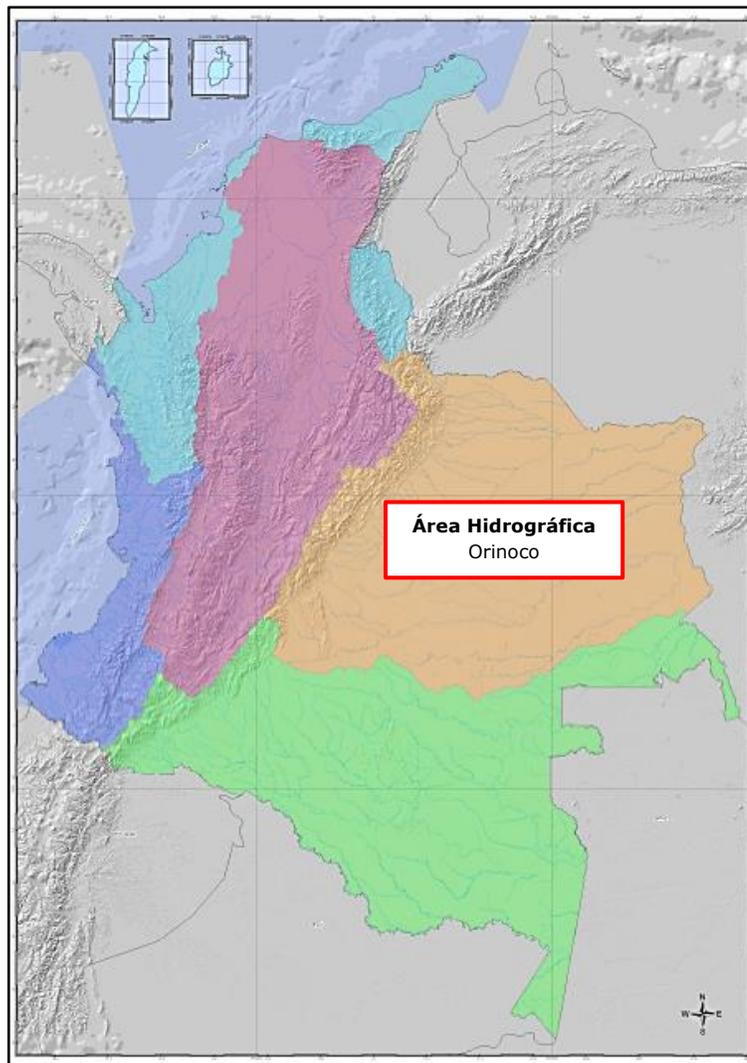


Figura 9. Área de Manejo Especial de La Macarena (AMEM)

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)<sup>62</sup>, la zona de estudio se ubica en el área hidrográfica del Orinoco (ver Figura 10), en la zona hidrográfica del río Guaviare (ver Figura 11), y entre las subzonas hidrográficas (3201) Cabeceras del Guayabero hasta bocas del río Duda, (3202) Duda y (mi) del Guayabero hasta el Refugio, y (3203) Losada y (md) del Guayabero hasta el Refugio (ver Figura 12), niveles de localización establecidos según la siguiente jerarquización.

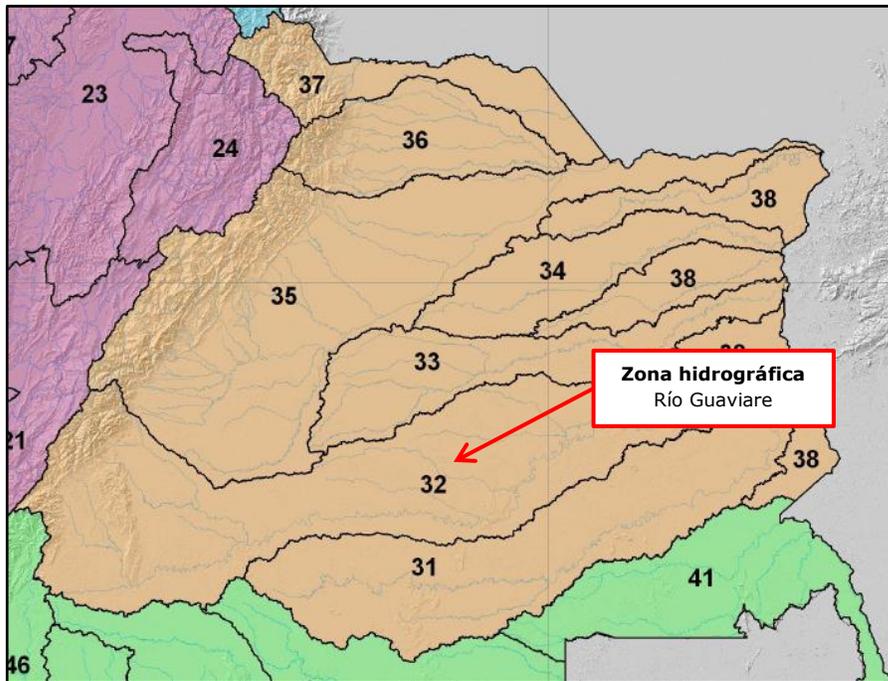
- ✓ Área hidrográfica
- ✓ Zona hidrográfica
- ✓ Subzona hidrográfica



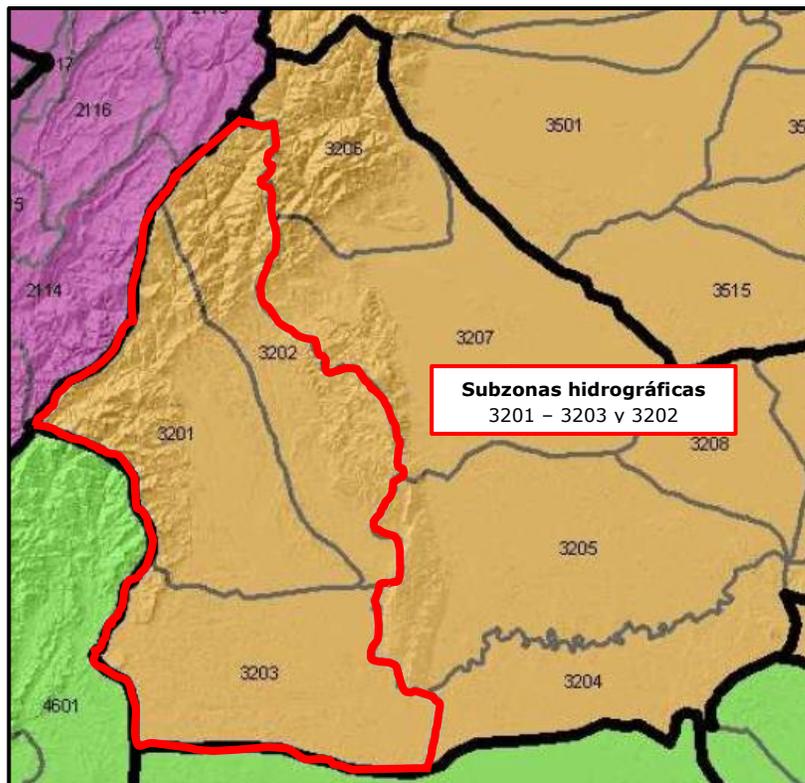
**Figura 10. Áreas hidrográficas de Colombia**

Fuente: IDEAM, 2009

<sup>62</sup> IDEAM. Zonificación hidrográfica de Colombia. 2009.



**Figura 11. Zonas hidrográficas de Colombia**  
 Fuente: IDEAM, 2009

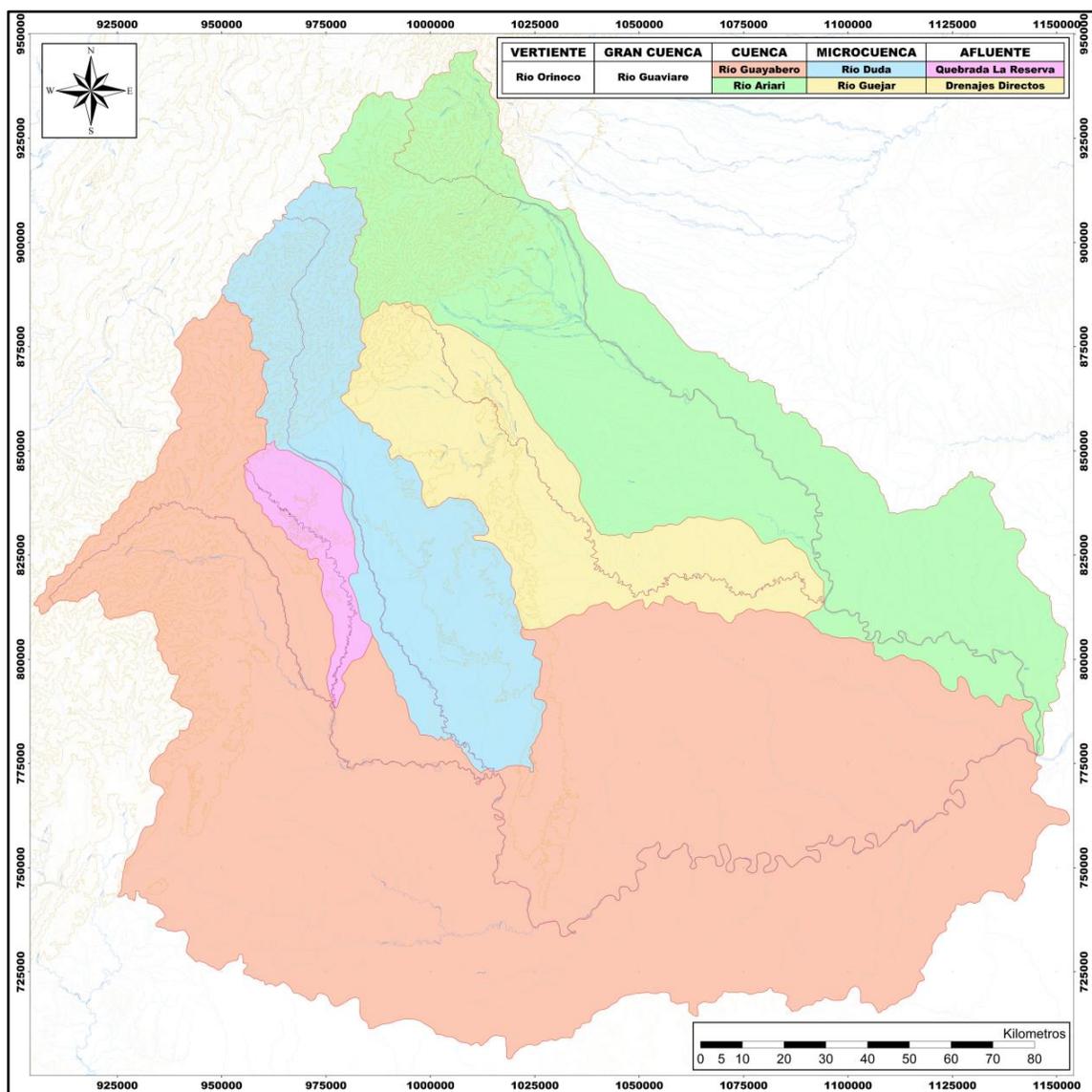


**Figura 12. Subzonas hidrográficas de Colombia**  
 Fuente: IDEAM, 2009

A continuación se presenta el cuadro de cuencas para las principales corrientes hídricas de la zona de estudio y dentro de las cuales se enmarca el río Guayabero y la quebrada La Reserva objeto de determinación del caudal ecológico; los cuerpos de agua pueden observarse en la Figura 13 que presenta las corrientes a partir del nivel de cuenca.

**Tabla 20. Cuadro de cuencas área de estudio**

VERTIENTE	GRAN CUENCA	CUENCA	MICROCUENCA	AFLUENTE
Orinoco	Río Guaviare	Guayabero	Duda	Reserva
		Ariari	Guejar	-



**Figura 13. Principales cuencas para la zona de estudio**

Como información de carácter descriptivo se presenta la siguiente que es complementaria de aquella consignada en los numerales 8.2.4, 8.2.5, 8.2.6 y 8.2.7, donde se expone información relacionada con las características físicas, el comportamiento de la precipitación y de los caudales medios para las cuencas de la zona de estudio.

- **Río Guaviare**

Nace en la cordillera oriental al suroeste del departamento del Meta. Corre primero al sureste, luego al noreste y posteriormente desemboca en el río Orinoco. Sirve de límites al departamento del Meta con los departamentos del Guaviare, Vaupés, Vichada y Guainía. Tiene una longitud de 1.350 Km. Recibe los ríos Guayabero, Duda, Cabra, Cafre, Ariari, Uva, Quejas, Mapiripán, Manaveni e Inírida.<sup>63</sup>

- **Río Guayabero**

Nace en la confluencia de los ríos Guaduas y Papaneme en las estribaciones de la cordillera oriental, con un recorrido orientado de occidente a oriente, irrigando los municipios de La Uribe, Vista Hermosa, La Macarena y, en su recorrido final, parte de Puerto Rico y Puerto Concordia en el departamento del Meta. A su vez, sirve de límite entre los departamentos del Meta y Guaviare; hasta encontrarse con la desembocadura del río Ariari, formando a partir de este punto el río Guaviare.<sup>64</sup> En su recorrido también pasa por la zona del parque de los Picachos, limita con el parque Tinigua, circunda la sierra de la Macarena y recorre las sabanas de los caños Yarumales, Cabra y Cafre.

La cuenca del río Guayabero presenta grandes corrientes que descienden de la cordillera Oriental hasta el valle medio del río Guayabero, donde desarrollan un régimen generalmente trezado cuando atraviesan paisajes de terrazas, entre estos afluentes se encuentran el río Leyva, Duda, Guape, Platanillo y Escaleras; cuando las corrientes recorren valles colinados adquieren por el contrario canales sinuosos como los que presenta el río Guaduas, el río Losada, caño Perdido y caño Yulo.<sup>65</sup>

---

<sup>63</sup> Atlas Geográfico – Principales ríos de Colombia. [en línea]. Consultado el 19/10/13. Disponible en: <http://atlasgeografico.net/tag/rio-guaviare>.

<sup>64</sup> Ministerio de Medio Ambiente (MMA) et al. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de un sector estratégico de los Distritos de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables Ariari – Guayabero y La Macarena, y del Parque Nacional Natural Sierra de La Macarena, en el Área de Manejo Especial La Macarena – AMEM, Departamento del Meta y Guaviare. Mayo de 2002.

<sup>65</sup> Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial de La Macarena (CORMACARENA). Levantamiento de cobertura vegetal y uso actual del suelo en los municipios del AMEM. Villavicencio (Meta), Junio de 1997.

### Fotografía 1. Río Guayabero a la altura del casco urbano de La Macarena



Fuente: Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA)

- **Río Ariari**

Nace en el Páramo de Sumapaz (alto de las Oseras), y desciende formando un gran cañon hasta su salida de la cordillera cerca de los municipios de El Dorado y Cubarral en el departamento del Meta. Allí comienza su proceso erosivo de arrastre de materiales, hasta la altura del municipio de Fuente de Oro, donde comienza a ser navegable por pequeñas embarcaciones. A partir del municipio de Puerto Lleras es navegable por embarcaciones de un calado importante (25 a 30 ton).

El río Ariari es un río de aguas amarillas en la época de invierno y de aguas claras en la época de verano. En su recorrido capta el 10% de las aguas que irrigan al departamento del Meta y que descienden por las laderas de la cordillera oriental y de la Sierra de la Macarena. Baña en su recorrido los municipios de Cubarral y El Castillo que conforman la cuenca alta; los municipios de Granada, Fuente de Oro y Lejanías que conforman la cuenca media o vega del Ariari; y los municipios de Puerto Lleras, Puerto rico y Puerto Concordia que conforman el bajo Ariari hasta su desembocadura al río Guayabero para dar origen al río Guaviare.<sup>66</sup>

- **Quebrada La Reserva**

Nace en la cordillera occidental a una altura aproximada de 1050 m.s.n.m. y desemboca a los 300 m.s.n.m. en el río Guayabero, con un área aproximada de 687 Km<sup>2</sup> con una longitud de su cauce principal de 139 Km aproximadamente. La cuenca hace parte del municipio de Uribe-Meta y presenta en su recorrido cambios de pendientes fuertes; en la Tabla 23 se presenta información adicional referente a las características físicas de la cuenca.

---

<sup>66</sup> Ministerio de Medio Ambiente (MMA) et al., Op. cit., p. 68

**Fotografía 2. Quebrada La Reserva**



Fuente: Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA)

### **8.2.2. Especies faunísticas acuáticas**

El siguiente apartado corresponde a información secundaria disponible para la región en cuanto a especies faunísticas acuáticas se refiere (ictiofauna, bentos y perifitón). La importancia de la información aquí consignada radica en que sirve como fundamento para determinar directrices en la selección del Qe, además de insumo para métodos de cálculo del caudal ecológico como los hidrobiológicos.

De acuerdo con el Estudio para el Ordenamiento Territorial de la cuenca del río Duda<sup>67</sup>, esta corriente cuenta con una notable diversidad ecológica en términos de fauna íctica, la cual a pesar de los cambios en los caudales y que les afecta, logran sobrevivir gracias a la cobertura boscosa en gran parte de arroyos y caños que evita que éstos desaparezcan completamente durante el período seco, garantizando la subsistencia de un gran número de formas pequeñas o juveniles de peces que de lo contrario deberían migrar o morir.

---

<sup>67</sup> Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial de La Macarena (CORMACARENA) y SINARCO Ltda. Estudio para el Ordenamiento Territorial de la cuenca del río Duda. Villavicencio (Meta), Noviembre de 1999.

Dentro de las especies ícticas que cita el estudio en comento se encuentran las presentadas en la Tabla 21, donde en el río Duda se encuentran las formas de mayor valor para el consumo o la comercialización en la región como es el *Piaractus brachypomum* (Cachama blanca), *Brachyplatystoma flavicans* (Dorado), *Brachyplatystoma juruensis* (Apui), *Goslinia platynema* (Baboso) y *Paulicea lutkeni* (Amarillo).

También menciona el Estudio para el Ordenamiento Territorial de la cuenca del río Duda, que la familia Pimelodidae tiene presencia en la corriente, familia en la que se encuentran las especies de peces de mayor importancia para la pesca y de más amplia distribución en las grandes corrientes de la Orinoquía Colombiana y por consiguiente es de esperar su existencia en el río Guayabero, Ariari, quebrada La Reserva, etc., especies como *Brachyplatystoma filamentosum* (Valentón), *Brachyplatystoma flavicans* (Dorado), *Goslinia platynema* (Baboso), *Paulicea lutkeni* (Amarillo), *Phractocephalus hemiliopterus* (Cajaro), *Pseudoplatystoma fasciatum* (Pintadillo) y *Pseudoplatystoma trigrinum* (Bagre tigre).

De igual forma menciona el Estudio para el Ordenamiento Territorial de la cuenca del río Duda, que la familia Serrasalmodidae tiene presencia en el río Duda (ver Tabla 21), e incluye una serie de especies de consumo como *Colossoma macropomum* (Cachama negra), además de las familias Prochilodidae con *Prochilodus marieae* (Coporo) y Ageneiosidae con *Angeniusus brevifilis* (Chanleto) son significativas para la pesca de consumo.

**Tabla 21. Especies ícticas reportadas para la cuenca del río Duda**

FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN
AGENEIOSIDAE	<i>Angeniusus brevifilis</i>	Chanleto
CHARACIDAE	<i>Pryconamericus spp</i>	Guarupaya
	<i>Gephyrocharax sp</i>	
CLUPEIDAE	<i>Fallona flavipinnia</i>	Sardinata
CTENOLUCIDAE	<i>Ctenolucios hujeta</i>	Agujeto
CYNODONTIDAE	<i>Hydrolichus scomberoides</i>	Payara
	<i>Phaphiodontichthys vulpinus</i>	Payarín
DORADIDAE	<i>Sachdoras sp</i>	Sierra copora
ERYTHRINIDAE	<i>Hoplías malabaricus</i>	Guabina
PIMELODIDAE	<i>Brachyplatystoma filamentosum</i>	Valentón
	<i>Brachyplatystoma flavicans</i>	Dorado
	<i>Brachyplatystoma juruensis</i>	Apui
	<i>Brachyplatystoma vaillanti</i>	Blanco pobre
	<i>Callophysus macropterus</i>	Simi
	<i>Goslinia platynema</i>	Baboso
	<i>Leiaris marmoratus</i>	Bagre negro
	<i>Paulicea lutkeni</i>	Amarillo
	<i>Phractocephalus hemiliopterus</i>	Cajaro
<i>Pinirampus pinirampu</i>	Barbiacho	

**Tabla 21. Especies ícticas reportadas para la cuenca del río Duda**

FAMILIA	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN
	<i>Sorubimichthys planiceps</i>	Paletón
	<i>Zungaro zungaro</i>	Bagre
PROCHILODIDAE	<i>Prochilodus marieae</i>	Coporo
SCIAENIDAE	<i>Plagioscion squamosissimus</i>	Pacora
SERRASALMIDAE	<i>Colossoma macropomum</i>	Cachama negra
	<i>Metynnis sp</i>	
	<i>Mylossoma duriventris</i>	Palometa
	<i>Piaractus brachypomum</i>	Cachama blanca

Fuente: CORMACARENA y SINARCO Ltda, 1999

En cuanto a la comunidad de perifitón se refiere, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para el Área de Interés Exploratorio Tinigua Módulo 1<sup>68</sup> reporta para la quebrada La Reserva (E 974090; N 829410) dieciocho especies de organismos perifíticos, de las cuales *Cymbella sp* fue la más abundante para el muestreo ejecutado, encontrándose también las especies presentadas en la siguiente tabla; la importancia de estas especies así como las especies bentónicas es su uso como indicadores de calidad del agua, lo cual permitiría, con mayor profundización, su empleo para la correcta selección del Qe para las corrientes hídricas que habitan tal y como se explicará más adelante.

**Tabla 22. Organismos perifíticos quebrada La Reserva**

FAMILIA	TAXA
Bacillariaceae	<i>Hantzschia sp</i>
Cymbellaceae	<i>Nitzschia sp</i>
	<i>Cymbella sp</i>
Gomphonemataceae	<i>Gomphonema sp</i>
Naviculaceae	<i>Navicula sp</i>
Pinnulariaceae	<i>Pinnularia sp</i>
Stauroneidaceae	<i>Stauroneis sp</i>
Surirellaceae	<i>Surirella sp</i>
Melosiraceae	<i>Melosira sp</i>
Fragilariaceae	<i>Fragilaria sp</i>
Scenedesmaceae	<i>Scenedesmus sp</i>
Cladophoraceae	<i>Oedogonium sp</i>
Volvocaceae	<i>Pandorina sp</i>
Desmidiaceae	<i>Cosmarium sp 1</i>

<sup>68</sup> Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Área de Interés Exploratorio Tinigua Módulo 1. 2012.

**Tabla 22. Organismos perifíticos quebrada La Reserva**

FAMILIA	TAXA
	Cosmarium sp
	Closterium
Mesotaeniaceae	Gonatozygon sp
Zygnemataceae	Spirogyra sp

Fuente: Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA)

Finalmente en términos de macroinvertebrados bentónicos, reporta el EIA citado que para la quebrada La Reserva se encontraron las siguientes especies: Macrelmis sp, Lumbricillus sp, Stylodrilus sp y Probezzia sp, siendo de importancia en tanto son indicadores de las condiciones de calidad del agua, lo cual permitiría, con mayor estudio, su uso para indicar la correcta selección de un Qe, que permita monitorear unas condiciones de calidad fisicoquímicas en las corrientes hídricas y que garantice la sobrevivencia de las especies ícticas de importancia para la región, por ejemplo.

### **8.2.3. Actividades socioeconómicas y usos del agua**

Según lo refiere CORMACARENA<sup>69</sup>, la economía de los municipios del AMEM está basada principalmente en la producción agropecuaria y la explotación forestal, y en menor escala la pesca. La principal característica de los sistemas de producción en el AMEM es que se basan en una economía campesina encajonada en sistemas tradicionales, con escasa tecnificación e ineficiente uso del suelo, insuficientes recursos de capital y la manifestación de deterioro ambiental.

En lo particular para La Uribe y La Macarena, se puede mencionar que en el primer caso el municipio tiene vocación fundamentalmente agrícola, con su agricultura destinada al consumo por parte de los habitantes del municipio y los excedentes para comercialización en municipios cercanos, siendo la extracción de madera otra actividad de escala importante, al igual que la ganadería extensiva e intensiva. En el caso de La Macarena la situación es muy similar, con una economía fundamentada en la actividad agropecuaria, destinada principalmente a cultivos de pan coger como el frijol, el maíz, la yuca y en menor escala el café y cacao, contando con actividad ganadera de igual forma y que es de carácter intensivo, destacando finalmente la explotación maderera.<sup>70</sup>

En cuanto al uso del agua, en la zona existe una característica y es la ausencia de servicios públicos en zonas alejadas al casco urbano de los municipios, en el caso particular de La Uribe y La Macarena, donde para la captación de agua o su

<sup>69</sup> Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial de La Macarena (CORMACARENA). Levantamiento de cobertura vegetal y uso actual del suelo en los municipios del AMEM. Op. cit. p. 59 – 63.

<sup>70</sup> Idem.

aprovechamiento la población recurre a métodos alternos a acueductos veredales o municipales, abasteciéndose principalmente a través de jagüeyes, aljibes y marcadamente de cuerpos de agua superficiales, escenario que impone la necesidad de garantizar la oferta hídrica mediante la conservación del recurso a través de la planificación en su uso.<sup>71</sup>

#### 8.2.4. Caracterización morfométrica de cuencas

La caracterización morfométrica que se presenta, resume una serie de parámetros e índices calculados con relación a las cuencas hidrográficas bajo estudio (ver Tabla 20), que permiten, a través de su interpretación, verificar la uniformidad de la región en términos hidrológicos y que sirve como fundamento para la selección del método analógico para la transposición de caudales medios.

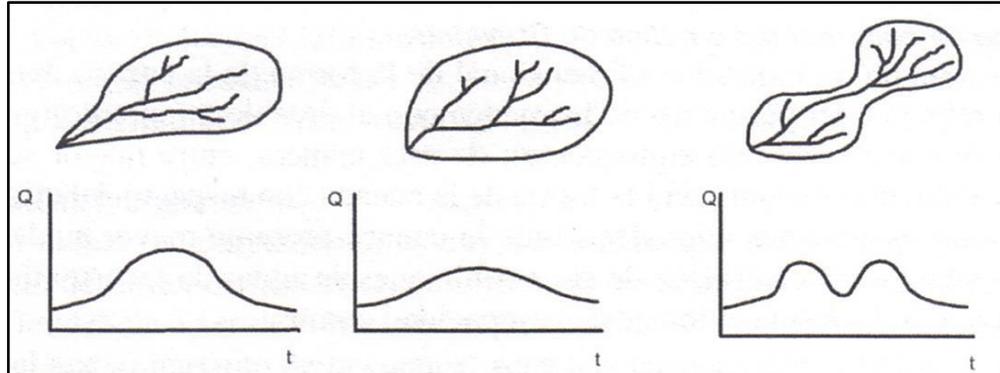
**Tabla 23. Resultados caracterización morfométrica**

PARÁMETRO	Quebrada La Reserva	Río Ariari	Río Duda	Río Guayabero	Río Guejar
Área (Km <sup>2</sup> )	686.73	8079.62	3882.15	19490.55	3285.83
Perímetro (Km)	164.40	653.23	421.21	1015.51	362.33
Índice de compacidad - K <sub>c</sub>	1.76	2.03	1.89	2.04	1.77
Factor de forma - F	0.036	0.028	0.076	0.047	0.052
Índice de alargamiento - I <sub>a</sub>	7.32	9.77	6.18	6.41	7.19
Índice asimétrico - I <sub>as</sub>	2.00	1.29	3.05	1.35	1.88
Pendiente media de la cuenca (%) - S <sub>c</sub>	2.62	12.04	18.58	5.43	9.88
Coefficiente de masividad (m/Km <sup>2</sup> ) - K <sub>m</sub>	0.67	0.10	0.31	0.02	0.16
Coefficiente orográfico - Co	3.12x10 <sup>-4</sup>	9.91x10 <sup>-5</sup>	3.07x10 <sup>-4</sup>	2.15x10 <sup>-5</sup>	1.65x10 <sup>-4</sup>
Densidad de drenaje (Km <sup>-1</sup> ) - D <sub>d</sub>	1.00	1.13	1.06	0.97	0.91
Constante de estabilidad del río (Km) - C	1.00	0.88	0.94	1.03	1.10

A partir de los resultados de la Tabla 23 se logra interpretar a través del índice de compacidad (K<sub>c</sub>) la uniformidad geométrica de las cuencas, donde todas presentan valores por encima de 1.7 unidades, lo cual establece cuencas más largas que anchas u oblongas, característica que implica que en la región exista una menor tendencia a las crecientes en tanto el valor del índice es alejado de la unidad. Otro índice que refuerza la respuesta de las cuencas estudiadas hacia las crecientes es el factor de forma (F), donde para cada una de las corrientes estudiadas los valores de F son inferiores a la unidad, lo

<sup>71</sup> Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Área de Interés Exploratorio Tinigua Módulo 1. Op. cit.

cual habla acerca de la baja susceptibilidad a las crecientes y que influencia en últimas la respuesta P-Q, es decir, el tipo de hidrogramas asociados a un evento de lluvia (ver Ilustración 11).



**Ilustración 11. Hidrogramas para cuencas con la misma área y diferentes formas para una lámina precipitada de igual magnitud**

Fuente: Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidro. (TRUJILLO, Aldemar et. al)

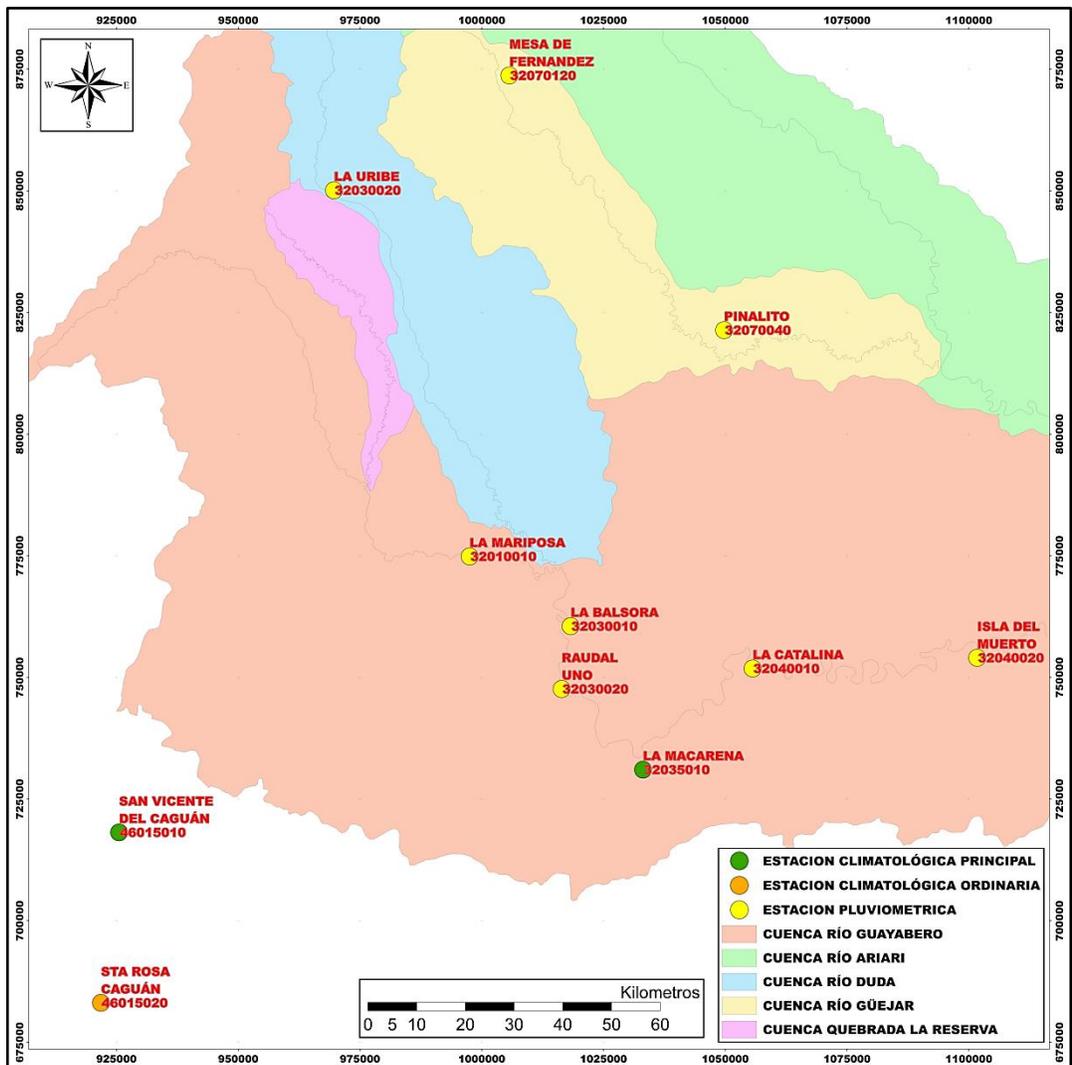
Otra característica que denota la elongación que presentan las cuencas estudiadas es el índice de alargamiento ( $I_a$ ), el cual define, como su nombre lo indica, el grado de alargamiento existente y que para el caso es alto, con valores mayores a la unidad y que describen cuencas alargadas.

Entre los índices calculados y que evidencian la similitud hidrológica de las cuencas está el coeficiente de masividad ( $k_m$ ), que para el caso de todas las cuencas presenta valores por debajo de la unidad, lo cual supone, de acuerdo con las clases de masividad, que las cuencas son moderadamente montañosas (rango de 0 – 35), información que se corrobora mediante los resultados del coeficiente orográfico ( $C_o$ ) y cuyos órdenes de magnitud son similares ( $10^{-5}$  a  $10^{-4}$ ), lo cual supone que los cuerpos de agua estudiados cuentan con mayor superficie en comparación con su altitud.

Por último cabe mencionar la similitud en las características físicas, y por ende en el comportamiento hidrológico de las corrientes estudiadas, que se refleja a través de la densidad del drenaje ( $D_d$ ), la cual es similar en todos los casos, con valores próximos a la unidad y que determina un nivel de drenaje moderado, explicando a su vez la baja susceptibilidad a las crecientes tal y como fuera mencionado.

### **8.2.5. Análisis temporal de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales**

El análisis temporal de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales se desarrolló con los registros disponibles para el periodo y las estaciones identificadas en la Tabla 18 y cuya localización se puede observar en la siguiente figura.

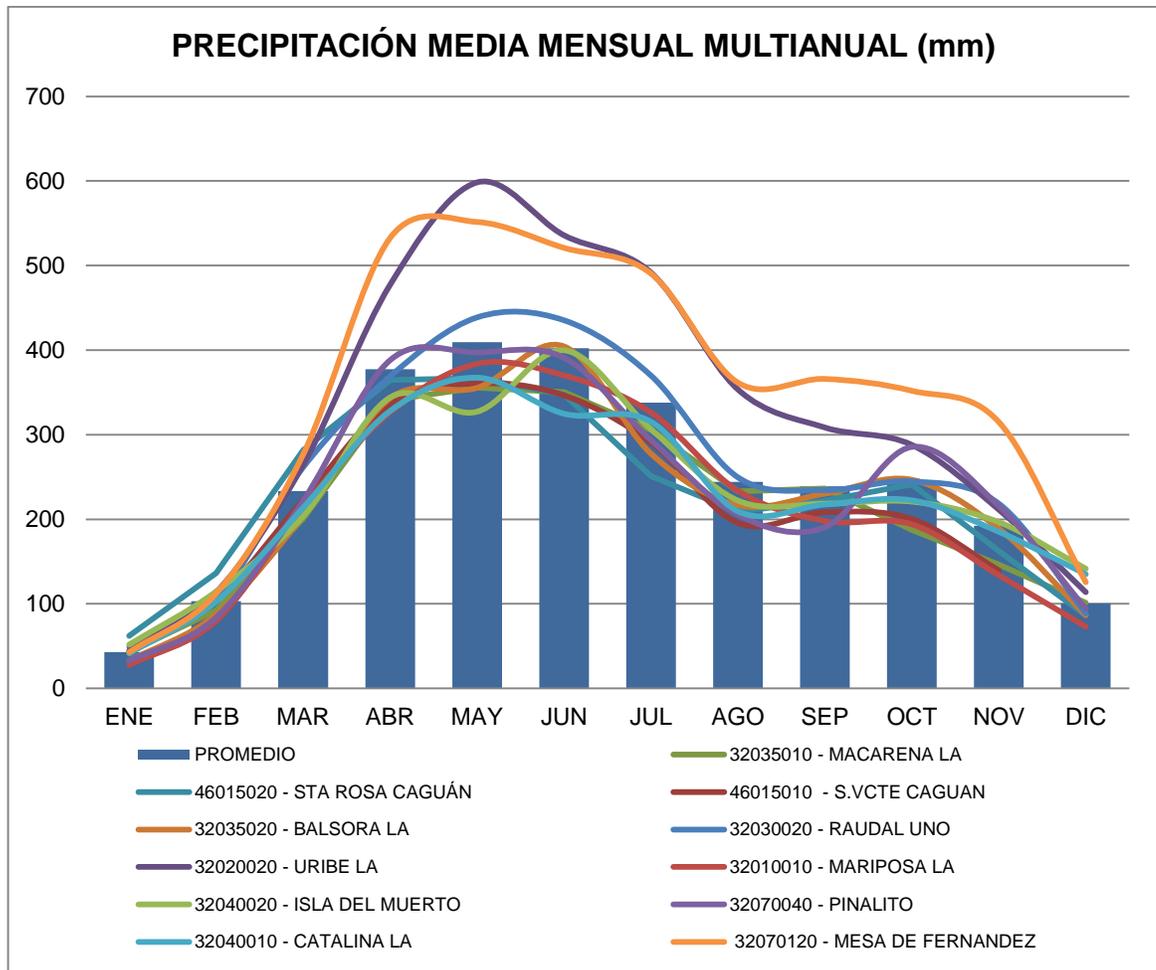


**Figura 14. Localización estaciones empleadas en la caracterización del comportamiento espacial de la precipitación en la zona de estudio**

En la Figura 15 se observa el comportamiento de las precipitaciones a nivel medio mensual multianual, donde se aprecia que para la zona existe un claro comportamiento monomodal de la precipitación, con los picos de lámina de agua para el primer semestre del año, donde los valores máximos de precipitación se registran para los meses de Abril a Julio, seguido de un descenso progresivo de los registros entre los meses de Agosto a Diciembre, hasta llegar a los valores mínimos de precipitación para el mes de Enero.

A partir de la gráfica se logra inferir la uniformidad de la precipitación en la zona de estudio en términos de magnitud, con desviaciones de precipitación del orden de 200 mm de lámina de agua para las estaciones ubicadas en cercanías a la cordillera oriental (URIBE LA y MESA DE FERNANDEZ) tal y como puede apreciarse con mayor claridad en la Figura 16, comportamiento que obedece a una elevación orográfica de las masas de

aire por presencia de la cordillera oriental y que generan los datos registrados. En la Tabla 18 se consigna información de las estaciones citadas en la Figura 15, para las cuales el período de registro trabajado es de 1993 a 2013.



**Figura 15. Comportamiento temporal de la precipitación media mensual multianual de la zona de estudio (1993 – 2013)**

Los valores graficados se resumen a continuación (ver Tabla 24), donde se observa que el registro máximo de precipitación se presenta en el mes Mayo con 598.37 mm, mientras que el mínimo se registra para el mes de Enero con 27.58 mm de agua, con valores promedios de precipitación que oscilan en el rango de 42.80 mm a 409.34 mm.

**Tabla 24. Valores totales medios mensuales multianuales de precipitación (mm) – 1993 a 2013**

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VALOR ANUAL
46015010 - S.VCTE CAGUAN	42.74	104.26	222.83	336.08	360.50	346.52	290.82	195.61	208.37	200.34	139.63	57.54	2505.22
32035010 - MACARENA LA	43.07	92.25	200.83	340.85	355.46	350.38	305.49	232.94	236.42	187.41	146.46	101.32	2592.87
46015020 - STA ROSA CAGUÁN	62.27	136.16	281.83	364.82	366.91	347.48	251.01	208.76	222.03	241.27	162.63	86.38	2731.55
32035020 - BALSORA LA	32.63	87.74	203.75	343.09	355.51	404.43	277.65	216.61	230.25	246.67	188.95	86.61	2673.90
32030020 - RAUDAL UNO	49.26	105.58	261.53	369.00	438.71	435.31	369.94	249.54	234.53	244.84	218.50	88.76	3065.51
32020020 - URIBE LA	44.89	113.65	264.29	477.35	598.37	535.79	491.67	353.44	308.50	287.94	211.39	113.83	3801.12
32010010 - MARIPOSA LA	27.58	80.17	214.80	326.38	383.89	370.14	326.28	233.65	198.00	194.10	133.80	73.05	2561.84
32040020 - ISLA DEL MUERTO	51.88	114.65	203.71	344.13	327.19	399.81	306.57	222.14	218.53	220.91	196.63	141.56	2747.70
32070040 - PINALITO	32.44	84.02	221.95	388.17	397.19	390.92	293.61	205.22	190.65	285.60	215.70	94.42	2799.88
32040010 - CATALINA LA	41.22	102.75	213.71	328.11	367.44	324.79	315.39	209.44	217.39	222.38	185.19	135.06	2662.87
32070120 - MESA DE FERNANDEZ	42.85	112.35	276.65	532.75	551.56	520.94	490.53	361.53	366.00	351.94	315.00	125.56	4047.65
PROMEDIO	42.80	103.05	233.26	377.34	409.34	402.41	338.09	244.45	239.15	243.95	192.17	100.37	2926.37
MÁXIMO	62.27	136.16	281.83	532.75	598.37	535.79	491.67	361.53	366.00	351.94	315.00	141.56	598.37
MÍNIMO	27.58	80.17	200.83	326.38	327.19	324.79	251.01	195.61	190.65	187.41	133.80	57.54	27.58

### 8.2.6. Distribución espacial de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales

La distribución espacial de la precipitación media mensual multianual se grafica en la siguiente figura (ver Figura 16), observando que en la región la lluvia se distribuye de manera uniforme, con las máximas precipitaciones hacia la cordillera oriental a partir de la cual los registros disminuyen progresivamente a medida que se adentra hacia el piedemonte. En la Tabla 18 se consigna información de las estaciones citadas en la Figura 16, para las cuales el período de registro trabajado es de 1993 a 2013.

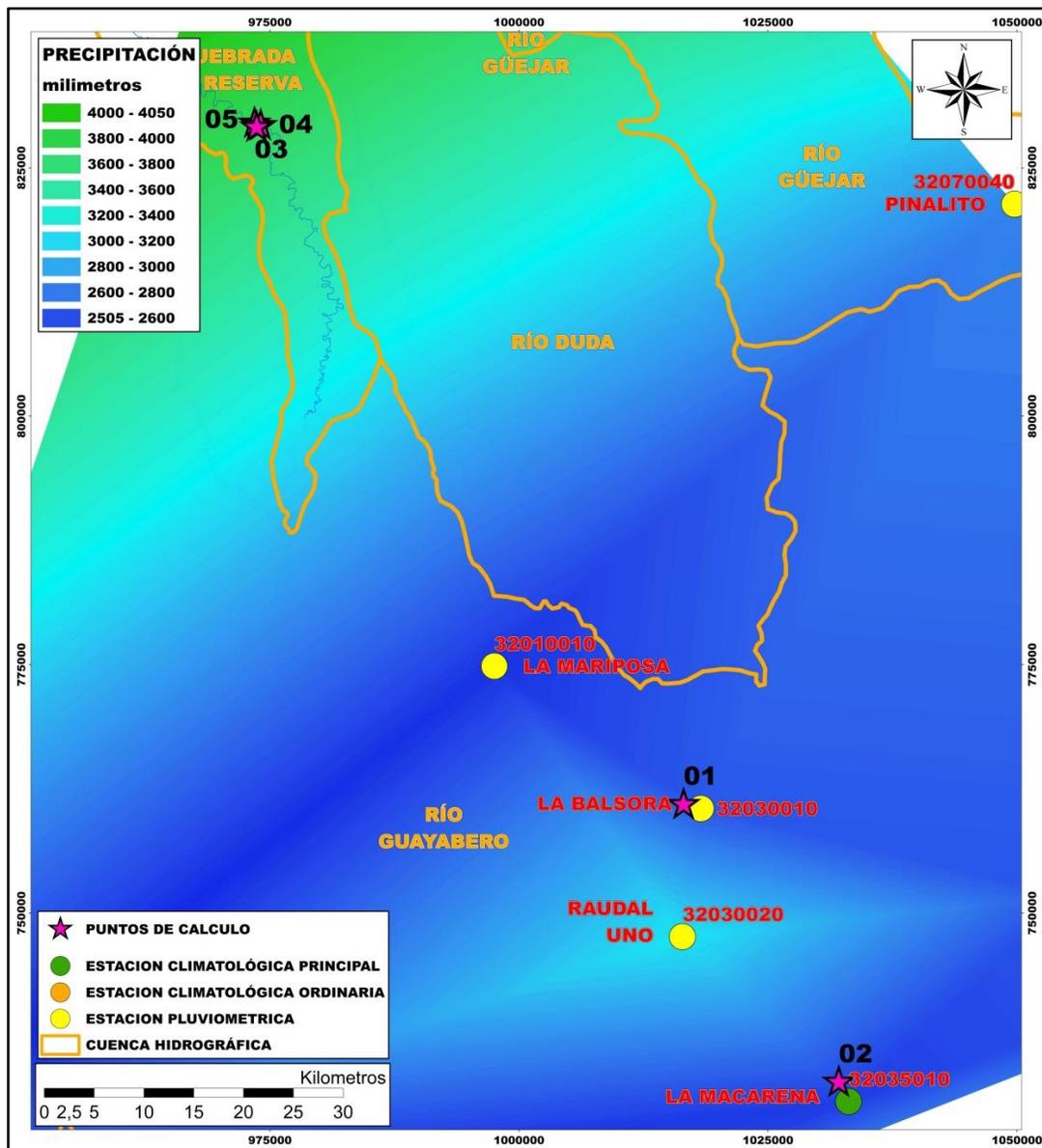


Figura 16. Distribución espacial de la precipitación total media mensual multianual en la zona de estudio (1993 – 2013)

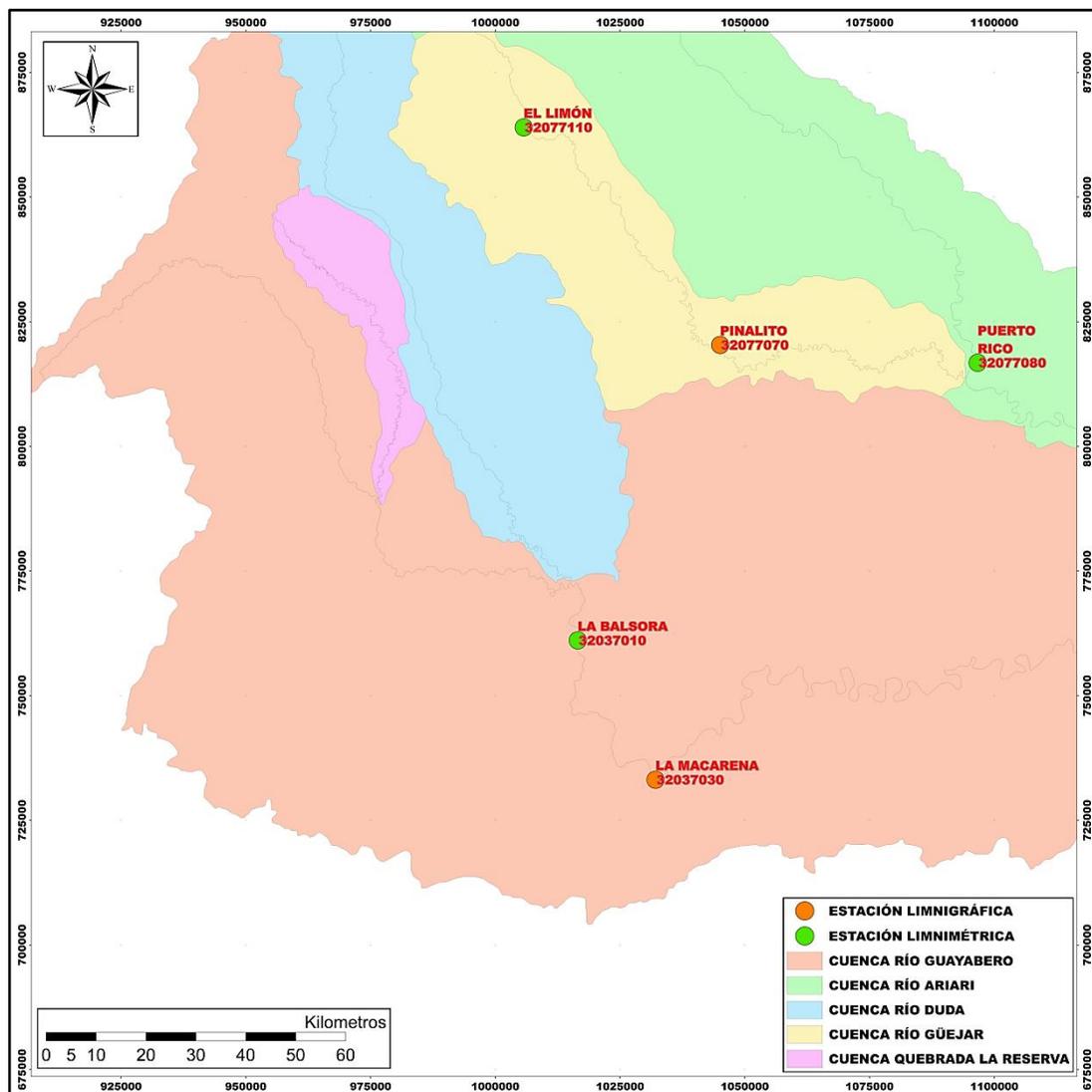
### 8.2.7. Análisis temporal de los caudales medios mensuales multianuales

El análisis temporal de los caudales medios mensuales multianuales se presenta a continuación, información que tiene como base los registros de caudales medios de las estaciones disponibles para la zona y que monitorean las siguientes corrientes.

**Tabla 25. Estaciones hidrométricas empleadas y corrientes monitoreadas**

<b>ESTACIÓN</b>	<b>CORRIENTE</b>
3203701 - BALSORA LA	GUAYABERO
3203703 - MACARENA LA	GUAYABERO
3207707 - PINALITO	GUEJAR
3207711 - LIMON EL	GUEJAR
3207708 - PTO RICO	ARIARI

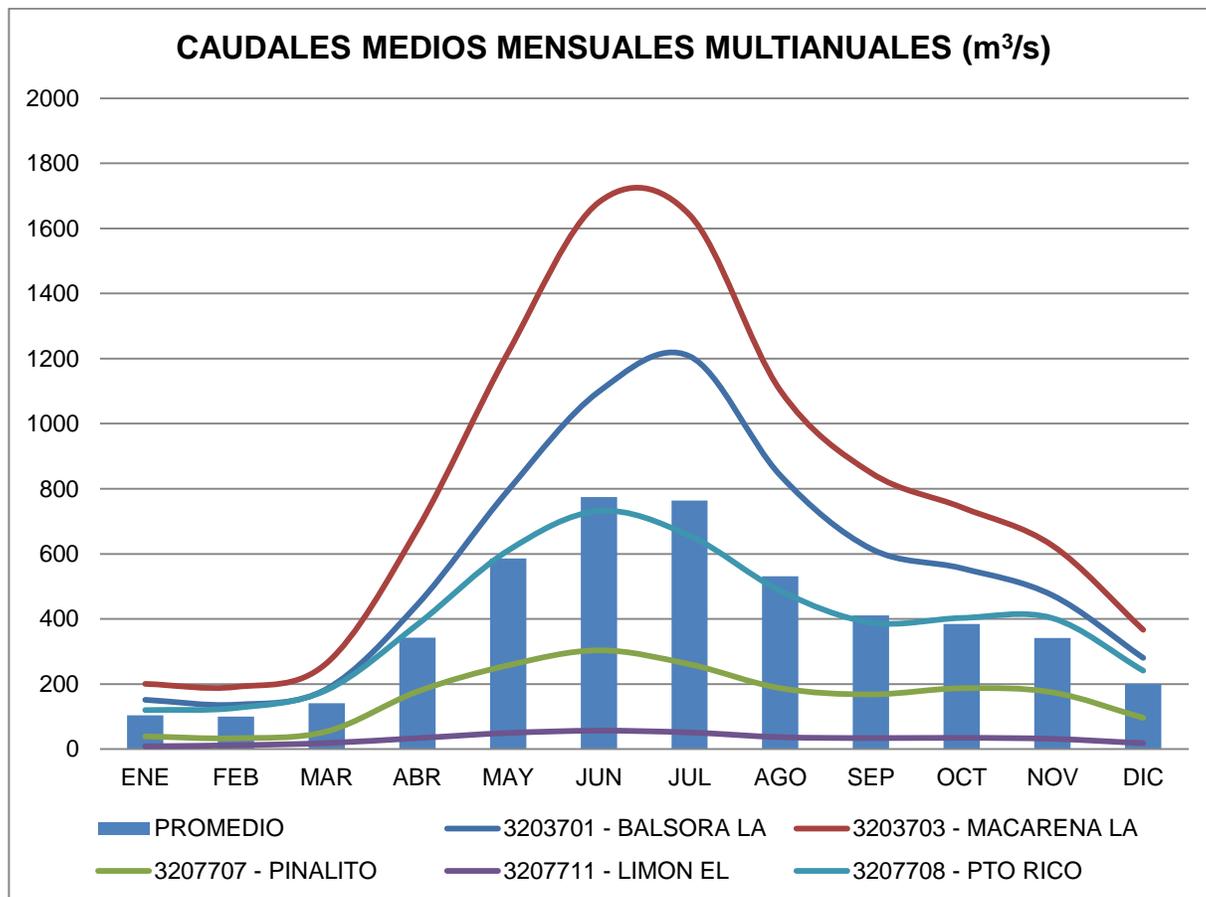
La ubicación espacial de las estaciones empleadas para el análisis temporal de caudales medios mensuales multianuales se presenta en la siguiente figura.



**Figura 17. Localización estaciones hidrométricas empleadas en la caracterización de caudales en la zona de estudio**

En la Figura 18 se observa que para la zona existe un claro comportamiento monomodal para el régimen hidrológico, donde los registros picos o máximos de caudal a nivel intranual se presentan para mitad del año calendario, comportamiento que se desfasa ligeramente para la zona de estudio con respecto a los picos de precipitación, presentándose los mayores registros de lluvia para el mes de Mayo (ver Figura 15), paso seguido para que en el mes de Junio se presenten los mayores órdenes de magnitud de caudal, característica que evidencia para las corrientes estudiada y de manera general para la zona de estudio, una correlación de tipo precipitación-escorrentía, donde posterior a un evento de lluvia se registra una respuesta en los caudales y que es de proporcionalidad.

Como otra característica de relevancia, del análisis de caudales se observa que la corriente que mayor caudal líquido transporta es el río Guayabero, cuyos caudales promedios a nivel anual oscilan 500 a 800 m<sup>3</sup>/s, entendiéndose así que éste es una de las principales corrientes del área cuya oferta hídrica es atractiva para la región, mientras que corrientes de menor envergadura como es el río Guejar cuenta con caudales líquidos cercanos a 100 m<sup>3</sup>/s como promedio anual. En la Tabla 19 **Tabla 18** se consigna información de las estaciones citadas en la Figura 18, para las cuales el período de registro trabajado es de 1983 a 2011.



**Figura 18. Comportamiento temporal de los caudales medios mensuales multianuales de la zona de estudio (1983 – 2011)**

Los valores graficados se resumen en la siguiente tabla, donde se observa que el registro máximo de caudal se presenta en el mes Junio (1680.45 m<sup>3</sup>/s), mientras que el mínimo se registra para el mes de Enero (8.69 m<sup>3</sup>/s), con valores promedios de que oscilan entre 99.93 a 774.21 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 26. Valores medios mensuales multianuales de caudal (m<sup>3</sup>/s) – 1983 a 2011**

CORRIENTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VALOR ANUAL
RÍO GUAYABERO	151.45	136.68	184.88	444.08	795.11	1098.61	1207.35	841.06	615.55	555.78	472.66	280.41	565.30
	200.53	191.13	264.27	675.68	1219.01	1680.45	1641.96	1102.19	849.02	742.95	625.51	366.54	796.60
RÍO GUEJAR	39.15	33.50	54.29	176.88	257.56	303.53	260.70	187.29	168.18	187.14	174.47	96.07	161.56
	8.69	11.78	18.65	33.75	49.73	56.72	51.16	36.78	33.91	34.75	31.54	18.23	32.14
RÍO ARIARI	119.94	126.56	181.50	382.95	610.37	731.72	655.97	486.23	388.87	403.06	402.34	241.17	394.22
PROMEDIO	103.95	99.93	140.72	342.67	586.36	774.21	763.43	530.71	411.11	384.74	341.30	200.48	389.97
MÁXIMO	200.53	191.13	264.27	675.68	1219.01	1680.45	1641.96	1102.19	849.02	742.95	625.51	366.54	1680.45
MÍNIMO	8.69	11.78	18.65	33.75	49.73	56.72	51.16	36.78	33.91	34.75	31.54	18.23	8.69

### 8.3. Cálculo del Qe para el río Guayabero y quebrada La Reserva

A continuación se presentan los resultados del cálculo del Qe para el río Guayabero y la quebrada La Reserva mediante el enfoque hidrológico empleando el método del IDEAM y el método de índices con la CDC, así como los resultados del Qe empleando el método del perímetro mojado clasificado dentro del enfoque hidráulico; nuevamente se presentan los puntos de cálculo seleccionados para la determinación del Qe en el río Guayabero y quebrada La Reserva.

**Tabla 27. Puntos de trabajo para el cálculo del Qe**

PUNTO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ	
		Este	Norte
1	Río Guayabero	1016529,943	761076,467
2		1032109,857	733130,248
3	Quebrada La Reserva	973445,230	829643,082
4		974071,105	829407,368
5		973661,316	829243,191

#### 8.3.1. Método del IDEAM

- **Río Guayabero**

De acuerdo con el registro de caudales de las estaciones hidrométricas BALSORA LA (punto de cálculo 1) y MACARENA LA (punto de cálculo 2), a continuación se presentan los valores promedios de caudales a nivel intranual y que permiten conocer el mes del año con el registro promedio mínimo y a partir del cual se realiza el cálculo del Qe según la propuesta del IDEAM.

**Tabla 28. Resumen de caudales medios mensuales estación BALSORA LA  
Punto de cálculo 1 (m<sup>3</sup>/s)**

BALSORA LA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIOS	151.45	136.68	184.88	444.08	795.11	1098.61	1207.35	841.06	615.55	555.78	472.66	280.41
MAXIMOS	273.10	325.70	345.00	878.90	1398.00	1664.00	1831.00	1224.00	836.10	979.70	747.80	435.60
MINIMOS	59.69	45.45	81.07	125.10	289.10	330.10	771.90	552.60	444.70	395.70	206.40	138.00

**Tabla 29. Resumen de caudales medios mensuales estación MACARENA LA  
Punto de cálculo 2 (m<sup>3</sup>/s)**

MACARENA LA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIOS	200.53	191.13	264.27	675.68	1219.01	1680.45	1641.96	1102.19	849.02	742.95	625.51	366.54
MAXIMOS	430.50	341.70	523.50	1336.00	2196.00	2594.00	2503.00	1700.00	1258.00	1274.00	1079.00	643.70
MINIMOS	110.00	97.22	142.50	179.80	409.00	912.00	1026.00	610.80	522.40	476.40	308.90	178.60

Según la información expuesta en las anteriores tablas, el Qe para el punto de cálculo 1 y 2 es 34.17 y 47.78 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

- **Quebrada La Reserva**

En el caso de la quebrada La Reserva, los puntos de cálculo son en total tres (punto de cálculo 3, 4 y 5), para los cuales se realiza el cálculo del Qe empleando para ello el método de transposición de caudales presentado en el numeral 5.4.1, aclarando que el método analógico utilizado no tiene en cuenta el coeficiente de corrección pluviométrico.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

Donde,

$Q_2$ : Caudal medio quebrada La Reserva

$Q_1$ : Caudal medio del río Guayabero – estación BALSORA LA

$A_1$ : Área aferente río Guayabero hasta la estación BALSORA LA

$A_2$ : Área aferente quebrada La Reserva hasta el punto de cálculo 3, 4 y 5

El uso del método analógico se fundamenta en que la quebrada La Reserva es un tributario del río Guayabero por lo que pertenece a una misma cuenca hidrográfica, además que pertenece a una misma zona hidrográfica (Río Guaviare – ver Figura 11), teniendo en cuenta la uniformidad en el comportamiento espacial de las precipitaciones para la zona de estudio, la proximidad de los puntos de cálculo, la correlación expuesta previamente y donde se exhibe que los caudales que se registran en la zona de estudio son función del comportamiento de la precipitación, de acuerdo con los resultados de la caracterización morfométrica del numeral 8.2.4, y por último, puesto que los caudales a trabajar son caudales promedios tal y como lo propone el método.

La siguiente tabla presenta el resumen de los caudales medios de la quebrada La Reserva a partir de los cuales se determina el Qe según el IDEAM.

**Tabla 30. Resumen de caudales medios mensuales multianuales quebrada La Reserva – Punto de cálculo 3, 4 y 5 (m<sup>3</sup>/s)**

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VALOR ANUAL
<b>PUNTO DE CÁLCULO 3</b>												
10.22	9.22	12.47	29.95	53.63	74.10	81.44	56.73	41.52	37.49	31.88	18.91	38.13
<b>PUNTO DE CÁLCULO 4</b>												
10.92	9.86	13.33	32.02	57.34	79.23	87.07	60.65	44.39	40.08	34.09	20.22	40.77
<b>PUNTO DE CÁLCULO 5</b>												
10.94	9.87	13.35	32.06	57.41	79.32	87.17	60.73	44.44	40.13	34.13	20.25	40.82

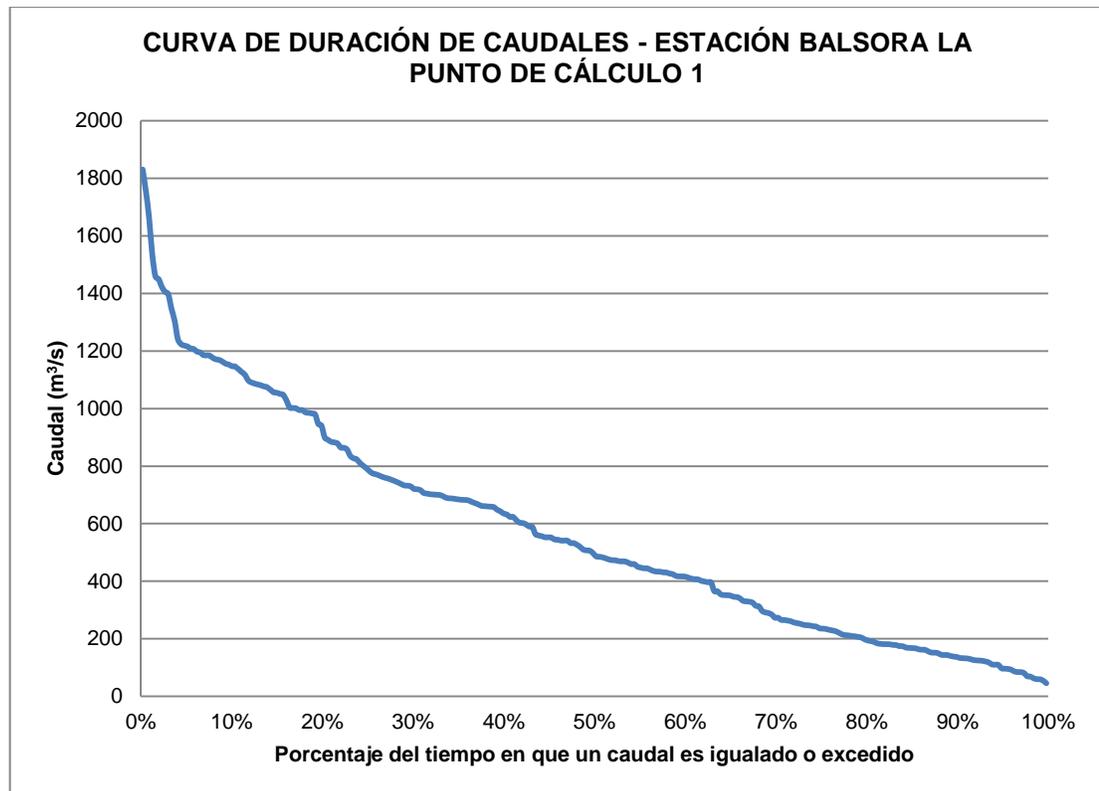
De acuerdo con los resultados de la Tabla 30 y según lo establece el IDEAM, el caudal ecológico para los puntos de cálculo 3, 4 y 5 es respectivamente: 2.30, 2.46 y 2.47 m<sup>3</sup>/s.

### 8.3.2. Método de índices con la CDC

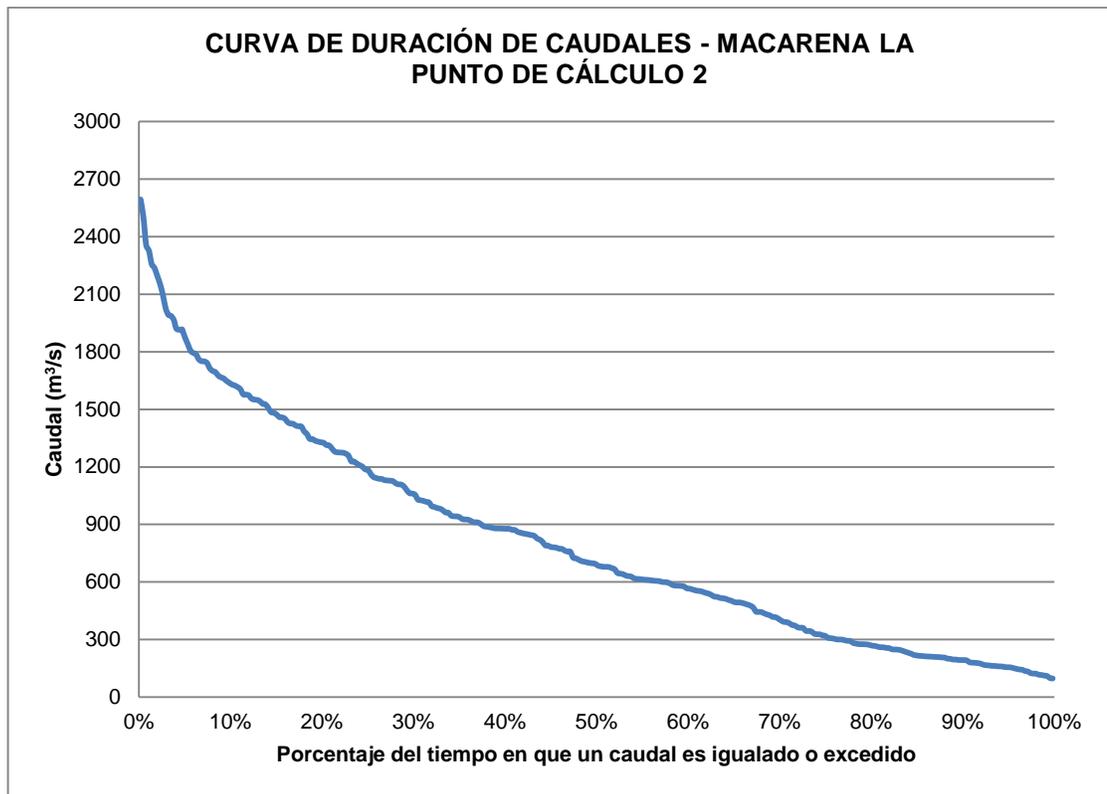
Teniendo en cuenta la información presentada en el numeral 5.4 relacionada con la construcción de las CDC y su transposición, a continuación se encuentran las CDC para el río Guayabero y la quebrada La Reserva y que permiten determinar el Qe de acuerdo con los índices establecidos en el método hidrológico de índices con la CDC.

- **Río Guayabero**

Las CDC para el río Guayabero se construyeron con los registros de caudal de las estaciones BALSORA LA y MACARENA LA cuyo resultado se observa a continuación.



**Figura 19. CDC río Guayabero estación BALSORA LA – Punto de cálculo 1**



**Figura 20. CDC río Guayabero estación MACARENA LA – Punto de cálculo 2**

De acuerdo con las CDC presentadas previamente, el caudal ecológico para los diferentes índices que propone el método de cálculo ( $Q_{50}$ ,  $Q_{90}$  y  $Q_{95}$ ) se consignan en la siguiente tabla:

**Tabla 31. Resultados  $Q_e$  río Guayabero - método de índices de la CDC**

PUNTO DE CÁLCULO	CAUDAL ECOLÓGICO	RESULTADO (m³/s)
ESTACIÓN BALSORA LA PUNTO DE CÁLCULO 1	$Q_{50}$	429.25
	$Q_{90}$	136.18
	$Q_{95}$	96.86
ESTACIÓN MACARENA LA PUNTO DE CÁLCULO 2	$Q_{50}$	689.75
	$Q_{90}$	193.03
	$Q_{95}$	155.73

Como procedimiento de verificación sobre las implicaciones del cálculo de los porcentajes en que los caudales líquidos son igualados o excedidos en el tiempo, empleando una u otra de las plotting fórmulas existentes, a continuación se expone parcialmente el resultado de empelar diversas ecuaciones y que permite observar la similitud en los valores, optando por el uso de la ecuación de Gringorten de acuerdo con lo expuesto en

el numeral 5.4; los resultados que se exponen son para el punto de cálculo de la estación BALSORA LA (punto de cálculo 1).

**Tabla 32. Resultados del cálculo del porcentaje del tiempo empleando diferentes plotting fórmulas**

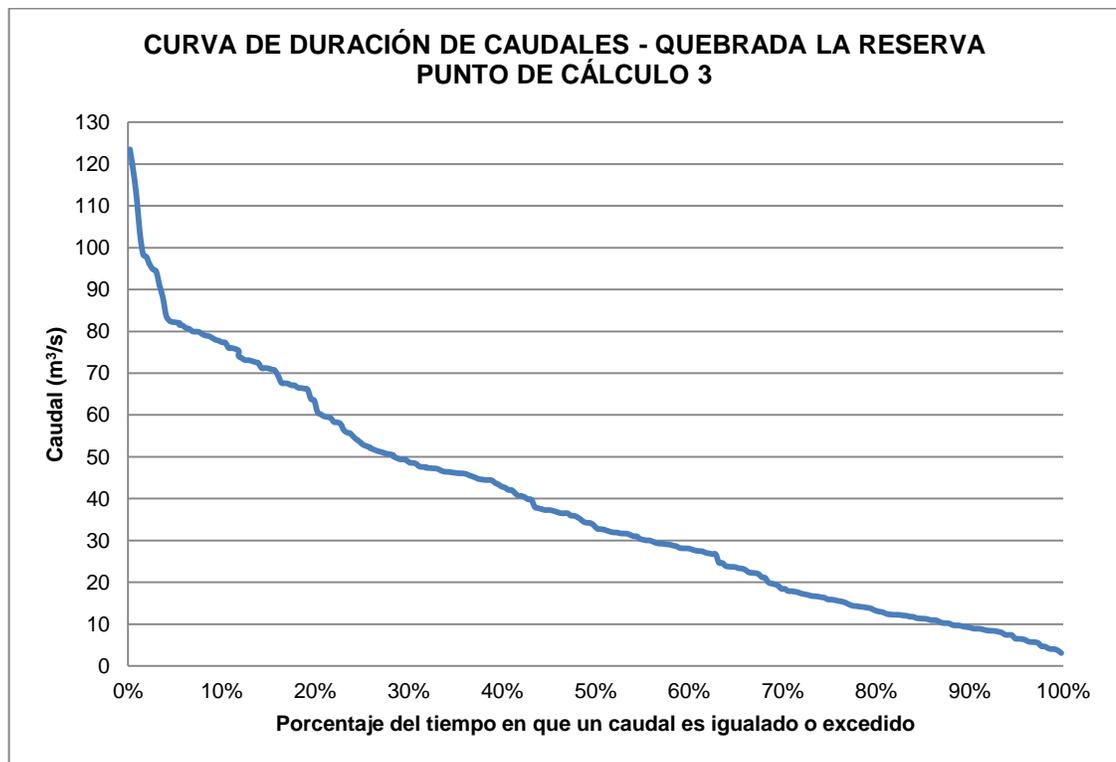
Q (m <sup>3</sup> /s)	Orden	PORCENTAJE DE EXCEDENCIA DEL TIEMPO (X≥x)				
		Gringorten - interpolando	Gringorten - a=0.4	California	Hazen	Weibull
1831	1	0.20%	0.21%	0.35%	0.18%	0.35%
1756	2	0.55%	0.56%	0.70%	0.53%	0.70%
1664	3	0.90%	0.91%	1.06%	0.88%	1.05%
1536	4	1.25%	1.27%	1.41%	1.23%	1.40%
1459	5	1.61%	1.62%	1.76%	1.58%	1.75%
1450	6	1.96%	1.97%	2.11%	1.94%	2.11%
1423	7	2.31%	2.32%	2.46%	2.29%	2.46%
1406	8	2.66%	2.67%	2.82%	2.64%	2.81%
1398	9	3.01%	3.03%	3.17%	2.99%	3.16%
1348	10	3.37%	3.38%	3.52%	3.35%	3.51%
1306	11	3.72%	3.73%	3.87%	3.70%	3.86%
1242	12	4.07%	4.08%	4.23%	4.05%	4.21%
1224	13	4.42%	4.43%	4.58%	4.40%	4.56%
1219	14	4.77%	4.79%	4.93%	4.75%	4.91%
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
97.26	270	94.88%	94.86%	95.07%	94.89%	94.74%
96.13	271	95.23%	95.21%	95.42%	95.25%	95.09%
95.18	272	95.58%	95.57%	95.77%	95.60%	95.44%
92.65	273	95.93%	95.92%	96.13%	95.95%	95.79%
86.46	274	96.28%	96.27%	96.48%	96.30%	96.14%
84.56	275	96.63%	96.62%	96.83%	96.65%	96.49%
84.04	276	96.99%	96.97%	97.18%	97.01%	96.84%
81.07	277	97.34%	97.33%	97.54%	97.36%	97.19%
69.81	278	97.69%	97.68%	97.89%	97.71%	97.54%
68.77	279	98.04%	98.03%	98.24%	98.06%	97.89%
62.78	280	98.39%	98.38%	98.59%	98.42%	98.25%
59.69	281	98.75%	98.73%	98.94%	98.77%	98.60%
59.34	282	99.10%	99.09%	99.30%	99.12%	98.95%
54.59	283	99.45%	99.44%	99.65%	99.47%	99.30%
45.45	284	99.80%	99.79%	100.00%	99.82%	99.65%

De la Tabla 32 se puede inferir que las máximas variaciones en el cálculo de los porcentajes del tiempo de excedencia o igualación se presentan para los mayores órdenes de magnitud de caudal o para los datos iniciales del registro, y a medida que la lista de registros aumenta, se observa que el resultado del cálculo comienza a ser similar, comportamiento que se presenta a partir del orden 4 a 5, aproximadamente, mientras que los valores finales del listado presentan resultados casi idénticos (orden 284 y anteriores), resultados que ratifican la poca influencia que tiene realizar el cómputo del porcentaje del tiempo en que los caudales son igualados o excedidos haciendo uso de la ecuación de California, Hazen, Weibull, Gringorten, etc.

- **Quebrada La Reserva**

Como se expuso en el numeral 5.4.3, es factible conocer la CDC para un sitio de interés que no cuente con un registro histórico de caudales, suponiendo que la relación Q/A para cada porcentaje del tiempo entre una y otra cuenca se mantiene.

En la siguiente figura y a manera de ejemplo se presenta la CDC para la quebrada La Reserva en el punto de cálculo número 3, aclarando que así como se construye esta curva se elaboran las CDC de los puntos de cálculo 4 y 5 y que permiten determinar el caudal ecológico de acuerdo con el método de índices con la CDC; los registros que se emplean como base para el cálculo de la CDC en la quebrada La Reserva son los caudales del río Guayabero registrados en la estación BALSORA LA.



**Figura 21. CDC quebrada La Reserva – Punto de cálculo 3**

Siguiendo el mismo procedimiento, mediante la construcción de la CDC en los puntos de cálculo 3, 4 y 5 de la quebrada La Reserva se obtienen los resultados que se consignan en la siguiente tabla.

**Tabla 33. Resultados Qe quebrada La Reserva - método de índices de la CDC**

PUNTO DE CÁLCULO	CAUDAL ECOLÓGICO	RESULTADO (m <sup>3</sup> /s)
PUNTO DE CÁLCULO 3	Q <sub>50</sub>	33.20
	Q <sub>90</sub>	9.19
	Q <sub>95</sub>	6.53
PUNTO DE CÁLCULO 4	Q <sub>50</sub>	35.50
	Q <sub>90</sub>	9.82
	Q <sub>95</sub>	6.98
PUNTO DE CÁLCULO 5	Q <sub>50</sub>	35.54
	Q <sub>90</sub>	9.83
	Q <sub>95</sub>	6.99

### 8.3.3. Método del perímetro mojado

Con la información disponible en la estación BALSORA LA y MACARENA LA en términos batimétricos y limnimétricos, además de la información batimétrica disponible para la quebrada La Reserva, se realizó el cálculo del caudal ecológico por medio del método hidráulico del perímetro mojado cuyos resultados se exhiben a continuación.

- **Río Guayabero**

Para construir la curva P vs Q se empleó la información de los perfiles transversales disponibles para el río Guayabero en las estaciones hidrométricas mencionadas, así como de caudales líquidos y niveles de lámina de agua correspondientes.

En la elaboración de la curva de gastos se empleó el proceso de mínimos cuadrados, seleccionando los parámetros de la curva (a, b y n) usando además del criterio expuesto por MONSALVE, Germán<sup>72</sup> en términos del coeficiente de correlación y su valor máximo, el error porcentual acumulado mínimo entre los valores registrados o medidos de caudal contra los valores calculados mediante la curva de gastos.

La curva de gastos está representada por la siguiente ecuación, que relaciona el nivel de agua en un determinado momento de la sección con su caudal respectivo.

$$Q = a(h \pm b)^n$$

Donde,

Q: caudal en m<sup>3</sup>/s

h: nivel lámina de agua (m)

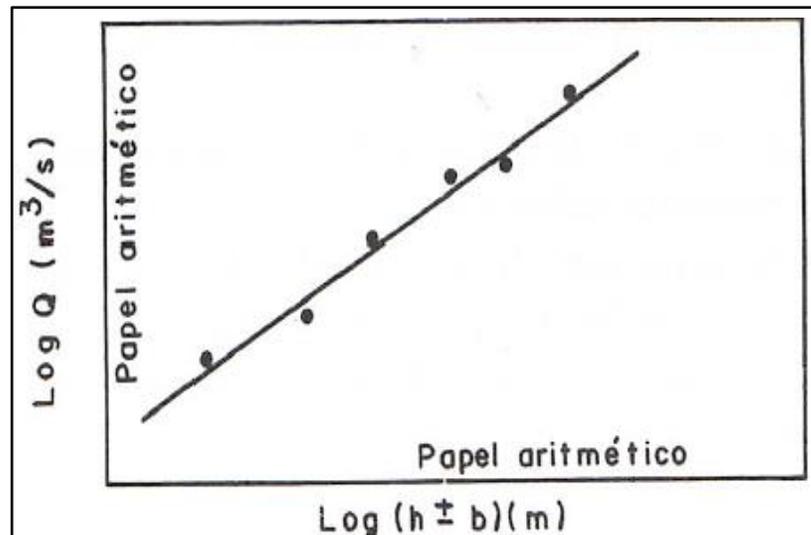
<sup>72</sup> MONSALVE, Germán. Op. cit, p. 210 – 211.

a y n: constantes para cada sección

b: valor que tiene en cuenta el hecho de que el cero de la regla limnimétrica no resulta siempre exactamente en el punto en el cual el caudal es igual a cero

Con los datos de nivel y de caudal registrados, las constantes a, b y n pueden ser calculadas por medio del método de mínimos cuadrados teniendo en cuenta la siguiente ecuación, procedimiento empleado en el presenta trabajo.

$$\text{Log } Q = \log a + n \log(h \pm b)$$

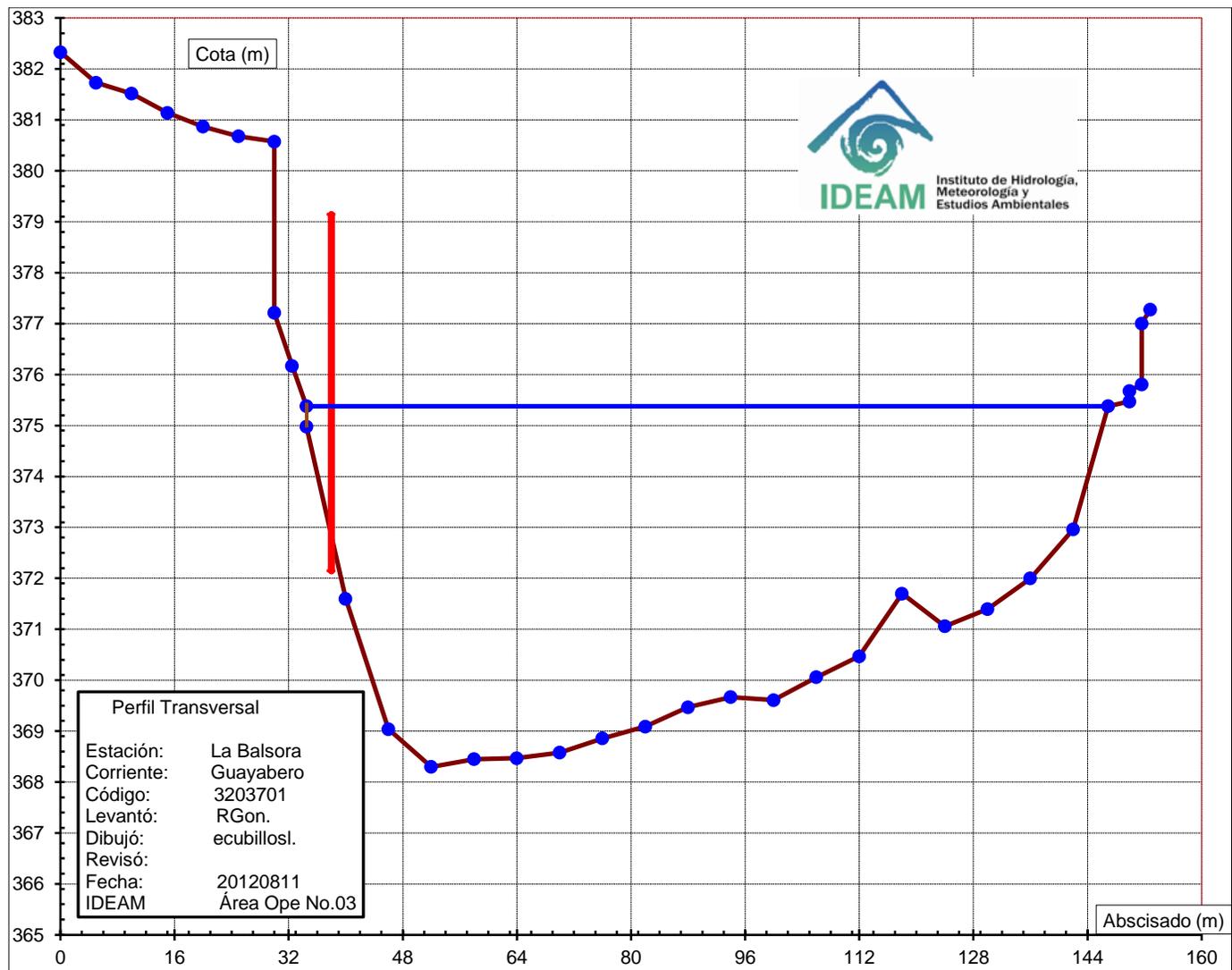


**Figura 22. Cálculo de la curva de calibración de caudales líquidos en una estación hidrométrica**

Fuente: MONSALVE SAÉNZ, Germán. Hidrología en la ingeniería

#### ✓ Estación BALSORA LA – punto de cálculo 1

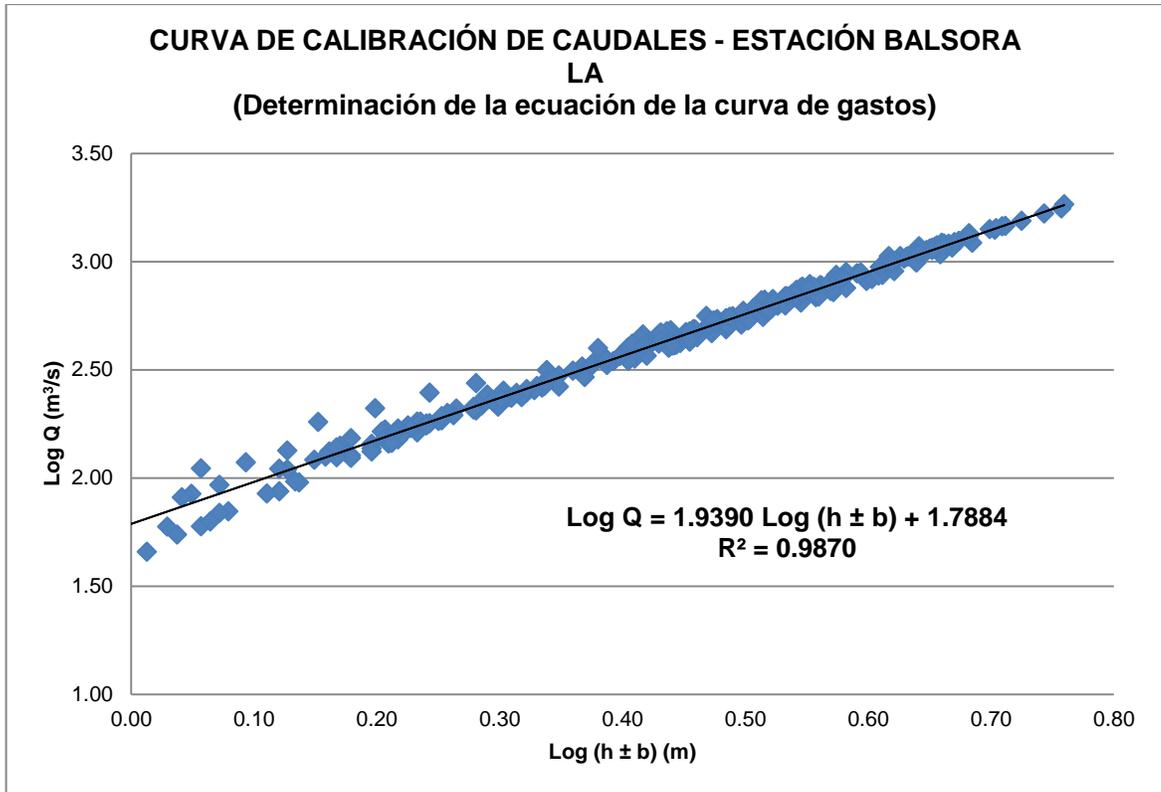
El perfil transversal de la estación BALSORA LA a partir del cual se construye la curva P vs Q se puede observar en la Figura 23. Usando el perfil, los registros de lámina de agua disponibles así como los aforos líquidos respectivos, se elaboró la curva de gastos del río Guayabero para el primer punto de cálculo.



**Figura 23. Perfil transversal estación BALSORA LA - punto de cálculo 1**

Fuente: IDEAM, 2013

El resultado del proceso de mínimos cuadrados para determinar los parámetros de la curva de gastos en el punto de cálculo 1 es el siguiente.



**Figura 24. Curva de calibración de caudales estación BALSORA LA – punto de cálculo 1**

Del proceso de mínimos cuadrados se obtuvo la ecuación que se presenta en la Figura 26, donde para la selección del parámetro b de la curva de gastos se construyó la siguiente figura (ver Figura 25), encontrando el valor de b (-0.2) para el cual el coeficiente de correlación es máximo y el error acumulado entre el valor de caudal registrado y el calculado por la ecuación de la curva de gastos es mínimo.

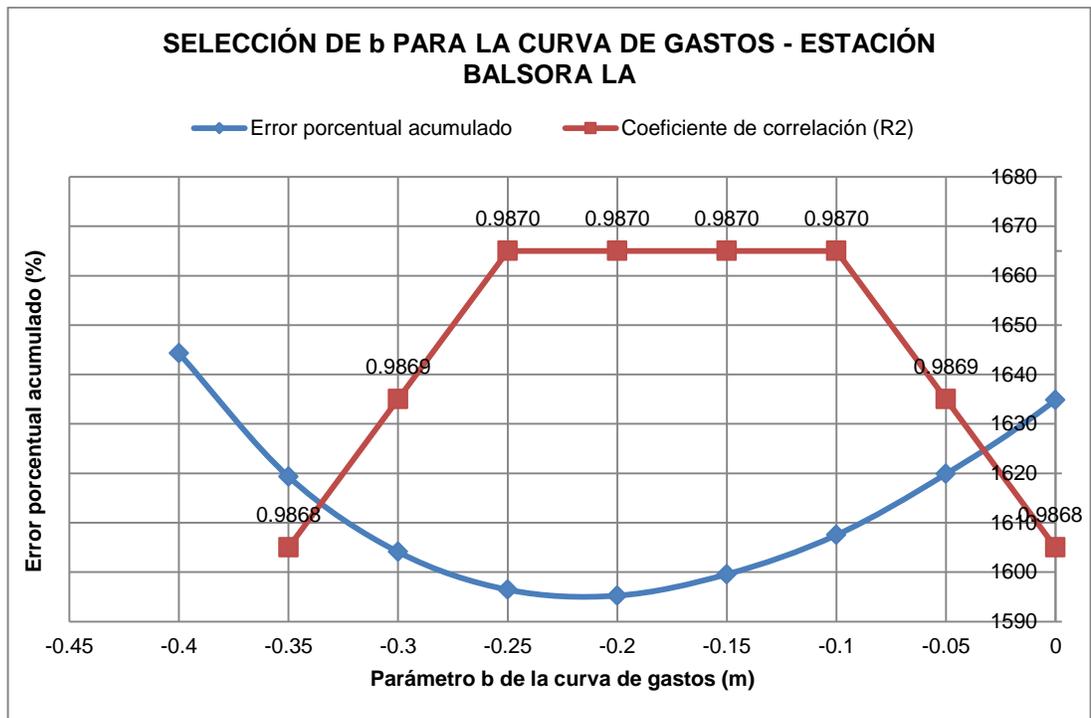


Figura 25. Curva selección parámetro b de la curva de gastos, estación BALSORA LA – punto de cálculo 1

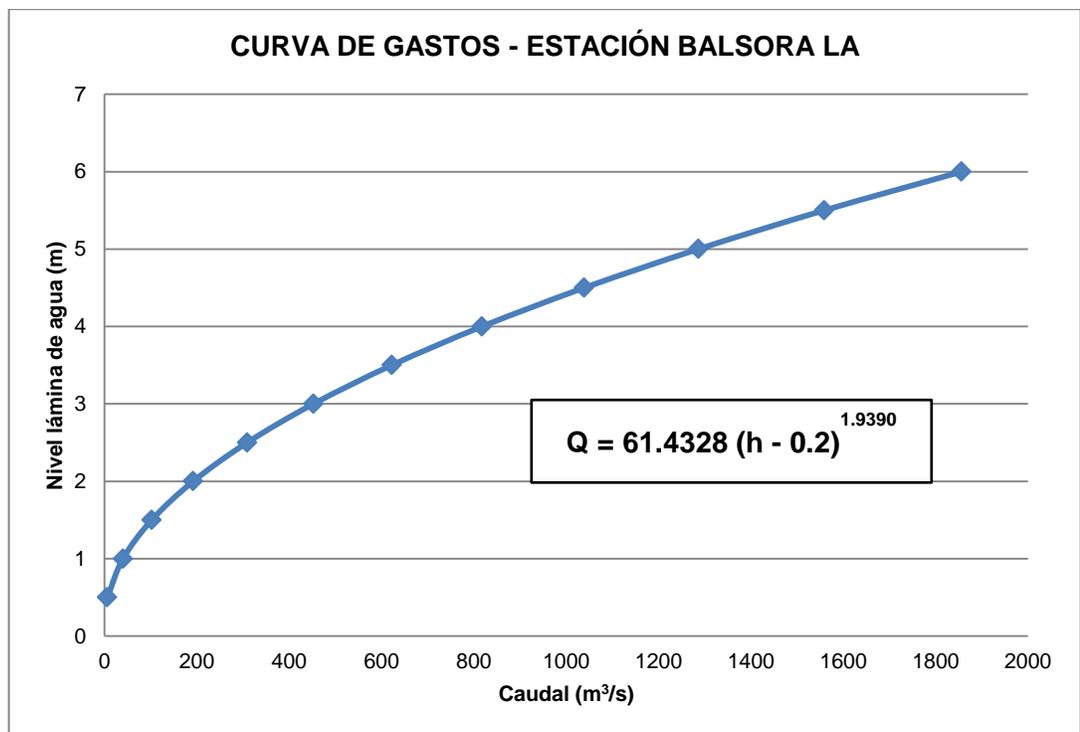


Figura 26. Curva de gastos estación BALSORA LA – punto de cálculo 1

La curva P vs Q se genera empleando la siguiente fórmula consignada en la Figura 26 y obtenida a partir de mínimos cuadrados.

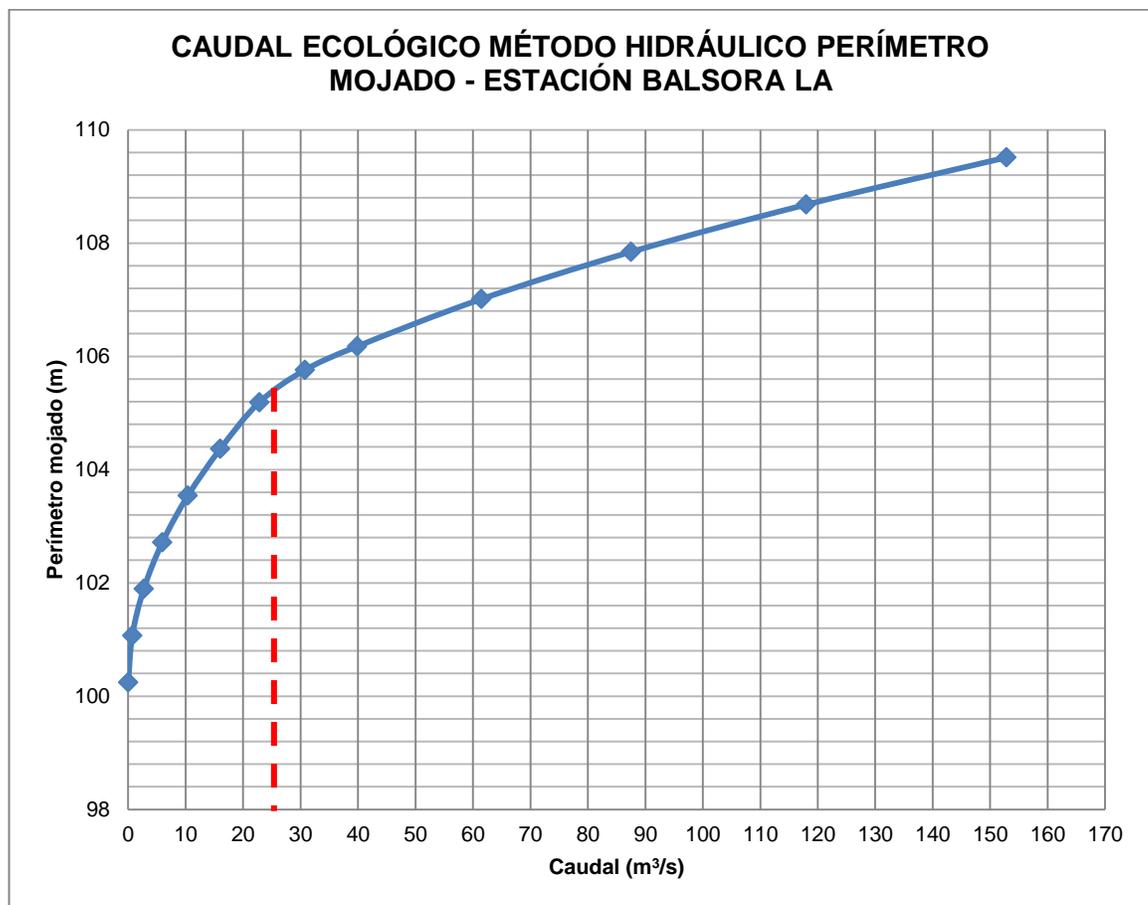
$$Q = 61.4328 (h - 0.2)^{1.9390}$$

Donde,

Q: caudal en m<sup>3</sup>/s

h: nivel lámina de agua (m)

El resultado de la construcción de la curva P vs Q para el río Guayabero en la estación BALSORA LA se presenta a continuación, donde se observa un punto de inflexión entre el perímetro 104 a 106 m.



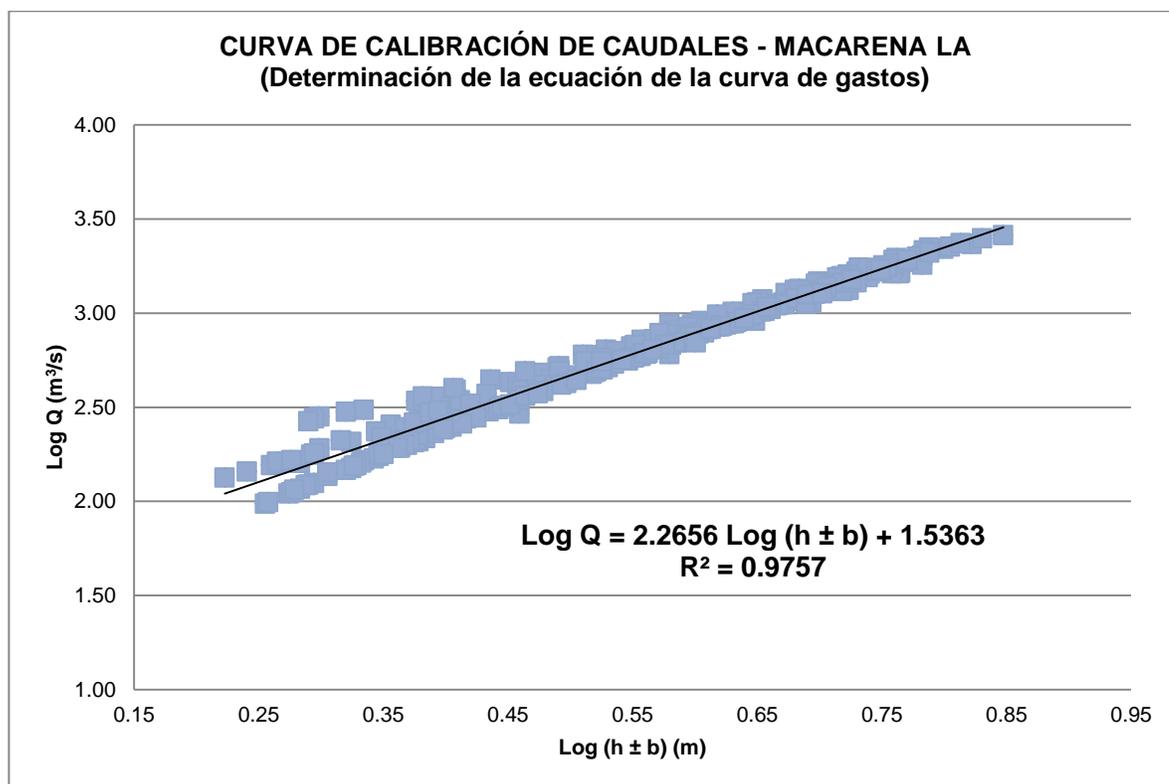
**Figura 27. Curva P vs Q río Guayabero – estación BALSORA LA punto de cálculo 1**

A partir de la curva P vs Q de la Figura 27, se puede inferir que el caudal ecológico de acuerdo con el método del perímetro mojado para dicha sección transversal es aproximadamente 25 m<sup>3</sup>/s.

✓ **Estación MACARENA LA – punto de cálculo 2**

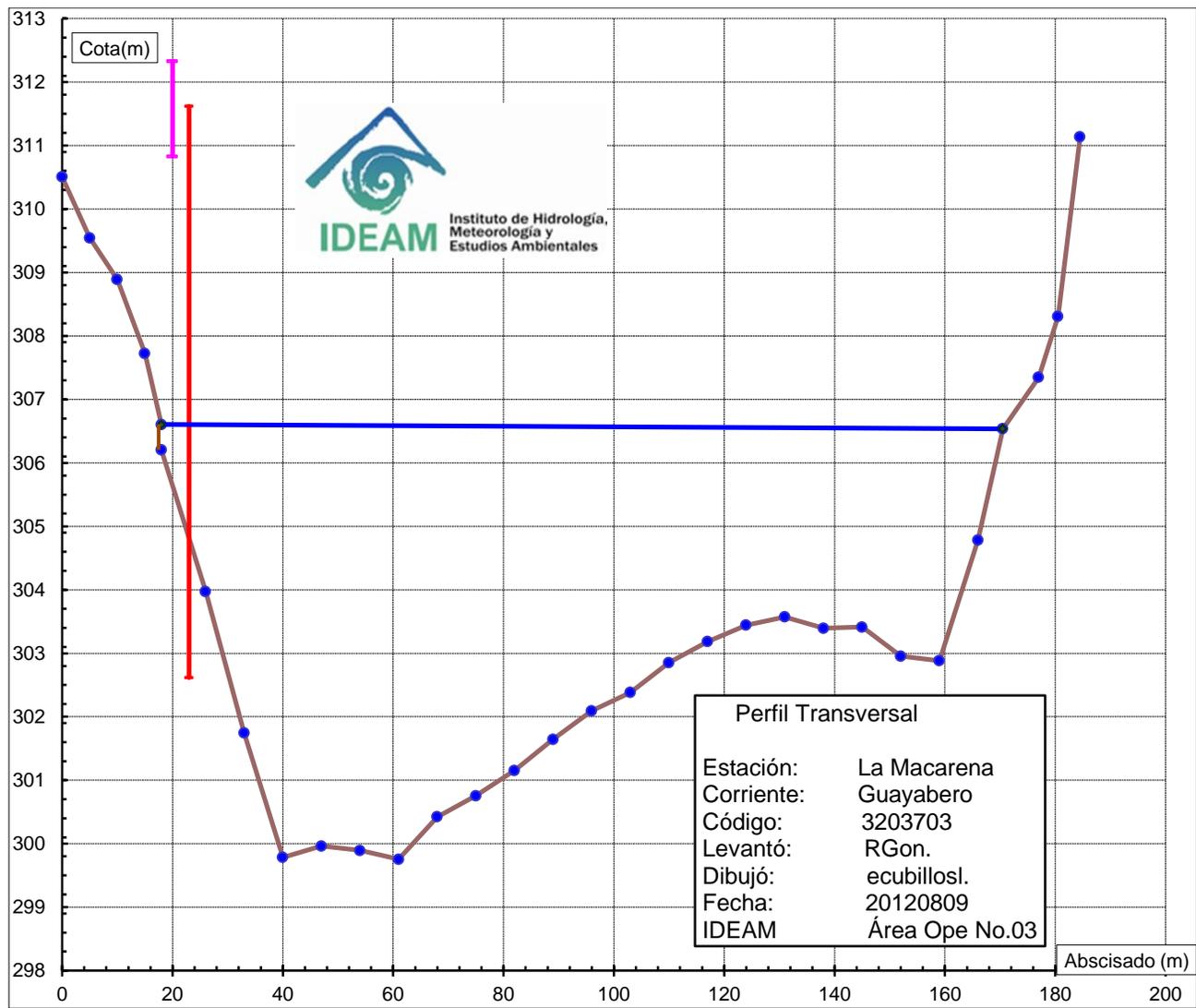
El perfil transversal de la estación MACARENA LA a partir del cual se construyó la curva P vs Q se puede observar en la Figura 29. Realizando el mismo procedimiento expuesto para el punto de cálculo 1 se construyó la curva P vs Q para la sección transversal de la estación MACARENA LA de la cual se determinó el caudal ecológico de la corriente.

El resultado del proceso de mínimos cuadrados para determinar los parámetros de la curva de gastos en el punto de cálculo 2 es el siguiente.



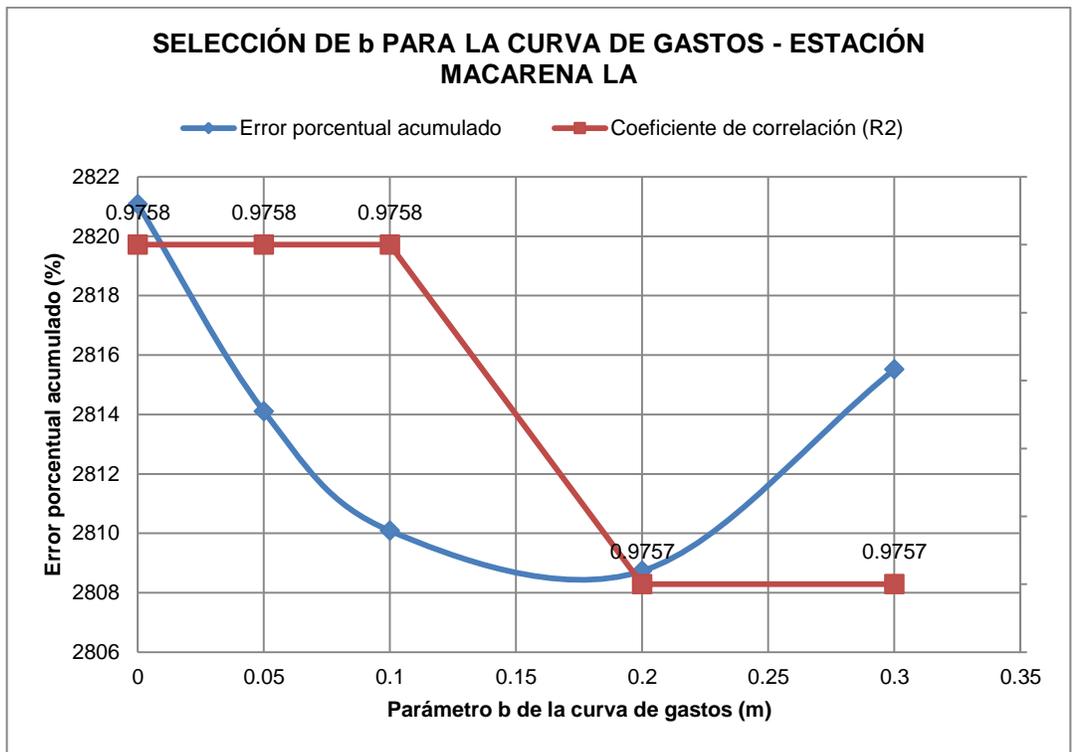
**Figura 28. Curva de calibración de caudales estación MACARENA LA – punto de cálculo 2**

Del proceso de mínimos cuadrados se obtuvo la ecuación que se presenta en la Figura 31, donde para la selección del parámetro b de la curva de gastos se construyó la Figura 30 encontrando el valor de b igual a +0.2.

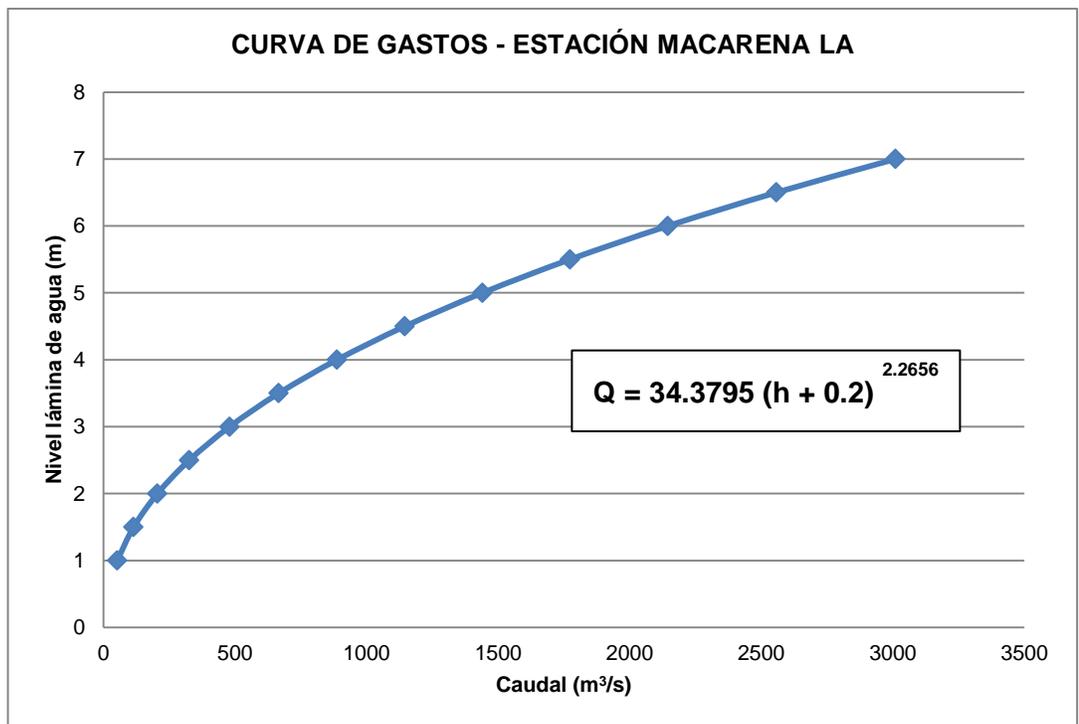


**Figura 29. Perfil transversal estación MACARENA LA – punto de cálculo 2**

Fuente: IDEAM, 2013



**Figura 30. Curva selección parámetro b de la curva de gastos, estación MACARENA LA – punto de cálculo 2**



**Figura 31. Curva de gastos estación MACARENA LA – punto de cálculo 2**

La curva P vs Q se genera empleando la siguiente ecuación consignada en la Figura 31 y obtenida a partir de mínimos cuadrados.

$$Q = 34.3795 (h + 0.2)^{2.2656}$$

Donde,

Q: caudal en m<sup>3</sup>/s

h: nivel lámina de agua (m)

El resultado de la construcción de la curva P vs Q para el río Guayabero en la estación MACARENA LA se presenta a continuación, donde se observa un punto de inflexión entre el perímetro 130 a 140 m.

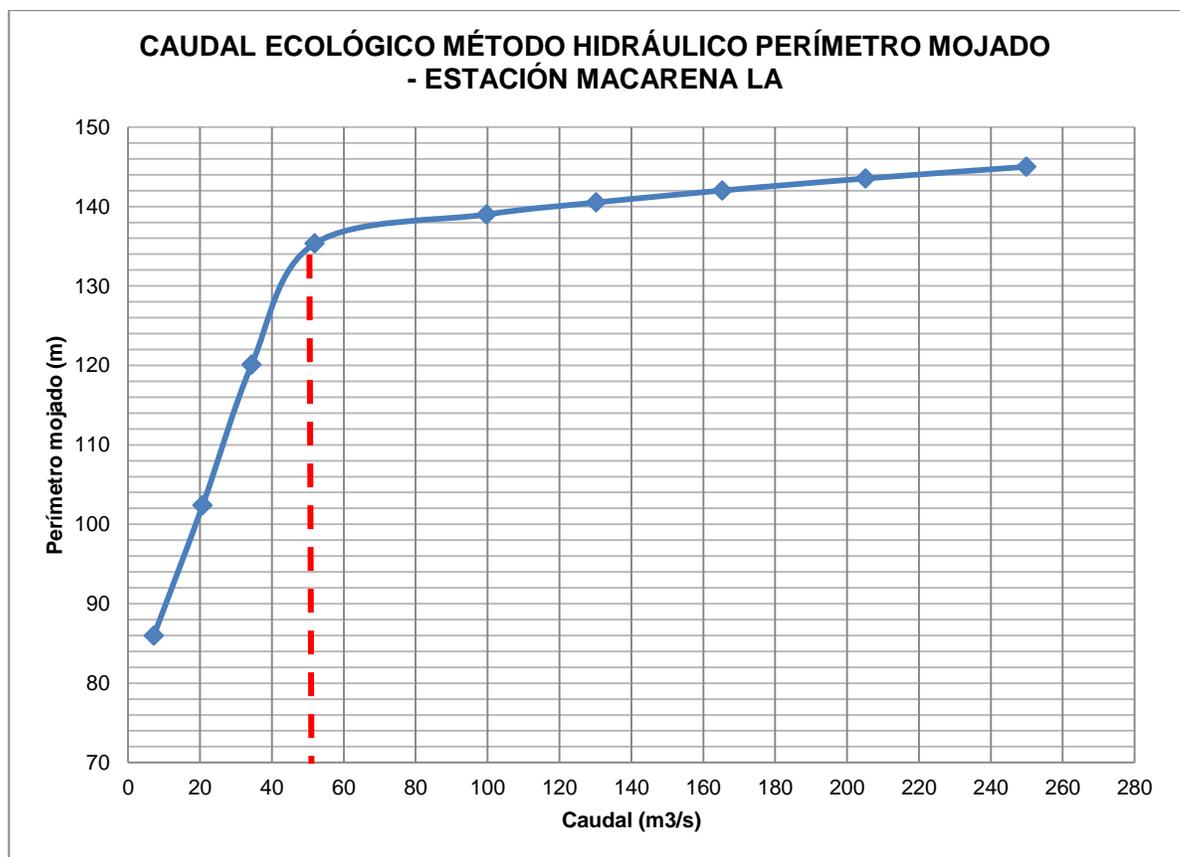


Figura 32. Curva P vs Q río Guayabero – estación MACARENA LA punto de cálculo 2

A partir de la curva P vs Q de la Figura 32, se puede inferir que el caudal ecológico de acuerdo con el método del perímetro mojado para dicha sección transversal es aproximadamente 50 m<sup>3</sup>/s.

- **Quebrada La Reserva**

A diferencia del procedimiento empleado para el río Guayabero, donde la construcción de la curva P vs Q se realizó a partir de la curva gastos así como la geometría de la sección transversal del río en 2 puntos, donde dicha formación se encontraba disponible, para la quebrada La Reserva se usó la información batimétrica disponible para un tramo de 2 Km así como la disponibilidad de 3 aforos de caudal líquido para los puntos de cálculo seleccionados (punto 3, 4 y 5).

Empleando la información batimétrica, los aforos de caudal líquido y el conocimiento de las características físicas del tramo bajo estudio, se elaboró un modelo hidráulico haciendo uso del software Hydrologic Engineering Center River Analysis Systema (HEC-RAS versión 4.1.0).

Para garantizar la calibración del modelo se seleccionó el coeficiente de rugosidad de Manning, teniendo en cuenta las características físicas de los sitios de aforo de caudal líquido (ver Fotografía 2), e igualmente los valores y descripciones del coeficiente consignados en la bibliografía disponible.<sup>73</sup>

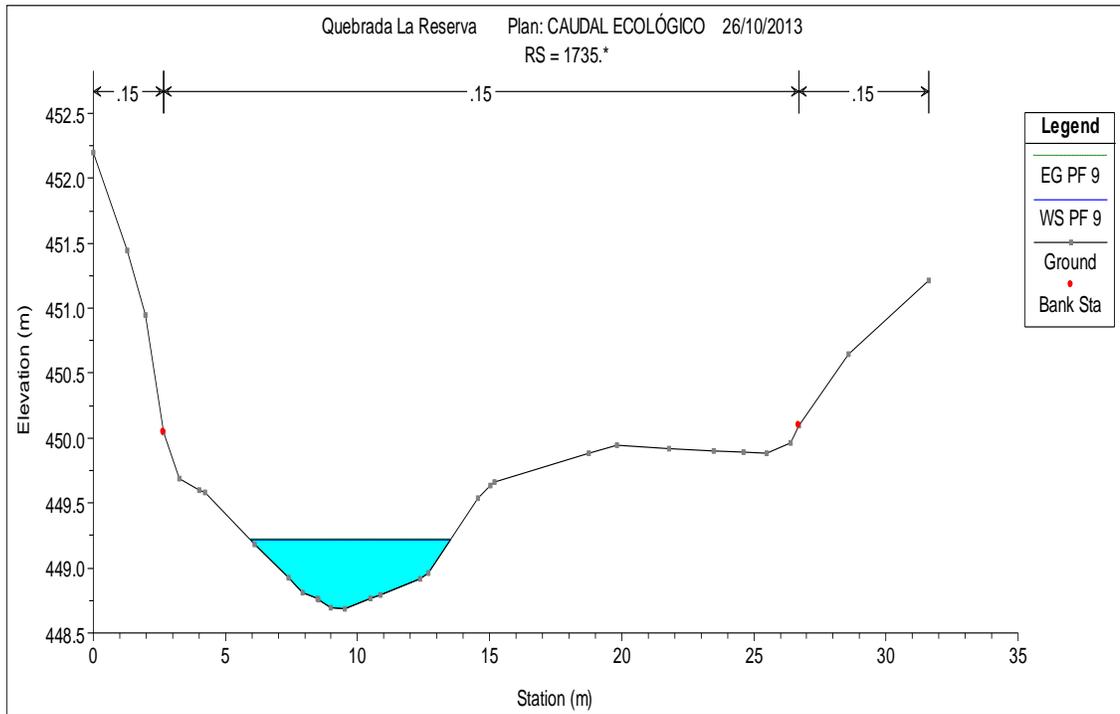
La siguiente tabla presenta las profundidades de lámina de agua registradas en campo durante los trabajos hidrotopográficos y las láminas de agua calculadas mediante el uso de HEC-RAS, resultados que sustentan el uso del modelo y su calibración.

**Tabla 34. Resultados de calibración modelo hidráulico quebrada La Reserva**

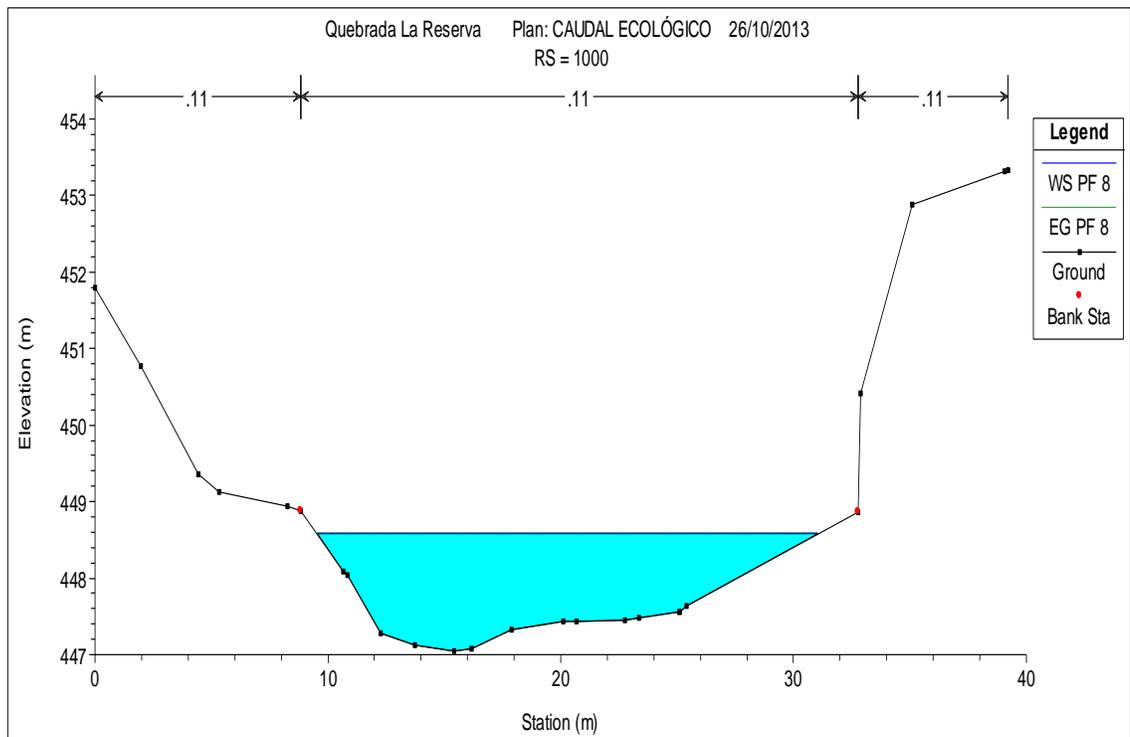
CAUDAL AFORADO (m <sup>3</sup> /s)	PUNTO DE CÁLCULO	Coeficiente Manning	LÁMINA DE AGUA MEDIDA (m.s.n.m.)	LÁMINA DE AGUA CALCULADA (m.s.n.m.)
1.68	1	0.15	449.77	449.78
1.13	2	0.11	448.88	448.95
1.49	3	0.15	448.01	447.84

A continuación se observan las secciones transversales empleadas en el cálculo del caudal ecológico para los 3 puntos de cálculo seleccionados, además de los niveles de lámina de agua que se obtienen cuando en cada sección circula el Qe cuyo proceso de selección se expone posteriormente.

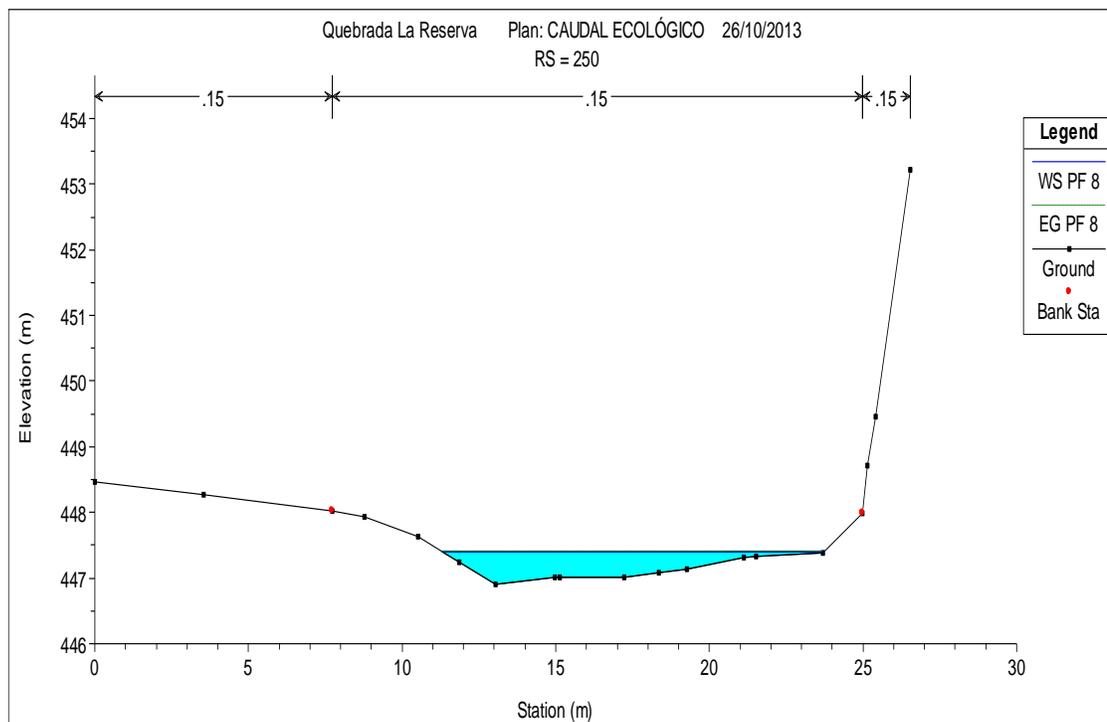
<sup>73</sup> CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá, Colombia, McGRAW-HILL INTERAMERICANA S. A., 1994. p. 667.



**Figura 33. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 3**



**Figura 34. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 4**

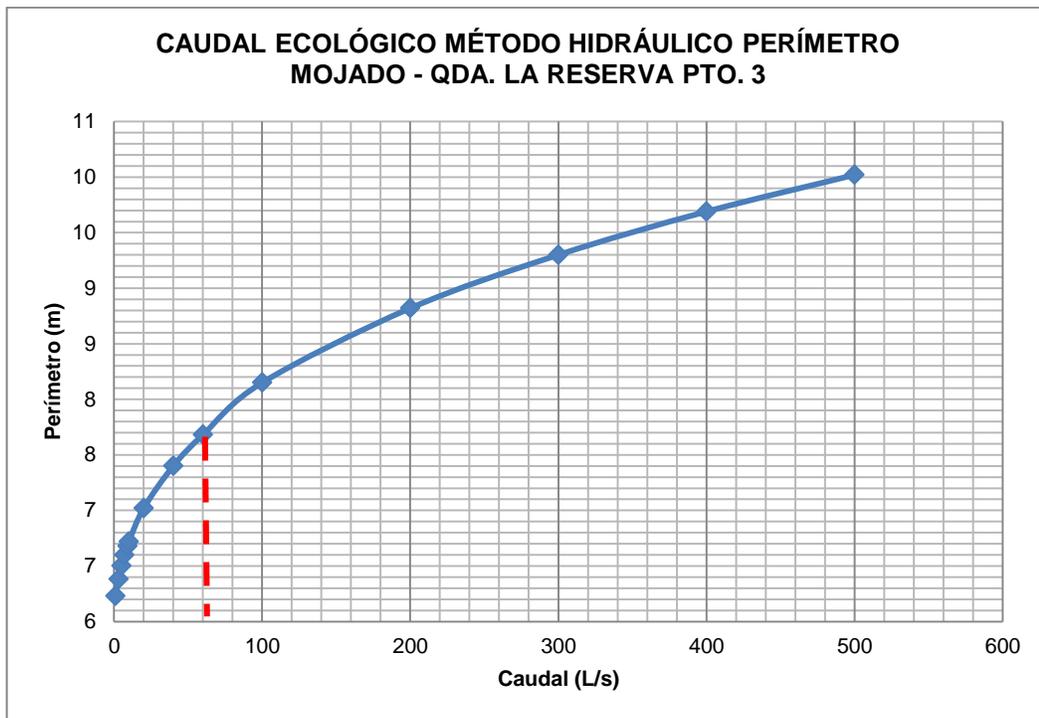


**Figura 35. Perfil transversal quebrada La Reserva – punto de cálculo 5**

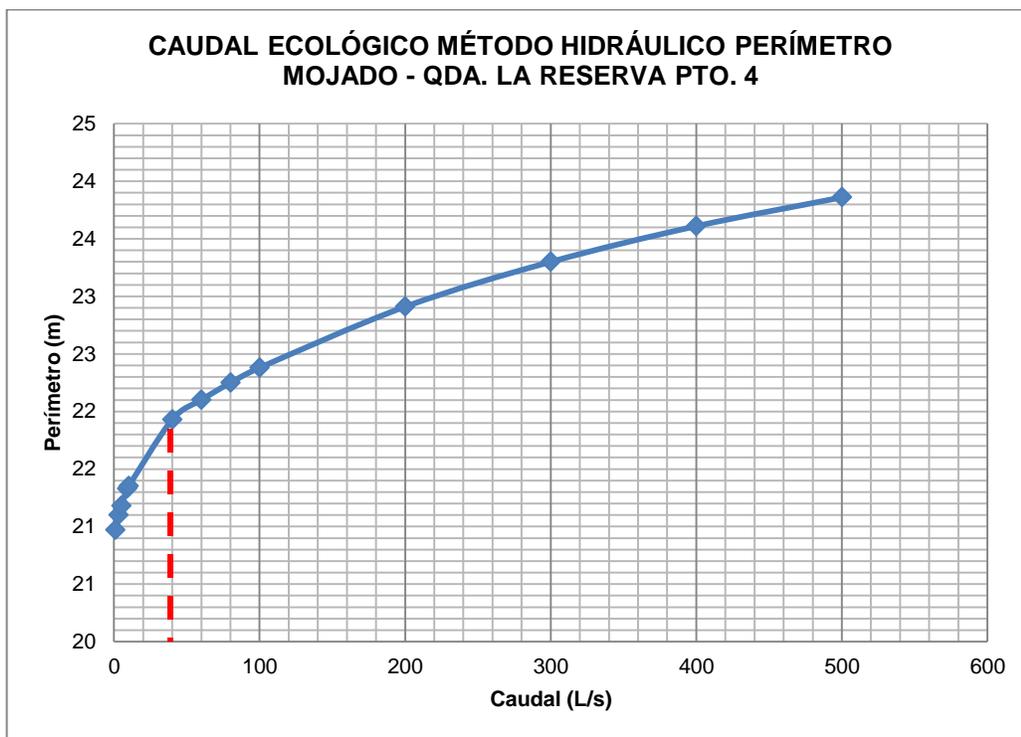
De acuerdo con lo expuesto con antelación y empleando el modelo hidráulico de la quebrada La Reserva, se construyeron las siguientes curvas P vs Q (ver Figura 36 a Figura 38) para los diferentes puntos de cálculo de la corriente (punto 3, 4 y 5), curvas a partir de las cuales se determinaron los siguientes caudales ecológicos y que quedan representados gráficamente en los perfiles presentados.

**Tabla 35. Resultados Qe quebrada La Reserva – método del perímetro mojado**

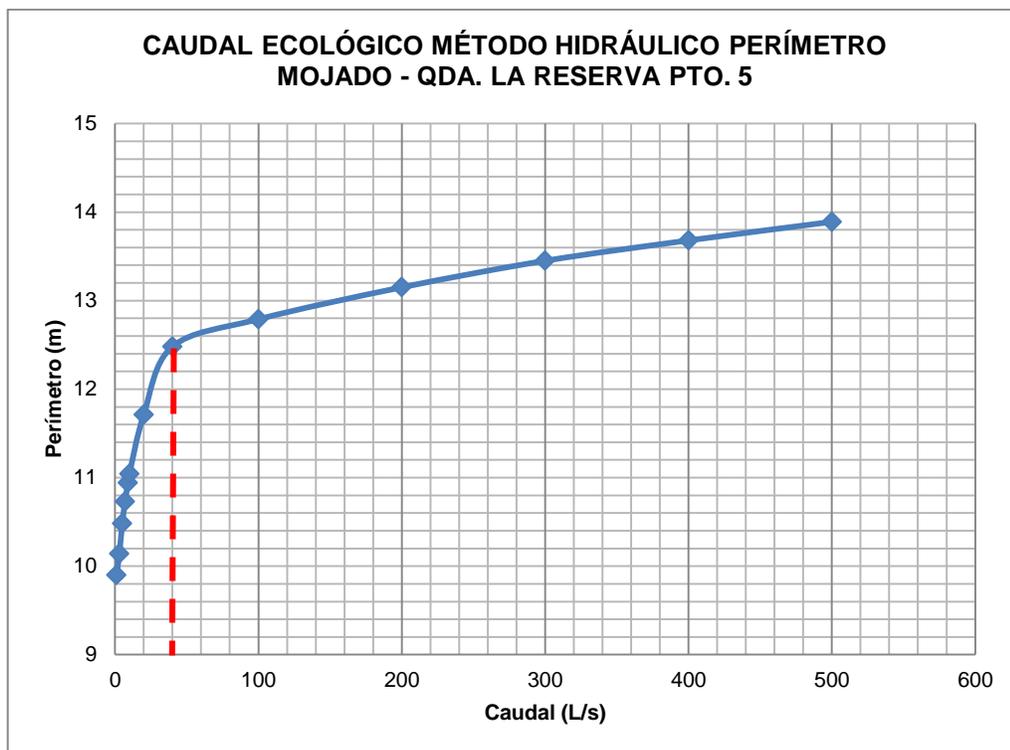
PUNTO DE CÁLCULO	RESULTADO (m <sup>3</sup> /s)	RESULTADO (L/s)
PUNTO DE CÁLCULO 3	0.06	60
PUNTO DE CÁLCULO 4	0.04	40
PUNTO DE CÁLCULO 5	0.04	40



**Figura 36. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 3**



**Figura 37. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 4**



**Figura 38. Curva P vs Q quebrada La Reserva – punto de cálculo 5**

**8.3.4. Resumen de resultados**

La siguiente tabla permite conocer de manera rápida y sencilla el caudal ecológico para los 2 puntos de cálculo estudiados para el río Guayabero, y los 3 puntos de cálculo de la quebrada La Reserva, de acuerdo con los 3 métodos de determinación del caudal ecológico empleados en el presente trabajo (método del IDEAM y de índices de la CDC – hidrológicos; método del perímetro mojado – hidráulico).

**Tabla 36. Consolidado de resultados de Qe para las corrientes estudiadas y los métodos de cálculo seleccionados**

PUNTO DE CÁLCULO	ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	MÉTODO DE CÁLCULO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)
				Este	Norte	(m³/s)
1	Balsora La	IDEAM		1016529.943	761076.467	34.17
		Índices CDC	Q <sub>50</sub>			492.25
			Q <sub>90</sub>			136.18
			Q <sub>95</sub>			96.86
		Perímetro mojado				25

**Tabla 36. Consolidado de resultados de Qe para las corrientes estudiadas y los métodos de cálculo seleccionados**

PUNTO DE CÁLCULO	ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	MÉTODO DE CÁLCULO		CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)
					Este	Norte	(m <sup>3</sup> /s)
2	Macarena La	IDEAM		Río Guayabero	1032109.857	733130.248	47.78
		Índices CDC	Q <sub>50</sub>				689.75
			Q <sub>90</sub>				193.03
			Q <sub>95</sub>				155.73
		Perímetro mojado					50
3	-	IDEAM		Quebrada La Reserva	973445.230	829643.082	2.30
		Índices CDC	Q <sub>50</sub>				33.20
			Q <sub>90</sub>				9.19
			Q <sub>95</sub>				6.53
		Perímetro mojado					0.06
4	-	IDEAM		Quebrada La Reserva	974071.105	829407.368	2.46
		Índices CDC	Q <sub>50</sub>				35.50
			Q <sub>90</sub>				9.82
			Q <sub>95</sub>				6.98
		Perímetro mojado					0.04
5	-	IDEAM		Quebrada La Reserva	973661.316	829243.191	2.47
		Índices CDC	Q <sub>50</sub>				35.54
			Q <sub>90</sub>				9.83
			Q <sub>95</sub>				6.99
		Perímetro mojado					0.04

#### 8.4. Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados de la Tabla 36 se pueden realizar las siguientes observaciones:

Claramente se evidencia la pluralidad de resultados, tanto a nivel de corriente como a nivel de método de cálculo, en los cuales la selección del caudal ecológico no debe obedecer entonces a la escogencia de un método de cálculo particular, sino en relación a otro tipo de criterios, a saber, el caudal que garantice la sobrevivencia de las especies ícticas citadas en la Tabla 21 (criterio biológico), o aquel que permita realizar el aprovechamiento del recurso hídrico superficial para consumo humano, teniendo en

cuenta que para la región ésta es la forma preponderante de uso del agua (criterio socioeconómico).

Aún si los objetivos del trabajo no plantean la determinación del caudal ecológico mediante métodos diferentes al del IDEAM, de índices con la CDC y del perímetro mojado, la Tabla 37 permite profundizar lo expuesto en el anterior párrafo, en el cual se menciona que el cálculo del caudal ecológico no debe ser función de la selección de un método particular, sino por el contrario debe establecerse de acuerdo con otro tipo de criterio debido a la multiplicidad de posibles resultados. Los métodos de cálculo seleccionados tienen en cuenta la información hidrométrica disponible, lo cual no permite trabajar con métodos que requieren como entrada caudales diarios, así como tampoco métodos que necesitan información de múltiples tramos de un cauce.

Llama la atención al comparar los resultados de la Tabla 36 con los de la Tabla 37, que, en términos generales, los valores de métodos como el del IDEAM o del perímetro mojado generan caudales ecológicos inferiores a cualquiera de los resultados que se generan mediante los métodos listados en la Tabla 37, así como que, bajo las condiciones de cálculo desarrolladas, existe coincidencia entre el criterio de la legislación Francesa, Suiza, Asturiana y Vasca. Al respecto, esto denota que, más allá de que uno u otro método sea más o menos indicado, la asertividad del resultado debe ser puesta a prueba mediante procesos posteriores de seguimiento y monitoreo que permitan establecer el éxito de un caudal ecológico una vez clarificado el criterio de selección.

**Tabla 37. Qe alternos – calculados empleando métodos hidrológicos diferentes al IDEAM e índices con la CDC<sup>74</sup>**

PUNTO DE CÁLCULO	ESTACIÓN HIDROME.	MÉTODO DE CÁLCULO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)
				Este	Norte	(m <sup>3</sup> /s)
1	Balsora La	Código del medio ambiente francés	Río Guayabero	1016529.94	761076.467	56.53
		Montana - período húmedo				113.06
		Montana - periodo seco				226.12
		Hoppe				635.30
		Caudal medio base				119.25

<sup>74</sup> Los resultados de los métodos de Motana, Hoppe, Legislación Suiza y Asturiana se trabajaron respectivamente bajo los siguientes escenarios: descripción: bueno; tipo de caudal: freza – desove; algoritmo de cálculo con  $a_0=1$  (legislación Suiza y Asturiana).

**Tabla 37. Qe alternos – calculados empleando métodos hidrológicos diferentes al IDEAM e índices con la CDC<sup>74</sup>**

PUNTO DE CÁLCULO	ESTACIÓN HIDROME.	MÉTODO DE CÁLCULO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)
				Este	Norte	(m <sup>3</sup> /s)
		Texas - período húmedo				308.53
		Texas - período seco				205.69
		Legislación Suiza				56.53
		Legislación Vasca				56.53
		Legislación Asturiana				56.53
2	Macarena La	Código del medio ambiente francés	Río Guayabero	1032109.86	733130.248	79.66
		Montana - período húmedo				159.32
		Montana - período seco				318.64
		Hoppe				877.50
		Caudal medio base				174.30
		Texas - período húmedo				425.59
		Texas - período seco				283.73
		Legislación Suiza				79.66
		Legislación Vasca				79.66
		Legislación Asturiana				79.66
		3				-
Montana - período húmedo	7.63					
Montana - período seco	15.25					
Hoppe	42.85					
Caudal medio base	8.04					
Texas - período húmedo	20.81					
Texas - período seco	13.87					
Legislación Suiza	3.81					
Legislación Vasca	3.81					

**Tabla 37. Qe alternos – calculados empleando métodos hidrológicos diferentes al IDEAM e índices con la CDC<sup>74</sup>**

PUNTO DE CÁLCULO	ESTACIÓN HIDROME.	MÉTODO DE CÁLCULO	CORRIENTE	COORDENADAS DATUM MAGNA SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		CAUDAL ECOLÓGICO (Qe)
				Este	Norte	(m <sup>3</sup> /s)
		Legislación Asturiana				3.81
4	-	Código del medio ambiente francés	Quebrada La Reserva	974071.105	829407.368	4.08
		Montana - período húmedo				8.15
		Montana - período seco				16.31
		Hoppe				45.81
		Caudal medio base				8.60
		Texas - período húmedo				22.25
		Texas - período seco				14.83
		Legislación Suiza				4.08
		Legislación Vasca				4.08
		Legislación Asturiana				4.08
5	-	Código del medio ambiente francés	Quebrada La Reserva	973661.316	829243.191	4.08
		Montana - período húmedo				8.16
		Montana - período seco				16.33
		Hoppe				45.87
		Caudal medio base				8.61
		Texas - período húmedo				22.28
		Texas - período seco				14.85
		Legislación Suiza				4.08
		Legislación Vasca				4.08
		Legislación Asturiana				4.08

Es claro que para el río Guayabero, que presenta una mayor envergadura, el caudal ecológico en todos los casos es superior a 30 m<sup>3</sup>/s, mientras que para la quebrada La Reserva, tributario directo de este último, el caudal es tan bajo como 40 L/s, lo cual

denota, para los métodos de cálculo trabajados, que existe una relación directa en términos de magnitud-dimensión de la cuenca. Es decir, para todos los puntos de cálculo seleccionados, existe una relación directa entre el caudal ecológico resultante y el área aferente de la cuenca, pues el caudal aumenta de manera directamente proporcional con el área; este comportamiento se exhibe para los métodos hidrológicos (IDEAM e índices con la CDC), bien sea empleando los caudales registrados o calculados mediante métodos indirectos, siendo atípico a este comportamiento únicamente los resultados del método del perímetro mojado para la quebrada La Reserva. La siguiente tabla junto con la Tabla 36 clarifica dicho comportamiento.

**Tabla 38. Correlación área – caudal ecológico**

PUNTO DE CÁLCULO	ÁREA AFERENTE (Km <sup>2</sup> )	CAUDAL ECOLÓGICO – IDEAM (m <sup>3</sup> /s)
1	5012.10	34.17
2	9263.02	47.78
3	338.07	2.30
4	361.44	2.46
5	361.88	2.47

De acuerdo con los métodos de cálculo seleccionados, se observa que el método de índices con la CDC es el más generoso en cuanto a la magnitud del caudal ecológico se refiere, situación que se replica para la totalidad de los 5 puntos de cálculo, seguido en orden decreciente por el método del IDEAM y por último el método del perímetro mojado (ver Tabla 36). Un inconveniente de seleccionar el caudal ecológico de una corriente mediante el criterio que establece el método de índices con la CDC es que, por ejemplo, garantizar un caudal que sea igualado o superado el 50% del tiempo en una corriente es impensable a menos que se realice un control de caudales, lo cual puede generar repercusiones sobre el comportamiento ecosistémico de la cuenca; además esto implicaría recurrir a procesos de trasvase de caudal y/o la regulación de los mismos, escenario a ser evaluado en un proceso conservacionista o de protección, cuyo fin último es la preservación de las condiciones naturales en su estado prístino.

Teniendo en cuenta que si no es a través de la regulación de caudales difícilmente se lograría garantizar los caudales ecológicos resultantes del método de cálculo de la CDC, resulta interesante observar que, en términos de porcentaje del tiempo en que un caudal es igualado o excedido ( $P - X \geq x$ ), el método del IDEAM y el método del perímetro mojado resultan más atractivos, ya que éstos equivalen a órdenes de magnitud que teóricamente se presentan en todo momento en una corriente, lo cual supone, en términos de gestión del recurso hídrico, un objetivo de manejo y conservación de mayor factibilidad. La siguiente tabla ilustra lo mencionado, presentando para cada caudal ecológico su porcentaje de igualación o excedencia.

**Tabla 39. Porcentaje de igualación o excedencia Qe calculados**

PUNTO DE CÁLCULO	MÉTODO DE CÁLCULO	Qe (m <sup>3</sup> /s)	P (X≥x) - %
1	IDEAM	34.17	102.97
	CDC	492.25	50.00
		136.18	90.00
		96.86	95.00
Perímetro mojado	25	104.14	
2	IDEAM	47.78	109.47
	CDC	689.75	50.00
		193.03	90.00
		155.73	95.00
Perímetro mojado	50	109.17	
3	IDEAM	2.30	102.97
	CDC	33.20	50.00
		9.19	90.00
		6.53	95.00
Perímetro mojado	0.06	107.20	
4	IDEAM	2.46	102.97
	CDC	35.50	50.00
		9.82	90.00
		6.98	95.00
Perímetro mojado	0.04	107.25	
5	IDEAM	2.47	102.97
	CDC	35.54	50.00
		9.83	90.00
		6.99	95.00
Perímetro mojado	0.04	107.25	

Aun cuando lo mencionado en el anterior párrafo respecto al método del IDEAM y del perímetro mojado es cierto, acerca de su mayor garantía de presencia, también es importante precisar que un caudal tan bajo como 0.04 a 0.06 m<sup>3</sup>/s para una quebrada como La Reserva no es conveniente, teniendo en cuenta que dicho caudal equivale a tener una lámina de agua de tan solo 0.53 y 0.52 m en el cauce para el punto de cálculo 3 y 5. Esto, con bastante seguridad, imposibilitaría el libre desplazamiento piscícola en toda la corriente así como la irrigación de las especies de bosque de galería o primario, que como se mencionó con antelación, permite en época de verano la sobrevivencia de las especies faunísticas acuáticas (ver numeral 8.2.2). Gráficamente la “pequeñez” del caudal ecológico y la lámina de agua que éste genera se plasma en la Figura 33 y Figura 35.

Por último cabe mencionar que de la oferta hídrica promedio de las corrientes, el caudal ecológico en promedio representa un 6% para los 5 puntos de cálculo seleccionados, lo cual se encuentra bastante alejado de los resultados encontrados para los ríos del departamento del Valle del Cauca (ver Tabla 2). Esta información supondría dos cosas: por un lado, de una región del país a otra no existe correlación en el orden de magnitud en que debe oscilar el caudal ecológico; por otro lado, es posible a partir de la determinación del caudal ecológico para las diferentes zonas hidrológicas colombianas (necesidad de adelantar más estudios), establecer un porcentaje fijo de descuento de la

oferta hídrica promedio o escenario equivalente, y que permita, así como en la experiencia de cálculo desarrollada en Zimbabue (ver capítulo 3), contar con un estándar nacional para el establecimiento de caudales ecológicos. Los caudales ecológicos que se establecen en la siguiente tabla son seleccionados de acuerdo a los argumentos presentados en el siguiente capítulo.

**Tabla 40. Porcentaje del Qe respecto a la oferta hídrica promedio de las corrientes**

PUNTO DE CÁLCULO	CORRIENTE	CAUDAL PROMEDIO (m <sup>3</sup> /s)	CAUDAL ECOLÓGICO (m <sup>3</sup> /s)	PORCENTAJE (%)
1	Río Guayabero	565.30	30	5.30
2		796.60	49	6.15
3	Quebrada La Reserva	38.13	2.30	6.03
4		40.77	2.46	6.03
5		40.82	2.47	6.05

## 9. CONCLUSIONES

Según lo expuesto en el presente trabajo referido a los métodos de cálculo del caudal ecológico, existe una gran variedad de formas para su cálculo, enmarcándose en 4 grandes enfoques: hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico, cada uno de los cuales es un complemento del anterior, toda vez que los métodos hidráulicos requieren de información hidrométrica para relacionarla con la geometría de un cauce, cúmulo de información que sirve de sustento para los métodos hidrológicos. Lo anterior, en conjunto con el estudio de especies florísticas o faunísticas determinadas (normalmente especies animales - peces), permite establecer el caudal ecológico con miras sobre las características hidrológicas, hidráulicas y bióticas de un lugar de interés, para finalmente llegar a los métodos holísticos que adicional a la información hidrométrica, batimétrica e hidrobiológica que requieren los anteriores métodos de cálculo incluye, en el proceso de establecer un caudal ecológico, variables de índole socioeconómica, política, administrativa, legislativa, etc. La síntesis metodológica propuesta en este trabajo se resume en el numeral 5.2.

De acuerdo con los resultados de caudal ecológico de la Tabla 36 analizados en el numeral 8.4 y teniendo en cuenta no sólo la caracterización de la zona de estudio en términos de especies faunísticas acuáticas de gran importancia para el consumo y la comercialización en la región (ver 8.2.2), sino también los usos que la población hace del agua superficial para su abastecimiento y actividades económicas como la pesca (ver 8.2.3), y, además, teniendo en cuenta que los sitios donde el ejercicio de cálculo fue desarrollado se encuentran en el AMEM que es un ecosistema estratégico para el país y de gran sensibilidad (ver 8.2.1), se considera que el caudal ecológico de las corrientes, excluyendo los resultados del método de la CDC según las razones citadas en el numeral 8.4, debería ser el siguiente:

**Tabla 41. Caudales ecológicos seleccionados<sup>75</sup>**

PUNTO DE CÁLCULO	CORRIENTE	MÉTODO DE CÁLCULO	CAUDAL ECOLÓGICO (m <sup>3</sup> /s)
1	Río Guayabero	IDEAM / Perímetro mojado	30
2		IDEAM / Perímetro mojado	49
3	Quebrada La Reserva	IDEAM	2.30
4			2.46
5			2.47

A pesar que en este trabajo se presenta una propuesta sobre cuál deber ser el caudal ecológico de las corrientes estudiadas, se considera que la definición de éste no debe ser

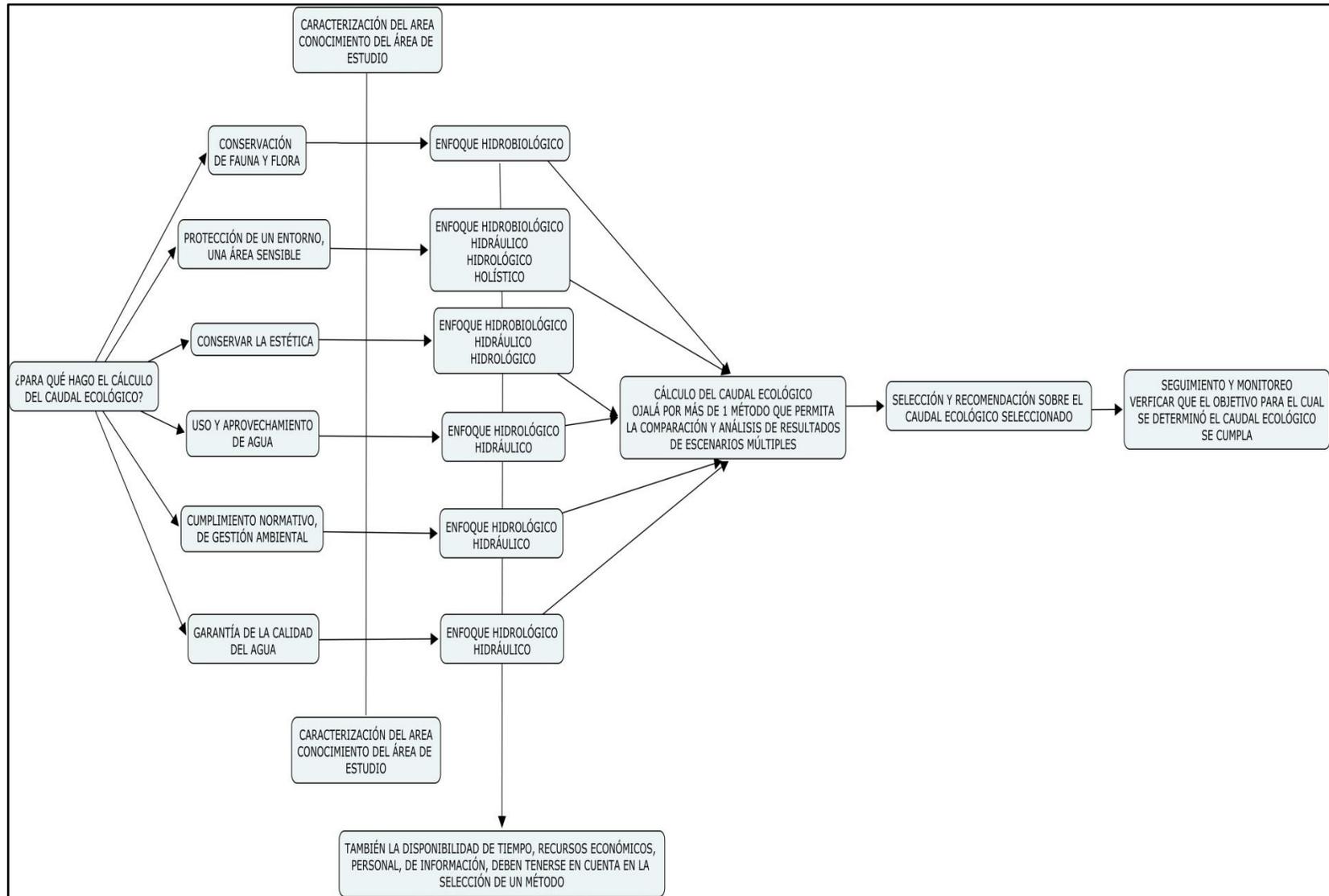
<sup>75</sup> Para el río Guayabero se asigna un valor promedio entre el método del perímetro mojado y del IDEAM.

función de un método de cálculo, su establecimiento no debe estar supeditado a la selección de un procedimiento específico. Por el contrario, es importante determinar un para qué, es decir, un objetivo o propósito aplicable al presente pero sobre todo de preferencia futuro, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes; una vez se tenga claridad sobre el o los propósitos de establecer un caudal ecológico se podrá seleccionar un método para establecer su valor y no al contrario.

- Conservar una especie vegetal o faunística terrestre, de avifauna y/o acuática; aquellas especies que presentan algún grado de peligro-vulnerabilidad deberán tener prelación sobre especies cuya conservación no se encuentra bajo presión.
- Protección de un entorno, un ecosistema estratégico, sensible, un espacio físico de especial interés.
- Conservación de la estética del medio; recreación pasiva, turismo, etc.
- Para planificar el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos, para otorgar derecho al uso del agua con sustento teórico-científico.
- Responder al mandato de una política, norma o ley sobre el manejo y uso del recurso hídrico.
- Garantizar la calidad del recurso hídrico.

En un segundo plano se considera que la selección del método de cálculo y, más aún, el caudal ecológico debe responder, adicionalmente a los criterios establecidos, a un ejercicio objetivo que permita determinar si es necesario o no desarrollar un nuevo método de cálculo, o si por el contrario la selección de un método existente es posible. Igualmente se debe tener presente la disponibilidad de recursos económicos, humanos, de información y de tiempo, aspectos que inclinarán la balanza en la selección de un método u otro, argumentos que en todo caso se consideran secundarios y que no pueden ser pretexto o fundamento principal en la selección de un método. También es requisito para la selección de un método de cálculo, tener en cuenta el marco normativo existente y el apego a éste. Por último el método de cálculo que se escoja, debe blindar la conservación del medio ambiente desde diversos puntos de vista, por lo cual se considera que el mejor escenario sería optar siempre por la selección de métodos holísticos en los cuales el comportamiento tanto abiótico como biótico de los ecosistemas es considerado de manera integral, abarcando estos métodos el criterio de los profesionales que deben tomar decisiones, permitiendo disminuir o aumentar un caudal de acuerdo con su conocimiento, práctica que debe ser replicable para los demás enfoques de cálculo.

La siguiente ilustración muestra lo que se considera es el *deber ser* en la selección de un método de cálculo y en últimas en la determinación de un caudal ecológico. La ilustración consigna algunos escenarios para el cálculo del caudal ecológico, el o los enfoques considerados apropiados para cada escenario de trabajo propuesto y, por último, los pasos de análisis, selección, recomendación y seguimiento-monitoreo.



**Ilustración 12. Procedimiento para la selección de un método de cálculo y la determinación del caudal ecológico**

## 10. RECOMENDACIONES

Más allá del resultado que se pueda obtener del cómputo del caudal ecológico, éste se debe establecer teniendo en cuenta el derecho de uso del agua entre los diferentes usuarios del recurso, sin discriminación alguna, es decir, se deben tener en cuenta usuarios que requieren el agua para consumo, para el desarrollo industrial, para el riego, generación de energía, recreación, cultura, y adicionalmente, el uso y necesidad de los recursos hidrobiológicos asociados a las corrientes y que dependen del agua (especies de flora y fauna).

En la determinación de caudales ecológicos se deben tener en cuenta aspectos hidrológicos, biológicos, de calidad del agua, económicos, sociales y culturales.

Durante el proceso de determinación del caudal ecológico el tipo de preguntas que han de prevalecer no deben direccionarse sobre cuál método emplear o cuál es mejor, puesto que cada uno de estos ha sido diseñado para responder a un caso particular, para unas características específicas o un propósito. En tal sentido, el tipo de preguntas a realizar son: ¿Cuál es el objetivo de establecer un caudal ecológico?, ¿Cuál debe ser el proceso para desarrollar métodos de cálculo de caudal ecológico en países, regiones, lugares donde al día de hoy no existe unanimidad al respecto?, ¿Con qué tiempo se dispone, qué equipamientos, personal, recursos, etc.?

El cómputo del caudal ecológico no debe limitarse a su determinación sino adicionalmente a evaluar si su selección efectivamente cumple el propósito para el cuál fue desarrollado, por lo cual el seguimiento y monitoreo debe ser un factor preponderante para determinar el éxito o fracaso del proceso así como las medidas correctivas a que haya lugar.

En tramos de corrientes considerados frágiles, estratégicos o de importancia ambiental y/o socioeconómica, es preferible conservar el régimen natural de caudales o en su defecto establecer un caudal ecológico lo más alto posible y parecido al caudal normal de la corriente

El caudal ecológico por sí solo no es una medida eficiente en el manejo integrado de una cuenca hidrográfica. Por el contrario éste ha de ser parte de una serie de medidas de manejo entre las cuales se pueden mencionar zonificaciones ambientales y de manejo, medidas de recuperación de suelos, conservación y protección de ecosistemas, prevención de la contaminación, etc., todos estos elementos que en su conjunto hacen parte de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH).

## 11. BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO CALVO, Julio C.; JIMÉNEZ, Jorge; GONZÁLEZ, Eugenio. Caso 1: Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 273 – 284.

ANDES POWER. Proyecto Minicentral Hidroeléctrica Las Nieves. Anexo 7. Cálculo caudal ecológico. [en línea]. Disponible en: [http://seia.sea.gob.cl/archivos/c0b\\_Anexo\\_7\\_Calculo\\_Caudal\\_Ecologico.pdf](http://seia.sea.gob.cl/archivos/c0b_Anexo_7_Calculo_Caudal_Ecologico.pdf)

APARICIO MIJARES, Francisco J. Fundamentos de hidrología de superficie. México, D. F., Editorial Limusa, S. A., 1992. N° 291.

ASAMBLEA CONSITUYENTE –Ecuador. Constitución del Ecuador. 2008. [en línea]. Disponible en: [http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion\\_de\\_bolsillo.pdf](http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf)

Atlas Geográfico – Principales ríos de Colombia. [en línea]. Consultado el 19/10/13. Disponible en: <http://atlasgeografico.net/tag/rio-guaviare>

BURBANO BURBANO, Liliana y DIEZ HERNÁNDEZ, Juan Manuel. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 26, N°1 (Abril, 2006). p. 56 – 68.

CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Environmental flow regime in the framework of integrated water resources management strategy. En: Ecohydrology & Hydrology. Vol. 8, N° 2-4 (2008); 307-315.

CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá, Colombia, McGRAW-HILL INTERAMERICANA S. A., 1994. p. 667.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia, McGRAW-HILL INTERAMERICANA S. A., 1994. p. 584.

COLBÚN – INGENDESA. Estudio de Impacto Ambiental 08480-03-01-IISE-EIA-001, versión 0. Anexo N, Caudal ecológico: Apéndice N1, caudal ecológico determinado mediante modelo IFIM – PHABSIM. [en línea].

COLOMBIA (2010). Constitución Política de Colombia de 1991. Bogotá. Gráficas Skla.

Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA). Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Área de Interés Exploratorio Tinigua Módulo 1. 2012.

Consultoría y Medio Ambiente Ltda. (C&MA). Respuesta auto de información adicional N° 3790 para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) área de interés exploratoria Tinigua Módulo 1.

CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL ÁREA DE MANEJO ESPECIAL DE LA MACARENA (CORMACARENA). Creación e importancia del Área de Manejo Especial La Macarena – AMEM Vistahermosa, Meta, Febrero de 2010.

CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL ÁREA DE MANEJO ESPECIAL DE LA MACARENA (CORMACARENA). Levantamiento de cobertura vegetal y uso actual del suelo en los municipios del AMEM. Villavicencio (Meta), Junio de 1997.

CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL ÁREA DE MANEJO ESPECIAL DE LA MACARENA (CORMACARENA) y SINARCO Ltda. Estudio para el Ordenamiento Territorial de la cuenca del río Duda. Villavicencio (Meta), Noviembre de 1999.

CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE LA ORINOQUÍA (CORPORINOQUÍA). Resolución 200.41.10.1398. Colombia, Corporación Autónoma Regional De La Orinoquía (CORPORINOQUÍA), 2010. 9 p.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (CVC) y Universidad del Valle. Estudio de los caudales afluentes y efluentes del embalse de Salvajina. Capítulo 4. Colombia. 2007. 35 p.

CURSO CORTO CAUDALES AMBIENTALES. (1<sup>a</sup> 2010: Bogotá). Memorias del primer curso corto de caudales ambientales.

DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. [en línea]. Vigésima segunda edición. España. 2001. Disponible en internet: <http://www.rae.es/rae.html>.

ECOPETROL, Gestión Social - DHS. Guía metodológica para la identificación y evaluación de impactos ambientales. Bogotá, Colombia. Ecopetrol. 2012. 16 p.

eFlowNet: Global Environmental Flows Network. [en línea]. Consultado el 15/08/13. Disponible en internet: <http://www.eflownet.org/index.cfm?linkcategoryid=1&siteid=1&FuseAction=main>.

ENDESA Chile. Introducción al cálculo de caudales ecológicos: un análisis de las tendencias actuales (ENDESA Chile). Santiago de Chile, Chile. Endesa Chile. 2011.

DAS GUPTA, A. Implication of environmental flows in river basin management. En: Elsevier. Physics and Chemistry of the Earth. 33 (2008); 298 – 303.

DOCAMPO PÉREZA, Luis. Modelación hidráulica de caudales ecológicos. [en línea]. Consultado el 12/08/13.

Instituto de hidrología de España-Unesco. Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos. Madrid, España, Unesco, 1981.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Zonificación hidrográfica de Colombia. 2009.

JEFATURA DEL ESTADO. Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional. En: Noticias Jurídicas. [en línea]. Consultado el 17/09/13. Disponible en: [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/l10-2001.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l10-2001.html)

KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali, Colombia. Universidad del Valle. 2009.

LOZANO BARÓN, Samuel. La Constitución ecológica de Colombia. Legislación Ambiental. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de La Salle. Segundo semestre 2010.

LUENGAS C., Belisario. Metodología para el Balance Hídrico Nacional. En: IDEAM – Centro de Documentación e Información Científico Técnica.

MAZVIMAVI, D; MADAMOMBE, E; MAKUKIRA, H. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe. En: Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 32, (2007); 995 - 1006.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MMA) et al. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de un sector estratégico de los Distritos de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables Ariari – Guayabero y La Macarena, y del Parque Nacional Natural Sierra de La Macarena, en el Área de Manejo Especial La Macarena – AMEM, Departamento del Meta y Guaviare. Mayo de 2002.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). Reservas forestales de la Ley 2 de 1959. [en línea]. Consultado el 12/09/2013. <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=278&conID=6056>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). Nuestra Ley, Nuestro Sistema, SINA 15 años: edición especial Ley 99 de 1993. Bogotá, Colombia. Villegas Editores S.A. 2009. 189 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). Política nacional para gestión integral del recurso hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). Proyecto de Ley del Agua: borrador versión Enero 17 de 2005. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005. 25 p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT) y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (SEDE BOGOTÁ). Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados: Informe final. Bogotá. Octubre 30 de 2008.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE E INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Estudio Nacional del Agua. En: IDEAM – Centro de Documentación e Información Científico Técnica. 2010.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DE CHILE. Ley 20017 de 2005. [en línea]. Consultado el 17/09/13. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=239221&idVersion=2009-12-29>

MONSALVE DURANGO, Elkín Aníbal; BUSTAMANTE TORO, César Augusto. Caso 2: Determinación de las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía-Puente Balboa. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 285 – 302.

MONSALVE SAÉNZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Segunda edición. Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. 1999. 382 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo, Uruguay, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe – ROSTLAC, 1982.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA - Ecuador. Ley orgánica de recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua. [en línea]. Consultado el 17/09/13. Disponible en: [http://iepala.es/IMG/pdf/PLRH\\_Ejecutivo\\_.pdf](http://iepala.es/IMG/pdf/PLRH_Ejecutivo_.pdf)

REDONDO TILANO, Sergio Andrés. Incertidumbre hidrológica en la estimación de caudales ambientales mediante metodologías basadas en series históricas. Bogotá, 2011. Tesis de investigación (Magíster en ingeniería – Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

REYES TRUJILLO, Aldemar; ULISES BARROSO, Fabián; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Santiago de Cali: Programa Editorial Universidad del Valle. 2010.

RINCÓN LARA, Andrea Isabel. Aplicación del modelo IHRA para calcular el caudal ecológico en la cuenca del río Lenguaque. Bogotá, 2004. Monografía (Ingeniero Ambiental y Sanitaria). Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

Universidad de Pamplona (UNIPAMPLONA). Capítulo III - índices de Calidad (ICAs) y de Contaminación (ICOs) de importancia mundial. [en línea]. Consultado el 23/10/13. Disponible en: [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/libros/06082010/icatest\\_capitulo3.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf)

U.S. Geological Survey (USGS). Instream Flow Incremental Methodology (IFIM). [en línea]. Consultado el 24/09/13. Disponible en: <http://www.fort.usgs.gov/products/software/ifim/Default.asp>

VÁSQUEZ ZAPATA, Guillermo León et al. Caso 4: Determinación de los caudales ecológicos para el normal desarrollo de la biota acuática, en las cuencas media y baja de los ríos: Timba, Claro, Amaime, Tulua y Pescador, en el departamento del Valle del Cauca. En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 311 – 325.

VIESSMAN Warren Jr. y LEWIS Gary L. Introduction to hydrology. 5ª edición. Estados Unidos, Prentice Hall, 2003.612 p.

World Wildlife Fund (WWF). Caudal ecológico: salud al ambiente, agua para la gente. En: Facts Sheet. Octubre de 2010. [en línea]. Octubre de 2011. p. 1.

YANG, Z. F. et al. Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China. En: Communicatiosn in Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. Vol. 14, (2009); 2469 - 2481.

ZAMORA GONZÁLEZ, Hildier. El índice BMWP y la evaluación biológica de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales naturales de Colombia. [en línea].

Consultado el 23/10/13. Disponible en:  
[http://attachments.wetpaintserv.us/tC\\$2dHzxCU2g24n4xbeS%2Bg%3D%3D1379729](http://attachments.wetpaintserv.us/tC$2dHzxCU2g24n4xbeS%2Bg%3D%3D1379729)

ZUÑIGA, María del Carmen. Caso 3: Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental: caso del río Meléndez (Valle del Cauca, Colombia). En: KINTZ CANTERA, Jaime; CARVAJAL ESCOBAR, Yesid; CASTRO HEREDIA, Lina Mabel. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Cali: Universidad del Valle. 2009. p. 303 - 310.

## **12. ANEXOS**

### **ANEXO 1. DATOS HIDROLÓGICOS**