

ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LAS PIEDRAS

Proyecto de grado modalidad investigación como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Ambiental

BRYAN FELIPE AVILÉS RAMÍREZ Cód. 104913010540
LINA MARÍA TOVAR PLAZA Cód. 49102026



UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN – 2017

ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LAS PIEDRAS

Proyecto de grado modalidad investigación como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Ambiental

BRYAN FELIPE AVILÉS RAMÍREZ Cód. 104913010540
LINA MARÍA TOVAR PLAZA Cód. 49102026

Director:
Ing. M.Sc. Carlos A. Gallardo B.
Departamento de Hidráulica

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN – 2017

Nota de Aceptación:

Firma de los jurados:

Firma del Jurado.

Firma del Jurado.

Dedicatoria

Este nuevo logro quiero dedicarlo a mis padres por haberme proporcionado la mejor educación, lecciones de vida, apoyo y Confianza para poder llegar a ser un profesional.

A mis hermanas y demás personas especiales que me han acompañado en todo este proceso y por el apoyo que me brindaron día a día en el transcurso de mi carrera universitaria.

Lina María Tovar Plaza

A Dios todo poderoso, por ser mi guía y eterna compañía durante este proceso. A mis padres Leída Constanza Ramírez y Wilmer Ramos, por su eterno e incondicional cariño y apoyo. A mis hermanas Valentina y Valerie por sus inocentes y acertados consejos. A mis Abuelos Asceneth Cuenca y Melquisedec Ramírez por sus sabios consejos e incontables enseñanzas. A mis tíos William Eduardo, Mairalejandra y Andrés Mauricio por su respaldo y cariño. A mi familia en general por forjar en mi vida las mejores cosas. A mis amigos, aquellos que perduran a lo largo de toda la vida. a todos mil gracias.

A todos aquellos seres de luz que me enseñaron día a día y me acompañaron durante mi vida universitaria, a los que permanecieron siempre y a los que hoy ya no están conmigo, a todos ellos muchas gracias.

Bryan Felipe Avilés Ramírez

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo agradecen especialmente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por la facilitación de la información pertinente para poder desarrollar a cabalidad la presente investigación.

A la Ingeniera Eliana Castro Aragón, por su gestión en la obtención de la información necesaria para ejecutar este estudio.

A el Ingeniero Luis Jorge González, por sus sugerencias y colaboración para el desarrollo de esta indagación.

A nuestro Director, Ingeniero Carlos A. Gallardo, por su dedicación y compromiso para lograr la finalización de nuestra investigación.

A nuestra Alma Máter, Universidad del Cauca, y demás profesores, que aportaron y dejaron en nosotros muchas enseñanzas y conocimientos para lograr alcanzar este nuevo logro personal y profesional.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
4. HIPOTESIS.....	4
5. MARCO TEÓRICO.....	5
5.1 REGISTRO DE CAUDALES EN UNA CUENCA HIDROGRAFICA.....	5
5.2 METODO DE ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA SITIOS DIFERENTES A LA ESTACIÓN DE AFOROS.....	5
5.2.1 Método de Transferencia Hidrológica.....	5
5.3 EL CAUDAL AMBIENTAL.....	6
5.3.1 Curva de Duración de Caudales.....	6
5.3.2 Índice de Regulación Hídrica (IRH).....	8
5.3.3 Cálculo del Índice de Regulación Hídrica (IRH).....	8
5.4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL.....	9
5.4.1 Metodología para la estimación del Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados.....	9
5.4.2 Metodología para estimar Caudales Ambientales en función del Índice de Regulación Hídrica.....	10
5.5 CAUDAL ECOLÓGICO.....	11
5.6 METODOS PARA LA DETERMINACION DEL CAUDAL ECOLOGICO.....	12
5.6.1 Métodos Cuantitativos.....	12
5.6.2 Métodos Hidrológicos.....	12
5.6.3 Métodos Hidráulicos.....	13
5.6.4 Métodos Simulación de Hábitat.....	14
6. METODOLOGÍA.....	19
6.1 ASPECTOS GENERALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS.....	19
6.1.1 Ubicación del Área de Estudio.....	19
6.1.2 Clima.....	22
6.1.3 Precipitación.....	22

6.1.4 Hidrografía.....	22
6.1.5 Demanda hídrica de la Subcuenca del río Las Piedras	23
6.2 MICROCUENCAS PRINCIPALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS ..	23
6.3 PROCEDIMIENTO	25
7. RESULTADOS, ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES	27
7.1 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS.....	27
7.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA LAS MICROCUENCAS ESTUDIADAS.....	31
7.2.1 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Arrayanales – Río las Piedras	31
7.2.2 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Aguas Claras – Río las Piedras	32
7.2.3 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca El Vado – Río las Piedras	33
7.2.4 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Santa Teresa – Río las Piedras	34
7.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA CONDICIONES CRITICAS	36
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
9. BIBLIOGRAFÍA.....	43
10. ANEXOS	47
ANEXO A. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).....	47
ANEXO B. DATOS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).....	47
ANEXO C. DATOS DE CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).....	47
ANEXO D. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA ARRAYANALES (1969-2015).	47
ANEXO E. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA AGUAS CLARAS (1969-2015).....	47
ANEXO F. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA EL VADO (1969-2015).....	47
ANEXO G. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS,	

MICROCUENCA SANTA TERESA (1969-2015).....	47
ANEXO H. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA ARRAYANALES.	47
ANEXO I. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA AGUAS CLARAS.....	47
ANEXO J. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA EL VADO.....	47
ANEXO K. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA SANTA TERESA.....	47

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 6.1 Demanda hídrica de la Subcuenca río Las Piedras.	23
Tabla 6.2. Clasificación y áreas de la Subcuenca y cada una de las microcuencas estudiadas. ...	24
Tabla 7.1 Resumen de resultados del caudal ambiental para la Subcuenca del río Las Piedras y sus principales microcuencas.....	38
Tabla 7.2. Resumen de las demandas hídricas de la Subcuenca del río Las Piedras y sus principales microcuencas.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 5.1. Curva de Duración de Caudales (CDC) de un río con alta pendiente.	7
Figura 5.2. Curva de Duración de Caudales (CDC) de un río con baja pendiente.	7
Figura 5.3. Rangos Clasificatorios para el IRH.	8
Figura 5.4. Curva de Duración de Caudales medios.....	9
Figura 5.5. Proceso general para estimar el Caudal ambiental.	11
Figura 6.1. Subcuenca del río Las Piedras y Subcuencas vecinas.	20
Figura 6.2. Cuenca hidrográfica del río Las Piedras.	21
Figura 6.3. Parte alta del río Las Piedras.	21
Figura 6.4. Cuenca hidrográfica río Las Piedras.....	23
Figura 7.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015)..	27
Figura 7.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).	28
Figura 7.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).	29
Figura 7.4. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).	30
Figura 7.5. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).	32
Figura 7.6. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).	33
Figura 7.7. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).	34
Figura 7.8. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y caudales (1969 – 2015).	35
Figura 7.9. Curva de Duración de Caudales medios mensuales (1969 – 2015).	36
Figura 7.10. Curva de Duración de Caudales mínimos mensuales (1969 – 2015).	37

LISTA DE FIGURAS DE LOS ANEXOS

Pág.

Figura H.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).	48
Figura H.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).	49
Figura H.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).	50
Figura I.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).	51
Figura I.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).	52
Figura I.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).	53
Figura J.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).	54
Figura J.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).	55
Figura J.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).	56
Figura K.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).	57
Figura K.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).	58
Figura K.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).	59

1. INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas mundiales en la actualidad es el uso excesivo del recurso hídrico y el deterioro de los ecosistemas acuáticos, por lo que antiguamente se determinaba y hablaba de caudales ecológicos, los cuales se definían como la cantidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para mantener el hábitat del río y su entorno en buenas condiciones (Velez, et al., 2004). En la actualidad se llegó a reconocer a los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, garantizan la disponibilidad constante de agua y los muchos beneficios que aportan a la sociedad, cabe resaltar que son necesarios para el desarrollo y formulación de normas y políticas del manejo de agua (Viveka, et al. 2014). Esta definición discrepa principalmente del término caudal ecológico en el sentido que el caudal ambiental agrupa el volumen mínimo que debe estar disponible en un cauce y sus respectivas demandas o usos, razón por la cual el caudal ambiental se utiliza como herramienta de la gestión integrada de recursos hídricos.

El río Las Piedras es de vital importancia para la región caucana ya que alrededor de su cauce se desarrollan diferentes actividades económicas representativas para la zona tales como la agricultura de subsistencia, la ganadería extensiva, la piscicultura (El Diviso), las bocatomas de acueductos para el abastecimiento de la ciudad de Popayán (El Tablazo), entre otras. En el siguiente trabajo se expondrá una metodología de estimación de caudales ambientales basada en métodos de tipo hidrológicos tal como lo propone el IDEAM, posteriormente se realizarán transposiciones de caudales para múltiples microcuencas de la sub-cuenca del río Las Piedras y así poder hallar los caudales ambientales de las mismas. Lo anterior teniendo en cuenta la oferta hídrica, para lo cual se trabajará con información preliminar sobre series históricas de caudales medios diarios, medios mensuales y mínimos mensuales (IDEAM, 2017). se determinará el índice de regulación hídrica (IRH), tal como lo sugiere el IDEAM y finalmente se establecerán dichos caudales ambientales.

2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de analizar y determinar el caudal ambiental para cualquier cuenca hidrográfica radica principalmente en la contribución de manera decisiva a la salud de los cuerpos de agua que este proporciona, al desarrollo económico de las poblaciones aledañas a las riveras de estos y al asegurar la disponibilidad constante de los muchos beneficios que aporta a la sociedad. Dicho lo anterior se infiere que resulta cada vez más claro que, a mediano y largo plazo, no satisfacer las necesidades de los caudales ambientales conlleva a consecuencias desastrosas para muchos de los usuarios del recurso hídrico, de esta manera se afirma que para abordar las necesidades hídricas de los ecosistemas acuáticos es necesario disminuir el empleo de agua por parte de uno o más sectores. Se trata de elecciones difíciles, pero que tendrán que adaptarse para asegurar la salud a largo plazo de las cuencas y las actividades que estas comprenden.

Una mirada mucho más sencilla al rol que desempeñan los caudales ambientales y su determinación se basa en el precepto de que no se puede extraer todo el caudal circulante en un cauce, se debe dejar circular el caudal mínimo necesario para permitir y garantizar la existencia de los diferentes sistemas bióticos y el caudal destinado para los usuarios del recurso hídrico o más comúnmente denominado demanda hídrica.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Determinar el caudal ambiental para el río Las Piedras y para las corrientes principales de varios de sus afluentes.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar el caudal ambiental para la Subcuenca del río Las Piedras, considerando el cauce principal desde su nacimiento hasta la estación limnimétrica Puente Carretera.
- ✓ Determinar el caudal ambiental de varias corrientes principales de las microcuencas del río Las Piedras.

4. HIPOTESIS

Con la metodología propuesta por el IDEAM para el cálculo de caudales ambientales basados en métodos hidrológicos (Curva de Duración de Caudales - CDC) se espera dar una aproximación real del caudal ambiental del río Las Piedras y de varios de sus afluentes. Así, se puede establecer como hipótesis que: “El método propuesto por el IDEAM sirve para determinar el caudal ambiental de cualquier corriente de agua”.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 REGISTRO DE CAUDALES EN UNA CUENCA HIDROGRAFICA

El régimen de caudales es un dato básico, indispensable, para todos los diseños y estudios hidráulicos e hidrográficos. Así pues, la principal forma de poder cuantificar dicho régimen es mediante la instalación de estaciones de aforo, las cuales permitan determinar con ayuda de series de datos de caudales tan largas como sea posible, los caudales escurridos en puntos característicos de un cauce principal y de ser posible los de sus diversos afluentes. En Colombia, las estaciones de aforo de caudales son inexistentes en muchos sitios, lo que ha obligado a recurrir a métodos aproximados para la estimación de estos valores. Otras veces se necesita conocer el régimen de caudales dentro de la misma cuenca, pero en sitios diferentes a los de la estación de aforos, en cuyo caso se puede recurrir a la trasposición de caudales.

5.2 METODO DE ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA SITIOS DIFERENTES A LA ESTACIÓN DE AFOROS

5.2.1 Método de Transferencia Hidrológica

Este método se emplea principalmente con parámetros adimensionales que tengan variables a transferir, lo cual está determinado principalmente por relaciones que incluyen la escorrentía y el área de la cuenca. Este método transfiere información y genera una relación entre el área, caudales y precipitaciones de la cuenca. Se aplica en cuencas donde se tenga información conocida y en zonas donde no se cuente con estos datos. Las relaciones se presentan en las siguientes ecuaciones.

Ecuación 5.1

$$\frac{Q}{A * P} = \frac{Q}{A * P} \quad (5.1)$$

Al considerar que las precipitaciones son uniformes dentro de la misma cuenca se obtiene:

Ecuación 5.2

$$Q = Q * \left(\frac{A}{A}\right)^n \quad (5.2)$$

Donde:

Q = Caudal de la cuenca sin información (m³/s).

Q = Caudal de la cuenca con información (m³/s).

A = Área de la cuenca sin información (km²).

A = Área de la cuenca con información (km^2).

n = Coeficiente de calibración para el caso general corresponde a 1.

5.3 EL CAUDAL AMBIENTAL

En términos generales, la alteración y modificación de los caudales de los sistemas hídricos superficiales en Colombia y el mundo entero por la extracción y regulación de agua o por el funcionamiento de hidroeléctricas y grandes embalses ha causado cambios en la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. Hace tres décadas, en países de América del Norte y la Unión Europea, se aplicó un instrumento denominado “instream flow” para intentar garantizar y compatibilizar esos usos ambientales manteniendo una cierta cantidad de agua (caudal) dentro de un cauce (Lamb, 1995) y con el cual se pretende proteger y conservar, mediante la mantención de un cierto volumen de agua dentro del cauce, entre otros, los valores ambientales y usos ambientales de los ríos.

En Colombia, este instrumento se adopta a principios de este milenio bajo el nombre de caudal ambiental con el objetivo final de mantener los caudales mínimos de las corrientes superficiales en sus diferentes tramos, a fin de garantizar la conservación de los recursos hidrobiológicos y de los ecosistemas asociados (Proyecto de ley 365 de 2005 “por la cual se establecen medidas para orientar la planificación y administración del recurso hídrico en el territorio nacional”).

El caudal ambiental establece el régimen hidrológico natural de un río que debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia la planicie de inundación para mantener los valores característicos del ecosistema (Tharme 2003). Los caudales ambientales surgieron por la necesidad de establecer límites de extracción de agua en ríos de modo que mantuvieran la capacidad de dilución y evitarán niveles de contaminación inadmisibles, posteriormente se consideró la cantidad de agua que debía permanecer en los ríos para mantener poblaciones de peces de interés comercial llamados caudales ecológicos. Actualmente lo que se busca es conservar los ecosistemas por todos los beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos, contribuyendo a su bienestar. De esta manera, el concepto de caudales ambientales plantea específicamente el interés de sostener los ecosistemas y el bienestar humano que depende de estos (Conferencia de Brisbane, 2007).

5.3.1 Curva de Duración de Caudales

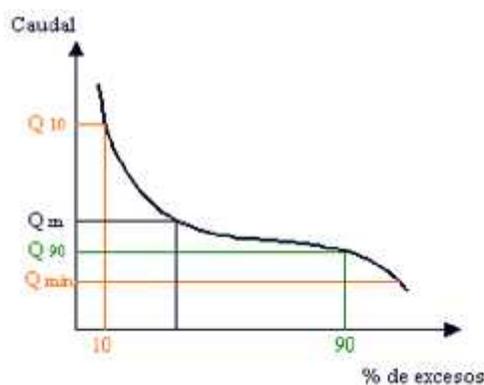
La curva de duración de caudales también es conocida como curva de persistencia o curva de caudales clasificados, nos indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Además, la curva indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia, dicha curva se puede construir a partir de caudales diarios, mensuales y anuales.

La curva de duración de caudales resulta del análisis de frecuencias de la serie histórica de

caudales medios diarios en el sitio de captación de un proyecto de suministro de agua. Se estima que, si la serie histórica es suficientemente buena, la curva de duración es representativa del régimen de caudales medios de la corriente y por lo tanto puede utilizarse para pronosticar el comportamiento del régimen futuro de caudales, o sea el régimen que se presentará durante la vida útil de la captación (Ingeniería Hoy, 2010).

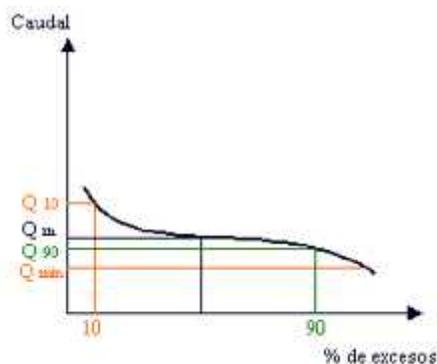
Las curvas de duración tienen formas típicas que dependen de las características de las cuencas vertientes. En cuencas de montaña, por ejemplo, la pendiente pronunciada en el tramo inicial de la curva indica que los caudales altos se presentan durante períodos cortos, mientras que en los ríos de llanura no existen diferencias muy notables en las pendientes de los diferentes tramos de la curva. Este hecho es útil para ajustar la forma de la curva de duración según las características de la cuenca cuando la serie de caudales medios es deficiente, o para transponer una curva de duración de una cuenca bien instrumentada de la misma región a la cuenca que tiene información escasa, (Figura 5.1 y Figura 5.2).

Figura 5.1. Curva de Duración de Caudales (CDC) de un río con alta pendiente.



Fuente: Blog Ingeniería Civil.

Figura 5.2. Curva de Duración de Caudales (CDC) de un río con baja pendiente.



Fuente: Blog Ingeniería Civil.

La curva de duración de caudales define el régimen de caudales de una corriente, ya que permite determinar la distribución de caudales en el tiempo. Los caudales característicos (medio, máximo y mínimo) determinados igualmente sobre la curva de duración, permiten caracterizar las condiciones medias, húmedas y secas de una cuenca. Por tanto, esta curva permite analizar la disponibilidad y variabilidad de caudales de una cuenca, esto es, su régimen hidrológico. Asimismo, la forma (tendencia) de la curva permite analizar la capacidad de regulación natural de una cuenca, la cual depende del relieve, la cobertura vegetal y las características geomorfológicas, entre otras (Acueducto de Bogotá, 2013).

5.3.2 Índice de Regulación Hídrica (IRH)

El Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH), mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas (IDEAM), las características del régimen hidrológico de la cuenca están relacionadas con factores meteorológicos, su interacción con la cobertura superficial y con los procesos del agua en el suelo. Este índice evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales por lo cual permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en general. En el Estudio Nacional del Agua 2010 se establecieron rangos dentro de los cuales se puede clasificar, estos se observan en la Figura 5.3.

Figura 5.3. Rangos Clasificatorios para el IRH.

Rango de valores del Indicador	Calificación	Descripción
>0.85	MUY ALTA	Muy alta retención y regulación de humedad
0.75 – 0.85	ALTA	Alta retención y regulación de humedad
0.65 – 0.75	MODERADA	Media retención y regulación de humedad media
0.50 – 0.65	BAJA	Baja retención y regulación de humedad
<0.50	MUY BAJA	Muy baja retención y regulación de e humedad

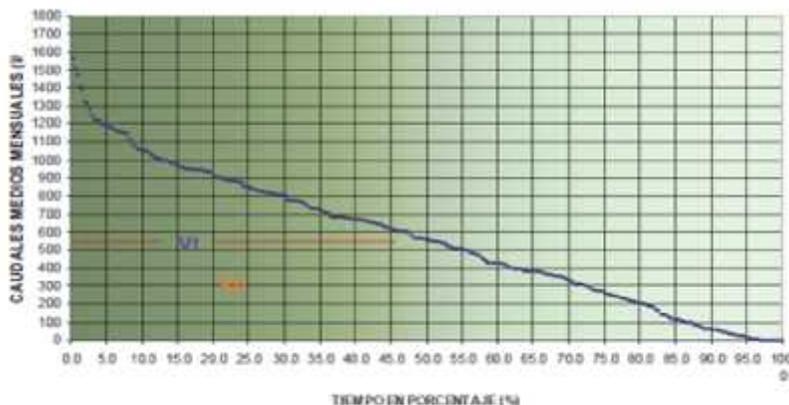
Fuente: Estudio Nacional del agua, 2010.

5.3.3 Cálculo del Índice de Regulación Hídrica (IRH)

La obtención del índice de regulación y retención hídrica (IRH), se basa fundamentalmente en la Curva de duración de caudales medios (Figura 5.4) para los caudales medios diarios. Su estimación resulta de la relación por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio y la correspondiente área total por debajo de la curva de duración de caudales diarios. La

expresión matemática se muestra en la Ecuación 5.3.

Figura 5.4. Curva de Duración de Caudales medios.



Fuente: Estudio Nacional del Agua 2010.

Ecuación 5.3

$$II = \frac{V_1}{V_2} \quad (5.3)$$

Donde:

II : Índice de retención y regulación hídrica.

V_1 : Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio.

V_2 : Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

5.4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL

5.4.1 Metodología para la estimación del Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados

La bibliografía más reciente en nuestro país corresponde al Grupo GIREH (Grupo de investigación en Ingeniería de los recursos hídricos de la Universidad Nacional Sede Bogotá), (Erasmó et al., 2007) “Informe Final del Contrato y del Plan de trabajo detallado aprobado por parte del MAVDT para el desarrollo de proyectos licenciados”, el cual contiene la propuesta metodológica para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieran licencia en Colombia.

La Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, realizó una propuesta inicial de criterios, lineamientos y orientaciones y una propuesta técnica por orden de la Dirección de Licencias una revisión para la estimación y evaluación detallada y crítica de metodologías existentes utilizadas a nivel nacional y mundial para la estimación del caudal ambiental. A demás de esto, la revisión de la información biológica, hidrológica, hidráulica y de calidad de agua disponible en trece (13)

proyectos licenciados por el MAVDT en Colombia, y los criterios y metodologías de determinación del caudal ambiental que se han aplicado por diferentes consultores y empresas en estos proyectos.

A nivel general considera que la propuesta metodología para estimar y evaluar el caudal ambiental debe cumplir con criterios de objetividad (sin convertirse en una receta, y promoviendo la incorporación del conocimiento de los diversos actores, debe poder ser aplicada de la manera más objetiva posible); flexibilidad (posibilidad de ser aplicada con algún grado de ajuste bajo diferentes condiciones de información y en diversos tipos de corrientes); adaptabilidad (resaltando la necesidad de realizar monitoreo, seguimiento y ajuste continuo de las estimaciones y de la propuesta metodológica en caso de considerarse necesario a partir de evaluaciones periódicas de índices de estado biótico); costo-efectividad (entendida como el adecuado balance entre la eficacia de la metodología y su sostenibilidad); ecosistémicos y de integralidad (considerando la necesidad de incorporar en los análisis los componentes hidrológico, hidráulico, de calidad de agua, biótico, socioeconómico, etc.); precaución ambiental (manteniendo prudencia ante el claro desconocimiento de nuestros ecosistemas y las limitaciones de información existentes en el contexto colombiano); parte integral del componente del marco normativo y de gestión ambiental (entendidos estos como instrumentos ambientales que son el nicho propicio para la determinación de los caudales ambientales); y obviamente con fundamento en criterios científicos sólidos (pretende ser un instrumento técnico que permita mejorar los Términos de Referencia de requerimientos de información y metodología a seguir para la definición y evaluación de un caudal ambiental en proyectos que requieran licencia).

Por último esta información se procesa por medio de modelos matemáticos y estadísticos para encontrar un umbral de caudal mínimos, el cual no deberá sobrepasar ninguna política de gestión de agua, datos basados en grupos de expertos y en modelos computacionales reconocidos en el campo científico (HEC-RAS, ARGIS, HIDROSIG, SURFER, PHABSIM, entre otros).

5.4.2 Metodología para estimar Caudales Ambientales en función del Índice de Regulación Hídrica

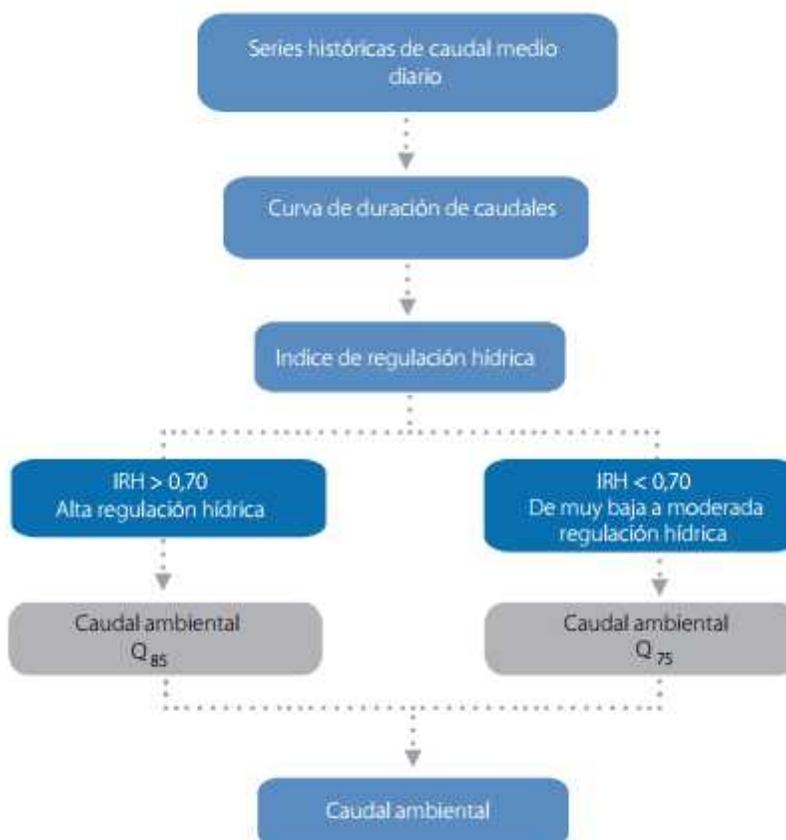
A partir del análisis estadístico y el conocimiento experto se pueden definir los valores característicos del caudal ambiental. En la Figura 5.5 se muestra el proceso general para determinar el caudal ambiental a partir de la curva de duración de caudales diarios. Con base en estas se estima el índice de regulación hídrica (IRH) y luego el caudal ambiental teniendo en cuenta las siguientes dos condiciones (IDEAM, 2014):

-) A cuencas con autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en que se considera representativo el valor característico Q85 de la curva de duración (caudal

igualado o superado el 85% del tiempo), este valor característico se aplica a estaciones con un IRH igual o superior a 0.70 (alta retención y regulación).

-) El segundo grupo corresponde a estaciones con valores del IRH inferiores a 0.70, para las cuales se asigna el valor característico Q_{75} de la curva de duración de caudales medios diarios en la determinación del caudal ambiental.

Figura 5.5. Proceso general para estimar el Caudal ambiental.



Fuente: Estudio Nacional del Agua 2014, con modificaciones propias.

5.5 CAUDAL ECOLÓGICO

La visión, así como la definición de caudal ecológico, ha cambiado a lo largo del tiempo; inicialmente (años 70), el concepto estaba fundamentado en un caudal mínimo fijo en el tiempo; posteriormente se planteó la tesis que este caudal debería calcularse a partir de las variaciones climáticas locales de la red de drenaje, en años siguientes el caudal ecológico o ambiental estaba más relacionado con los cambios en el hábitat y las funciones ecológicas del sistema hídrico y finalmente, los enfoques más recientes plantean la necesidad de mantener un buen estado ecológico del sistema, llegando a incorporar la restauración en los planes de manejo (UNAL, 2014). El Caudal ecológico podría definirse como el flujo de agua requerido para mantener las

necesidades mínimas de los ecosistemas acuáticos existentes en un área de influencia antrópica que modificara los caudales naturales de un río o quebrada. Los caudales ecológicos son escurrimientos que se dejan fluir por el río para preservar la integridad ecológica sin menoscabo del desarrollo de los habitantes (Parra, 2013).

5.6 METODOS PARA LA DETERMINACION DEL CAUDAL ECOLOGICO

5.6.1 Métodos Cuantitativos

La selección de la metodología o metodologías más apropiadas en cada caso depende de muchos factores, incluyendo los objetivos y requerimientos técnicos establecidos por la normativa, la adecuación a las características hidrológicas y ambientales del sistema fluvial objeto de análisis, la escala de trabajo y la cantidad y calidad de los datos disponibles. En cualquier caso, es importante aplicar metodologías suficientemente contrastadas y validadas por la comunidad científica, de forma que los resultados que se deriven en cuanto al régimen de caudales aconsejado permitan cumplir de forma efectiva con los objetivos ambientales perseguidos. En este sentido uno de los elementos de valoración, en conjunción con otros muchos, es el respaldo científico de las distintas metodologías propuestas. Existen aproximadamente 30 métodos diferentes (Carreno, 2008), los cuales se han agrupado en cuatro grandes tipos de enfoques metodológicos, con algún grado de aceptación, para fijar los caudales ecológicos o de mantenimiento, que se aplican de acuerdo con el país donde se usen y los intereses que se pretendan: Hidrológico, Hidráulico, de Simulación de Hábitat y Holístico. Uno de los métodos se basa en las series hidrológicas históricas del río y se conoce como Método Hidrológico. El segundo método se fundamenta en la simulación hidráulica del río y se conoce como Método Hidrológico – Biológico; algunos de los criterios de estos dos métodos son bastante restrictivos en cuanto a sus exigencias de caudal mínimo, tanto que de entrada eliminan toda posibilidad técnica y económica de adelantar cualquier proyecto en nuestro medio, pues fueron desarrollados para unas condiciones específicas muy diferentes a las nuestras. El tercer método se basa en criterios exclusivamente biológicos y es llamado de Simulación de Hábitat y por último el método holístico tiene una visión global del río. A continuación, se mencionan con mayor detalle algunas de estas metodologías. No se pretende incluir todas las que se han desarrollado sino mostrar un panorama de la gran diversidad de técnicas que han surgido, en especial en los últimos años.

5.6.2 Métodos Hidrológicos

Los métodos hidrológicos o de los caudales históricos se basan en el análisis de las características del régimen hidrológico natural como factor clave en la organización del ecosistema fluvial. En la actualidad, estos métodos son los considerados como más sencillos.

La mayoría se basa en el cálculo de un caudal mínimo teóricamente suficiente para mantener las características del sistema fluvial, para lo cual se analizan los registros históricos de caudal. Como ejemplos cabe citar el método de Tennant o Montana (Orth & Maughan, 1981) y el Range of Variability Approach (Richter et al., 1997). Con estos métodos, el caudal ecológico se establece a partir del resultado de algún parámetro estadístico supuestamente representativo. En la actualidad, los métodos hidrológicos son los más extendidos a nivel mundial para el cálculo del caudal ecológico de ríos. Los criterios o variaciones del método hidrológico consultados son los siguientes, para definir el caudal ecológico:

-) El caudal ecológico corresponde al 10 % del valor del caudal medio mensual multianual del río (Salazar, 2009).
-) A partir de curvas de duración de caudales medios diarios, propone como caudal mínimo ecológico el caudal promedio multianual de mínimo 5 a máximo 10 años que permanece el 97.5 % del tiempo y cuyo periodo de recurrencia es de 2.33 años. (ENA, 2000).
-) Se considerará como caudal ecológico el caudal de permanencia en la fuente durante el 90 % del tiempo. (Proyecto de ley, 2005).
-) El caudal ecológico corresponde al 25 % de los volúmenes anuales en condiciones de oferta media. IDEAM (2000).
-) El caudal ecológico se considera el caudal mínimo histórico de la serie hidrológica. IDEAM (2000).
-) El caudal ecológico es el 50 % del caudal mínimo del estiaje del año 95 %.
-) El caudal ecológico es la media de los caudales mínimos mensuales registrados durante una serie de años.

5.6.3 Métodos Hidráulicos

Los métodos Hidráulicos, también denominados de segunda generación, incluyen junto a información hidrológica la relativa a la morfología fluvial y al estudio de variables hidráulicas simples como la velocidad, la profundidad y la superficie cubierta por la lámina de agua y su relación con las variaciones de caudal. Uno de los métodos más extendidos es el del Perímetro Mojado (línea de contacto entre el agua y el lecho) (Reiser et al., 1989). Este método relaciona el caudal con el perímetro mojado, planteando que el punto de inflexión de la relación perímetro mojado-caudal es el punto donde se maximiza el hábitat usable por las especies. Otros métodos se basan en transectos múltiples. A diferencia de la técnica del perímetro mojado (utilizado para un único transecto), los métodos de transectos múltiples evalúan varias secciones transversales. En cada una de ellas se miden, bajo diferentes caudales, la velocidad, el nivel, el sustrato y la cobertura. Estos datos se someten a modelación para determinar los cambios en las variables hidráulicas, lo cual da una idea de la “habitabilidad” del río sometido a variaciones de caudal. Estos métodos tienen en cuenta la variabilidad de los caudales y el consecuente cambio de las variables hidráulicas de importancia ecológica. Hay varios métodos de transectos múltiples

propuestos para Estados Unidos; algunos miden variables como cobertura vegetal, caudales medios anuales, longitud y área de la sección (Método del Water Resources Research Institute “WRRRI Cover”, 1973). Otros determinan velocidad de la corriente, profundidad de flujo y necesidades de hábitat para el ciclo biológico de algunas especies ícticas (Método de Washington, 1974), o velocidad, profundidad de flujo, área de la subsección y tipos de sustrato (Método de California o de Waters, 1976). En el método de Oregón (1980) se mide velocidad, profundidad de flujo y caudal (Agua limpia y Castro, 2006).

5.6.4 Métodos Simulación de Hábitat

Este método, también llamado de tercera generación, agrupa series históricas de caudal, parámetros morfohidráulicos de diferentes secciones, procesos fisicoquímicos, tróficos y se extrapola hasta su relación con algunas variables biológicas poblacionales (biomasa, densidad, etc.) de especies piscícolas determinadas (específicamente para salmónidos), para definir sus preferencias en cuanto a su hábitat. La deducción de un caudal de mantenimiento a partir de estos planteamientos no resulta tan sencilla y directa como en los métodos anteriores, aunque supuestamente sus resultados ofrecen algunas garantías de adecuación, que no son, sin embargo, muy útiles para ríos en los que la variabilidad temporal de las características de hábitats es inherente. Dentro de esta metodología se encuentran el método basado en la geomorfología propuesto en Australia por (Thoms y Sheldom, 2002) e IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bain et al., 1988); (Reiser et al., 1989), uno de los más ampliamente aplicados para la determinación de caudales ambientales. (Thoms y Sheldom, 2002) plantea los siguientes pasos para el establecimiento de caudales ecológicos.

-)] 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.
-)] 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.
-)] 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).

-) 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.

El método IFIM, cuenta con una valoración positiva en el 90 % de los casos (Carreno, 2008), se ha aplicado en 38 estados de Norte América (Reiser et al., 1989), en Colombia, Australia y varios países europeos (Francisca et al., 2008). Está basado en las relaciones cuantitativas obtenidas por simulación hidráulica, entre los caudales circulantes y los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el hábitat biológico por medio de métodos computacionales como (PHABSIM el cual realiza la simulación del hábitat físico o RHABSIM simulación de hábitat fluvial). El Método del Hábitat Potencial Útil (HPU), es una variante del IFIM y busca establecer una combinación de condiciones hidráulicas (velocidad – profundidad), características del cauce (sustrato y cobertura) y características del agua (temperatura), óptimas para cada especie y estado de vida a lo largo del ciclo hidrológico anual.

Antes del desarrollo de la modelación se identifican los objetivos y límites del estudio y se realiza la tipificación e inventario de los diferentes hábitats eco-hidráulicos. Para estos fines el hábitat se define como un área relativamente homogénea en cuanto a velocidad, profundidad y tipo de sustrato. El inventario de hábitats se realiza mediante el levantamiento topográfico de secciones transversales (Díez y Burbano, 2006). El esquema conceptual de dicha metodología parte de cinco puntos básicos:

) **Modelo de hidráulica fluvial**

Con base en los caudales circulantes se establecen relaciones con parámetros como: Profundidad, velocidad del flujo, ancho del cauce inundado y granulometría del sustrato del cauce.

) **Curvas de preferencia de la fauna**

En este esquema se ubican las distintas especies identificadas en el cauce y se establece su relación con los parámetros físicos definidos en el cauce para cada caudal circulante. Los investigadores establecieron unas Curvas de Preferencia para las especies adultas, con énfasis en los salmónidos, en donde se normalizaron para mayor comodidad en una escala de cero (0) a uno (1.0), definiendo como valor cero el parámetro en condiciones intolerantes para el desarrollo de la especie y valor uno para aquellos valores del parámetro hidráulico que resulta óptimo para la especie.

) **Métodos Cuantitativos Valor potencial del hábitat fluvial**

El río, en la sección transversal, se divide en celdas diferenciales, en las que para determinado caudal circulante existe una profundidad media (P_i), una velocidad media (V_i), y un tipo de sustrato determinado (S_i). Las curvas de preferencia dan unos valores de preferencia para cada parámetro, que son $C_i(P_i)$, $C_i(V_i)$ y $C_i(S_i)$. El producto de ellos es un indicador del valor de cada celda como hábitat potencial y la integración de dicho valor en todas las celdas de una sección transversal del río, ponderándolas por la superficie que representan, define el valor potencial del hábitat fluvial útil (WUA).

) **Modelación hidráulica**

El módulo hidráulico describe la distribución espacial de atributos del sistema tales como la profundidad, la velocidad y el tipo de sustrato. Este realiza simulaciones hidráulicas de secciones definidas en un tramo de corriente, con las cuales se predice secuencialmente las profundidades y velocidades dentro de un rango de caudales definido. Las simulaciones de las profundidades se pueden desarrollar por tres modelos de régimen permanente. El primero es un método estadístico común relacionando una serie de caudales y niveles tomados en campo (STGO), el segundo está indicado para un régimen de flujo uniforme (MANSQ) y por último para un flujo gradualmente variado (WSP).

) **Modelación del hábitat**

PHABSIM cuenta con un módulo para la simulación de hábitat físicos, en el cual, si se dispone de información sobre preferencias físicas para organismos específicos (en zonas templadas se han desarrollado curvas de aptitud del hábitat para varias especies de salmón y trucha), el modelo permite evaluar la disponibilidad de hábitat para diferentes escenarios alternativos de alteración del caudal.

La modelación del hábitat realizada por PHABSIM transforma la información sobre estructura del canal, los niveles de agua modelados y las velocidades en un índice de cantidad y calidad del hábitat disponible, usando Curvas de Preferencia del Hábitat (HSC) como la función de transferencia. Este índice de hábitat es luego referido a un Área Ponderada Útil (WUA-Weighted Usable Área) para cada sección transversal, la cual es posteriormente sumada para obtener un Área Ponderada Útil para cada especie de organismo en todo el tramo objeto de estudio y para un caudal dado. Esto permite crear relaciones entre un rango de caudales y la disponibilidad de hábitat para el organismo objetivo en toda el área de estudio.

Existen dos tipos generales de modelación del hábitat disponibles en PHABSIM, los cuales están basados en las condiciones promedio de todo el canal (Average Parameter Model) o en la distribución explícita de la velocidad, la profundidad y el tipo de sustrato a través de toda la

sección transversal (Distributed Parameter Models).

En adición a estas dos categorías, hay una tercera clase de modelación, que incluye la determinación o evaluación del hábitat físico efectivo y está compuesta de dos programas, el HABEF y el HABTAM. El primero es utilizado para determinar la disponibilidad de hábitat físico considerando dos flujos; en otras palabras, el hábitat que permanece efectivo cuando dos flujos son de importancia. En el segundo programa el hábitat efectivo se define como aquel que permanece disponible cuando las especies son forzadas a moverse en la sección transversal debido a fluctuaciones del caudal.

Requerimientos de información

) Estructura del canal:

Levantamientos topográficos detallados de secciones transversales de los micro hábitats donde se identifique la geometría del canal, además de la descripción de la composición de sustrato y la cobertura de vegetación.

) Información hidráulica:

Levantamiento de medidas de nivel del agua y distribución de velocidades para su respectivo caudal en cada sección transversal. Se recomienda como mínimo tres juegos de mediciones de profundidades y un juego de distribución de velocidades para asegurar una buena flexibilidad de la modelación hidráulica.

) Selección de organismos objetivo:

Se deben seleccionar las especies (normalmente peces) y los estados de vida de éstas que serán potencialmente indicadoras de la disponibilidad de hábitat, de acuerdo al cambio del régimen de flujo del sistema. Curvas de adaptabilidad de los organismos: Se deben definir condiciones favorables de micro hábitat para las especies objetivo, es decir, elaborar curvas de adaptabilidad de los organismos con respecto a variables como la velocidad, la profundidad y el sustrato. Estas curvas se pueden elaborar con trabajos de campo bien elaborados, transfiriendo curvas existentes o con una combinación de las dos.

5.6.5 Métodos Holísticos

Finalmente, los métodos Holísticos constituyen una aproximación a una visión global del río, basada en la Teoría de Ecosistemas Fluviales, en la que los caudales son el soporte básico para el ecosistema fluvial. Es la metodología que más volumen de información requiere y la más compleja y detallada y entre los ejemplos se pueden citar la Building Block Metodology (BBM) (Palmer, 1999) y la Downstream Response to Imposed Flow Transformatio (DRIFT) (King et al., 2003).

5.7 CAUDAL AMBIENTAL EN FUNCION DEL INDICE DE REGULACION HIDRICA

Se sabe que, al implementar la metodología propuesta por el Grupo GIREH (Grupo de investigación en Ingeniería de los recursos hídricos de la Universidad Nacional Sede Bogotá), (Erasmus et al., 2007) “Informe Final del Contrato y del Plan de trabajo detallado aprobado por parte del MAVDT para el desarrollo de proyectos licenciados”, para la estimación del caudal ambiental se encuentran inconformidades entre las personas que la aplican en la actualidad, pues estos se refieren a esta como una metodología que requiere de muchos datos que al final poco se utilizan, cuya obtención requiere una inversión económica muy alta. En otros casos particulares se menciona la discrepancia que tiene la metodología de calcular caudales ambientales con hidrología sin ecología, caudales independientes también a la calidad de agua, utilizándose métodos estadísticos en las series de tiempo que suponen un caudal ambiental de permanencia en el tiempo, sin conocer los requerimientos de las especies, estos solo los asumen por diversas tablas con porcentajes. Debido a esto, se desea obtener caudales que protejan verdaderamente a los organismos que se encuentran en sitios afectados antrópicamente en el lugar de estudio, sin obviar los usos que pueden llegar a hacer los usuarios de los cuerpos de agua, ya sea para fines agrícolas, domésticos o industriales y reducir así la incertidumbre de datos y procesos para llegar a determinar un caudal ambiental. Para llegar a esto, es necesario realizar un análisis hidrológico completo.

En el Estudio Nacional del Agua 2010 (ENA 2010), el caudal ambiental se estima a partir de las características del régimen hidrológico representadas en la curva de frecuencias de caudales diarios (Curva de Duración de Caudales), la cual sintetiza las características del régimen en un punto específico de la unidad hídrica de análisis (IDEAM, 2010).

Es importante anotar que a nivel nacional del ENA (2010), el caudal ambiental es un estimativo general y no reemplaza la evaluación que debe hacerse a un nivel regional o local para la gestión integrada del recurso hídrico. En ese sentido, el método hidrológico integra los elementos necesarios para el análisis regional. Esto lo corrobora la UICN (Aguirre, 2003) al reconocer que “el régimen de caudales es implícitamente, mas no explícitamente integral, ya que los elementos del ecosistema reciben apoyo del régimen hidrológico”. La inclusión del caudal ambiental se sustenta, además, en la regulación establecida por el MAVDT (Decreto Nro. 3930 de 2010), que define el caudal ambiental como: “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 debajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” (IDEAM, 2010).

Así pues, en el siguiente trabajo se desarrollará la estimación del caudal ambiental para la Subcuenca del Río Las Piedras y algunas de sus principales Microcuencas, tales como: Arrayanales, Santa Teresa, El Vado y Aguas Claras en base a lo propuesto por el (IDEAM, 2014). El cual lo define en función del Índice de Retención y Regulación hídrica (IRH).

6. METODOLOGÍA

El principal propósito de este estudio fue establecer valores de caudales ambientales para la Subcuenca del Río Las Piedras y para las microcuencas de sus principales afluentes. Para esto, se partió de la construcción de su Curva de Duración de Caudales con series históricas de Caudales medios diarios, para lo cual se contó con datos desde el año 1969 al año 2015, suministrados por el IDEAM. Seguidamente se analizó la incidencia de valores de Caudales altos y Caudales bajos los cuales pueden sesgar de manera representativa dichas curvas, para lo cual se descartaron los picos altos y bajos y se elaboraron las Curvas de Duración de Caudales respectivas. Luego se determinó el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) tal como lo establece el IDEAM, a partir del cual se determinó en la CDC medios diarios el caudal ambiental. Este procedimiento se hizo para la Subcuenca del río Las Piedras y para cada uno de sus microcuencas principales. Se resalta, que, para obtener los caudales para las microcuencas, se hizo una trasposición de los caudales medios diarios desde la estación Puente Carretera. Las microcuencas estudiadas correspondieron a las corrientes: Arrayanales, Aguas Claras, El Vado y Santa Teresa.

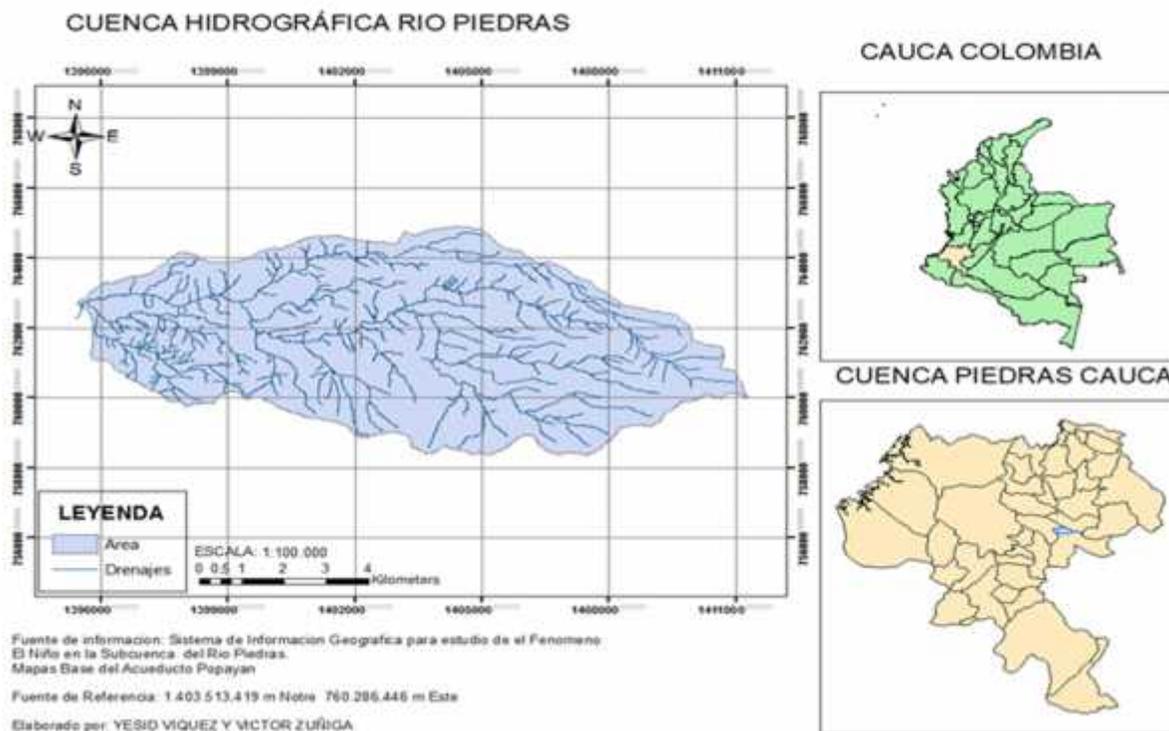
6.1 ASPECTOS GENERALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS

6.1.1 Ubicación del Área de Estudio

La Subcuenca del río Las Piedras está ubicada en el municipio de Popayán y Totoró, al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Se encuentra a $76^{\circ} 31' 10''$ al Oeste de Greenwich y $2^{\circ} 21' 45''$ de latitud Norte, en el nacimiento del río y a $76^{\circ} 23' 45''$ longitud Oeste y $2^{\circ} 25' 40''$ de latitud Norte en la desembocadura del río Cauca.

Limita al norte con la divisoria de aguas de la Subcuenca del río Palacé, al sur con la divisoria de aguas del río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el Departamento del Cauca. Su extensión es de 6.626 Ha, Figura 6.1.

Figura 6.2. Cuenca hidrográfica del río Las Piedras.



Fuente: Mapa base del Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

Una vista de la parte alta del río Las Piedras se presenta en la Figura 6.3.

Figura 6.3. Parte alta del río Las Piedras.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Clima

De acuerdo a la clasificación climática de la Subcuenca se cuenta con “clima medio y húmedo: se presenta este clima, en la franja altitudinal por debajo de los 2000 msnm, en una pequeña proporción de la parte baja de la Subcuenca, en las veredas Las Huacas y San Isidro, con temperaturas promedio similares de 19.3° C. La Subcuenca del río Las Piedras cuenta con altitudes en un rango entre 1.980 y 3.820 m.s.n.m.

6.1.3 Precipitación

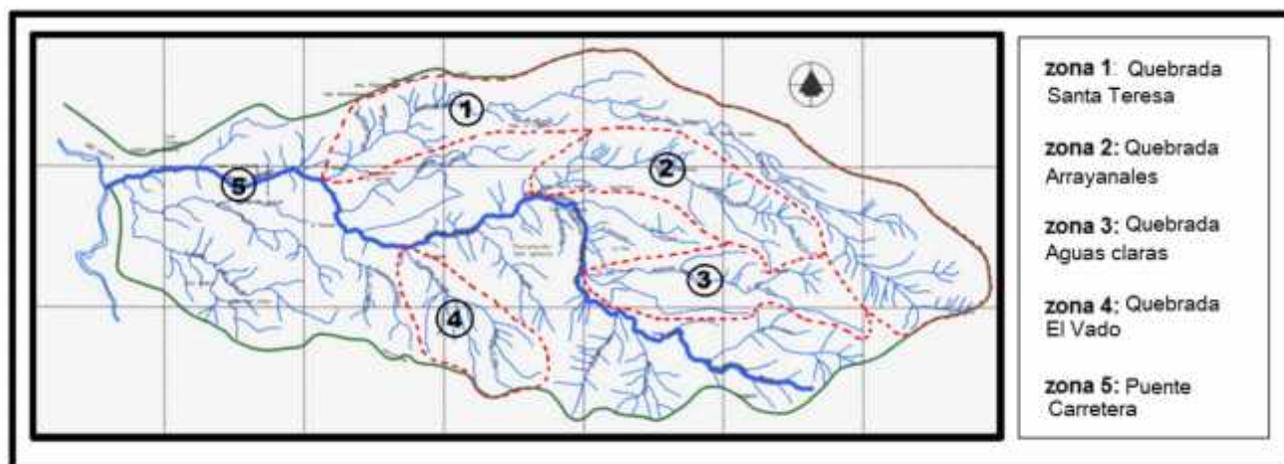
Según el Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca del río Las Piedras, la precipitación de la Subcuenca no es uniforme. Esto se debe a que es un clima típicamente ecuatorial de montaña con pisos térmicos como, templado, frío y de páramo con pisos bioclimáticos subandinos y alto andinos. Estos pisos se ven afectados por los vientos alisios y por la geomorfología del área, generando precipitaciones de tipo orográfico. De esta manera, se encuentran periodos de lluvias de octubre a mayo y un periodo seco de junio a septiembre. Los períodos más intensos de lluvias están entre octubre y diciembre, haciendo que la oferta hídrica de la zona se mantenga, debido a sus largos meses de precipitación y la retención de aguas de sus suelos.

6.1.4 Hidrografía

La Subcuenca del río Las Piedras pertenece a la cuenca del río Cauca. El río Las Piedras nace a partir de las corrientes Aguas Claras y Peñas Blancas; aguas abajo, a la corriente principal llegan 18 quebradas: Agua Colorada, Carnicería, El Vado, Pichagua, El Cedro, Las Juntas, La Costa, La Chorrera, Arrayanales, El Arado, El Limonar, Santa Teresa, Los Robles, La Josefina, San Pedro y caño El Muerto. En la Subcuenca del río Las Piedras se encuentra la estación hidrométrica Puente Carretera, la cual monitorea la corriente a una altura de 2000 msnm. Esta estación sirve de referente en la generación de caudales máximos para diseño de estructuras hidráulicas, entre otros.

Para el presente trabajo se determinaron los caudales ambientales para el río Las Piedras (hasta la estación hidrométrica Puente Carretera) y en las microcuencas de las quebradas: Aguas Claras, Arrayanales, El Vado y Santa Teresa. Lo anterior, al tener en cuenta que estas corrientes son de gran importancia por su alto aprovechamiento en actividades agrícolas y de fuentes de abastecimiento de agua potable. (Figura 6.4).

Figura 6.4. Cuenca hidrográfica río Las Piedras.



Fuente: López y Mavisoy (2016) con modificaciones propias.

6.1.5 Demanda hídrica de la Subcuenca del río Las Piedras

Este valor de se obtuvo recopilando información del POMCH, (2006) y se sintetiza en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Demanda hídrica de la Subcuenca río Las Piedras.

Uso	Valor Demandado (L/s)	%
Doméstico	751	77
Agropecuario	150	15
Piscifactoría El Diviso (no retorna)	77	8
Demanda Total	978	100

Fuente: Recamán, 2006, pág.111.

6.2 MICROCUENCAS PRINCIPALES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS

Para profundizar un poco más sobre las características de cada una de las microcuencas estudiadas, se presenta en la Tabla 6.2 los valores correspondientes a sus áreas tanto para las microcuencas como para la Subcuenca. Seguidamente se tratará de abordar de manera breve las principales características de las microcuencas a estudiar.

Tabla 6.2. Clasificación y áreas de la Subcuenca y cada una de las microcuencas estudiadas.

CAUCE	AREA (Has)	CLASIFICACION
RIO LAS PIEDRAS	6626	SUBCUENCA
QUEBRADA ARRAYANALES	440.1	MICROCUENCA
QUEBRADA AGUAS CLARAS	387.2	MICROCUENCA
QUEBRADA EL VADO	262.3	MICROCUENCA
QUEBRADA SANTA TERESA	1540.93	MICROCUENCA

Fuente: POMCH (2006), pág.365 con modificaciones propias.

6.2.1 Microcuenca Santa Teresa

La Microcuenca Santa Teresa está ubicado en la vereda de Santa Teresa y la vereda San Juan, la vereda Santa Teresa posee una población de 141 habitantes, que equivale al 7% de la cuenca, de la cual el 43% es población indígena y el 57% es población campesina y la vereda San Juan tiene una población de 474 habitantes que equivale al 22% de la cuenca, de la cual el 77% es población indígena y el 23% es población campesina. Se encuentra entre los 2000 y 3000 m.s.n.m., cuenta con una temperatura promedio de 18.4°C, una precipitación de 172.9 mm, tiene una pequeña franja en el páramo y 4 canales abiertos para la finca del señor Ernesto Gonzáles, la finca de Carlos y Efraín collazos, para la vereda el Hatico y fincas aledañas de la vereda de San Juan las cuales hacen uso de esta para fines domésticos, pecuarios y agrícolas. En cuanto a vegetación se encuentran zonas de pastos naturales y bosque abierto, parte de estas se utilizan para el pastoreo y/o para el desarrollo de cultivos, también cuenta con bosque denso en el cual se encuentra árboles, arbustos y herbáceas, por lo que ofrece una alta cobertura del suelo y hasta el 80% de escorrentía, ayudando así a regular el ciclo hidrológico de grandes áreas.

La microcuenca Santa Teresa cuenca con una demanda hídrica de 0.21 m³/s, que son de uso doméstico y de uso pecuario, principalmente.

6.2.2 Microcuenca Aguas Claras

La Microcuenca Aguas Claras se ubica en la vereda de Quintana y es una de las quebradas más importante para la red de drenaje de la Subcuenca, cuenta con una temperatura promedio de 13.4 °C, y está ubicada entre 2500 y 2800 m.s.n.m., posee alrededor de 329 habitantes, los cuales equivalen al 16% de la cuenca, de manera que el 10% es población indígena y el 90% es población campesina, tiene explotación piscícola en el resguardo de Puracé y tiene 2 canales abiertos para fincas y ganaderías, sus principales demandas son de tipo doméstico, agrícola y pecuario. Tiene zonas con procesos de erosión severa; zonas de bosques denso y zonas de bosques abiertos. Éstas se encuentran dentro de los suelos que se deben proteger y conservar.

La microcuenca Aguas Claras tiene una demanda hídrica de 0.13 m³/s que son usados en uso

doméstico, pecuario y su mayoritariamente en la piscifactoría El Diviso, la cual no retorna 0.077 m³/s.

6.2.3 Microcuenca Arrayanales

La Microcuenca Arrayanales está ubicada en la vereda Quintana, cuenta con una temperatura promedio de 14°C, se encuentra entre 2500 y 2800 msnm, posee aproximadamente 329 habitantes, los cuales equivalen al 16% del total de la cuenca, de manera que el 10% de la población es indígena y el 90% es campesina, tiene tres canales abiertos que son usados para usos agrícola, pecuarios y cuenta con zonas de producción agropecuaria moderada, con ayuda de esta se realiza la adecuación del suelo para ser usado en cultivos.

La microcuenca arrayanales cuenca con una demanda hídrica de 0.06 m³/s mayormente en uso doméstico, agrícola y pecuario.

6.2.4 Microcuenca El Vado

La Microcuenca El Vado está ubicada en la vereda San Ignacio y cuenta con una población 234 habitantes, los cuales equivalen al 10% de total de población de la cuenca, de manera que el 61% es población indígena y el 39% es población campesina, tiene un suelo con fertilidad moderada, zonas con procesos medianos de erosión, de la misma forma cuenta con zonas de producción agropecuaria para cultivos y/o actividades pecuarias.

La microcuenca El Vado tiene una demanda hídrica de 0.04 m³/s para usos doméstico y agropecuario.

6.3 PROCEDIMIENTO

Se siguieron los pasos que a continuación se describen:

- a) Se analizaron los datos de caudales medios diarios de la Estación Puente Carretera suministrados por el IDEAM (Anexo A). Como había valores atípicos muy altos y bajos, se suprimieron los caudales de aguas altas y bajas, con base en:

Ecuación 6.1:

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_1}{2} \quad (6.1)$$

Ecuación 6.2:

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_1}{2} \quad (6.2)$$

Luego, se construyeron las CDC medios diarios. Para esto, se analizaron todas las combinaciones posibles: CDC sin suprimir caudales; CDC suprimiendo caudales extremos; CDC suprimiendo solo los caudales altos; CDC suprimiendo solo los caudales bajos. Luego se seleccionó aquella CDC que mejor correspondiera al caudal ambiental teniendo en cuenta la demanda hídrica y el caudal ecológico.

Para todas las combinaciones anteriormente expuestas:

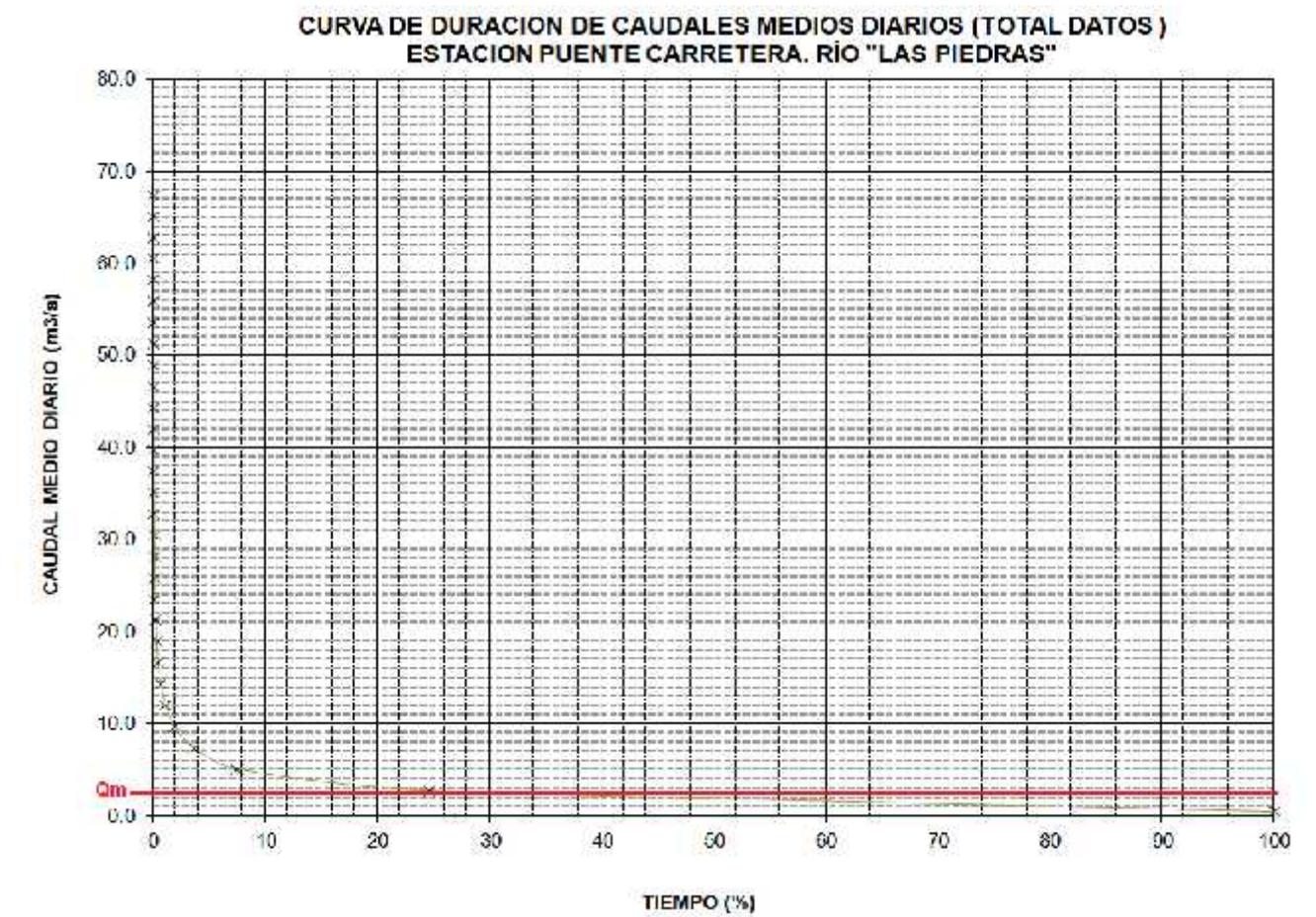
- b) Se determinó el IRH, para lo cual se tuvieron en cuenta las áreas bajo la curva total y bajo el caudal medio histórico.
- c) El caudal ambiental se encontró según el IRH fuese menor, mayor o igual a 0.7. Con este resultado en la misma CDC se estimó el caudal ambiental para la Subcuenca del río Las Piedras.
- d) Para determinar el caudal ambiental de cada microcuenca de la Subcuenca del río Las Piedras, se repitió el procedimiento descrito, pero haciendo para cada una la trasposición de caudales.

7. RESULTADOS, ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES

7.1 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS

Con la información de caudales medios diarios del río Las Piedras, Estación Puente Carretera se obtuvieron las CDC de las Figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4.

Figura 7.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).



Para el trazado de la CDC medios diarios se tuvo en cuenta la totalidad de datos (16864), los cuales fueron facilitados por el IDEAM, Anexo A.

En la Figura 7.1 se observa el caudal promedio ($Q_m = 2.43 \text{ m}^3/\text{s}$). A partir de esta gráfica se obtuvo el área total bajo la CDC, la cual fue de: $V_t = 248 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, que correspondió a: $V_p = 175 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3 se encontró un $IRH = 0.71$, según clasificación de la Figura 5.3 para distintos valores de IRH. Este valor mayor a 0.7 es

característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y para este valor obtenido se considera representativo el valor de Q_{85} y posteriormente se pudo establecer como caudal ambiental: $Q_{85} = 0.95 \text{ m}^3/\text{s}$.

En esta CDC se puede apreciar que aproximadamente solo el 8% de los datos representan mediciones mayores a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que puede sesgar en grandes proporciones el resultado del IRH a obtener. Para evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales altos. Para ello, se aplicó la Ecuación 6.1, para valores de $Q_{\text{mayor}} = 69.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{\text{prom}} = 2.43 \text{ m}^3/\text{s}$. Así, se obtuvo el caudal de aguas altas: $Q_{\text{altos}} = 36.12 \text{ m}^3/\text{s}$. De esta manera, se descartaron los valores mayores a $36.12 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figura 7.2 presenta la situación anterior.

Figura 7.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).

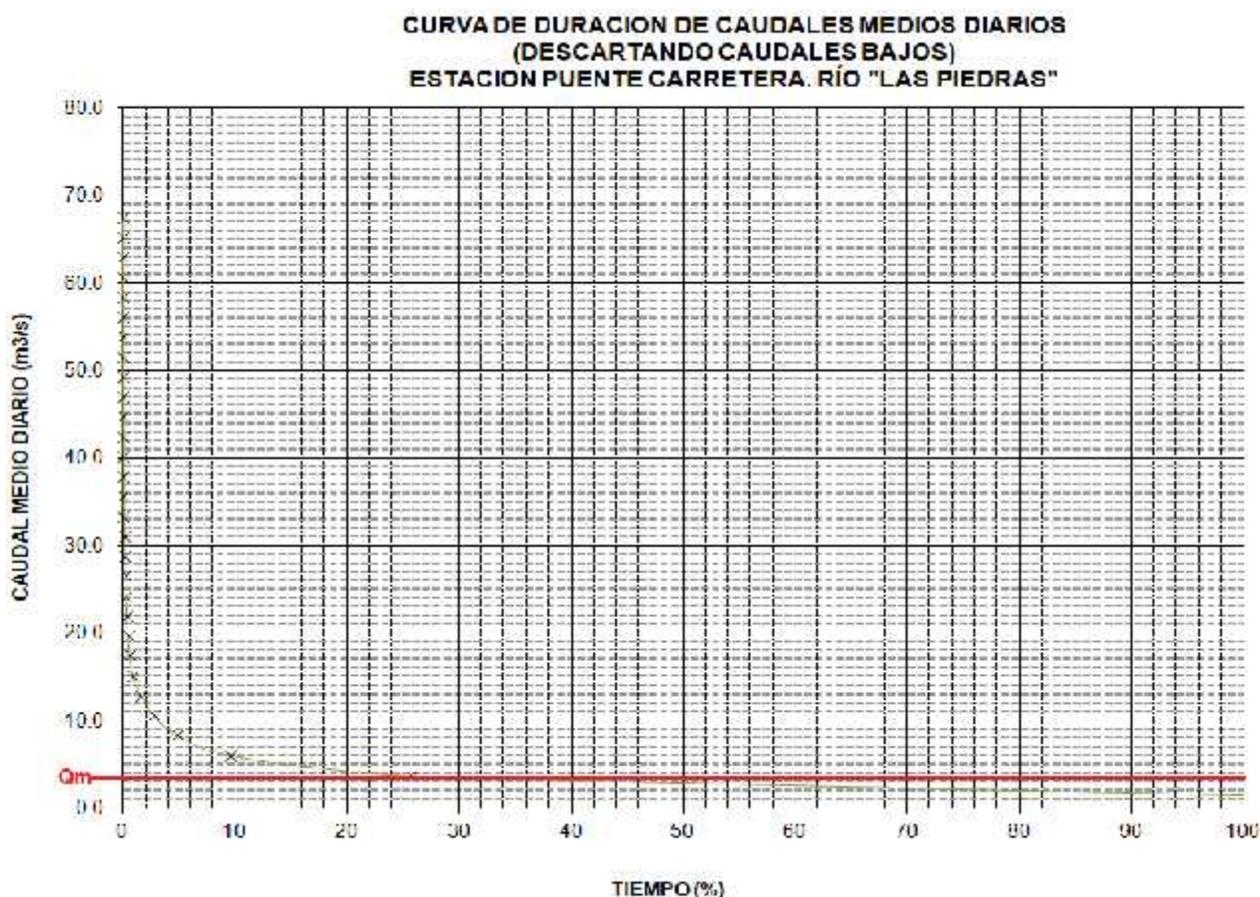


En la CDC de la Figura 7.2 se suprimieron los primeros seis datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $36.12 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.2 se observa el caudal medio ($Q_m = 2.41 \text{ m}^3/\text{s}$). A partir de esta grafica se obtuvo el área total bajo la CDC, la cual fue $V_t = 230 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, que correspondió a: $V_p = 164 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3 se encontró un $\text{IRH} = 0.71$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH , éste es mayor a 0.7, el cual es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y para este valor obtenido se considera representativo el valor de Q_{85} y posteriormente se pudo establecer como caudal ambiental: $Q_{85} = 0.95 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido a que también existe la posibilidad de sesgo en cuanto a valores de caudales bajos, para la CDC de la Figura 7.1, de manera análoga buscando evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales bajos, se aplicó la Ecuación 6.2, para valores de $Q_{\text{menor}} = 0.515 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{\text{prom}} = 2.43 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniéndose $Q_{\text{bajos}} = 1.47 \text{ m}^3/\text{s}$. Así pues, se descartarán los valores menores a $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figura 7.3 presenta la CDC descartando los valores correspondientes a caudales bajos.

Figura 7.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).

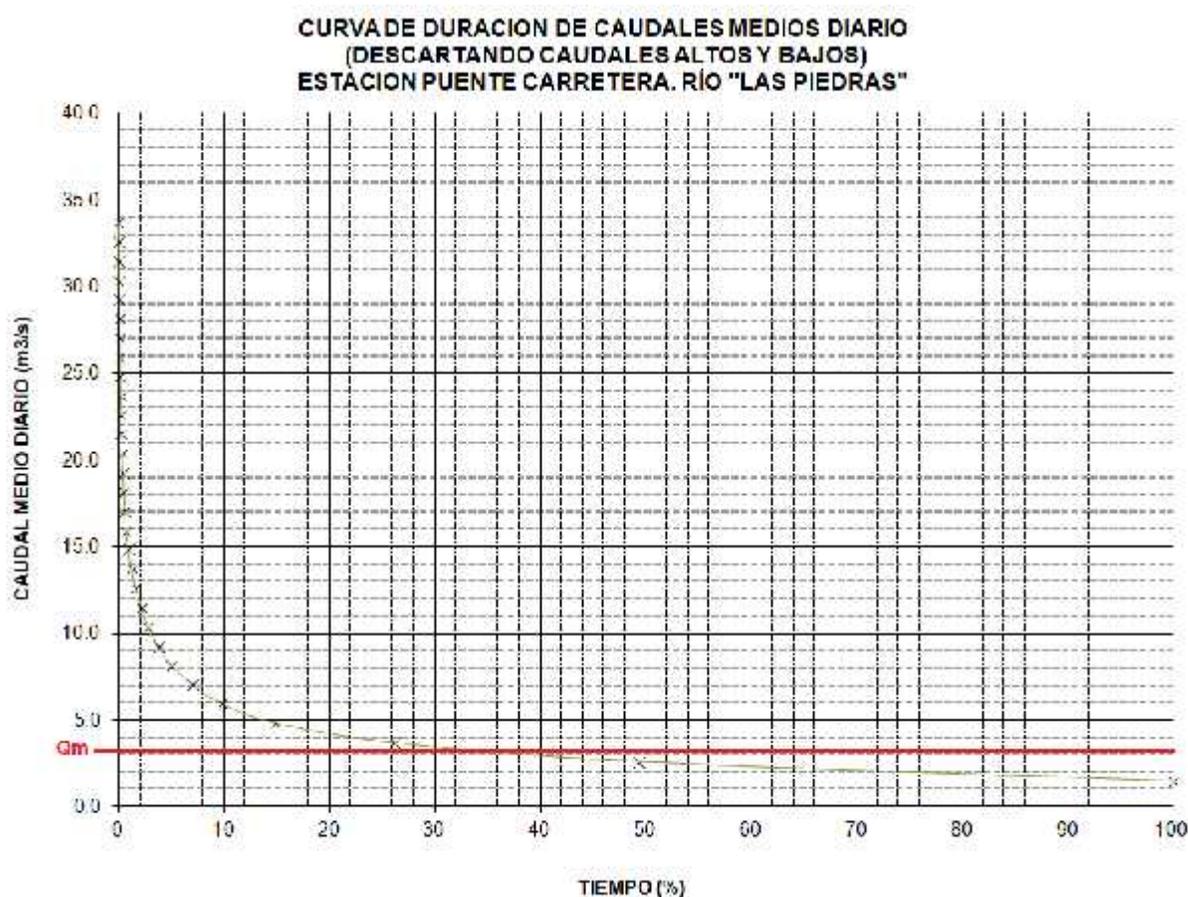


En la CDC de la Figura 7.3 se suprimieron los últimos 7190 datos, los cuales cumplían con la condición de ser menores a $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.3 se observa el caudal promedio ($Q_m = 3.42 \text{ m}^3/\text{s}$), a partir de estas curvas también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue $V_t = 356 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, la cual fue $V_p = 270 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3 se obtiene un $\text{IRH} = 0.76$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH , éste es mayor a 0.7, el cual es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y para este valor obtenido se considera representativo el valor de Q_{85} y posteriormente se pudo establecer como caudal ambiental $Q_{85} = 2.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

A pesar de los datos descartados para la Figura 7.2 y Figura 7.3, se analizó una CDC adicional en la cual se descartaron simultáneamente los caudales de aguas altas y bajas (Figura 7.4).

Figura 7.4. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).



En la CDC de la Figura 7.4 se suprimieron los primeros seis datos y los últimos 7190, quedando como límite superior: $Q = 36.12 \text{ m}^3/\text{s}$ y como límite inferior: $Q = 1.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.4 se observa el caudal medio ($Q = 3.39 \text{ m}^3/\text{s}$). A partir de esta gráfica se obtuvo el área total bajo la CDC, De esta manera, se encontró que el área bajo la curva total fue de:

$V = 341 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio: $V = 264 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se obtuvo un $\text{IRH} = 0.77$. Teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH , éste es mayor a 0.7, el cual es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y para este valor obtenido se considera representativo el valor de $Q_{85} = 1.95 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

Realizadas las anteriores CDC se concluyó que la CDC (resultante de suprimir simultáneamente los valores de Q y Q , Figura 7.4) proporciona un $Q_{85} = 1.95 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se asume representativo con respecto a los demás valores de caudal ambiental estimados, debido a que es un valor de caudal que asegura las demandas de la cuenca y deja un caudal remanente importante en el cauce para el caudal ecológico.

7.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA LAS MICROCUENCAS ESTUDIADAS

Para el desarrollo de cada una de las microcuencas analizadas se llevó a cabo el mismo procedimiento realizado para la Subcuenca del río Las Piedras, de modo que se optó por tomar como representativa la CDC que resulta de suprimir simultáneamente los valores de Q y Q , de la misma manera se seleccionó como caudal ambiental el correspondiente Q_{85} .

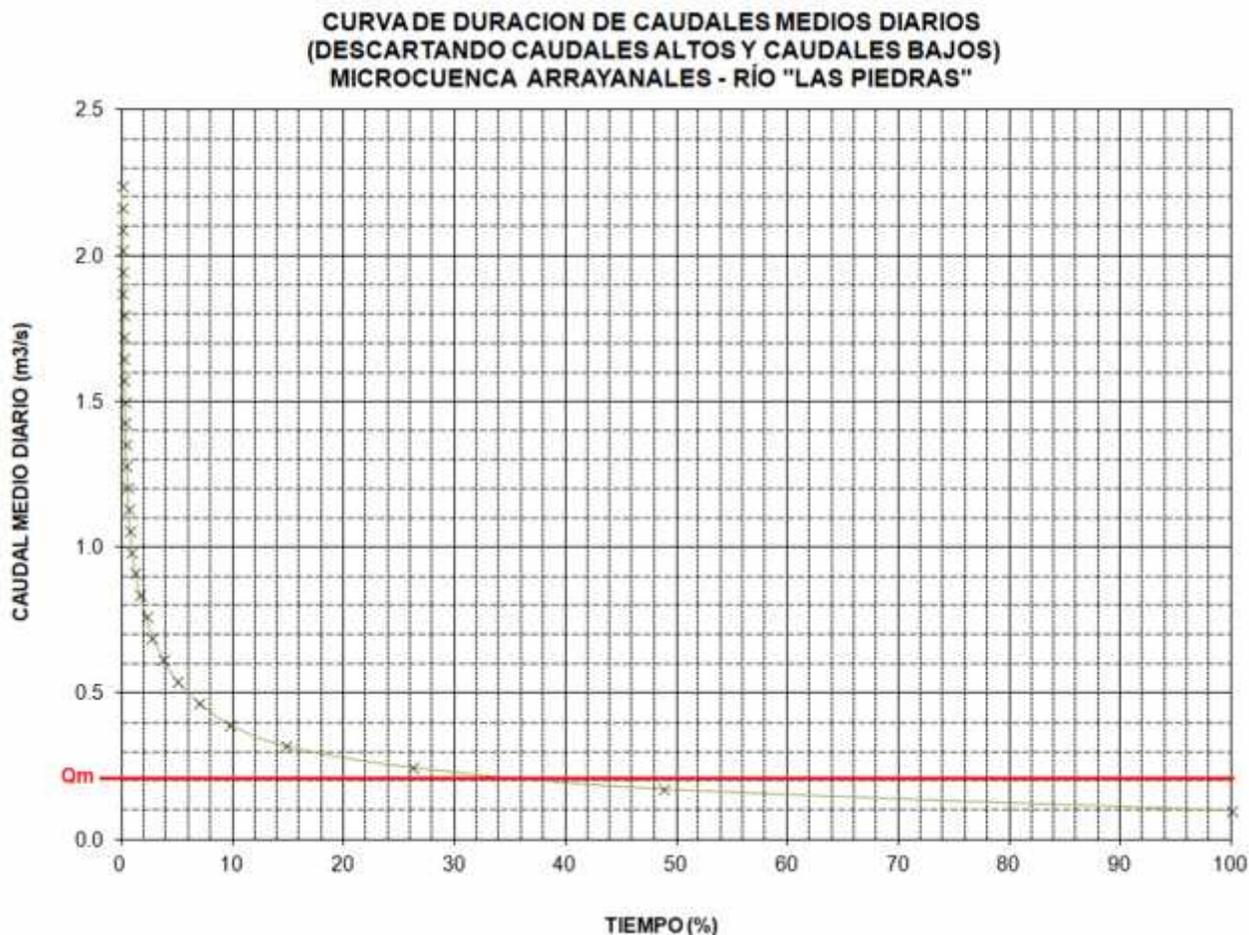
7.2.1 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Arrayanales – Río las Piedras

Con la información de caudales medios diarios del río Las Piedras y después de realizar la correspondiente transposición de caudales para la microcuenca Arrayanales (Anexo D) con ayuda de la Ecuación 5.2, se obtuvieron las CDC de la microcuenca. La CDC adoptada se presenta en la Figura 7.5, las demás CDC se presentan en el Anexo H.

Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros seis datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $2.398 \text{ m}^3/\text{s}$ y los últimos 7187 datos menores a $0.097 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.5 se presenta el trazado del valor del caudal medio, el cual fue $Q = 0.22 \text{ m}^3/\text{s}$, también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue $V = 22.24 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, la cual fue $V = 17 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se obtuvo un $\text{IRH} = 0.76$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH . Este valor es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y a partir del cual se obtuvo: $Q_{85} = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

Figura 7.5. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).



7.2.2 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Aguas Claras – Río las Piedras

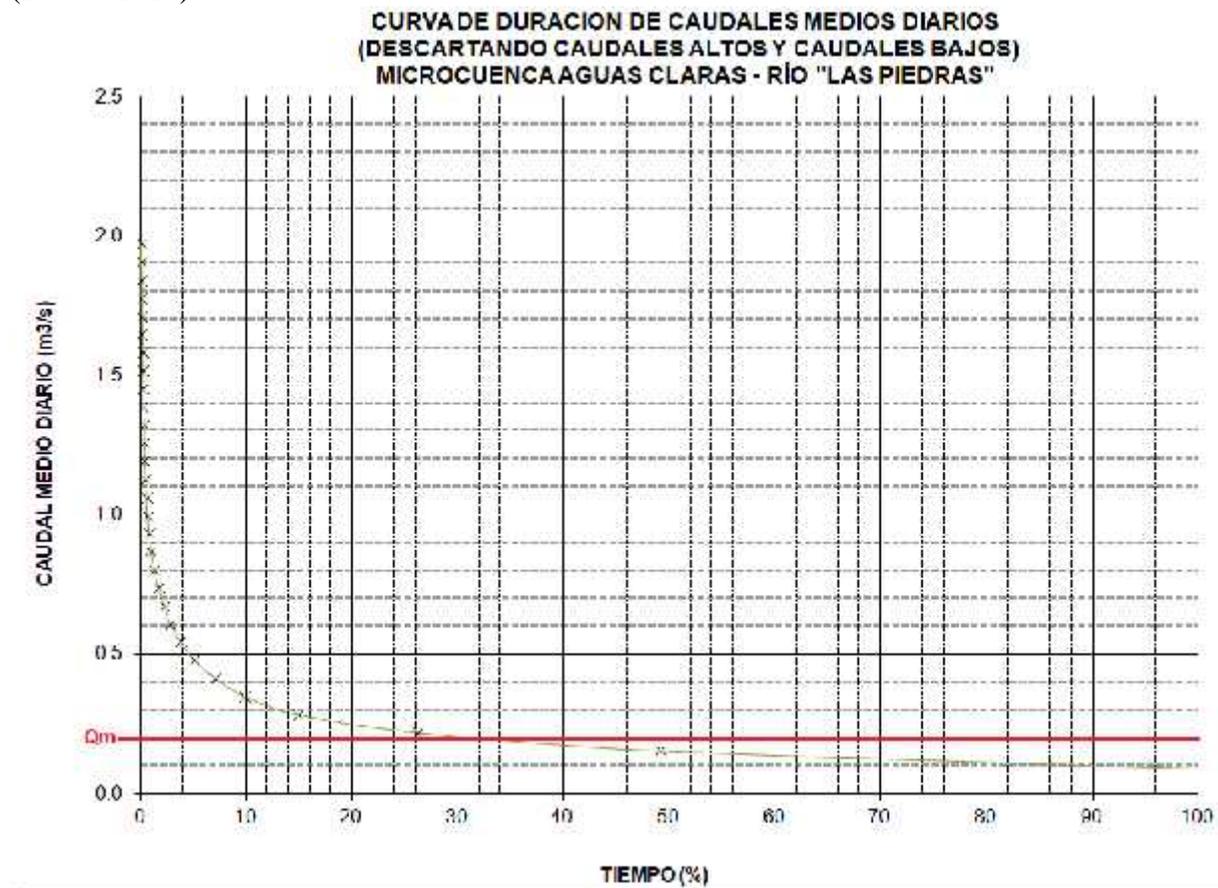
Con la información de caudales medios diarios del río Las Piedras y después de realizar la correspondiente transposición de caudales para la microcuenca Aguas Claras (Anexo E) con ayuda de la Ecuación 5.2, se obtuvieron las CDC de la microcuenca. La CDC adoptada se presenta en la Figura 7.6, las demás CDC se presentan en el Anexo I.

Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros seis datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $2.11 \text{ m}^3/\text{s}$ y los últimos 7154 datos menores a $0.086 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.6 se presenta el trazado del valor del caudal medio, el cual fue $Q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$, también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue $V = 19.7 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal

medio, la cual fue $V = 15.4 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se obtuvo un $\text{IRH} = 0.78$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH. Este valor es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y a partir del cual se obtuvo: $Q_{85} = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

Figura 7.6. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).



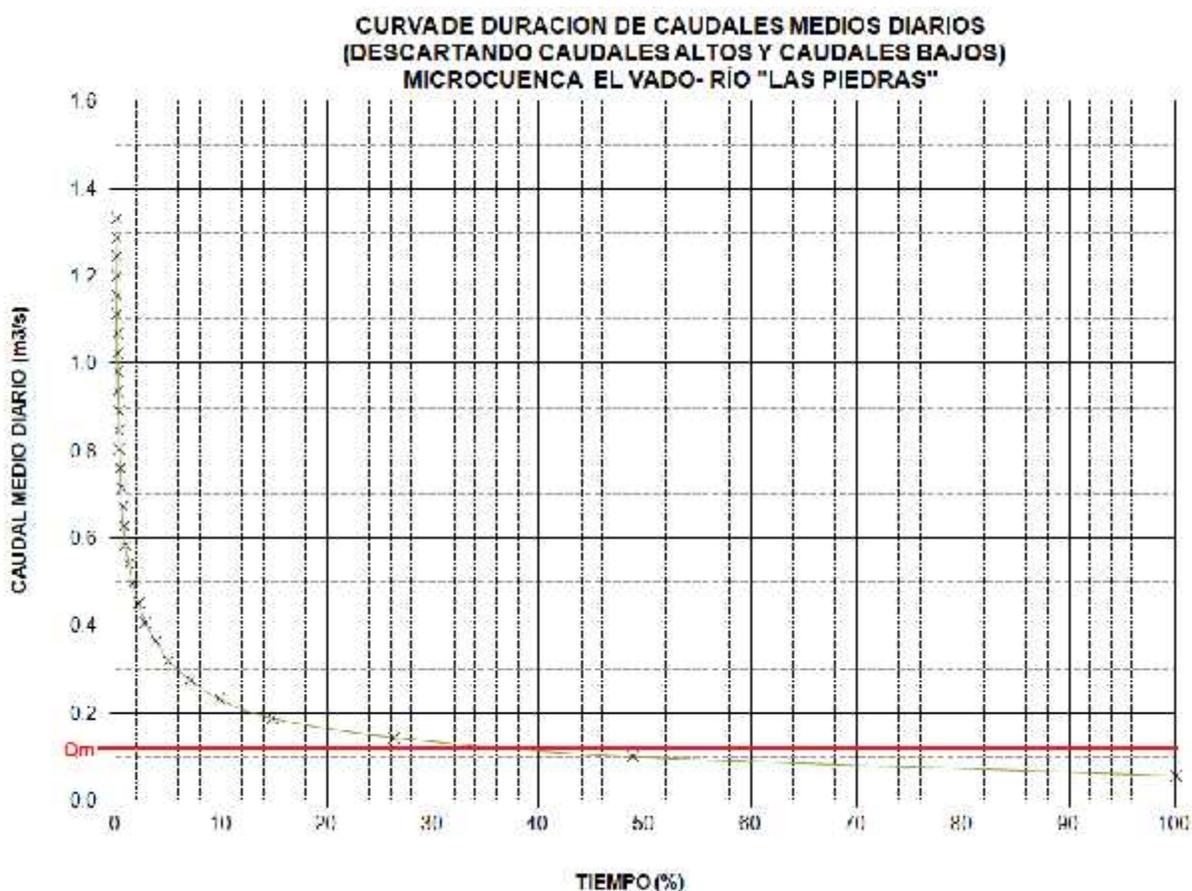
7.2.3 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca El Vado – Río las Piedras

Con la información de caudales medios diarios del río Las Piedras y después de realizar la correspondiente transposición de caudales para la microcuenca El Vado (Anexo F) con ayuda de la Ecuación 5.2, se obtuvieron las CDC de la microcuenca. La CDC adoptada se presenta en la Figura 7.7, las demás CDC se presentan en el Anexo J.

En esta CDC se suprimieron los primeros seis datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $1.43 \text{ m}^3/\text{s}$ y los últimos 7097 datos menores a $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.7 se presenta el trazado del valor del caudal medio, el cual fue $Q = 0.13 \text{ m}^3/\text{s}$, también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue $V = 12.66 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, la cual fue $V = 9.99 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se obtuvo un $\text{IRH} = 0.78$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH . Este valor es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y a partir del cual se obtuvo: $Q_{85} = 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

Figura 7.7. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y bajos (1969 – 2015).



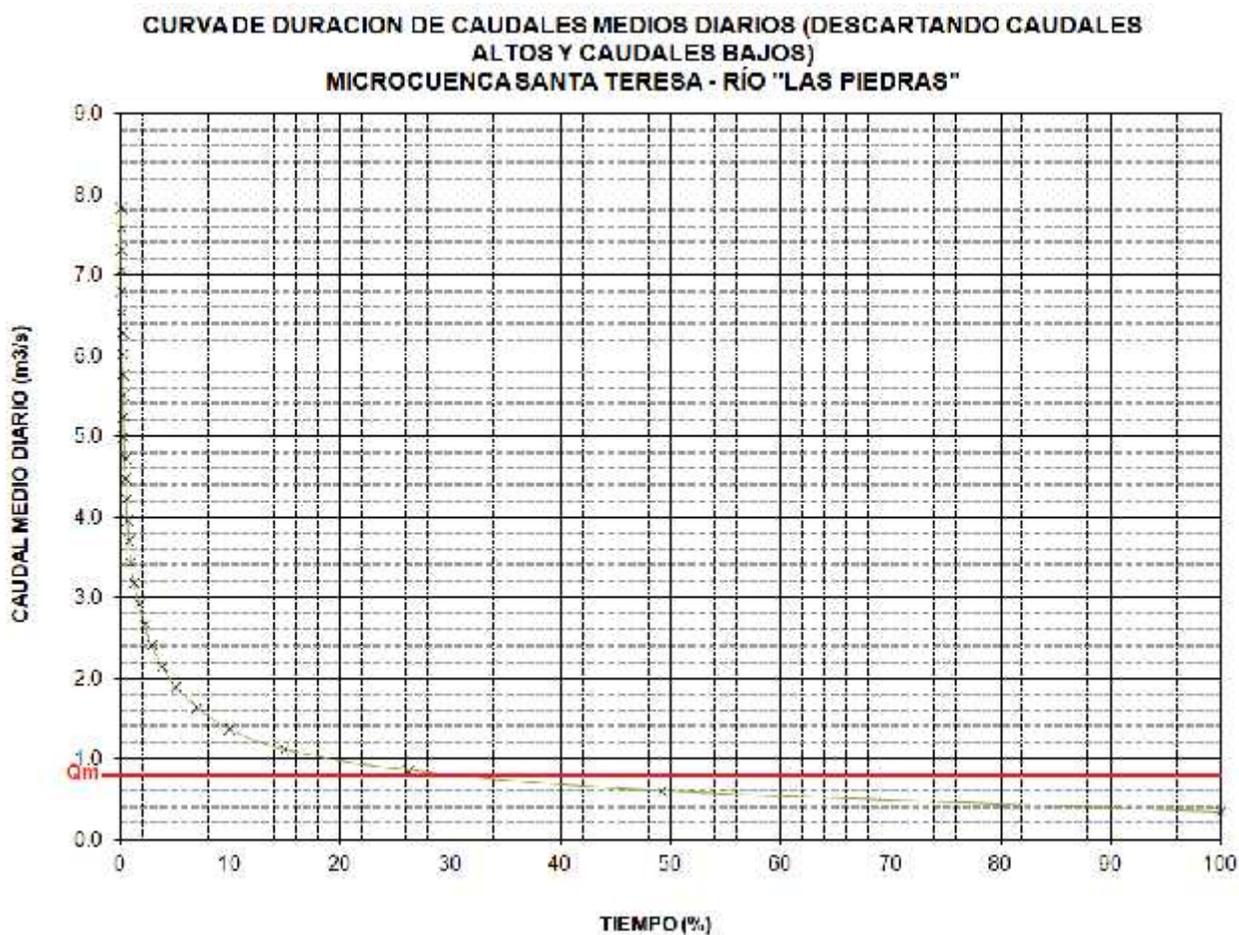
7.2.4 Determinación del Caudal Ambiental para la microcuenca Santa Teresa – Río las Piedras

Con la información de caudales medios diarios del río Las Piedras y después de realizar la correspondiente transposición de caudales para la microcuenca Santa Teresa (Anexo G) con ayuda de la Ecuación 5.2, se obtuvieron las CDC de la microcuenca. La CDC adoptada se presenta en la Figura 7.8, las demás CDC se presentan en el Anexo K.

Para la CDC se suprimieron los primeros seis datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y los últimos 7178 datos menores a $0.342 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Figura 7.8 se presenta el trazado del valor del caudal medio, el cual fue $Q = 0.79 \text{ m}^3/\text{s}$, también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue $V = 39 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio, la cual fue $V = 30.3 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se obtuvo un $\text{IRH} = 0.77$, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH . Este valor es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y a partir del cual se obtuvo: $Q_{85} = 0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

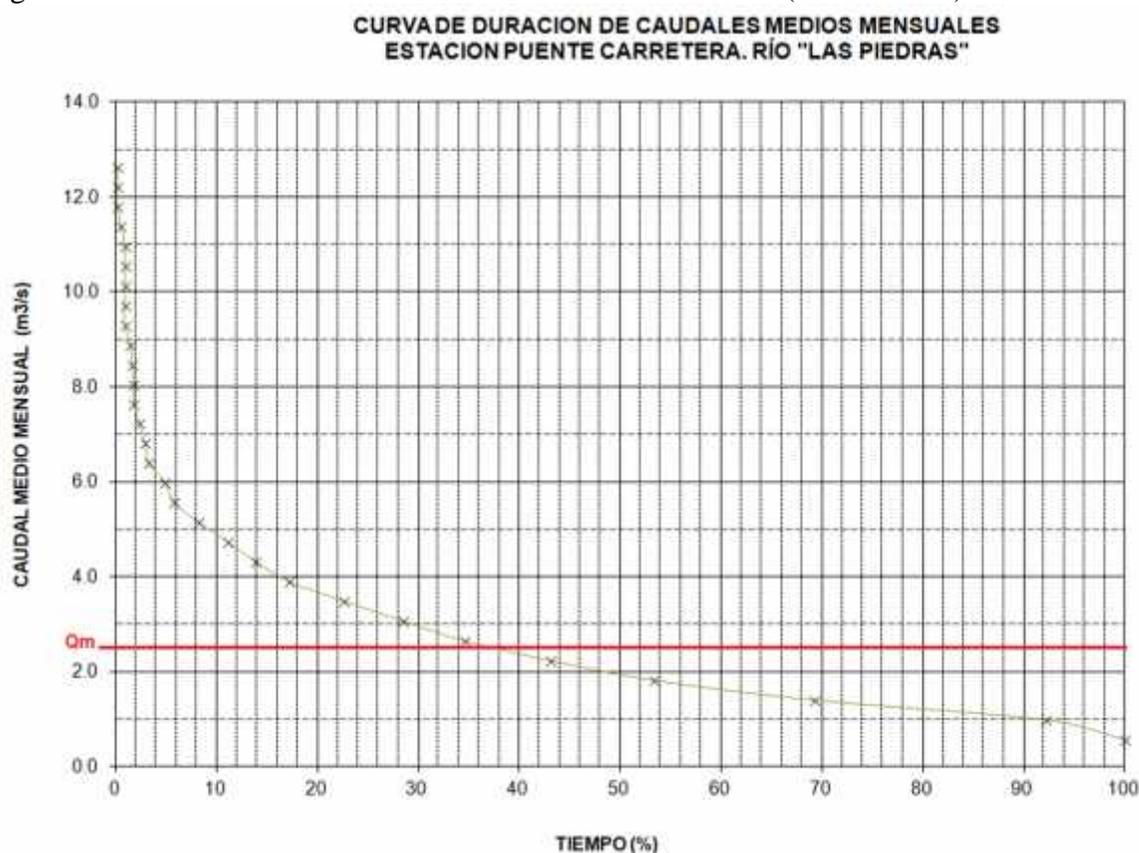
Figura 7.8. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos y caudales (1969 – 2015).



7.3 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL PARA CONDICIONES CRÍTICAS

Considerando condiciones extremas de bajos caudales, se recreó un escenario en el que se presentaran condiciones extremas, tales que, en lugar de los valores de caudales medios mensuales, se asuman valores de caudales mínimos mensuales. A continuación, se presentan las dos CDC correspondientes a los caudales medios mensuales y mínimos mensuales Figura 7.9 y Figura 7.10.

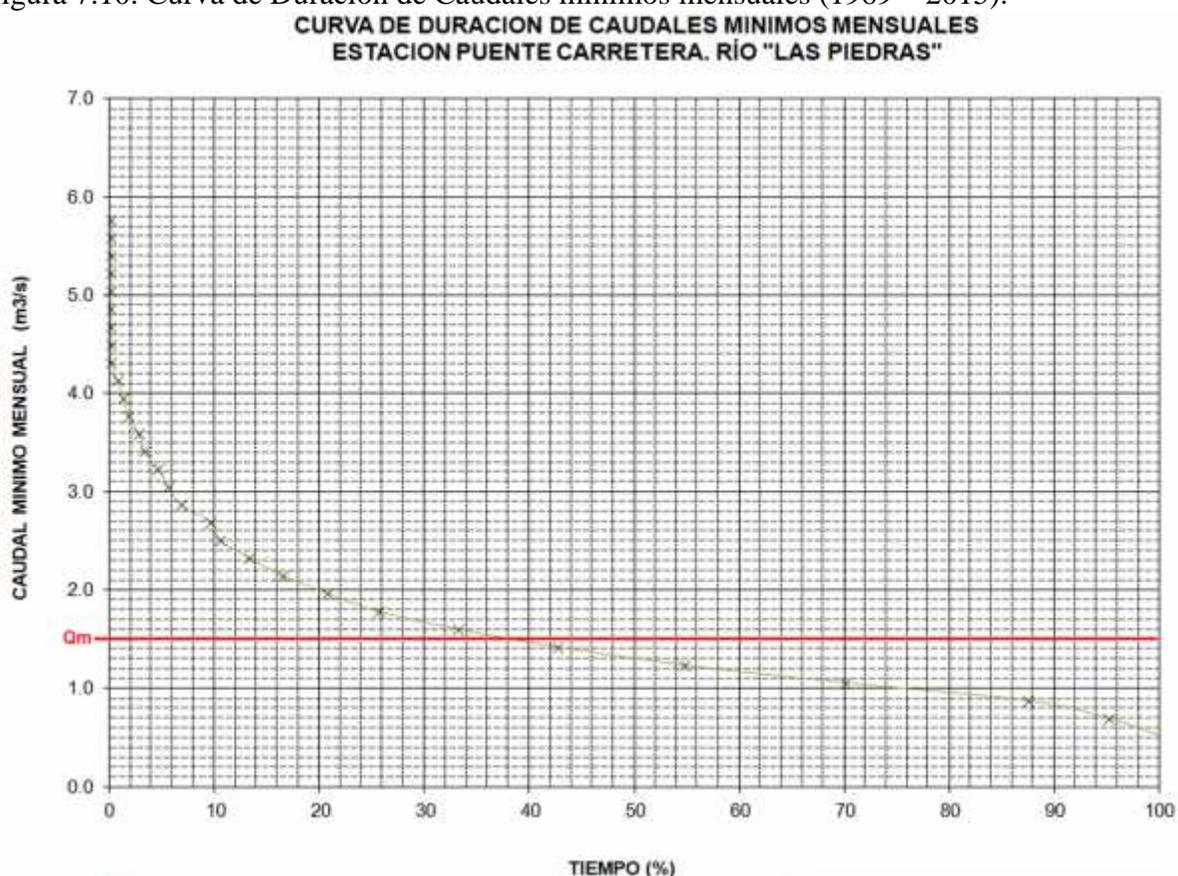
Figura 7.9. Curva de Duración de Caudales medios mensuales (1969 – 2015).



Para el trazado de la CDC medios mensuales, Figura 7.9, se tuvo en cuenta la totalidad de datos (547), los cuales fueron facilitados por el IDEAM, Anexo B.

En la Figura 7.9 se presenta el trazado del valor del caudal medio, el cual fue: $Q = 2.54 \text{ m}^3/\text{s}$, también se muestra el área total bajo la CDC, la cual fue: $V = 252 \text{ m}^2$ y el área bajo el caudal medio: $V = 188 \text{ m}^2$. Luego al aplicar la Ecuación 5.3, se encontró un $\text{IRH} = 0.74$. Al tener en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH , el citado valor corresponde a cuencas con alta retención y regulación de humedad. Así, se determinó como representativo del caudal ambiental, el valor de $Q_{85} = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 7.10. Curva de Duración de Caudales mínimos mensuales (1969 – 2015).



Para el trazado de la CDC mínimos mensuales, Figura 7.10, se tuvo en cuenta la totalidad de datos (539), estos fueron facilitados por el IDEAM, Anexo C.

En la Figura 7.10 se presenta el trazado del valor del caudal medio ($Q = 1.52 \text{ m}^3/\text{s}$); también se muestra el área total bajo la CDC ($V = 148 \text{ m}^2$) y el área bajo el caudal medio ($V = 123 \text{ m}^2$). Luego al aplicar la Ecuación 5.3 se obtiene un IRH = 0.83, teniendo en cuenta la clasificación descrita en la Figura 5.3 para distintos valores de IRH, éste es mayor a 0.7, el cual es característico de cuencas con alta retención y regulación de humedad y para este valor obtenido se considera representativo el valor de $Q_{85} = 0.91 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudal ambiental.

7.4 CAUDAL ECOLOGICO

El caudal ambiental se compone del caudal utilizado para los diferentes usos racionales que se derivan del cauce principal y del caudal ecológico para preservar la biota del sistema. Por lo anterior, el caudal ecológico derivado de la relación citada corresponde a lo expresado en la Ecuación 7.1:

$$Q_{e \text{ ó } g} = Q_a - Q_{di} \quad (7.1)$$

Donde:

$$Q_{e \text{ ó } g} = 1.95 \frac{m^3}{s} - 0.978 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{e \text{ ó } g} = 0.972 \frac{m^3}{s}$$

Por lo tanto $0.972 \text{ m}^3/\text{s}$, es la cantidad hídrica necesaria para mantener el ecosistema y el hábitat en buenas condiciones, ya que se tuvo en cuenta la demanda que se tiene en la Subcuenca del río Las Piedras con respecto a las diferentes actividades que se realizan en ésta.

7.5 RESUMEN DE RESULTADOS

Para la respectiva estimación de los caudales ambientales en el caso de la serie de caudales medios diarios para la Subcuenca y microcuencas estudiadas, se optó por trabajar con el método de la Curva de Permanencia, el cual hace parte de los métodos de tipo hidrológico. En este método se enuncia que, para cuencas con una alta autorregulación y pequeñas variaciones en sus series de caudales diarios, se considera representativo el valor característico Q_{85} de la Curva de Duración de Caudales (Suárez, 2014).

Al inferir que tanto la Subcuenca del río Las Piedras como las respectivas microcuencas analizadas cumplen con el anterior criterio al tener un IRH mayor a 0.70. Razón por la cual, se define el caudal ambiental como el valor correspondiente al 85% de la Curva de Duración de Caudales (Q_{85}), lo cual se evidencia en la Tabla 7.1

Tabla 7.1 Resumen de resultados del caudal ambiental para la Subcuenca del río Las Piedras y sus principales microcuencas.

Descripción	Qm	IRH		Criterio	Q85
		Valor	Categoría		
Sub cuenca (total datos)	2.43	0.706	Moderada	> 0.7 => Q85	0.95
Subc-cuenca (sin Q altos)	2.41	0.713	Moderada	> 0.7 => Q85	0.95
Sub- cuenca (sin Q bajos)	3.42	0.758	Alta	> 0.7 => Q85	2
Sub-cuenca (sin Q extremos)	3.39	0.774	Alta	> 0.7 => Q85	1.95
Sub- cuenca (min mensuales)	1.52	0.83	Alta	> 0.7 => Q85	0.91
Sub-cuenca (medios mensuales)	2.54	0.74	Moderada	> 0.7 => Q85	1.18
Microcuenca Sanata Teresa	0.79	0.777	Alta	> 0.7 => Q85	0.41
Microcuenca Aguas Claras	0.2	0.782	Alta	> 0.7 => Q85	0.11
Microcuenca Arrayanales	0.22	0.764	Alta	> 0.7 => Q85	0.12
Microcuenca El Vado	0.13	0.782	Alta	> 0.7 => Q85	0.07

Se trabaja con los datos de la CDC sin los caudales de aguas altas y bajas debido a que los mayores son excepcionales y muy pocos, mientras que al suprimir los más bajos se da un mayor factor de seguridad para el caudal ambiental. Un criterio general de hacer ese ajuste fue que el caudal ambiental resultante para los escenarios que consideraban todos los caudales y sin los de aguas altas, no cumplen con la consigna de satisfacer la demanda ($0.978 \text{ m}^3/\text{s}$) y tener un caudal excedente para el ecosistema. Esto anterior, bajo las condiciones actuales de ordenamiento de la Subcuenca. Si el ordenamiento fuese diferente y diera una demanda menor, entonces estos caudales ambientales descartados, podrían cumplir. Por lo anterior, se recomienda bajo un nuevo ordenamiento, volver a determinar tanto la demanda como los caudales ambientales bajo diferentes escenarios.

De acuerdo con los IRH obtenidos, la Subcuenca y microcuencas estudiadas presentan un índice de regulación hídrica alto, por lo tanto, se puede evidenciar un comportamiento excelente de regulación de humedad que se ve reflejado en la eficiencia y capacidad para suplir las demandas. También, se pudo establecer que se contará con el recurso hídrico durante la mayor parte del año, con especial atención en los meses de menor aporte de lluvias (Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre), esto teniendo en cuenta los caudales medios mensuales multianuales (Anexo B).

Se realizó la CDC para la serie de datos de caudales medios mensuales (Anexo B) y los caudales mínimos mensuales (Anexo C) de la Subcuenca río Las Piedras, de modo que se pudiera comparar el IRH junto con el Q_{85} obtenidos y posteriormente evaluar si se encontraban diferencias significativas entre las dos CDC. Lo anterior mostró que, con respecto a la CDC para la serie de caudales medios mensuales el valor del IRH fue 0.74 y para la serie de caudales mínimos mensuales el valor del IRH fue 0.83, luego se supone que la condición más crítica probable a presentarse en la cuenca sería, que en lugar de los caudales medios se presentaran los caudales mínimos. Para este caso la CDC mínimos mensuales no muestra diferencias apreciables con respecto al IRH, pues éste dio en ambos casos un valor cercano y alto ($\text{IRH} > 0.7$), lo que significa que la cuenca tiene una buena capacidad reguladora. Con respecto al Q_{85} se puede inferir que este caudal fue de $0.91 \text{ m}^3/\text{s}$ para la CDC mínimos mensuales, encontrándose por debajo de la demanda hídrica de la cuenca ($0.978 \text{ m}^3/\text{s}$), de manera que la cuenca en esta situación tendría un déficit ligero en la demanda y no habría excedente para el caudal ecológico. En lo referente a la CDC medios mensuales se realizó para poder corroborar que básicamente los valores obtenidos comparados con los encontrados en la CDC sin los caudales extremos (Caudales de aguas altas y bajas), no presentan grandes discrepancias en cuanto a IRH, pues en ambos casos se conserva mayor a 0.7, por lo que el caudal ambiental se estimó como el Q_{85} dando como resultado $1.18 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que significa que se sigue supliendo la demanda hídrica de la cuenca. Finalmente, se recomienda trabajar siempre con los caudales medios diarios cuando se pretenda determinar el caudal ambiental.

El caudal ecológico para la Subcuenca del río Palacé fue estimado igual a $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$, mediante el software IFIM (Gallardo y González, 2001). Siguiendo esta misma metodología, se recomienda realizar un estudio para la determinación del caudal ecológico del río Las Piedras, el cual se puede comparar con el estimado en el este estudio ($0.972 \text{ m}^3/\text{s}$).

Al desglosar el término de Caudal Ambiental (Q_A), se establece que este es igual a la suma del caudal ecológico más el caudal destinado para la demanda hídrica racional de la cuenca. Así, el caudal ecológico calculado a partir del Q_A determinado con base en el IRH fue de $0.972 \text{ m}^3/\text{s}$.

De las microcuencas estudiadas se evidenció que en la microcuenca Santa Teresa la demanda hídrica es inferior ($0.21 \text{ m}^3/\text{s}$) al Q_A hallado ($0.41 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo tanto, se infiere que no hay déficit en la demanda y que cuenta con un caudal ecológico que mantiene el ecosistema en buenas condiciones. Para el resto de las microcuencas se presenta un caudal ecológico mucho más pequeño debido a que sus demandas hídricas son más cercanas al caudal ambiental (Tabla 7.2), como lo es la microcuenca Arrayanales en donde la demanda hídrica es de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ y el $Q_{85} = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ y en la microcuenca El Vado donde la demanda es de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ y el $Q_{85} = 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual indica que el hábitat se mantiene mientras se siga conservando la demanda actual; pero que en condiciones críticas se presentaría un déficit en la demanda y se tendría que tomar medidas para conservar el ecosistema. Por último, está la microcuenca Aguas Claras donde la demanda hídrica total es $0.086 \text{ m}^3/\text{s}$ y el $Q_{85} = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$, dejando para caudal ecológico $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 7.2. Resumen de las demandas hídricas de la Subcuenca del río Las Piedras y sus principales microcuencas.

Descripción	Área (Ha)	Demanda Doméstica (m^3/s)	Demanda Industrial (m^3/s)	Demanda Agropecuaria (m^3/s)	Demanda total (m^3/s)	Caudal Ecológico (m^3/s)
Subcuenca río Las Piedras	6626.0	0.751	0.077	0.150	0.978	0.972
Microcuenca Santa Teresa	1540.93	0.175	-	0.035	0.21	0.200
Microcuenca Aguas Claras	387.2	-	0.077	0.009	0.086	0.024
Microcuenca Arrayanales	440.1	0.050	-	0.010	0.06	0.060
Microcuenca El Vado	262.3	0.030	-	0.006	0.04	0.300

Para la elaboración de la Tabla 7.2, se tuvieron en cuenta las relaciones de áreas entre el total de la Subcuenca del río las Piedras y cada una de las microcuencas. Además, el caudal ecológico se determinó como la diferencia entre el caudal ambiental y la demanda total de cada microcuenca. También, para la demanda agropecuaria se tomó como base la demanda total agropecuaria para la Subcuenca del río las Piedras y la relación de áreas antes mencionada.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conforme a los objetivos y resultados obtenidos en este trabajo, se concluye y recomienda tanto para la Subcuenca del río las Piedras como para las microcuencas estudiadas que:

La curva de duración de caudales nos permite conocer las condiciones de regulación de la cuenca e interpretar el comportamiento del régimen hidrológico, debido a que se tiene en cuenta los datos históricos de los caudales diarios.

La pendiente de la curva de duración de caudales obtenida con los caudales históricos de la cuenca aporta información sobre la capacidad de regulación, en este caso indica que el inicio de la curva al ser tan pronunciada es debido a que durante un lapso de tiempo corto se presentaron caudales altos.

-) Para abordar la falta de información hidrológica en las microcuencas, se aplicó el método de transposición de caudales para poder determinar las CDC, el IRH y el caudal ambiental.
-) Conforme con los objetivos de este trabajo se logró determinar el caudal ambiental para la Subcuenca del río Las Piedras en la estación Puente Carretera y para las principales microcuencas, conociendo así el comportamiento de las mismas.
-) Se reconoce la importancia de determinar el caudal ambiental, puesto que este está estrechamente relacionado con los diversos procesos y ciclos ambientales, adicionalmente a esto se sabe que estos regímenes de caudales ayudan a la conservación y preservación de los ecosistemas existentes en la cuenca.
-) Se recomienda realizar un estudio más detallado a partir de la incorporación de la variabilidad climática y su tendencia creciente, representada especialmente por el fenómeno de El Niño, estableciéndose como escenario más crítico en periodos futuros.
-) Inicialmente se estimaban caudales ecológicos, contemplando únicamente la biota y los ecosistemas que existieran a lo largo del cauce, posteriormente se designó el término caudal ambiental para tener en cuenta no solo el bienestar de la biota y los ecosistemas del cauce, sino también, para considerar las demandas o usos adicionales que se pudieran presentar en el cauce analizado.

-) Teniendo en cuenta el concepto de caudal ambiental, es necesario plantear una relación idónea entre la cantidad y calidad del recurso hídrico, para ello resulta indispensable que se realice un estudio adecuado de especificidad de las comunidades bióticas analizadas, con el fin de asignar valores de caudal ambiental que puedan asegurar la preservación de las especies propias del ecosistema de cada microcuenca o Subcuenca estudiada.
-) Se sugiere realizar una investigación más a fondo o analizar si se debe cambiar o establecer parámetros adicionales para la determinación del caudal ambiental. Un ejemplo posible sería determinar para cuencas con alta regulación y retención hídrica, como valor de caudal ambiental el valor de Q_{50} , así pues, se trabajaría siempre con un rango seguro donde se conservaría un mayor volumen circundante de agua sobre el cauce y se podría garantizar las respectivas demandas de la cuenca.
-) El caudal ambiental en función de IRH fue propuesto así por el IDEAM con el ánimo de tener en cuenta los usos de la cuenca, las demandas de la misma y los bienes y servicios que de ella se producen.

9. BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO. 2008. Cuenca Las Piedras, Acueducto y Alcantarillado S.A., E.S.P. Recuperado de: <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>.

AGUALIMPIA, Y., CASTRO, C. 2006. Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. Revista Tecno gestión Vol. 3 (1) Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

BAIN, M. B.; FINN, J. T. and BOOKE, H. E. 1988. Streamflow regulation and fish community structure, Ecology, 69 (2), pp 382 - 392.

CABRAL SOTO y CORRADINE MOYANO. 2014. Estimación del caudal ecológico por los métodos Q_{10} , $Q_{95\%}$ y los factores de reducción del 25% en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques. sitio web: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n%20ecol%C3%B3gica.pdf>.

CARREÑO F., Y MARTINEZ F. 2008. Indicadores bibliográficos para la valoración de las metodologías de determinación de los caudales ambientales. Fundación nueva cultura del agua, Vol. 1, 1-13. España.

CARVAJAL ESCOBAR, YESID. 2007. El régimen de caudal ambiental en el marco de la gestión integrada del recurso hídrico para adaptarse al cambio climático. Universidad del Valle, Colombia.

DÍEZ-HERNÁNDEZ, J. M. 2005. Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. Ingeniería y Competitividad, 7 (Cap. 2), 1-18. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/2913/291323478002.pdf>.

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

EMPRESA DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BOGOTÁ. 2013. Estudios y proyectos ambientales y mecánicos. Acueducto de Bogotá. Metodología para la evaluación regional del agua, (ERA) Recuperado de: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/metodologia-para-la-evaluacion-regional-del-agua-era-documento-sintesis>.

ERASMO, A., et al. 2007. Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GIREH. Bogotá: Contrato No. 0076 - 08 del Convenio Interadministrativo OEI - MAVDT No 004/07 de 2007.

FRANCISCA, M., et al. 2008. Indicadores bibliográficos para la valoración de las metodologías de determinación de los caudales ambientales. Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua. Febrero de 2011 Toledo. Documento c01015.

GALLARDO, C. y GONZÁLEZ, L. 2001. Determinación del caudal ecológico para el río Palacé. En Revista Unicauca Ciencia., Volumen 6. Universidad del Cauca. Popayán.

IDEAM, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. 2000. Estudio Nacional del Agua.

IDEAM. 2000. Tomado de la presentación: Caudales Ecológicos: Perspectiva desde la dirección general de aguas. Francisco Riestra Gonzáles.

IDEAM, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. 2010. Estudio Nacional del Agua. Cap. 3: Agua Superficial. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>.

IDEAM, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. 2014. Estudio Nacional del Agua 2014. Cap 2: Agua Superficial. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.

KING, J., BROWN, C. and SABET, H. 2003. A scenario - based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. River Research and Applications, 19(5-6), pp 619 - 639.

LAMB, B. L. 1995. Quantifying instream flows: matching policy and technology. Pages 7-1 to 7-22 in: L. J. MacDonnell and T. A. Rice, editors. Instream flow protection in the West. Revised edition. University of Colorado Natural Resources Law Center, Boulder.

ORTH, D. J. and MAUGHAN, O. E. 1981. Evaluation of the Montana method for recommending instream flows in Oklahoma streams. Proceedings of Oklahoma the Academy Science, 61, pp 62-66.

PALMER, C. G. 1999. Application of ecological research to the development of a new South African water law. Journal of the North American Benthological Society, 18(1), pp 132-142.

PARRA RODRÍGUEZ y EMERSON ARTURO. 2013. Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la

estimación de caudales ambientales. Maestría tesis. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín – Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/9163/#sthash.vO2LBHWu.dpuf>.

PROYECTO LEY DEL AGUA (Proyecto De Ley N 365 – Cámara de 2005).

REISER, D. W.; WESCHE, T. A. and ESTES, C. 1989. Status of instream flow legislation and practices in North America. *Fisheries*, 14(2), pp 22-29.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGINGTON, R. and BRAUN, D. P. 1997. How much water does a river need?, *Freshwater Biology*, 37, pp 231-249.

SALAZAR, A. & IDEAM. 2009. Análisis de la experiencia de la aplicación de la propuesta metodológica de cálculo de caudal ecológico en las 5 cuencas piloto. Propuesta metodológica de cálculo de caudal ambiental para pequeños ríos y quebradas.

SOKOLOV A. A. and CHAPMAN T. G. 2003. Métodos de cálculo del balance hídrico. Instituto de Hidrología de España, UNESCO. Guía internacional de investigación y métodos. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>.

THARME, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies. *River Research and Applications* 19:1 - 45.

THOMS M.C. and SHELDON F. 2002. An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: the role of geomorphology. *Geomorphology* 47: 153 – 168. Australia.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2014. Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) - UNAL, 196 p. Bogotá

VELES, RIOS. 2004. Seminario internacional sobre eventos extremos mínimos en regímenes de caudales: diagnóstico, modelamiento y análisis, Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas. Universidad Nacional de Medellín. Medellín. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4336/1/DA3751.pdf>.

VIVEKA SABAJ; LORENA RODRÍGUEZ – GALLEGO; CHRISTIAN CHRETIES; MAGDALENA CRISCI MARIANELA; FERNÁNDEZ NOELIA; COLOMBO BIBIANA LANZILOTTA; MATILDE SARAVIA; CAROLINA NEME y DANIEL CONDE. 2014. ¿Qué son los Caudales Ambientales? y ¿Cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay? *Revista*

de Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe. Recuperado de:
<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002277/227701S.pdf>.

WATERS, B. F. 1976. A methodology for evaluating the effects of different streamflows on salmonid habitat. Proceedings of the symposium and specialty conference on in stream flow needs. Am. Fish. Soc. Bethesda.; Maryland. Vol. II pp. 334 - 343. EEUU.

Sitios web visitados:

<http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/03/curva-de-duracion-de-caudales.html>. Sobre:
Curva de Duración de Caudales.

[http://www.ideam.gov.co/ Agua/Evaluación del recurso hídrico/ Indicadores/ IRH](http://www.ideam.gov.co/Agua/Evaluación%20del%20recurso%20hídrico/Indicadores/IRH). Sobre:
El índice de la regulación hídrica según el IDEAM.

10. ANEXOS

ANEXO A. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).

ANEXO B. DATOS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).

ANEXO C. DATOS DE CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES, ESTACIÓN PUENTE CARRETERA (1969-2015).

ANEXO D. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA ARRAYANALES (1969-2015).

ANEXO E. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA AGUAS CLARAS (1969-2015).

ANEXO F. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA EL VADO (1969-2015).

ANEXO G. DATOS DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS TRANSPUESTOS, MICROCUENCA SANTA TERESA (1969-2015).

ANEXO H. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA ARRAYANALES.

ANEXO I. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA AGUAS CLARAS.

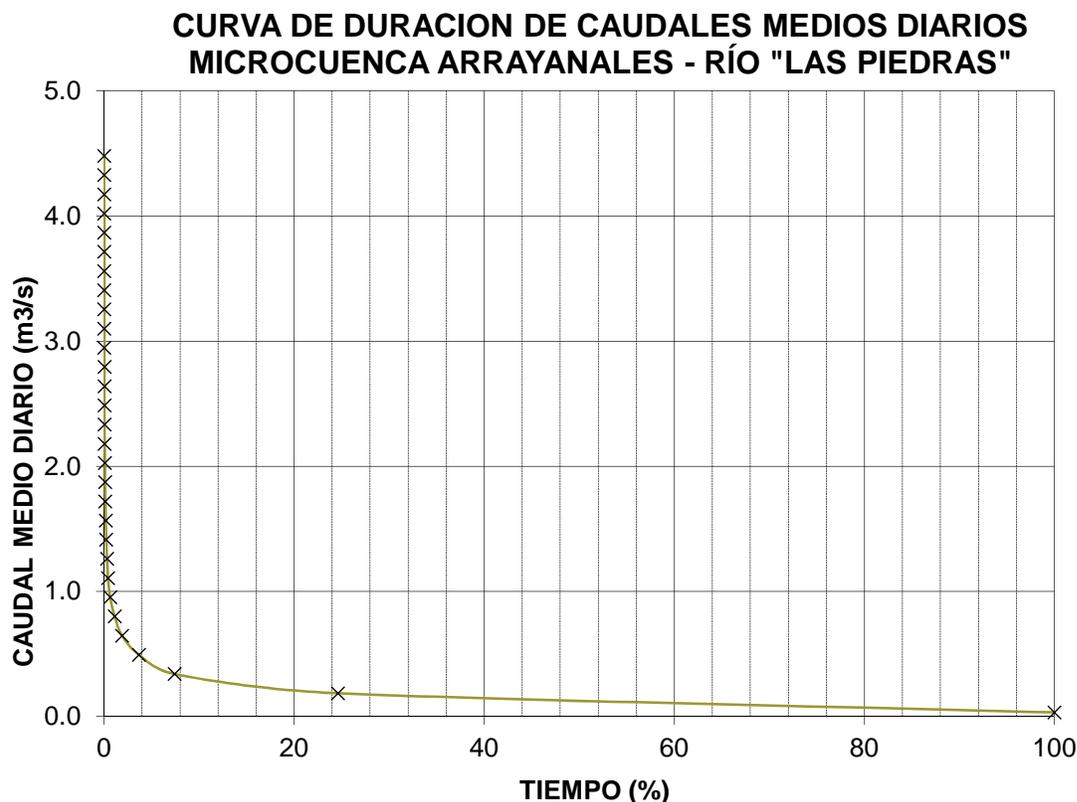
ANEXO J. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA EL VADO.

ANEXO K. INFORMACIÓN ADICIONAL – MICROCUENCA SANTA TERESA.

ANEXO H

MICROCUENCA ARRAYANALES

Figura H.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).



Para el trazado de la Curva de Duración de Caudales Medios Diarios se tuvo en cuenta la totalidad de datos (16864), estos obtenidos mediante la aplicación del método de transposición de caudales (Anexo E). El valor del Caudal promedio fue de $0.161 \text{ m}^3/\text{s}$.

En esta Curva de Duración de Caudales se puede apreciar que aproximadamente el 4% de los datos representan mediciones mayores a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que sesga por completo el resultado del IRH a obtener, esta tendencia se puede atribuir a errores en la lectura del caudal o a posteriores precipitaciones u cualquier otro fenómeno de tipo hidrológico en lapsos cortos de tiempo.

Para evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales altos, esto por medio del siguiente criterio:

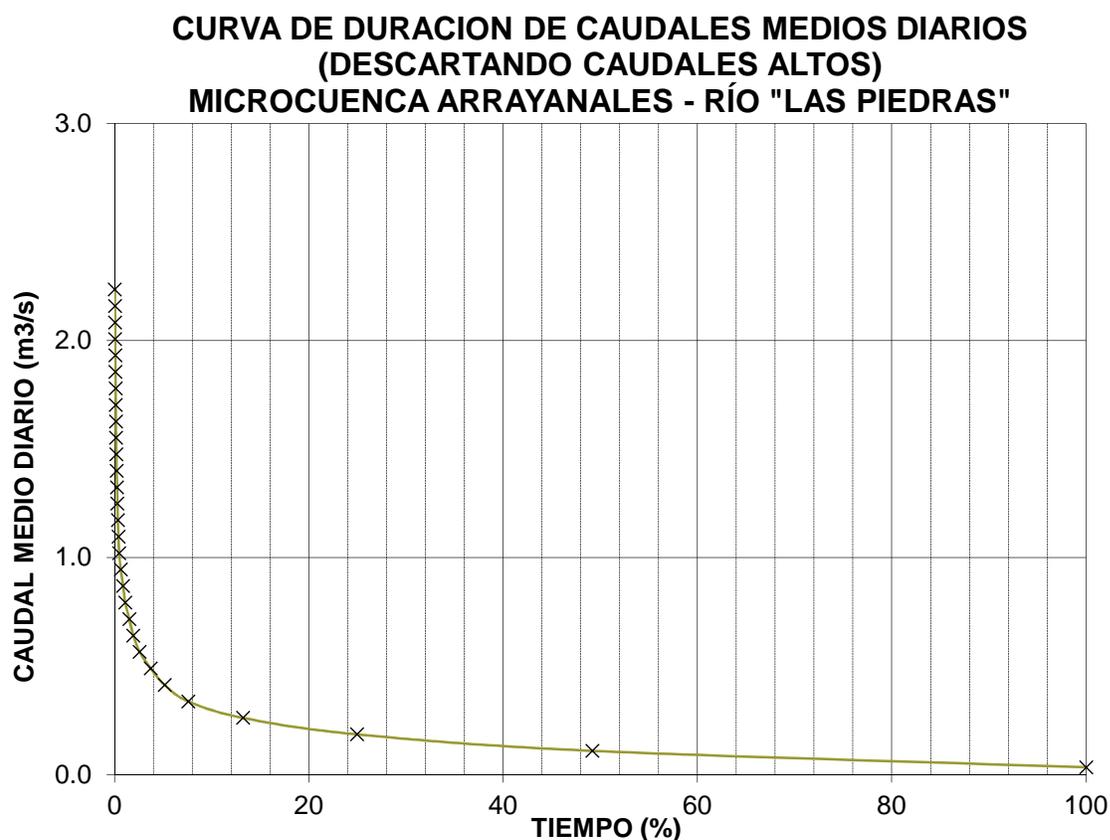
$$Q \quad (\text{m}^3/\text{s}) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{4.636 + 0.161}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 2.398$$

Luego, se descartarán los valores mayores a 2.398 m³/s.

Figura H.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).



Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros 6 datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a 2.398 m³/s. y para esta condición el Caudal promedio fue de 0.160 m³/s.

Debido a que existe la posibilidad de sesgo en cuanto a valores de Caudales bajos de manera análoga para evitar inconsistencias en la serie de datos obtenidos se aplicó para descartar valores de Caudales bajos el siguiente criterio:

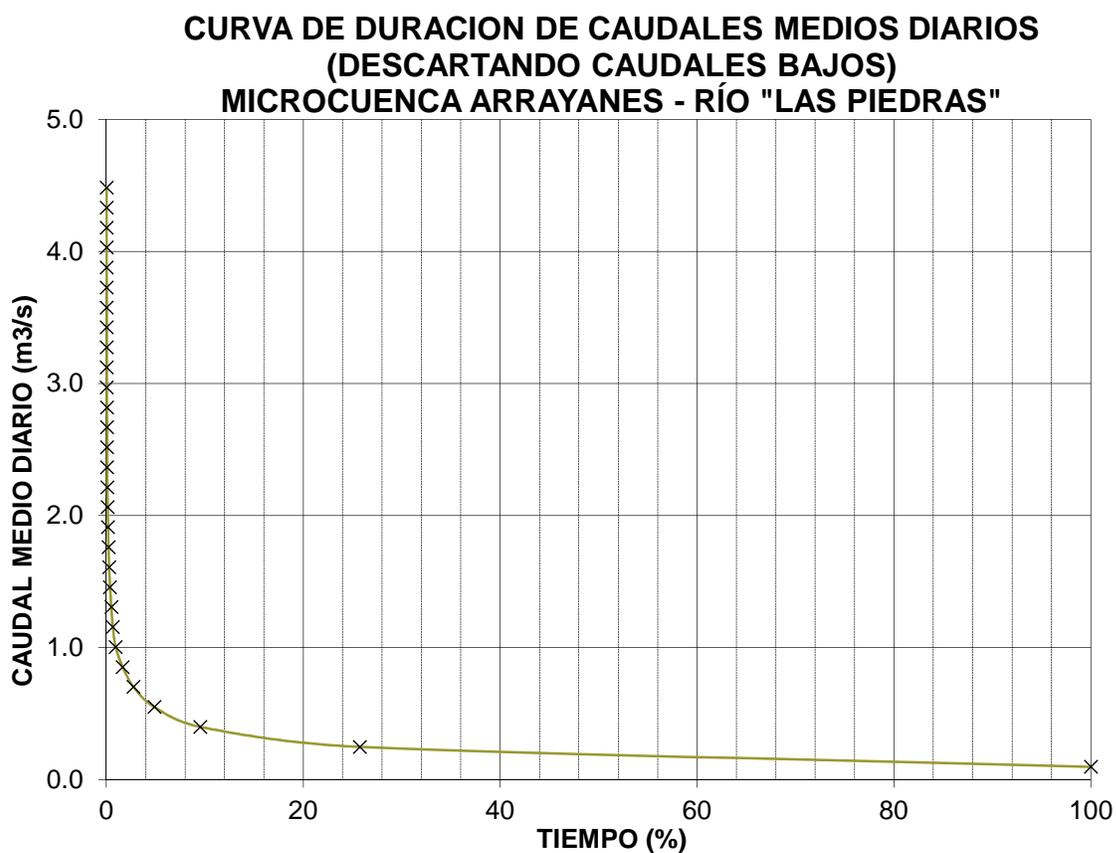
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{0.034 + 0.161}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 0.0975$$

Luego, se descartarán los valores menores a $0.0975 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura H.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).

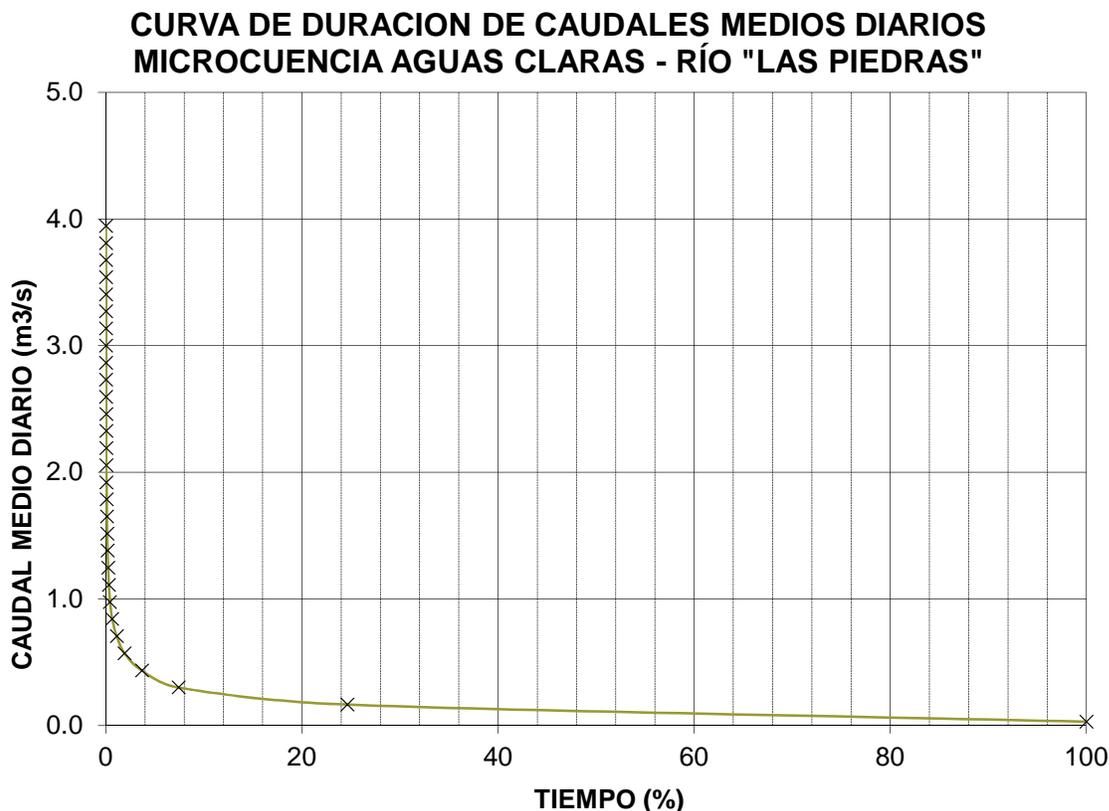


Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los últimos 7184 datos, los cuales cumplían con la condición de ser menores a $0.0975 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.227 \text{ m}^3/\text{s}$.

A pesar de los datos descartados de las Curvas de Duración de Caudales anteriormente anexadas, se puede analizar una nueva Curva de Duración de Caudales en la cual se descarten tantos valores de Q y Q . La cual fue optada para desarrollar la determinación del caudal ambiental en la microcuenca Arrayanales.

ANEXO I MICROCUENCA AGUAS CLARAS

Figura I.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).



Para el trazado de la Curva de Duración de Caudales Medios Diarios se tuvo en cuenta la totalidad de datos (16864), estos obtenidos mediante la aplicación del método de transposición de caudales. El valor del Caudal promedio fue de 0.142 m³/s.

En esta Curva de Duración de Caudales se puede apreciar que aproximadamente el 4% de los datos representan mediciones mayores a 0.5 m³/s, lo que sesga por completo el resultado del IRH a obtener, esta tendencia se puede atribuir a errores en la lectura del caudal o a posteriores precipitaciones u cualquier otro fenómeno de tipo hidrológico en lapsos cortos de tiempo.

Para evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales altos, esto por medio del siguiente criterio:

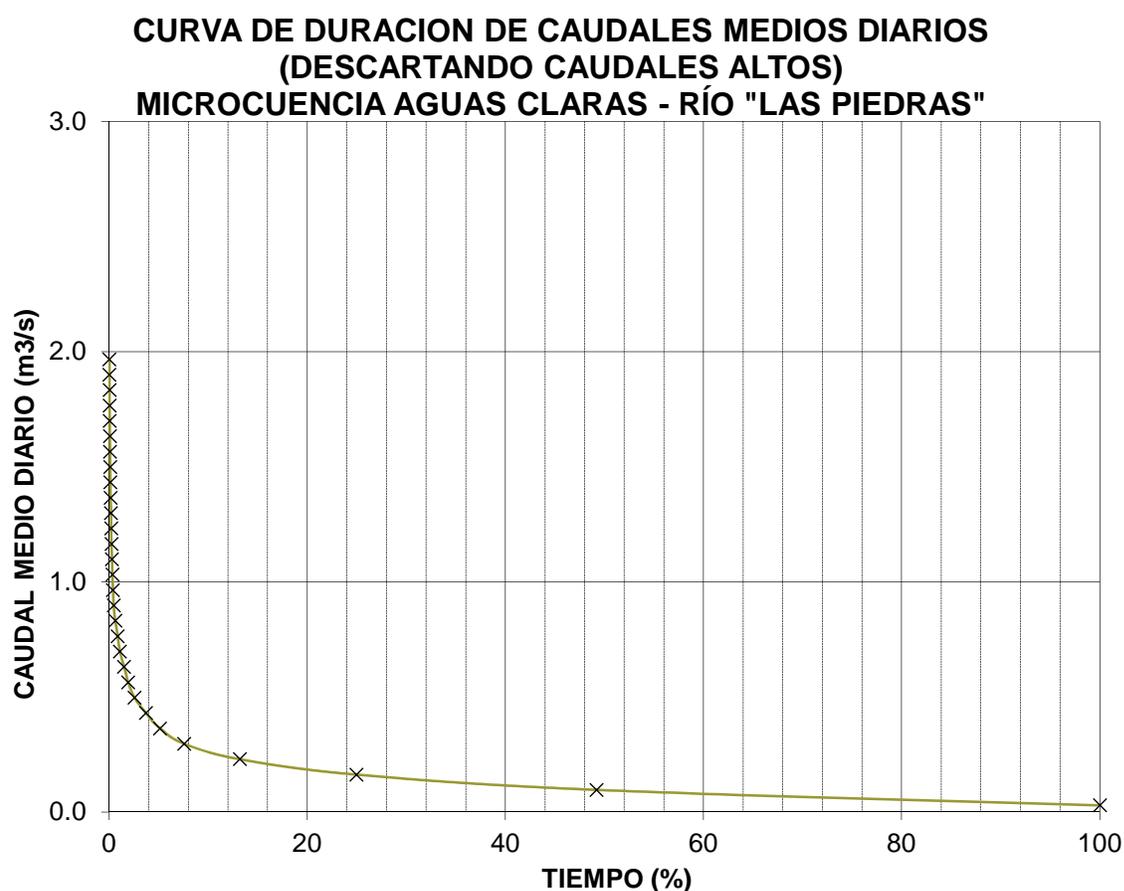
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{4.079 + 0.142}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 2.11$$

Luego, se descartarán los valores mayores a $2.11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura I.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).



Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros 6 datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $2.110 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.141 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido a que existe la posibilidad de sesgo en cuanto a valores de Caudales bajos de manera análoga para evitar inconsistencias en la serie de datos obtenidos se aplicó para descartar valores de Caudales bajos el siguiente criterio:

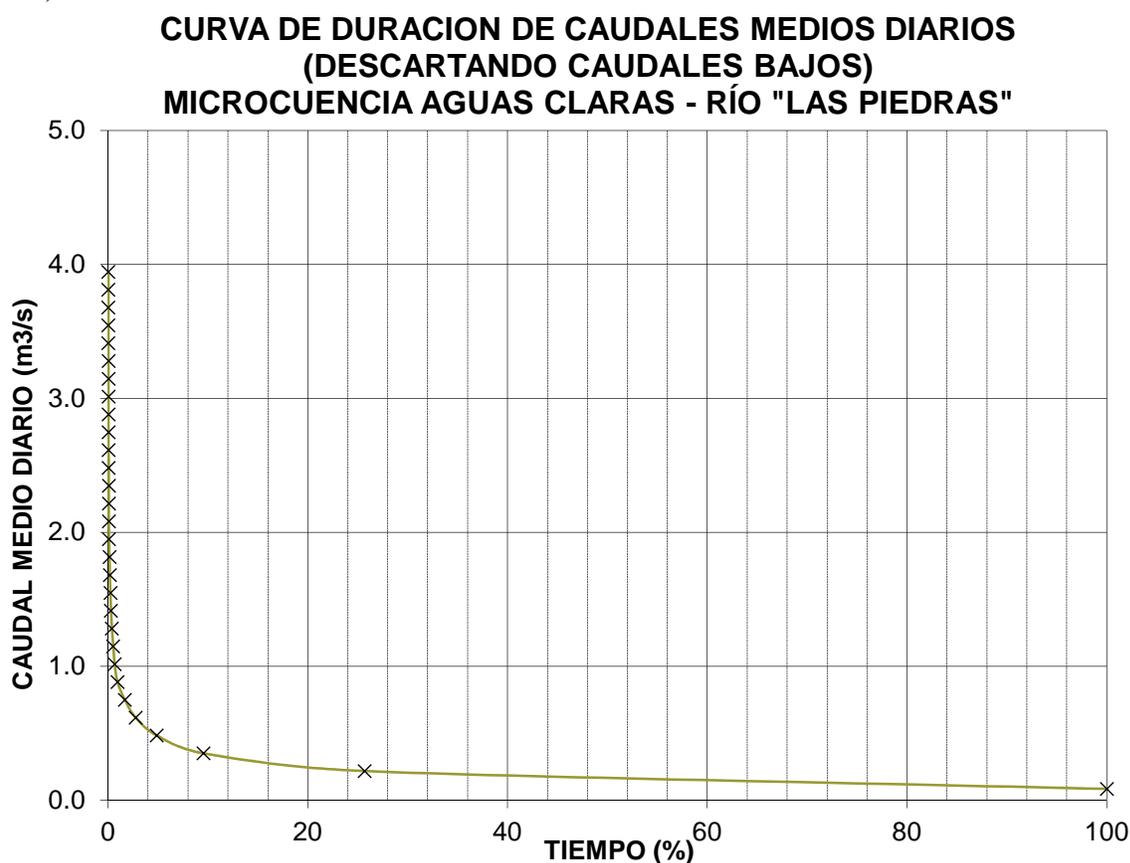
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{0.030 + 0.142}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 0.086$$

Luego, se descartarán los valores menores a $0.086 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura I.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).

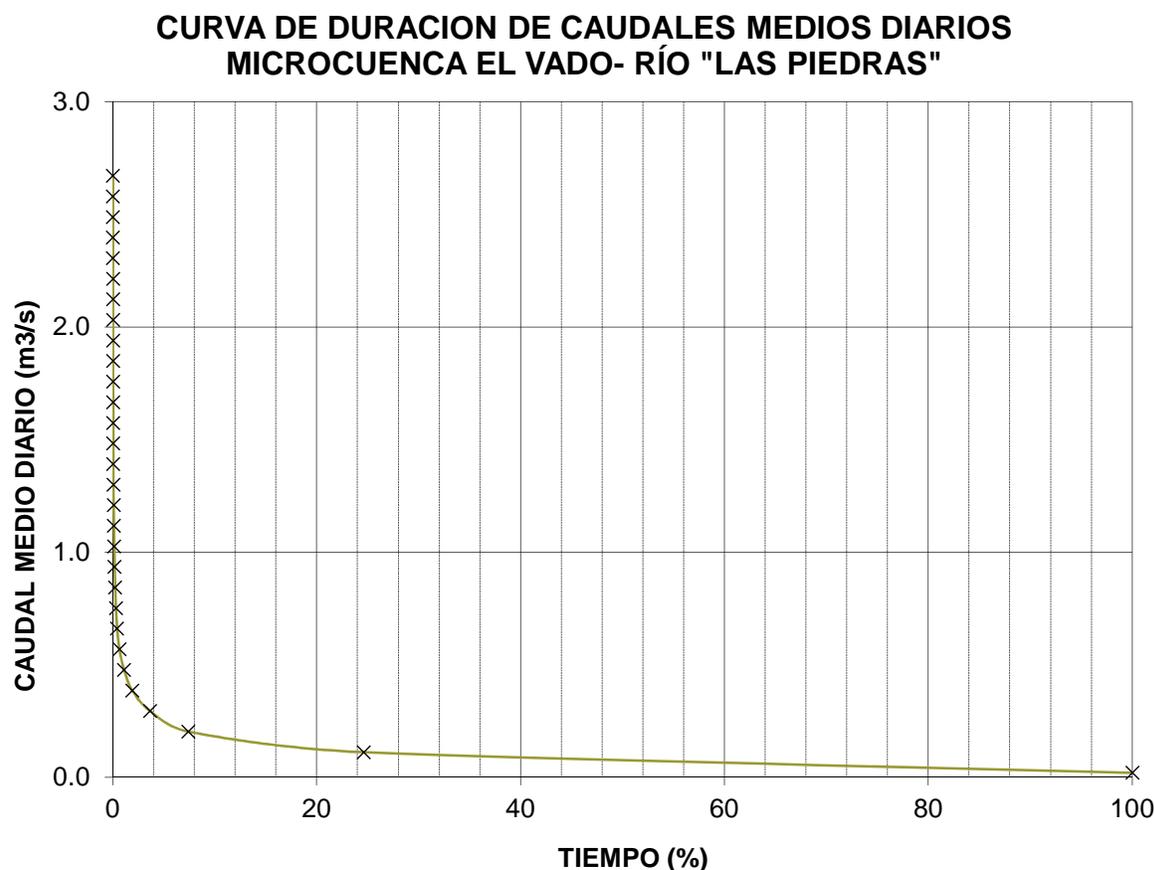


Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los últimos 7154 datos, los cuales cumplían con la condición de ser menores a $0.086 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.199 \text{ m}^3/\text{s}$.

A pesar de los datos descartados de las Curvas de Duración de Caudales anteriormente anexadas, se puede analizar una nueva Curva de Duración de Caudales en la cual se descarten tantos valores de Q y Q_i . La cual fue optada para desarrollar la determinación del caudal ambiental en la microcuencia Aguas Claras.

ANEXO J MICROCUEENCA EL VADO

Figura J.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).



Para el trazado de la Curva de Duración de Caudales Medios Diarios se tuvo en cuenta la totalidad de datos (16864), estos obtenidos mediante la aplicación del método de transposición de caudales. El valor del Caudal promedio fue de 0.096 m³/s.

En esta Curva de Duración de Caudales se puede apreciar que aproximadamente el 2% de los datos representan mediciones mayores a 0.5 m³/s, lo que sesga por completo el resultado del IRH a obtener, esta tendencia se puede atribuir a errores en la lectura del caudal o a posteriores precipitaciones u cualquier otro fenómeno de tipo hidrológico en lapsos cortos de tiempo.

Para evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales altos, esto por medio del siguiente criterio:

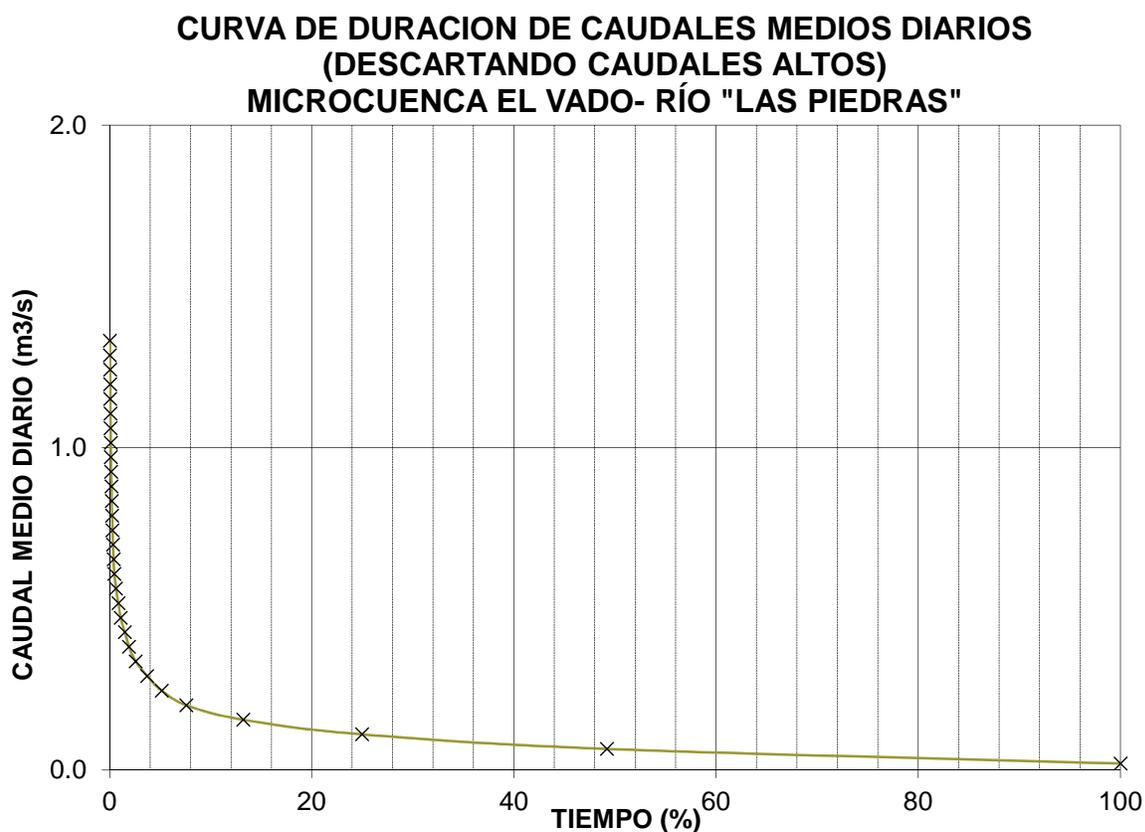
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{2.763 + 0.096}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 1.429$$

Luego, se descartarán los valores mayores a 1.429 m³/s.

Figura J.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).



Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros 6 datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a 1.429 m³/s. y para esta condición el Caudal promedio fue de 0.095 m³/s.

Debido a que existe la posibilidad de sesgo en cuanto a valores de Caudales bajos de manera análoga para evitar inconsistencias en la serie de datos obtenidos se aplicó para descartar valores de Caudales bajos el siguiente criterio:

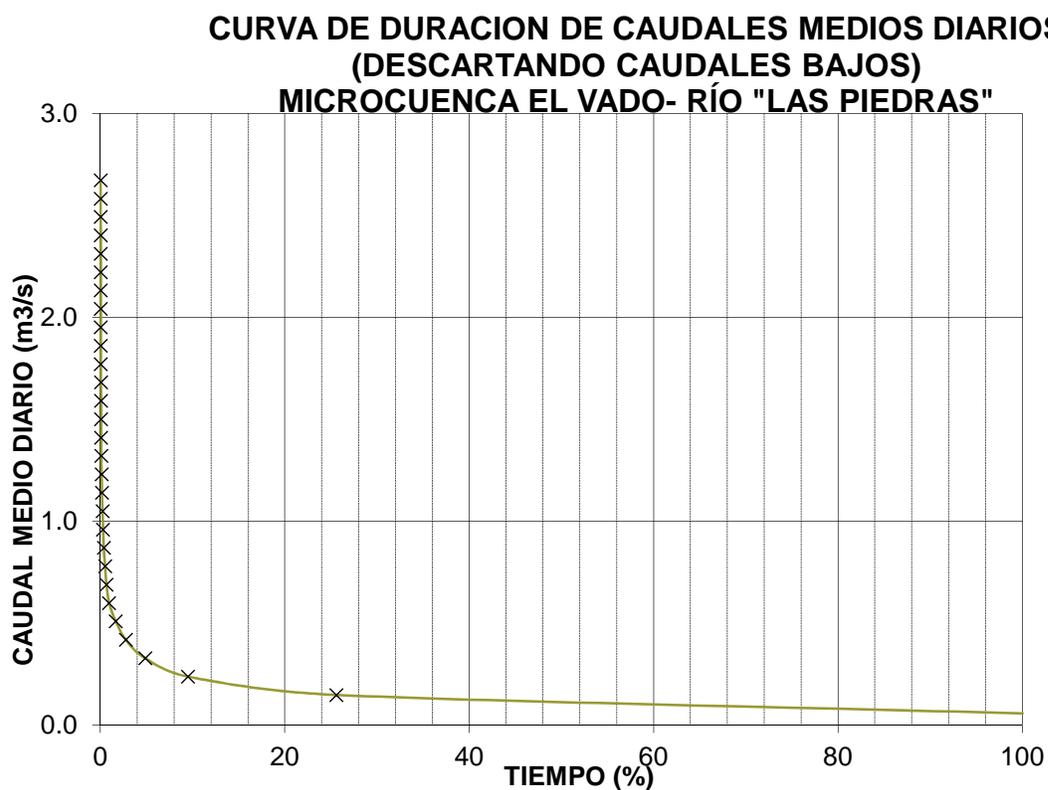
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{0.020 + 0.096}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 0.058$$

Luego, se descartarán los valores menores a $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura J.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).

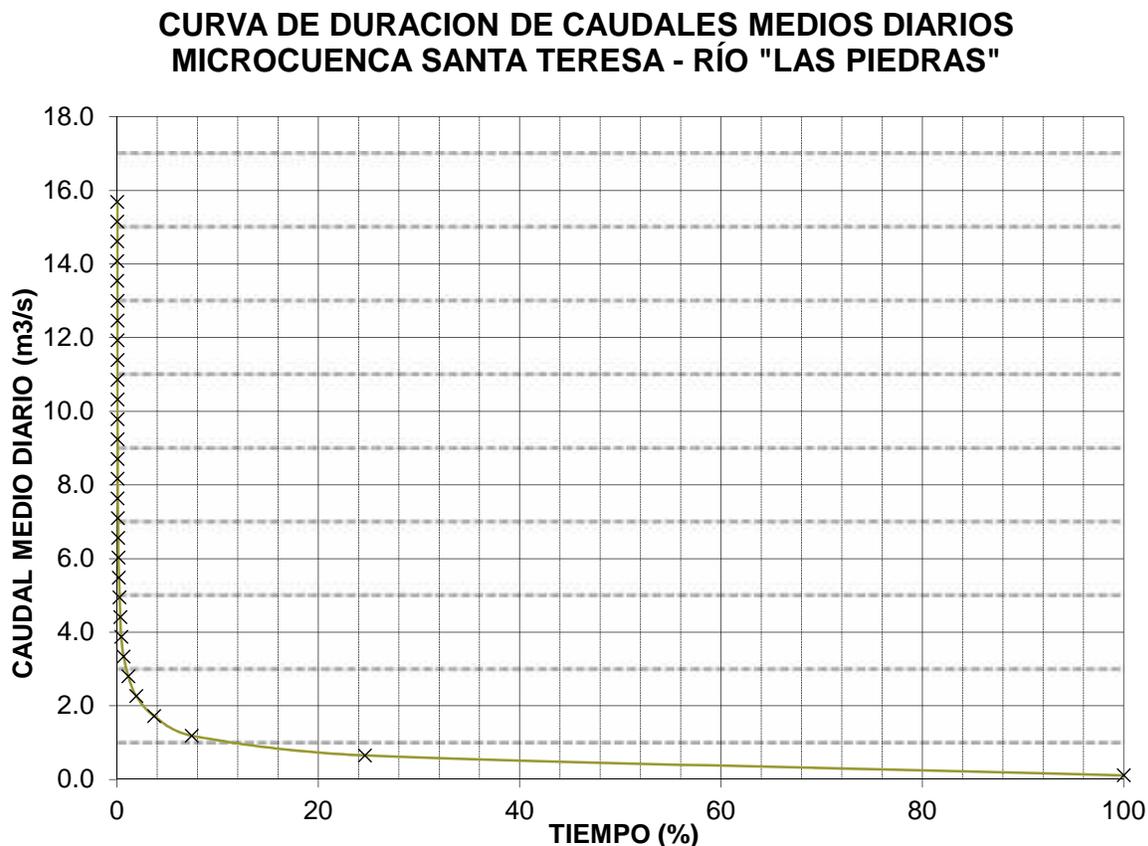


Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los últimos 7097 datos, los cuales cumplían con la condición de ser menores a $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.135 \text{ m}^3/\text{s}$.

A pesar de los datos descartados de las Curvas de Duración de Caudales anteriormente anexadas, se puede analizar una nueva Curva de Duración de Caudales en la cual se descarten tantos valores de Q s y Q . La cual fue optada para desarrollar la determinación del caudal ambiental en la microcuenca El Vado.

ANEXO K MICROCUENCA SANTA TERESA

Figura K.1. Curva de Duración de Caudales medios diarios, sin descartar datos (1969 – 2015).



Para el trazado de la Curva de Duración de Caudales Medios Diarios se tuvo en cuenta la totalidad de datos (16864), estos obtenidos mediante la aplicación del método de transposición de caudales. El valor del Caudal promedio fue de $0.565 \text{ m}^3/\text{s}$.

En esta Curva de Duración de Caudales se puede apreciar que aproximadamente el 8% de los datos representan mediciones mayores a $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que sesga por completo el resultado del IRH a obtener, esta tendencia se puede atribuir a errores en la lectura del caudal o a posteriores precipitaciones u cualquier otro fenómeno de tipo hidrológico en lapsos cortos de tiempo.

Para evitar esta inconformidad en la serie de datos obtenidos se optó por descartar los datos de caudales altos, esto por medio del siguiente criterio:

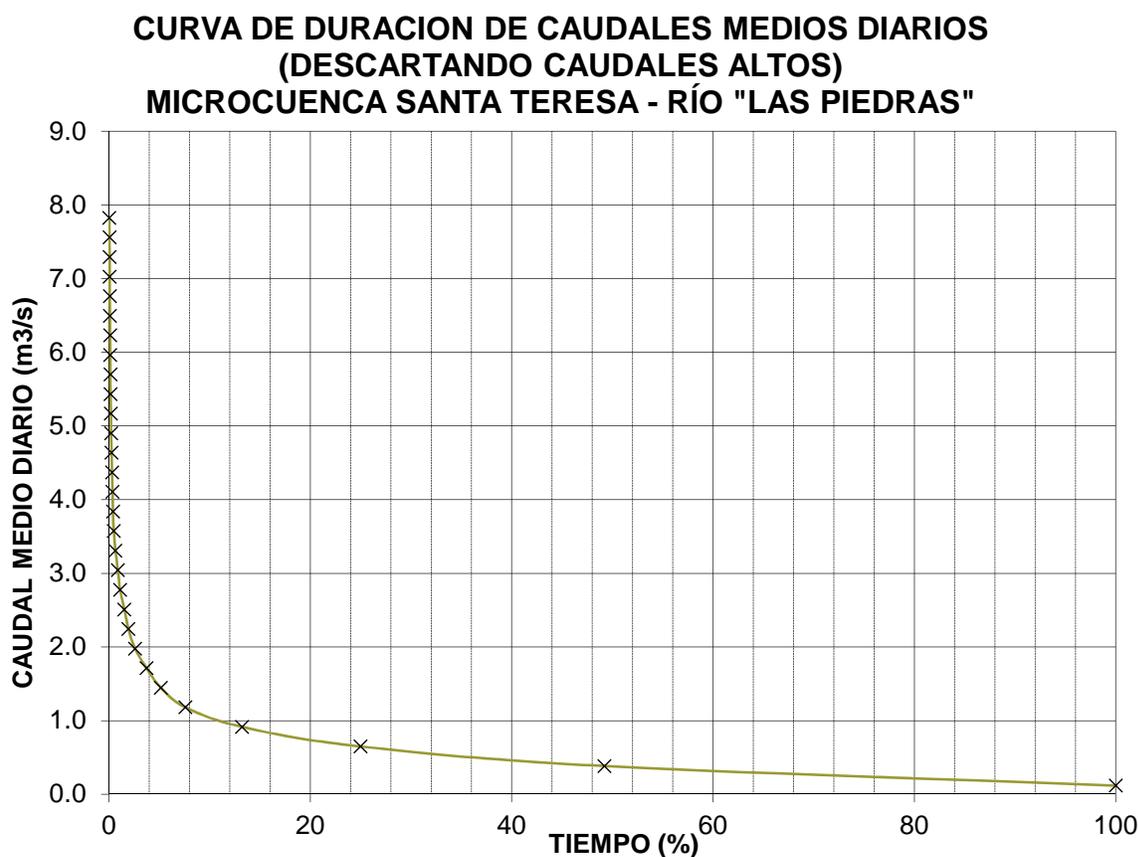
$$Q \quad (\text{m}^3/\text{s}) = \frac{Q + Q_i}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{16.233 + 0.565}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 8.399$$

Luego, se descartarán los valores mayores a $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura K.2. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales altos (1969 – 2015).



Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los primeros 6 datos, los cuales cumplían con la condición de ser mayores a $8.399 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.561 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido a que existe la posibilidad de sesgo en cuanto a valores de Caudales bajos de manera análoga para evitar inconsistencias en la serie de datos obtenidos se aplicó para descartar valores de Caudales bajos el siguiente criterio:

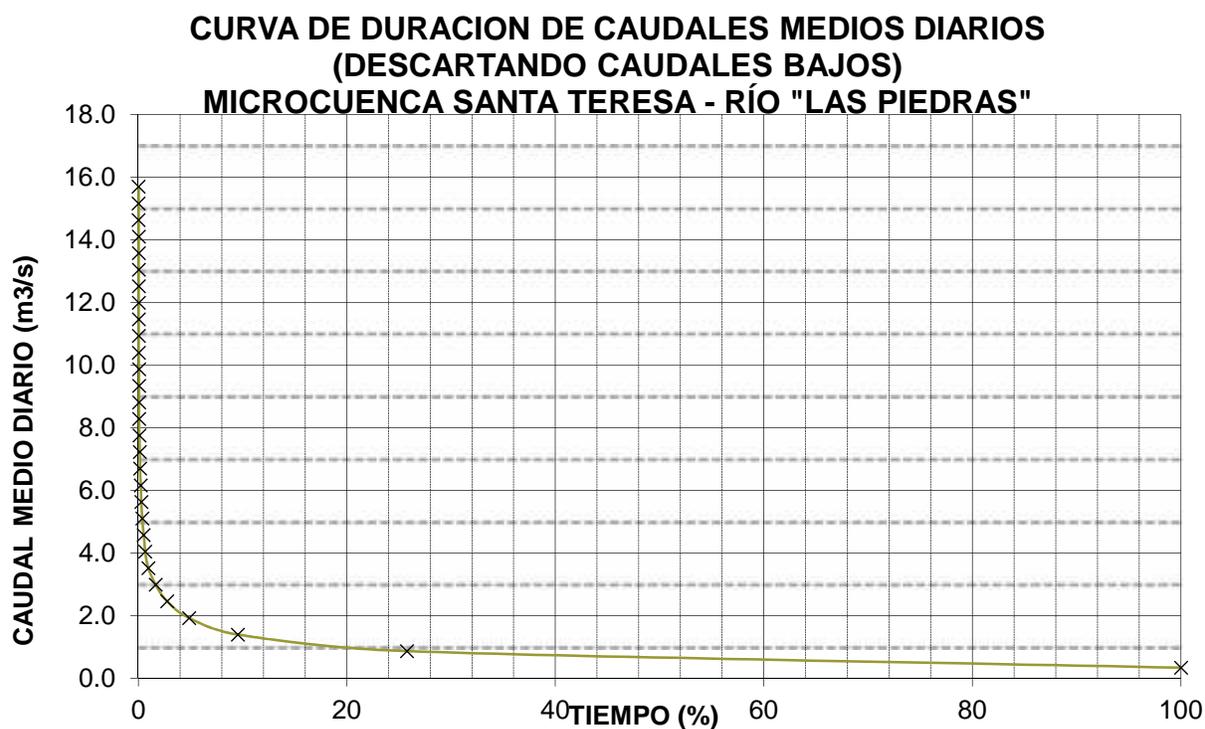
$$Q \quad (m^3/s) = \frac{Q \quad r + Q_l}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = \frac{0.120 + 0.565}{2}$$

$$Q \quad (m^3/s) = 0.342$$

Luego, se descartarán los valores menores a $0.342 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura K.3. Curva de Duración de Caudales medios diarios, descartando caudales bajos (1969 – 2015).



Para esta Curva de Duración de Caudales se suprimieron los últimos 7178 datos, los cuales cumplían con la condición de ser menores a $0.342 \text{ m}^3/\text{s}$. y para esta condición el Caudal promedio fue de $0.794 \text{ m}^3/\text{s}$.

A pesar de los datos descartados de las Curvas de Duración de Caudales anteriormente anexadas, se puede analizar una nueva Curva de Duración de Caudales en la cual se descarten tantos valores de Q y Q . La cual fue optada para desarrollar la determinación del caudal ambiental en la microcuenca Santa Teresa.