

# APLICACIÓN DE MÉTODOS HIDROLÓGICOS PARA DETERMINAR EL RÉGIMEN DE CAUDAL AMBIENTAL (RCA) EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CALI.



**Elaborado por: Camilo Andrés Parra  
Betancourt.**

**Director: Ph.D Yesid Carvajal Escobar.  
Grupo IREHISA  
2015**



APLICACIÓN DE MÉTODOS HIDROLÓGICOS PARA DETERMINAR EL RÉGIMEN DE CAUDAL  
AMBIENTAL (RCA) EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CALI

PRESENTADO POR  
CAMILO ANDRES PARRA BETANCOURT

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA

DIRECTOR  
YESID CARVAJAL ESCOBAR, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
SANTIAGO DE CALI  
2015

*Esta trabajo se los dedico a mi madre Sixladiz Betancourt Toro y a mi hermano Blue Antonio Betancourt, fundamentales en mi vida. A ellos les debo todo y les agradezco Su gran amor hacia mí, su apoyo constante y paciencia.*

*Para ellos mis logros, mis felicidades, mi vida y eterna gratitud...*

NOTA DE ACEPTACIÓN:

---

---

---

---

---

---

---

FIRMA DEL EVALUADOR

---

FIRMA DEL EVALUADOR

SANTIAGO DE CALI, DICIEMBRE DEL 2015

## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad del Valle, por su compromiso y entrega para el desarrollo de mi formación como Ingeniero Agrícola.
- A mi director Yesid Carvajal Escobar, por su tiempo, colaboración y por proyectar todos los aspectos desarrollados en esta investigación.
- Al profesor Oscar Ramírez Benjumea, por brindar asesoría y suministrar información necesaria para el desarrollo de la investigación.
- A la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC) por su apoyo para el desarrollo de esta investigación y el suministro de información.
- A mis amigos Alexander Gaviria, Jorge Mario Gallardo, Jhon Edinson Sanchez, María Teresa Solarte, Ronald Andres Gonzalez, Ángela Rodríguez y Johan Manuel Bermudez por su apoyo incondicional.
- A todos los integrantes del grupo de investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Desarrollo de Suelos - IREHISA, de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), por los aportes en la investigación y la formación profesional.

## RESUMEN

El objetivo general del proyecto de grado consistió en caracterizar el régimen de caudal ambiental (RCA) en la cuenca baja del río Cali basado en los factores hidrológicos, que inciden en su determinación, para el período y zona de estudio. Esta información permite valorar y predecir efectos que sobre el mismo traería la construcción de obras reguladoras o futuras intervenciones humanas. Este tema ha empezado a estudiarse a nivel mundial debido a los impactos nocivos que se producen después de un aprovechamiento del recurso, sin tener un criterio técnico de la cantidad que se debe dejar para que el río continúe con las funciones naturales aunque se haya fijado un caudal ambiental equivalente a al 75% de la media multianual, es necesaria una reevaluación. Como objetivos específicos se tuvieron: (1) Caracterizar el régimen natural de caudales en la cuenca del Río Cali con base en la información secundaria de la estaciones limnigráficas de Bocatoma y Pichindé (2) Estimar y comparar el caudal ambiental de la cuenca del río Cali mediante metodologías hidrológicas halladas en la revisión bibliográfica (3) Generar recomendaciones, para la determinación del régimen de caudal ambiental, de acuerdo los análisis de los resultados obtenidos, en el contexto colombiano. La metodología propuesta para alcanzar estos objetivos consistió en: recopilación de información antecedente, análisis exploratorio de la información histórica hidroclimatológica y caracterización del régimen natural de caudales, estimación del régimen de caudal ambiental usando el enfoque metodológico propuesto por Castro (2008) y el Ministerio de Medio Ambiente (2013). Los principales resultados obtenidos: caracterización del régimen natural de caudales, estimación del régimen de caudal ambiental variable intra e interanualmente y considerando los planteamientos de Lhumeau y Cordero (2012) de adaptación basada en ecosistemas y la ideas de Ortega et al. (2010) asociadas a la reducción de las emisiones por deforestación y degradación forestal para delinear las recomendaciones en la determinación de RCA desde una visión holística de la conservación para pequeñas cuencas andinas como la del río Cali. La principal conclusión de este trabajo es que cualquier intervención que se realice sobre el río impacta negativamente el comportamiento natural que tiene el mismo y esa alteración se refleja en calidad, cantidad y en la estructura. El establecimiento de un RCA en concordancia con Palau (1994) y Castro (2008) debe estar enmarcado dentro de un conjunto de prácticas de gestión en la cuenca relacionadas con el uso del suelo, la participación comunitaria, los derechos de agua, y reducción de las presiones antrópicas .

**Palabras clave:** Caudal ecológico, Caudal ambiental, Régimen de Caudal Ambiental, Objetivos del Milenio, Reducción de presiones antrópicas, Cambio climático, Variabilidad Climática.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| <b>1. INTRODUCCION</b> .....   | 11 |
| <b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....  | 3  |
| <b>3. OBJETIVOS</b> .....  | 4  |
| 3.1 Objetivo General.....  | 4  |
| 3.2 Objetivos Específicos .....  | 4  |
| <b>4. ANTECEDENTES</b> .....   | 5  |
| <b>5. MARCO DE REFERENCIA</b> .....  | 9  |
| 5.1. MARCO CONTEXTUAL.....   | 9  |
| 5.1.1. Contexto general de la situación mundial de los recursos hídricos .....           | 9  |
| 5.1.3. Revisión de marcos normativos respecto al caudal ambiental en Colombia .....      | 12 |
| 5.1.2. Variabilidad climática y cambio climático. ....                                   | 18 |
| 5.1.4. El caudal ambiental en el marco de la gestión integrada del recurso hídrico.....  | 19 |
| 5.1.5. Importancia de los bosques interandinos.....                                      | 21 |
| 5.1.6. Errores comunes en la determinación del caudal ambiental.....                     | 23 |
| 5.2 MARCO TEORICO .....  | 24 |
| 5.2.2. La Precipitación.....   | 24 |
| 5.2.2. Caudales .....  | 25 |
| 5.2.3. El Hidrograma .....   | 25 |
| 5.2.4. Curva de Duración de Caudales .....   | 26 |
| 5.2.5. Análisis Exploratorio de datos.....   | 27 |
| 5.2.6 Programa de mediciones de campo .....  | 28 |
| Aforos .....   | 29 |
| 5.2.7. Caudales ambientales.....   | 30 |
| 5.2.7.1. Revisión de Conceptos para el caudal ambiental.....                             | 30 |
| 5.2.7.2. Delimitación del concepto de caudal ambiental para el contexto colombiano ..... | 31 |
| <b>6. METODOLOGIA</b> .....  | 34 |
| 6.1. Descripción de la zona de estudio. ....   | 34 |
| 6.1.1. Caracterización Morfométrica .....  | 36 |
| 6.1.2. Caracterización climática de la cuenca .....                                      | 38 |
| 6.1.3. Geología y geomorfología.....   | 39 |
| 6.1.4. Erosión.....  | 41 |

|   |            |
|---|------------|
| 6.1.5. Biodiversidad .....  | 42         |
| 6.2 Metodologías aplicadas .....  | 44         |
| <b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>54</b>  |
| 7.1. Análisis exploratorio de datos.....  | 54         |
| 7.2. OBJETIVO 1 .....   | 60         |
| 7.2.1. Caracterización hidrológica del régimen natural de caudales .....                                      | 60         |
| 7.3. OBJETIVO 2 .....   | 70         |
| 7.3.1. Aplicación de las metodologías hidrológicas .....  | 70         |
| 7.3.2. Análisis de los caudales obtenidos con las metodologías propuestas .....                               | 74         |
| 7.4. OBJETIVO 3 .....   | 88         |
| 7.4.1. Recomendaciones, para la determinación del régimen de caudal ambiental, en el contexto colombiano..... | 88         |
| <b>8. CONCLUSIONES Y REMENDACIONES .....</b>  | <b>93</b>  |
| <b>9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....</b>  | <b>96</b>  |
| <b>10. REFERENCIAS.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>Anexos.....</b>  | <b>111</b> |
| Anexo A. Graficas del Análisis Exploratorio de datos.....   | 112        |
| Anexo B. Pautas para la caracterización del régimen natural de caudales. ....                                 | 114        |
| Anexo C. Gráficas comparativas objetivo 2.....  | 116        |
| Anexo D. Informe de salidas de campo.....   | 123        |
| Anexo E. Documento fotográfico .....  | 126        |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Bienes y servicios que proveen los ecosistemas naturales a la humanidad, adaptado de UICN (2000) ..... | 11 |
| Tabla 2. Denominaciones y conceptos del Caudal Ambiental (Cantera, Carvajal y Castro, 2009). ....               | 30 |
| Tabla 3. Caracterización morfométrica de la cuenca del río Cali. ....   | 37 |
| Tabla 4. Clasificación de los suelos de la cuenca río Cali.....   | 40 |
| Tabla 5. Índices de la curva de duración de caudal usados en el estudio de caudales ambientales..               | 48 |
| Tabla 6. Algunos usos del caudal 7q10. ....   | 50 |
| Tabla 7. Umbrales de contribución para cada tipo de año. ....   | 62 |
| Tabla 8. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año.....                                    | 64 |
| Tabla 9. Características generales de la avenida geomorfológica del río Cali. ....                              | 67 |
| Tabla 10. Estructura de los caudales mínimos o sequías. ....  | 68 |
| Tabla 11. Caudal ambiental según el método de Tennant Estación Bocatoma. ....                                   | 70 |



|   |    |
|---|----|
| Tabla 12. Caudal ambiental según el método de Tennant Estación Pichindé.....  | 71 |
| Tabla 13. Caudal ambiental según el método de Hoppe estación Bocatoma.....  | 72 |
| Tabla 14. Caudal ambiental según el método de Hoppe estación Pichindé.....  | 72 |
| Tabla 15. Índices de la curva de duración de caudales para las estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 72 |
| Tabla 16. Caudales mínimos de 7 días consecutivos para las estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 73 |
| Tabla 17. Resultados de la aplicación de las metodologías hidrológicas Estación entre los años 1979-2014.....   | 74 |
| Tabla 18. Resultados de la aplicación de las metodologías hidrológicas Estación Pichindé entre los años 1978-2014.....                                | 75 |
| Tabla 19. Estadísticas descriptivas metodología de Tennant Excelente - Estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 76 |
| Tabla 20 Estadísticas descriptivas metodología d Hoppe Excelente - Estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 77 |
| Tabla 21 Estadísticas descriptivas metodología de Lyons Excelente - Estaciones Bocatoma y Pichindé.....   | 78 |
| Tabla 22 Resultados de la aplicación de la metodología hidrológica del ministerio del medio ambiente- Estación Bocatoma entre los años 1979-2014..... | 80 |
| Tabla 23 Resultados de la aplicación de la metodología hidrológica del ministerio del medio ambiente-Estación Pichindé entre los años 1978-2014.....  | 80 |
| Tabla 24. Años por condición hidrológica.....   | 82 |
| Tabla 25 Estadísticas descriptivas metodología de Ministerio del medio ambiente-Estación Bocatoma.....  | 83 |
| Tabla 26. Estadísticas descriptivas metodología de Ministerio de Medio Ambiente-Estación Pichindé.....  | 86 |

## Índice de gráficas

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 1. Variación temporal del caudal medio mensual intranual año 2010– Río Cali, régimen bimodal.....                 | 26 |
| Gráfica 2 Gráfica de serie de tiempo – serie de caudales medios diarios para estación Bocatoma 1979- 2014.....            | 55 |
| Gráfica 3 Serie de tiempo – serie de caudales anuales estación Bocatoma 1946- 2014.....                                   | 55 |
| Gráfica 4. Histogramas Estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 57 |
| Gráfica 5. Diagrama de cajas Estación Bocatoma y Pichindé.....  | 58 |
| Gráfica 6. Probabilidad de Estación Bocatoma.....   | 58 |
| Gráfica 7. Curva de probabilidades de excedencia – Estación Pichindé.....   | 61 |
| Gráfica 8. Curva de probabilidades de excedencia – Estación Bocatoma.....   | 61 |
| Gráfica 9. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año. Estación Bocatoma.....                         | 63 |
| Gráfica 10. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año. Estación Pichindé.....                        | 63 |
| Gráfica 11. Correlaciones cruzadas entre el Índice de Oscilación del Sur (SOI) y los caudales medios mensuales (QMM)..... | 66 |
| Gráfica 12. Caudales máximos estación Bocatoma y Pichindé.....  | 68 |
| Gráfica 13. Caudales mínimos estaciones Bocatoma y Pichindé.....  | 69 |

|  |           |
|--|-----------|
| Gráfica 14. Curva de Duración de Caudales Diarios para las Estaciones Bocatoma y Pichindé, Río Cali .....  | 71        |
| Gráfica 15 Comparación método de Tennant Excelente frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma. ....                             | 76        |
| <b>Gráfica 16. Comparación método de Tennant Excelente frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Pichindé.....</b>                     | <b>76</b> |
| Gráfica 17. Comparación método de Hoppe frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Bocatoma.....  | 77        |
| Gráfica 19. Comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Bocatoma.....  | 79        |
| Gráfica 20. Comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Pichindé. ....                                       | 79        |
| Gráfica 21. Correlaciones cruzadas entre el Caudal medio mensual QMM y Temperatura Oceánica Superficial en la zona Niño 3-4 (SST 3-4) .....        | 81        |
| Gráfica 22. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma. ....    | 83        |
| Gráfica 23. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Promedio frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma..... | 84        |
| Gráfica 24. Caudales recomendados para el mes de Junio.....  | 84        |
| Gráfica 25 Componentes del caudal ecológico IHA .....  | 85        |
| Gráfica 26. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Pichindé. ....    | 86        |
| Gráfica 28. Componentes del caudal ecológico con IHA .....   | 87        |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Representación de las condiciones oceánicas y atmosféricas del ENOS y Normal Fuente: NOAA y TAO (2011) ..... | 19 |
| Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Cali. ....  | 34 |
| Figura 3. Imagen satelital de la zona de estudio cuenca del río Cali. Herramienta Google earth. ....                   | 36 |
| Figura 4. Usos del suelo y cobertura de la cuenca del río Cali para el año 2004 Fuente (CVC, 2011). ....               | 41 |
| Figura 5. Erosión de la cuenca del río Cali para el año 2009. Fuente (CVC, 2011). ....                                 | 42 |



## 1. INTRODUCCION

El agua dulce es vital para la vida humana, el mantenimiento de las condiciones ecológicas de los hábitats y el bienestar económico de las naciones, de ahí que se deba reconocer la importancia de mantener estos ecosistemas reguladores del ciclo hidrológico, con el fin de conservar los múltiples servicios ambientales que prestan a la sociedad (Barón, 2003). Las actuaciones humanas (hidráulicas, agrícolas, industriales, etc.) sobre la cuenca producen alteraciones en los ecosistemas fluviales con serias consecuencias en los componentes físicos y biológicos. La mayoría de los ríos en el mundo han sido modificados en su estructura, forma, composición y funcionamiento, lo que ha provocado graves alteraciones ecológicas y ambientales, así como también, contaminación, disminución excesiva de caudales y pérdida de servicios ambientales y recreativos del río, entre otros; los cuales pueden presentar condiciones irreversibles.

De acuerdo con GWP (2005) hay mayor interés en los círculos nacionales e internacionales frente a los recursos hídricos, reconociendo el agua dulce como recurso renovable, pero finito y vulnerable, que posee valor económico en todos sus usos y por lo tanto debe ser reconocida como bien económico, por consiguiente para su adecuada gestión y desarrollo se requiere de la participación en todos los niveles.

En Colombia además de las alteraciones en los ecosistemas fluviales con serias consecuencias en los componentes físicos y biológicos, se suma la diversidad climática del país influenciada por la variabilidad espacio temporal de la Zona de Confluencia Intertropical, por los sistemas de circulación general de la atmósfera de la zona tropical y subtropical y por el relieve, entre otros, que se manifiesta en una distribución heterogénea de la precipitación. El fenómeno de El Niño Oscilación Sur - ENOS el cual afecta todo el territorio causando alteraciones en los periodos climáticos del país y en particular en el ciclo hidrológico provocando variaciones temporales de los caudales de los ríos. Los fenómenos El Niño y La Niña son la señal más importante de la alteración en el clima con situaciones extremas en la distribución de la temperatura del aire y la precipitación, provocando sequías e inundaciones a lo largo y ancho del territorio colombiano. Según análisis del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, en el caso del fenómeno El Niño, las anomalías de temperatura media mensual del aire pueden estar entre 1,0 y 1,5 °C y la precipitación mensual en algunas zonas de los valles interandinos puede reducirse en más del 40% (IDEAM, 2002). De esta forma la disponibilidad hídrica de los ríos se ve determinada por las variaciones en el clima que en casos extremos se traduce en exceso o en déficit de agua.

La influencia de la Variabilidad Climática y el Cambio Climático en el territorio llevan a mejorar la gestión de las cuencas hidrográficas e incorporar herramientas para estudiar el comportamiento de las corrientes para así avanzar hacia la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH). De acuerdo con IDEAM (2001). Es importante no concentrarnos solo en el papel socioeconómico del agua, se debe tener en la cuenta que el agua también cumple una función ecológica en los ecosistemas naturales por tanto, los usos socioeconómicos deben armonizarse con los requerimientos ecosistémicos, por consiguiente las decisiones en planificación y operación de sistemas de aprovechamiento hídrico se fundamentan en la información histórica de las variables hidroclimatológicas; información que debe ser entendida y procesada para un buen funcionamiento de los sistemas con el fin de reducir la vulnerabilidad de la disponibilidad hídrica (Carvajal, 2004).

El concepto de caudal ambiental ha sido abordado desde los años 70 y las metodologías han sido mejoradas desde entonces según los intereses particulares de las regiones en la explotación de sus fuentes, abordar el tema del caudal ambiental permite conocer herramientas para promover la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) y tomar decisiones acerca de concesiones y viabilidad de las posibles formas de aprovechamiento del recurso (Céspedes, 2012).

El establecimiento del régimen de caudal ambiental forma parte de una óptica ecosistémica en la gestión integrada de los recursos hídricos, que incluye un amplio conjunto de medidas para garantizar un río saludable, entre las cuales se incluyen: la protección de suelos, la prevención de la contaminación, control en el aprovechamiento, protección, conservación y restauración de hábitats (Castro, 2008), vinculando las visiones del enfoque ecosistémico y la adaptación basada en ecosistemas, las cuales reconocen la resiliencia y la dinámica de los ecosistemas junto a la implementación de acciones de adaptación planificada, con el fin de reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y las poblaciones a la Variabilidad Climática y Cambio Climático ( Lhumeau y Cordero, 2012).

A nivel mundial se están desarrollando nuevas políticas que aseguran prácticas sustentables aplicando metodologías, métodos o procedimientos de estimación del RCA que reduzcan los impactos sobre los ecosistemas, siendo un acercamiento a la realidad y un aporte al desarrollo y conocimiento del comportamiento de las cuencas hidrográficas y ecosistemas fluviales asociados, dentro de este contexto se deben conocer plenamente los elementos conceptuales y teóricos que rigen los caudales ambientales. Dada la urgente necesidad que existe en el país de conocer y aplicar criterios científicos adecuados para determinar el régimen de caudal ambiental en las cuencas, el proyecto de tesis de pregrado “Aplicación de métodos hidrológicos para determinar el Régimen de Caudal Ambiental (RCA) en la Cuenca Hidrográfica del Río Cali”, como avance en la gestión integrada del recurso hídrico en la región aplicable en otras regiones del país.



## 2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen grandes desafíos que configuran la crisis del agua en América Latina y el Caribe (ALC): una creciente urbanización (en el 2030 se proyecta una población urbana del 83%, con más de 600 millones de personas), globalización, contaminación, deforestación de cuencas, conflictos crecientes por uso de agua y suelo, entre otros factores, a los que se suman el efecto del Variabilidad Climática y Cambio Climático (Carvajal-Escobar, 2009).

Reconociendo que en Colombia existe una oferta apreciable de recursos hídricos, es importante tener en cuenta, una realidad estimada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, que se fundamenta en estimativos de la demanda para los años 2015 y 2025 efectúa una aproximación al posible agravamiento del desabastecimiento de agua tanto por la presión por su uso, como por las restricciones de su uso de la oferta por afectación de la calidad y la regulación (Ministerio de Medio Ambiente y IDEAM, 2008).

Debido a que el agua es considerada como un bien de uso público - propiedad del Estado, fundamental para el sostenimiento de la vida y la salud, genera para el Estado la obligación de satisfacer de una manera sustentable los diversos usos que sobre la misma se requieren, incluyendo el denominado caudal ambiental. Es por ello que se hace necesario realizar estudios específicos para determinar el régimen caudal ambiental, de tal forma que en las reglamentaciones sobre corrientes se garantice la satisfacción de las necesidades de acceso al recurso hídrico, tal como lo dicen los mandatos constitucionales. Factor que genera al Estado la responsabilidad de planificar, regular y controlar la cantidad, la calidad y el acceso al agua, en beneficio de la vida y la salud de los seres vivos (Palta, 2008).

En muchos de los proyectos de abastecimiento de agua, en la reglamentación de corrientes, en la construcción de hidroeléctricas, transvases de cuencas, extracción para la irrigación de cultivos de grandes terratenientes, y en las diferentes obras de regulación, han faltado estudios rigurosos del régimen de caudal ambiental que debe permanecer en el río para no afectar la vida misma en este y los servicios ambientales que presta a la comunidad. Además, se habla recientemente del impacto de la erosión hídrica traducida en la destrucción de los propios ecosistemas en los que ella se manifiesta, lo que también repercute en el sistema socioeconómico generando pobreza y marginalidad, particularmente entre la población rural (Castro 2008). Dicho lo anterior, este trabajo busca profundizar y proponer la aplicación de varios métodos hidrológicos para contribuir a la determinación del Régimen de Caudal Ambiental (RCA) en una cuenca torrencial andina del Valle del Cauca, caso Cuenca Hidrográfica del Río Cali, dada la necesidad de establecer medidas protección y adaptación al Cambio Climático y Variabilidad Climática de manera prioritaria, puesto que las presiones sobre la cuenca son cada vez mayores y la capacidad de resiliencia de los ecosistemas que la componen se ve más limitada, apuntando hacia la GIRH en la región y en el país.





### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo General

Emplear métodos hidrológicos para determinar el Régimen de Caudal Ambiental en la cuenca del río Cali.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización hidrológica del régimen natural de caudales de la cuenca del río Cali.
- Estimar y comparar el caudal ambiental de la cuenca del río Cali empleando diferentes metodologías hidrológicas.
- Delinear recomendaciones, para la determinación del régimen de caudal ambiental, de acuerdo los análisis de los resultados obtenidos, en el contexto colombiano.



#### 4. ANTECEDENTES

En muchos países a nivel mundial se han desarrollado y aplicado diferentes metodologías con el fin de definir un caudal ecológico, un caudal ambiental mínimo, de mantenimiento, régimen de caudal ambiental, etc. Las metodologías varían desde procedimientos sencillos de escritorio hasta el uso de herramientas computacionales complejas, con el uso de componentes hidrológicos, hidráulicos, biológicos,

Históricamente este tipo de caudales tiene su origen en EE.UU., donde se les denomina «instreamflow». Éste término, al principio se utilizaba para definir el caudal que era necesario para mantener las condiciones adecuadas, en un río o tramo de río, que requerían algunas especies acuáticas indicadoras con algún valor (como los peces para pesca deportiva) para su freza, conservación, maduración o cría y paso (Cachón de Mesa, 2000). Posteriormente, ésta definición se ha ampliado para abarcar los componentes del ecosistema fluvial completo (el cual incluye el nacimiento del mismo; el cauce en su totalidad; las zonas riparias; el agua del cauce y su naturaleza física y química; el agua subterránea asociada al cauce y las riberas; los humedales ligados al agua superficial o subsuperficial; la llanura de inundación; el estuario y el ecosistema marino litoral, cuando éste depende claramente de las entradas de agua dulce). De ahí que no sea muy apropiado el adjetivo «instream» puesto que son caudales para mantener áreas que no están realmente dentro de la corriente, pero que son críticas para el mantenimiento del ecosistema, las actividades asociadas con el río, tales como las recreativas, y diversos aspectos relacionados con el paisaje (el mantenimiento de la calidad estética o de las características de naturalidad, belleza y rareza) o con un interés científico o cultural (Cachón de Mesa, 2000). Además el caudal suministrado para fines ambientales debe reflejar la variabilidad intra e interanual del régimen hidrológico; así mismo, es el que define la geomorfología del cauce y sus llanuras de inundación, y por tanto las comunidades bióticas presentes en él, por lo que resulta imprescindible abandonar la idea de que el caudal con fines ambientales es un simple valor único de cantidad de agua y pasar a considerarlo como un concepto múltiple, compuesto por varios elementos que forman una estrategia, un protocolo o, si se prefiere, un instrumento para la gestión integral de los ecosistemas fluviales (Monsalve y Bustamante, 2006).

En Colombia han sido pocos los estudios realizados al respecto, dirigidos con un enfoque conservacionista, debido a que en la mayoría de los proyectos de aprovechamiento del recurso hídrico, sea superficial o subterráneo, la metodología empleada ha sido la del 10% del caudal medio anual e incluso la del medio mensual mínimo multianual. (Castro, 2008)

De los estudios realizados en Colombia se puede destacar el trabajo de Vásquez et al. (1998) en el que se lograron determinar los caudales ecológicos mínimos óptimos en las cuencas media y baja de los ríos Timba, Claro, Amaime, Tuluá y Pescador en el Departamento del Valle del Cauca. La metodología usada por los autores consistía en encontrar cuales eran las variables (hidrológicas, de calidad del agua, textura del sustrato) que mejor explicaran las variaciones de la comunidad en términos de índices biológicos (densidad, riqueza, diversidad, equidad) y de esta forma determinar el caudal mínimo óptimo que cumpliera con un número adecuado de especies, riqueza, diversidad y equidad en el tramo de estudio. Los resultados del análisis arrojaron caudales ecológicos que variaron entre el 10 y 80% del caudal medio anual registrado en los ríos en estudio (Castro, 2008)

En el municipio de Santiago de Cali (Departamento del Valle del Cauca) el DAGMA contrató a la empresa Ingenieros consultores INCOL S.A -ROCHE LTEE (2000) para que realizaran la determinación del caudal ecológico para los ríos Cali, Aguacatal, Cañaveralejo y Meléndez. Para ello se realizó un análisis de regionalización a partir de información pluviométrica y área drenante, y un análisis de frecuencia de mínimos, con los que posteriormente se determinaron caudales mínimos para diferentes períodos de retorno. En este proyecto había una seria confusión entre caudales ecológicos y mínimos extremos que solo ocurren una vez cada cierto período de tiempo, es decir que son sucesos ocasionales a los cuales las especies no están acostumbradas por largos periodos de tiempo.

Campo y Ruiz (2001) realizaron la estimación del caudal ecológico en el río Palace (Departamento del Cauca) haciendo uso de la metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) con el objeto de determinar si el caudal remanente después de derivar 0,50 m<sup>3</sup>/s para el acueducto de la ciudad de Popayán, era apto para mantener las especies ícticas y macroinvertebrados presentes en el río. Los resultados mostraron que el caudal ligado a la derivación de 500 l/s que representa el 6,78 % del caudal medio anual del río Palacé, impacta levemente la calidad global del ecosistema fluvial evaluada con el IFIM. El manejo de los caudales del Palacé con el desvío de 500 l/s salvaguarda los requerimientos ecosistémicos aguas abajo de la bocatoma, lo que le avala como un régimen ambiental de caudales válido.

REDRÍO (2003) es un proyecto coordinado por el grupo de investigación de la Universidad de Antioquia Ingeniería y Gestión Ambiental, GIGA. Este grupo hace seguimiento continuo a la cantidad y calidad del agua del río Aburrá - Medellín, en varios tramos, en sus principales quebradas afluentes y en las aguas subterráneas del Valle de Aburrá, con el fin de entregar información a la autoridad competente, en este caso el Área Metropolitana, para fijar políticas y criterios en la gestión del recurso hídrico.

Otra de las aproximaciones para determinar caudales ambientales que también cabe destacar fue la realizada en el río Chinchiná (Departamento de Caldas) por la Corporación Regional de Caldas a cargo de la empresa de consultoría Proagua (2005). En el estudio se obtuvo un régimen de caudales para la recuperación y protección de los ecosistemas fluviales representativos de cada el tramo del río en estudio. Para ello se usó la información geomorfología del cauce, la hidrología, los parámetros físicos químicos y biológicos de



calidad del agua, y algunos componentes socioeconómicos. Se usó la metodología del Caudal Básico de Mantenimiento (Palau, 1994) para determinar en primera instancia un régimen de caudal ambiental de manera hidrológica. Posteriormente se caracterizó la calidad del agua aplicando índices de calidad estandarizados de tipo fisicoquímico y de tipo biológico con el objetivo de definir un Factor de Calidad Ambiental, que multiplicaba al caudal calculado por el método de Palau, y generando a su vez un caudal de recuperación ambiental. Los resultados mostraron que el río presenta un alto nivel de alteración, lo que hacía que el caudal de recuperación ambiental representara entre un 26 y 66% del caudal medio mensual multianual.

En el Departamento del Quindío, Monsalve y Bustamante (2007) realizaron un estudio para determinar las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico enfocado básicamente en la caracterización biofísica del tramo, y establecer cuáles son los factores y variables necesarias para obtener a futuro inmediato una aproximación al caudal ecológico del río Quindío en el tramo Boquía – Puente Balboa. Para tal efecto se evaluó la variabilidad hidrológica del río, las características hidráulicas de las secciones, los aprovechamientos hidráulicos en la zona, calidad del agua desde el punto de vista físico químico e índices de contaminación acuática (ICA), y una caracterización limnológica de las comunidades bióticas de macroinvertebrados e ictiofauna. En general, de los cinco elementos analizados en este estudio, se estableció que tanto las características del canal (velocidad, profundidad, caudal, etc) y el componente biológico (macroinvertebrados e ictiofauna) presentan marcada relación; ya que las especies (capturadas en muestreos periódicos) son influenciadas fácilmente por las condiciones cambiantes del cauce (niveles altos, niveles bajos, rápidos, zonas lentas, etc), impuestas básicamente por la extracción de agua que hacen los aprovechamientos hidráulicos y la modificación de caudales presentes aguas

Castro (2008) El objetivo general de la tesis consistió en caracterizar el régimen de caudal ambiental en la cuenca baja del río Dagua basado en los factores hidrológicos, hidráulicos, físico químicos de calidad del agua y biológicos que inciden en su determinación, para el período y zona de estudio. Esta información permite apreciar y predecir efectos que sobre el mismo traería la construcción de una obra reguladora o futuras intervenciones humanas.

Céspedes (2012) seleccionó información relacionada con los caudales ambientales, con la metodología IFIM y con la herramienta PHABSIM, también reunió información de la cuenca del río Pance, única corriente utilizada actualmente como fuente de recreación en la ciudad de Cali y por tanto de gran importancia. Recopiló información hidrológica y realizó la caracterización hidrológica de la cuenca junto a levantamientos hidrotopográficos con los que se efectuó la simulación hidráulica utilizando PHABSIM en un tramo ubicado en la zona conocida como Burbujas, en la parte alta de la cuenca del río Pance.

En el departamento de Caldas (Parra, 2012) realiza la investigación en un proceso de planificación de siete pasos implementada en el Proyecto Traspase Manso, ubicado en el Departamento de Caldas, Municipios de Samaná y Norcasia. En este estudio se involucran

varios actores para satisfacer múltiples objetivos económicos, sociales y ecológicos. El proceso de siete pasos proporcionar un enfoque transparente y participativo hacia el logro de una visión común entre todas las partes interesadas. Esta metodología holística toma en cuenta la hidrología de la cuenca, el hábitat de idoneidad para la especie en peligro *Ichthyoelephas longirostris* y la capacidad instalada de la derivación del río Manso que alimenta el proyecto hidroeléctrico Miel I. El modelo PHABSIM muestra una mejor área ponderada útil con caudales mayores a  $4,00 \text{ m}^3/\text{s}$  para el pez, sin embargo el tramo trasvase posee secciones donde el organismo objetivo puede sobrevivir con un grado de estrés durante periodos cortos de bajo caudal como  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las simulaciones determinan que caudales menores de  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$  afectan considerablemente la pesca, refugio y el hábitat del pez. Se muestra los dos casos inherentes al proyecto Manso, el primero en donde el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la resolución número 1673 de 2009, determino un caudal de  $6,00 \text{ m}^3/\text{s}$  para el proyecto Manso y el segundo, donde la empresa ISAGEN S.A. en la revisión del caudal ecológico, manifiesta un caudal ecológico de  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$ . El resultado del mejor plan de generación está dado por la conciliación de las partes interesadas. En la aceptación y estén de acuerdo con cada uno de los datos y pasos aquí mostrados.



## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. MARCO CONTEXTUAL

#### 5.1.1. Contexto general de la situación mundial de los recursos hídricos

Aunque el agua es el elemento más abundante en la Tierra con un volumen total de alrededor de 1400 millones de  $\text{Km}^3$ , únicamente 2,53 % del total es agua dulce y el resto es agua salada. Aproximadamente las dos terceras partes del agua dulce se encuentran inmovilizadas en glaciares y al abrigo de nieves perpetuas. O en los acuíferos profundos de agua subterránea. Las fuentes principales de agua para el uso humano son lagos, ríos, la humedad del suelo, lagunas poco profundas de agua subterránea y embalses, que representan menos del 1% de toda el agua dulce. De los cuales el ser humano extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable y se apropia del 26% de la evapotranspiración anual y del 54% de las aguas de escorrentía accesibles. El control que la humanidad ejerce sobre las aguas de escorrentía es ahora global y el hombre desempeña actualmente un papel importante en el ciclo hidrológico. (World Water Assessment Programme, UNESCO 2003).

La distribución per cápita en el mundo es muy irregular: mientras Canadá dispone de cerca de 109.000  $\text{m}^3$  por habitante al año, en regiones como el Medio Oriente, 9 de 14 países cuentan con menos de 1.000  $\text{m}^3$  por habitante al año, lo que los coloca en la categoría de países que sufren de falta de agua. Adicionalmente, países como China, que posee el 20% de la población del mundo, sólo cuenta con el 8% del agua dulce disponible a nivel mundial (Postel 1992).

Del total de agua dulce utilizada en el mundo, se estima que el 65 % se destina para riego agrícola, el 25% para industria y el 10% para consumo doméstico, comercial y otros servicios urbanos municipales. Para el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34 % a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego. El consumo total de agua se ha triplicado desde 1950 y ahora sobrepasa los 4.300  $\text{Km}^3$  por año, equivalente al 30,70% de la dotación dulce renovable del mundo que se puede considerar como estable (PNUD 2009) , Si las tendencias actuales persistieran, antes de 2025 se espera que la demanda de agua dulce aumente en un 56%, más de la que es disponible actualmente. (Comunidades Europeas 2004).

Sobre todo durante los últimos 50 años, el suministro finito mundial de agua dulce ha estado sometido a presiones cada vez mayores y también ha sufrido una degradación de calidad.

Unos 2 millones de toneladas de desechos son arrojados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas (fertilizantes, pesticidas y residuos de pesticidas). (World Water Assessment Programme, UNESCO 2003) .en los países con una industrialización acelerada dichos desechos están generando metales pesados, ácidos y agentes contaminantes orgánicos persistentes que no solo terminan en las fuentes superficiales de agua sino en las capas acuíferas, contaminando de esta forma dos de las principales fuentes de agua dulce para el ser humano. (World Resources 1998). Es posible que disminuyan los caudales de los ríos en períodos de flujo escaso y la calidad del agua empeorará, sin duda, debido al aumento de las cargas contaminantes y de la temperatura del agua. Además Las estimaciones recientes sugieren que el cambio climático y la variabilidad climática serán responsables de alrededor del 20% del incremento de la escasez global de agua.

En la Región de América Latina y el Caribe ALC, el tema del agua es de especial importancia para el desarrollo. Aun cuando la Región es rica en recursos acuáticos renovables, y comprende más del 30% de los recursos hídricos RH del mundo con un escurrimiento medio anual de 13.120 km<sup>3</sup>, que representa el 30.8% del escurrimiento anual en todo el mundo La precipitación anual media en la región es del orden de los 1500 mm, más del 50 % del promedio mundial (Garcia 1998) Este recurso están distribuidos de manera muy irregular. Una gran parte de estos recursos, por ejemplo, se encuentran en la región de la Amazonía, en Perú, Colombia y Brasil, que tiene una baja densidad poblacional. Mientras que zonas áridas y semiáridas como el centro y norte de México, donde vive una gran parte de la población y que son el motor de la actividad económica nacional, sufren de una escasez constante de agua, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Tres cuencas hidrográficas en ALC (Golfo de México, La cuenca del Atlántico Sur y la Cuenca de la Plata), cubren el 25% del territorio, sostienen al 40% de la población y sin embargo poseen solo el 10 % de los recursos hídricos de la Región.

El déficit de la Región en agua y saneamiento se ha reconocido dentro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, donde se acordó reducir a la mitad la cantidad de personas en el mundo sin acceso a una fuente segura de agua o a un servicio de saneamiento. Actualmente a pesar de que el 86% de la población de la Región tiene acceso a una fuente de agua potable, sólo 49% tiene acceso a un servicio de saneamiento. Se estima que cerca de 150 de los casi 510 millones de habitantes de la Región no tienen acceso a una fuente segura de agua y casi 250 millones no reciben el servicio de alcantarillado. En Brasil, por ejemplo, sólo el 20% de las aguas negras reciben tratamiento, mientras que el resto es tirado a algún cuerpo de agua cercano. En la Región menos del 13% de las Aguas Residuales Municipales son tratadas antes de su descarga a algún río, lago o mar. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA 2003).

La desigualdad en el acceso a servicios de agua y saneamiento en ALC pueda haber empeorado a consecuencia de los flujos altamente desiguales de inversión privada en el sector. Éstos se han concentrado en las zonas más ricas de algunos países. Además, la mayoría de esta inversión se ha destinado al suministro de agua mientras que el saneamiento

ha recibido una atención mínima (Comunidades Europeas 2004). Las inversiones en mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los RH es insuficiente, en general la eficiencia en el uso del agua es baja; un 60% de la población habita en cuencas con ríos compartidos por dos o más países, lo cual constituye un reto para la gestión integral de cuencas, tomando en cuenta las enormes diferencias políticas, económicas, culturales y sociales en estos países; Las obras de infraestructura, por su parte, contribuyen a aumentar la crisis de los recursos hídricos en ALC. A pesar del desarrollo económico y la prestación de servicios especialmente en hidroelectricidad, dichas infraestructuras han provocado la interrupción de ecosistemas naturales y cambios en los regímenes hidrológicos en ecosistemas acuáticos además del desplazamiento de grandes poblaciones. A pesar de la lucha de las poblaciones latinoamericanas por un uso equitativo y sostenible de los recursos hídricos, aún no se ha logrado el empoderamiento de las poblaciones en la toma de decisiones ni una participación pública que permita equilibrar el gran abismo entre el acceso, uso y distribución equitativa de los recursos hídricos. (Guerrero, De Keizer y Córdoba, 2006)

Es difícil evaluar las consecuencias de los cambios de los ecosistemas y gestionarlos eficazmente debido a que muchas de las repercusiones tardan en ponerse de manifiesto, porque pueden manifestarse más claramente a cierta distancia del lugar en el que el ecosistema fue modificado, y además los costos y beneficios de los cambios suelen afectar a diferentes conjuntos de interesados directos; los servicios que los ecosistemas prestan para beneficio humano, tales como los servicios de provisión (alimento, fibra, agua, medicinas, etc.), de regulación (regulación de lagua, aire, clima, riesgos naturales, etc.), de soporte (ciclado de nutrientes, formación del suelo, control biológico) y los culturales (valores estéticos, espirituales, recreación y ecoturismo) aproximadamente el 67% de estos servicios están siendo degradados o se están utilizando de manera no sustentable. Entre ellos se encuentran aquellos que se derivan de las cuencas hidrográficas y los humedales, es decir que se está afectando directamente la provisión de agua dulce, la regulación de la erosión, la purificación del agua, el tratamiento natural de aguas residuales, la recarga de aguas subterráneas y la regulación de riesgos naturales, entre otros. (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA 2005).

**Tabla 1. Bienes y servicios que proveen los ecosistemas naturales a la humanidad, adaptado de UICN (2000)**

| Funciones de provisión  | Funciones de regulación  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer refugios a plantas y animales silvestres (y personas indígenas) para mantenerla diversidad biológica y genética.</li> <li>• Función de refugio (para especies residentes y migratorias).</li> <li>• Función de vivero (hábitat de reproducción para especies cosechables).</li> <li>• Recursos que proporcionan los ecosistemas naturales y seminaturales.</li> <li>• Alimento (plantas y animales comestibles).</li> <li>• Materia prima (paja, telas, etc.)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacidad de ecosistemas naturales y seminaturales para regular procesos ecológicos esenciales y sistemas que sustentan la vida.</li> <li>• Mantenimiento de ciclos biogeoquímicos (regulación de la calidad del aire y amortiguación de CO<sub>2</sub>).</li> <li>• Regulación del clima (amortiguar extremos).</li> <li>• Regulación del agua (protección contra inundaciones).</li> </ul> |

| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustibles y energía (recursos renovables de energía).</li> <li>• Forraje y fertilizante (krill, materia orgánica).</li> <li>• Recursos medicinales (medicinas, modelos, organismos para pruebas).</li> <li>• Recursos genéticos (para resistencia de cultivos).</li> <li>• Recursos ornamentales (peces de acuario, recuerdos).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministro de agua (filtración y almacenamiento).</li> <li>• Retención de suelos (control de erosión).</li> <li>• Tratamiento de desechos (purificación de agua).</li> </ul>   |
|--|---|
| Funciones de soporte   | Funciones culturales  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclado de nutrientes. (o mantenimiento de la disponibilidad de nutrientes esenciales).</li> <li>• Formación de suelos y mantenimiento de fertilidad.</li> <li>• Control biológico (control de plagas).</li> <li>• Polinización</li> <li>• Fijación de bioenergía.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer oportunidades para reflexión, enriquecimiento espiritual y desarrollo cognoscitivo.</li> <li>• Información estética (paisajes valiosos).</li> <li>• Recreo y ecoturismo.</li> <li>• Inspiración cultural y artística (o sea, la naturaleza como motivo y fuente de inspiración para la cultura humana y el arte).</li> <li>• Información espiritual e histórica (basada en consideraciones éticas y valores patrimoniales). Información educativa científica (o sea, la naturaleza como laboratorio natural en el terreno y áreas de referencia).</li> </ul> |

### 5.1.3. Revisión de marcos normativos respecto al caudal ambiental en Colombia

Reconociendo que en Colombia existe una oferta considerable de recursos hídricos de conformidad con lo planteado sobre los recursos internos de agua dulce per cápita- metros cúbicos correspondientes a 57,000 m<sup>3</sup> anuales por habitante (Sánchez, Yewande y Kulsum, 2007), es necesario tener en cuenta una realidad estimada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM que con fundamento en estimativos de la demanda 2015 y 2025 efectúa una aproximación al posible agravamiento del desabasteciendo de agua tanto por la presión, por su uso, como por las restricciones de su uso, de la oferta, por afectación de la calidad y la regulación (IDEAM, 2008).

La Constitución Política de Colombia de 1991, consagra de múltiples maneras la protección y defensa del medio ambiente así: como una obligación que está bajo la responsabilidad del Estado y de los particulares, como un derecho y un deber colectivo, como un factor determinante del modelo económico del Estado y como una limitación al ejercicio pleno de derechos económicos.

Desde el preámbulo se incorporan los cometidos del Estado, uno de ellos y quizás el más importante es del garantizar la vida del pueblo colombiano, en este lugar la protección de los recursos naturales y en forma específica del agua, juega un papel de suma importancia pues hoy reconocemos que proteger los recursos hídricos es proteger la vida misma (Palta, 2008).

El agua considerada como un bien de uso público de propiedad del Estado fundamental para la vida y la salud, genera para el Estado la obligación de satisfacer de una manera sustentable los diversos usos que sobre la misma se requieren, incluyendo el ambiental en el cual se sustenta el concepto de caudales ecológicos. Por los mandatos constitucionales, la satisfacción de necesidades de acceso al RH le generan al Estado la responsabilidad de planificar, regular y controlar la cantidad, la calidad y el acceso al agua, en beneficio de la vida y la salud de los seres vivos, en este aspecto los caudales ambientales deben ejercer un papel privilegiado pues desde la concepción que se tenga de ellos se puede garantizar la protección del derecho colectivo a un medio ambiente sano.

Con la expedición de la Ley 99 de 1993, se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Como componentes del SINA, se encuentran las orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales contenido en la mencionada Ley.

La distribución de competencias en el marco institucional colombiano, regulada por la Ley 99 de 1993, es una forma de desarrollar el principio constitucional de la descentralización administrativa, pues reconoce la existencia de entidades con personería jurídica propia, con autonomía administrativa y financiera, encargadas de administrar y planificar desde sus ámbitos territoriales regionales y/o locales los recursos naturales renovables.

A continuación se tratarán las principales normas que regulan actualmente la distribución y manejo del RH, para determinar si con ellas se le proporciona al agua un espacio como usuario del ambiente y si se le garantiza la protección frente a otros usuarios.

En el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables, Decreto-Ley 2811 de 1974, se encuentra como principio que el Estado y los particulares deben participar en la preservación y manejo de los recursos naturales, que son de utilidad pública e interés nacional; en esta norma se determinan los modos de adquirir el derecho al uso de las aguas, dentro de ellos se encuentran las concesiones, entendidas como el otorgamiento del derecho a aprovecharlas sujeto a las disponibilidades del recurso y a las necesidades que imponga el objeto por el cual se destina.



En materia específica sobre la administración del agua y sus cauces, el Código Nacional de Recursos Naturales, estableció de una manera muy general, la facultad del gobierno nacional de reservar aguas de una o varias corrientes o parte de dichas aguas, sin establecer una finalidad específica y un procedimiento especial, este vacío parece estar solucionado con el Decreto 1541 de 1978.

El Decreto 1541 de 1978 reglamentario del Decreto-Ley 2811 de 1974 dictado para reglamentar las normas relacionadas con el agua en todos sus estados, consagro en el artículo 37 que el suministro de aguas para satisfacer concesiones está sujeto a la disponibilidad del recurso y que el Estado no es responsable cuando por causas naturales no pueda garantizar el caudal concedido. Este decreto se encargó de establecer prioridades para el otorgamiento de las concesiones de agua, entendidas como la forma de adquirir el derecho a usarlas. Además determinó que el orden de prelación puede variarse atendiendo a las necesidades económicas y sociales de la región, y de acuerdo a varios factores, entre los que se encuentran: La preservación del ambiente y la necesidad de mantener reservas suficientes del RH.

El Decreto 1541, establece además que para la administración, conservación y manejo del RH, el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente — Inderena, tendrá a su cargo entre otras responsabilidades las de: Reglamentar el aprovechamiento de las aguas de uso público, superficiales y subterráneas, distribuyendo los caudales para los usos contemplados en el artículo 36 del Decreto, reservar las aguas de una o varias corrientes o depósitos o parte de dichas agua y declarar el agotamiento cuando haya lugar. En cuanto a las reservas consagro que pueden ser decretadas para cualquiera de los siguientes fines: organizar y facilitar la prestación de un servicio público; adelantar programas de restauración, conservación o preservación de la calidad de las aguas, de su caudal o de sus cauces, lechos o playas, o del ambiente de que forma parte; adelantar estudios o proyectos que puedan conducir al uso de las aguas, cauces o lechos por parte del Estado; mantener una disponibilidad de aguas publicas acorde con las necesidades del país; para desarrollar programas de acuicultura, proteger criaderos de peces y mantener el medio ecológico de la fauna y flora acuática dignas de protección, y para el establecimiento de zonas de manejo especial en desarrollo de los artículos 137, 138, 308 y 309 del Decreto-Ley 2811 de 1974.

Por otra parte el Decreto 1594 de 1984, reglamentario del Decreto-Ley 2811 de 1974, señala en la entidad encargada del manejo y administración del recurso (en su época EMAR), la obligación de desarrollar el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico para destinar las aguas en forma genérica a los diferentes usos; para ello, determino que debe tenerse en cuenta entre otros criterios el de la preservación de las características naturales del recurso, esto involucra cantidad y calidad.



La Ley 357 del 21 de enero de 1997, por medio de la cual se aprueba la "Convención relativa a los humedales de importancia intencional especialmente como hábitat de aves acuáticas", suscrita en Ramsar el 2 de febrero de 1971, considera las funciones ecológicas fundamentales de los humedales como reguladores de los regímenes hidrológicos y como hábitat de una fauna y flora características, especialmente de aves acuáticas. Esta Ley define a los humedales como las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros.

Mediante las Resoluciones VII.7 y VII.18 adoptadas en la 7° Conferencia de las Partes Contratantes celebrada en San José en 1997, se adoptaron directrices sobre la conservación y el uso racional de los humedales y se lijaron lineamientos para integrar la conservación y uso racional de los humedales en el manejo de las cuencas hidrográficas, dentro de estos últimos se encuentran disposiciones que desarrollan el manejo de caudales ecológicos, como: la realización de estudios destinados a determinar el régimen de caudales mínimos e ideales para el mantenimiento de ecosistemas de humedales, establecimiento de caudales óptimos para el mantenimiento de ciertos humedales y sus funciones ecológicas esenciales, el uso del principio precautorio en aquellas situaciones en las cuales la información necesaria para la fijación de caudales es inadecuada, el desarrollo de planes de asignación de agua para todos los usuarios del recurso, incluyendo los humedales.

La Ley 165 del 9 de noviembre de 1994, por medio de la cual se aprueba el "Convenio sobre la diversidad biológica", hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992, contiene fundamentos jurídicos según los cuales las partes contratantes tienen la obligación de adoptar o desarrollar estrategias, planes y programas nacionales, para la conservación y el uso sustentable de la diversidad biológica además de integrarla en planes, programas y políticas sectoriales. En materia de conservación in situ, el Convenio de Diversidad Biológica, estipuló disposiciones que están orientadas a la conservación de la biodiversidad, incluyendo la regulación de los caudales ambientales, desafortunadamente hoy no se cuenta con un marco reglamentario articulado y completo que permita llevar a la práctica los postulados que consagra, pues se han expedido normas especiales para diferentes ecosistemas tales como, los páramos y los humedales (Resoluciones No. 769 del 2002, 157 de 2004, 0196 del 1 de febrero de 2006) que analizadas no reflejan el nivel de protección que debería tener los caudales ambientales.

Mediante la Resolución 1284 del 30 de junio del 2006 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental - EIA", para la construcción de presas, represas y embalses con capacidad mayor a 200 millones de m<sup>3</sup> en operación de agua y se adoptan otras determinaciones.

En relación con los aspectos concernientes al Caudal Ambiental, la Resolución en mención, determina los requisitos del estudio de impacto ambiental a cargo del peticionario de la licencia ambiental, entre los cuales se encuentra la estimación de los caudales aprovechables y del caudal remanente a dejar aguas abajo del sitio del proyecto, incluyendo el caudal ecológico. Frente a esta norma se considera que pone en peligro los caudales ambientales que deben considerarse y regularse, aguas arriba del proyecto, toda vez que lo que ocurre en materia de calidad y cantidad en la cuenca alta influye en la media y en la baja.

Para el caso de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) como instrumento técnico y normativo de planeación y gestión de largo plazo, materializado en un conjunto de acciones y políticas, administrativas y de planeación física, que orientarán el desarrollo del territorio municipal por los próximos años y que regularán la utilización, ocupación y transformación del espacio físico urbano y rural. Contempla la delimitación de las áreas de reserva para la protección del medio ambiente y los recursos naturales incluyendo áreas de amenazas y riesgos y Determinación de los sistemas de aprovisionamiento de los servicios de agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales, pero en síntesis la noción de caudal ambiental no es contemplada como instrumento para la toma de decisiones frente a la gestión del RH en los territorios (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2004).

Pero en lo sustancial la normatividad no es clara al respecto, incluso en el Proyecto de Ley 365 de 2005 (Congreso de la República, 2005) “por el cual se establecen Medidas para orientar la planificación y administración del Recurso Hídrico en el territorio nacional”, incluye el denominado caudal ecológico y, establece que las autoridades ambientales deben fijar dicho caudal con base en estudios técnicos, pero mientras no se disponga de éstos para el río o tramo del mismo, se considera como caudal ecológico el que permanece en la fuente el 90% del año, valor que no garantiza ni la vida acuática, ni la sustentabilidad del ecosistema, ni los servicios ambientales que presta. En el Estudio Nacional del Agua (2008) realizado por el IDEAM se plantea como caudal ecológico el caudal mínimo estimado a partir de la curva de duración de caudales medios diarios, se considera entonces que el caudal que permanece en la corriente durante 75% del tiempo representa el mínimo que podría fluir por el cauce una vez se realicen las captaciones; criterio también aconsejado para realizar el cálculo de índices de escasez para aguas superficiales (Resolución 865 de 2004 - por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones).

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, con el decreto 3930 de 2010 Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 111-Libro 1/del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones, define el caudal ambiental como “*El volumen de agua*

*necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de una fuente”. Adicionalmente el decreto en su artículo 6 menciona los aspectos mínimos del Ordenamiento del Recurso Hídrico citando en su parágrafo 5 que “la oferta hídrica total y disponible, considerando el caudal ambiental”. Esta noción legal aporta elementos claves para el fortalecimiento de la GIRH, pero falta precisar en lo procedimental, en términos del cómo se establecerán las asignaciones de agua dado que el territorio nacional cuenta con diferentes escenarios ambientales que no pueden ser intervenidos de la misma forma, dado la diferencia de alturas, distribución de la precipitación, biodiversidad y actividades económicas que se desarrollan en cada zona.*

En cuanto, a los planes de Gestión del Riesgo, los cuales están relacionados con procesos de desarrollo municipal, el riesgo y los desastres; se sustenta que el proceso de desarrollos según sus características, constituye las condiciones de riesgo, por ende, se induce a los desastres, lo que a su vez frena y retrasa el desarrollo mismo, aunque la figura de caudal ambiental no es explícita, cabe anotar que los planes de gestión del Riesgo son una herramienta en el proceso de planificación para balancear la argumentación técnica en conjunto con la interpretación social y política en la definición y priorización de los problemas municipales (Banco Mundial, 2010), y el no tener en cuenta la figura de caudal ambiental o alguna aproximación hacia la GIRH deja la posibilidad de que estas visiones de conservación y preservación no se direccionen en el planteamiento de las soluciones que se ajusten a mitigar la problemática social, cabe anotar que la construcción de los objetivos y metas según la disponibilidad de recursos, manteniendo la visión sobre el futuro deseado, junto al fortaleciendo la identidad cultural deben partir desde los actores sociales y no solo desde las autoridades territoriales.

Por otra parte la Política Nacional para la GIRH de 2010, hace énfasis en la administración del recurso hídrico; teniendo presente las capacidades institucionales y las condiciones del recurso en la jurisdicción de cada autoridad ambiental competente, partiendo de la ordenación del recurso, considerando la oferta, la demanda y el balance hídrico; considerando además de la cantidad y calidad de aguas superficiales y aguas subterráneas, los usuarios legales, usuarios de hecho del recurso tanto para aprovechamiento como para vertimientos, la disponibilidad del RH, accesibilidad y asequibilidad, se incorpora el caudal ecológico en la cual no es explícita su aplicación o puesta en marcha en la GIRH, se considera como parámetro en la ordenación del recurso para así determinar los usos del mismo (destinación y los objetivos) visibilizando y destacando la importancia de la demanda de agua necesaria para mantener los ecosistemas que dependen del RH, sin los cuales nuestra propia sobrevivencia no sería posible e identificar los conflictos por acceso ya sean existentes o potenciales. En caso de existir o preverse posibles conflictos futuros, la autoridad ambiental deberá optar por reglamentar la respectiva corriente hídrica distribuyendo y asignando el caudal disponible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Los Planes de Ordenación y Manejo Cuencas Hidrográficas (POMCA) se establecen como instrumentos propicios para que tanto en su formulación e implementación se construyan escenarios que permitan el desarrollo de la gobernanza del agua, reflejando los acuerdos y compromisos entre el poder público, la sociedad civil, las comunidades étnicas y los sectores económicos, haciendo necesaria la consideración justa y equitativa de las necesidades y responsabilidades existentes en la cuenca hidrográfica, aunque en los POMCA se incorpora la gestión del riesgo en el cual se contempla la probabilidad de ocurrencia de fenómenos amenazantes de origen natural en la cuenca hidrográfica, que pueden afectar gravemente las áreas de importancia estratégica para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, los asentamientos humanos, la infraestructura estratégica y las áreas donde se desarrollan actividades productivas, se busca establecer las medidas para evitar el deterioro de los recursos naturales; sin embargo no existe desarrollo suficiente para su adecuada implementación, por ello avanzar en el conocimiento de los ecosistemas y el establecimiento de límites de uso y aprovechamiento del RH, como lo es el caudal ambiental, es apostarle al compromiso de la sociedad con el medio ambiente y el desarrollo sustentable (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

De acuerdo con Castro (2008) El cálculo del Régimen de Caudal Ambiental sigue siendo flexible, dejando al libre albedrío la decisión de realizar un estudio técnico y bien fundamentado del tema, o si se hace y éste afecta la viabilidad del proyecto, se condiciona el estudio a la conveniencia de intereses particulares. La falta de reglamentación y conocimiento en este sentido, ha dejado en libertad al diseñador o extractor de conservar en el río solo el 10% del caudal medio anual y en algunos casos del mínimo anual; criterio que no tiene fundamento teórico ni técnico, y es más bien copia de reglamentación extranjera.

#### 5.1.2. Variabilidad climática y cambio climático.

La Variabilidad Climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante periodos de tiempo relativamente cortos. Esta incluye los extremos y las diferencias de los valores mensuales, estacionales y anuales con respecto a los valores climáticos esperados (medias temporales). El grado de magnitud de la variabilidad puede describirse por la diferencia presentada entre las estadísticas a largo plazo de un elemento climático y las obtenidas para un periodo de menor longitud. (IDEAM, 2002).

El Cambio Climático es un fenómeno que produce variaciones en el clima en diferentes escalas de tiempo, que van desde décadas hasta millones de años, y puede ser resultado de muchos factores, como el cambio en la actividad solar, largos periodos de cambios en los elementos orbitales de la tierra, procesos naturales internos del sistema climático o forzamientos antropogénicos como el aumento de concentraciones de gases en la atmósfera. Generalmente, el término Cambio Climático, se utiliza para denotar un cambio

significativo en los valores medios de elementos meteorológicos (temperatura, precipitación, nivel del océano, etc.) en un intervalo de tiempo de una década o superior (Carvajal,2006).

Es evidente que las alteraciones climáticas traen diferentes efectos sobre la sociedad y el medio ambiente, de acuerdo con el IPCC (2001), se necesita más investigación para mejorar la capacidad de detectar, asignar y comprender el cambio climático, reducir las incertidumbres y proyectar los cambios climáticos futuros; su importancia radica principalmente en la generación de planes de adaptación eficientes junto con políticas de gestión sobre poblaciones y los recursos naturales ante las variaciones en el clima a escala regional y local. Sobre la base de cada vez más pruebas, existe una gran confianza en que lo que ocurre sobre los sistemas hidrológicos como el aumento o disminución de la escorrentía, la variación en muchos glaciares y la nieve que alimenta los ríos, el calentamiento de los lagos y los ríos de muchas regiones, los efectos en la estructura térmica y la calidad del agua están estrechamente relacionados con el CC (IPCC, 2007).

Los impactos específicos del CC son difíciles de identificar y el debate continúa acerca de cuáles patrones de cambio obedecen a factores antrópicos y cuales a los ciclos climáticos naturales. No obstante, su impacto sobre los sectores más vulnerables de la sociedad, se hace cada vez más evidente (Carvajal, 2005).

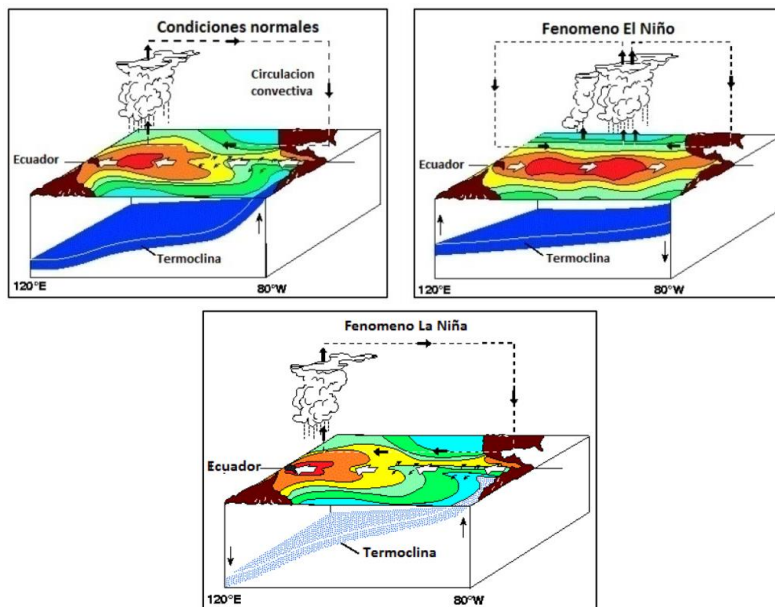


Figura 1. Representación de las condiciones oceánicas y atmosféricas del ENOS y Normal Fuente: NOAA y TAO (2011)

#### 5.1.4. El caudal ambiental en el marco de la gestión integrada del recurso hídrico

Los patrones de acceso al agua son reflejo, entre otros factores, de los patrones de desigualdad de los que adolece toda la humanidad (PNUMA 2003). La aproximación

tradicional sectorial y fragmentada del manejo de los RH ha llevado comúnmente a conflictos de interés en los organismos de gobierno. Los objetivos de política han sido establecidos sin considerar las implicancias para otros usuarios de agua y sin consultarlas entre las fronteras sectoriales e institucionales. Como resultado, la disponibilidad de los recursos financieros y ambientales, no han sido utilizadas para maximizar el bienestar social total (GWP y TAC, 2000)<sup>1</sup>. A medida que se va intensificando la crisis del agua, los gobiernos del mundo entero presionados por las grandes multinacionales están abogando por una solución radical: la privatización, la reificación y el desvío masivo de las aguas. Los partidarios de este sistema opinan que esta sería la única manera de poder abastecer a los lugares del mundo donde se padece sed. Empero, sabemos por experiencia (Cochabamba, Bolivia) que la venta del agua en un mercado abierto no sirve para colmar las necesidades de los pobres y sedientos. Muy al contrario, el agua privatizada termina en manos de quienes pueden pagar por ella, (Barlow, 2001). La Global Water Partnership impulsa la implementación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como estrategia para enfrentar la crisis del agua y reconocen al agua como elemento vital para los seres humanos, la naturaleza y el desarrollo sustentable de los países.

La GIRH va encaminada al desarrollo y gestión sustentable el RH en la cual se debe abordar los problemas prioritarios del agua que afectan a la sociedad. Como resultado de esto se pueden lograr acciones enfocadas que progresen gradualmente hacia la GIRH. Más comúnmente, el reconocimiento de que los problemas de agua son los síntomas del más profundo fracaso de los sistemas de gestión del agua, conduce a la planificación a largo plazo con una agenda para el uso más sustentable del RH. La identificación del agua como un factor clave en la reducción de la pobreza y el desarrollo sustentable, impulsa también la planificación nacional con respecto al agua. Además, busca introducir un elemento de democracia descentralizada en la manera en la que se gestiona el agua, con énfasis en la participación de los interesados y la toma de decisiones en el nivel más bajo posible (Cap-Net, GWP y PNUD, 2005).

Es necesario un cambio fundamental en las políticas de manejo del agua de modo que se incorpore una visión más amplia de la naturaleza dinámica de los recursos de agua dulce y de los beneficios que ellos proporcionan a corto y a largo plazo. Que asignen más equitativamente el recurso agua entre el funcionamiento natural del ecosistema por un lado y las necesidades extractivas de la sociedad por el otro. (Baron et al., 2003)

En la mayoría de los países de ALC los derechos de agua no están subordinados a los efectos que puedan tener en el medio ambiente ni pueden ser modificados para reducir un peligro para el medio ambiente. Castro (2008) citando a Lee (1990) expresa que las tendencias

---

<sup>1</sup>Global Water Partnership (Asociación Mundial para el Agua) y Technical Advisory Committee (Comité de Consejo Técnico).

actuales indican que, a menos que se formule y ponga en práctica efectivamente una política sostenible sobre ordenación de los recursos hídricos, la base de estos recursos se ha de deteriorar con cada vez mayor rapidez. A nivel operacional, el desafío es traducir los principios acordados con participación democrática de sectores e instituciones en acciones concretas que garanticen la sustentabilidad del RH (GWP y TAC, 2000).

La GIRH debe tomar en cuenta los usos múltiples del recurso por los diferentes sectores: agricultura, industria, energía, consumo doméstico, recreación, pesca, acuicultura. Hay que dar su lugar al gasto de agua que requieren los ecosistemas. Considerando el nivel de caudales renovables de cada zona y cada cuenca como límites naturales que deben ser conocidos y respetados (Arrojo y Gracia, 2000) para mantener sus funciones y productividad, de este modo los caudales ambientales forman parte una gestión sustentable del RH para que así se pueda seguir gozando de los recursos y servicios que ofrecen los ecosistemas.

Los caudales ambientales no son solo para proteger animales y plantas. Son indispensables para tener un sistema fluvial saludable y en buen funcionamiento. Siendo un esfuerzo serio para corregir situaciones en las que la regulación del río ha sobrepasado con mucho el punto óptimo para todas las partes afectadas. También es importante considerar que los caudales ambientales solo garantizarán un río saludable en la medida en que formen parte de un conjunto más amplio de medidas, tales como protección de suelos, prevención de la contaminación y protección y restauración de hábitats (Dyson et al., 2003).

#### 5.1.5. Importancia de los bosques interandinos

Los estudios sobre los bosques andinos son aún demasiado precarios como para clasificarlos. Así, se ha sugerido la identificación de las variables que alteran las condiciones de los bosques andinos mediante la demarcación de gradientes ambientales más conspicuos, que sirvan para identificar condiciones que cambian la estructura y la composición de dichos bosques (Beck et al., 2008).

En este contexto, es obvio que la altitud es el factor ambiental que más modifica a los bosques andinos, y así se definen tres tipos principales: bosque montano bajo o subandino, bosque montano alto y bosque alto-andino o bosque de niebla (Rada, 2002;).

En sentido general, los bosques andinos no tienen un rango de altitud definido, pues se encuentran distribuidos en altitudes diferentes dependiendo de las condiciones ambientales de cada sitio y de su exposición a las corrientes de masas de aire humedecido. No obstante, generalmente se ubican en altitudes que oscilan entre los 1000 y 3500 msnm en las áreas tropicales (Rangel, 2000)



De acuerdo con Tobón (2009) como resultado del amplio rango altitudinal de los bosques Andinos, se observa toda una gama de condiciones ambientales, físicas y geográficas. Esto permite un desarrollo natural de los bosques, con lo que se conforman ecosistemas variados y, a la vez, se contribuye a la gran oferta de servicios ambientales que proporcionan estos ecosistemas, que van desde la regulación de caudales y el rendimiento hídrico, hasta escenarios de belleza escénica incomparable. Específicamente, los bosques andinos actúan como reguladores hídricos, poseyendo, junto con la Amazonía, gran parte del agua dulce terrestre. Los bosques de niebla (alto-andinos) presentan una dinámica hídrica poco convencional (Bruijnzeel, 2001), que radica principalmente en que la niebla y la lluvia transportadas por el viento se convierten en un aporte adicional de agua (Tobón, Gil y Villegas, 2008) y de nutrientes (Beiderwieden Wrzesinsky y Klemm, 2005) al sistema. Todo esto, como resultado de la capacidad que tienen estos bosques para interceptar el agua de la niebla y de la consecuente disminución de la transpiración (Ferwerda et al., 2000).

Los bosques, además de su función de depósito de la biodiversidad, proveen otros beneficios indirectos a nivel local. Así los bosques naturales de baja perturbación estabilizan el paisaje. La acción compactadora de las raíces de los árboles disminuye la erosión, lo que a su vez reduce la sedimentación, protege los ríos, y las zonas costeras y pesqueras. Ellos controlan la química de las aguas en los acuíferos y en las fuentes y lagos, protegiendo por consiguiente los recursos pesqueros. Los bosques protegen la humedad del paisaje en períodos de sequía y prevén la desertificación y los desastres naturales causados por los deslizamientos y las crecientes. Todos los bosques juegan un papel central en el ciclo de elementos nutrientes, que incluye el nitrógeno, el potasio, el fósforo etc. La productividad de muchos ecosistemas boscosos está vinculada directamente con la actividad biológica de hongos y de los diversos microorganismos del suelo lo cual es descomponen la materia orgánica, reciclan nutrientes y fijan el nitrógeno. Los árboles absorben y depositan los nutrientes, previniendo que ellos escurran y causen contaminación en las fuentes de agua, así como empobrecimiento del suelo. (Saile y Torres, 2004).

De acuerdo con TEEB (2010), se estima que la contribución de los bosques y de otros ecosistemas representa entre el 47% y 89% de los medios de vida de la población rural, a través de los servicios ecosistémicos y otros beneficios directos. De ahí surge la importancia de la conservación y preservación para reducir la pobreza.

El aumento en la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, asociados a la Variabilidad Climática y/o al Cambio Climático se ha convertido en el principal problema ambiental del siglo XXI, al hacer más vulnerables las sociedades humanas. Se analizaron los impactos del fenómeno ENOS en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Cali, encontrando correlaciones significativas de Variables Macroclimáticas (VM) asociadas al



ENOS con las precipitaciones mensuales y con el caudal de sus principales afluentes (CVC, 2011).

Jaffe, Rivas y Ardila (2013) señalan que la pérdida de los bosques afecta directamente a los agricultores familiares. Por un lado, disminuye sus opciones de desarrollo y, por otro, produce variaciones climáticas que debilitan sus actividades productivas agropecuarias. La última década se ha caracterizado por fuertes fenómenos climáticos, con devastadores efectos para la humanidad y especialmente para la pequeña y mediana agricultura, que no dispone de medios para restablecer su capacidad productiva. El control de la deforestación y degradación de los bosques debe ser un elemento por considerar en las políticas públicas de la región, no solo porque presenta las mayores tasas de pérdida de cubierta forestal en el mundo, lo cual impacta seriamente los medios de vida de las poblaciones rurales que ahí habitan, sino que también por su importancia en la mitigación del cambio climático a nivel global.

#### 5.1.6. Errores comunes en la determinación del caudal ambiental

A nivel mundial se han desarrollado diferentes conceptualizaciones respecto al caudal ambiental y el análisis cuantitativo de las diferentes metodologías han presentado ciertos errores para su determinación y aplicación en un sistema hídrico, limitando esas metodologías en cuanto a sustentabilidad de los recursos y el mantenimiento de los servicios que prestan los ecosistemas.

De acuerdo con Carvajal (2010) entre los errores más comunes que se cometen en el momento de estimar el RCA en nuestro contexto son: no se puede considerar su estimación como un asunto secundario, cuando es de relevante importancia para el manejo sustentable del RH, en la mayoría de los ríos, no se han establecido objetivos ambientales específicos, la consideración de ver el RCA como un dato puntual, desconoce entre otros aspectos, que la variabilidad hidrológica permite regular muchos procesos ecológicos como el transporte y remoción de sedimentos, nutrientes, renovación de comunidades, ciclos vitales, incorporación de material orgánico; creación de zonas de reposo, recuperación, etc. Frecuentemente, se confunde el RCA con el caudal necesario para diluir carga contaminante y mejorar la calidad del río, cuando un río contaminado requiere acciones previas para recuperar sus condiciones antes de aplicar una metodología para determinar el RCA. Otro error, es considerar que el RCA aplica solo al río y no a la cuenca, lo que significa examinar la cuenca desde sus fuentes hasta los entornos costeros y estuarios, incluyendo humedales, llanuras de inundación, sistemas conexos de aguas subterráneas y los valores ambientales, económicos sociales y culturales en relación con el sistema total, cuando las presiones en estas, configuran amenazas también para los RCA, variando el grado de afectación, según cada caso en particular, donde la evaluación de los impactos se desarrollan en la carencia cuantitativa y cualitativa de información sobre las condiciones de las cuencas hidrográficas.

Teniendo en cuenta lo mencionado por Dyson, Bergkamp y Scanlon (2003) al tomar medidas para una gestión que favorezca caudales ambientales se pone sobre la mesa la disputa sobre el acceso y propiedad del agua y de los derechos a la misma procurando comprender que el ecosistema asociado es también usuario del RH que regula.

## 5.2 MARCO TEORICO

### 5.2.2. La Precipitación

La precipitación es el nombre dado al agua que se deposita en la superficie terrestre proveniente de la atmósfera y se constituye en uno de los componentes principales del ciclo hidrológico, pues es ésta en general la principal fuente de abasto de agua a una región (Jiménez, 1986).

La atmósfera que cubre la esfera terrestre es el medio en el cual la humedad del ambiente mediante la acción de diversos mecanismos se transforma físicamente para caer en diversas formas. La condensación o congelamiento del vapor de agua se produce por el enfriamiento de masas de aire húmedo y por el agrupamiento de las moléculas de agua en torno a la presencia de núcleos o partículas de varias sustancias (Jiménez, 1986).

Si se supone una distribución espacial uniforme de la precipitación, existen diferentes metodologías para determinar la precipitación media sobre una zona determinada, a partir de información hidroclimatológica puntual. Los métodos más precisos y de fácil aplicación son el método de las isoyetas y el método de los polígonos de Thiessen.

El método de Polígonos de Thiessen proporciona un promedio ponderado de los registros pluviométricos, a partir de estaciones que tienen influencia sobre el área de interés. Para asignar el grado de influencia o ponderación en un mapa de la subcuenca se unen los puntos de las estaciones mediante líneas rectas a las cuales se les traza las mediatrices formando polígonos. Los lados de los polígonos conforman el límite de las áreas de influencia de cada estación (Lobo, 2004).

Si se considera que la distribución espacial de la precipitación no es uniforme, las alternativas que contemplan son, por una parte, la utilización de datos obtenidos mediante radar, que proporcionan los valores registrados directamente sobre una cuadrícula. Por otro lado, se puede utilizar también un algoritmo que proporciona el valor de la precipitación en un punto, o en una zona de pequeña extensión, como media ponderada de los valores registrados en diferentes pluviómetros, con coeficientes de ponderación que tienen en cuenta el inverso del cuadrado de la distancia al pluviómetro correspondiente (GESHA et al., 2004).

### 5.2.2. Caudales

El régimen de caudales de una corriente de agua en un periodo de tiempo determinado es la única variable que se puede medir con precisión, las otras variables climatológicas como la precipitación, la temperatura, el brillo solar, etc., solo pueden ser estimadas a partir de mediciones en diferentes puntos de la cuenca o con fórmulas hidrológicas, la aproximación de la medida depende de la herramienta de medida o de la fórmula hidrológica utilizada.

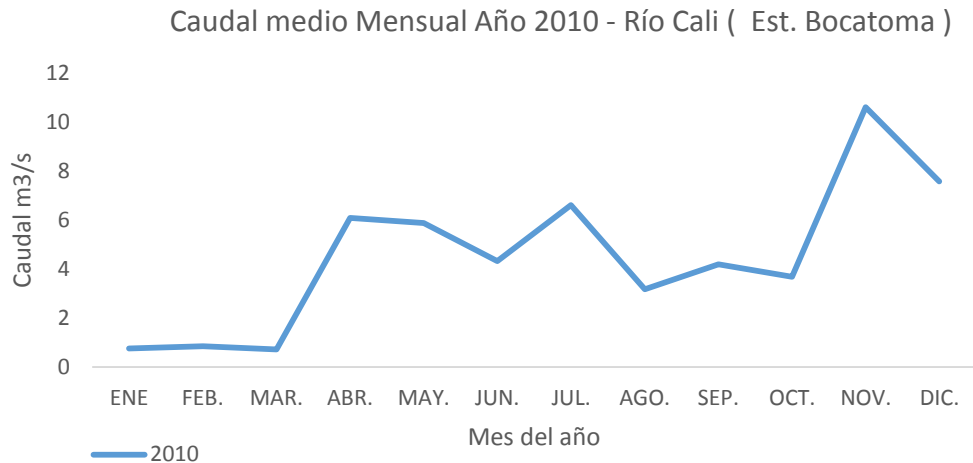
La instalación de las estaciones de aforo es el primer paso para cualquier estudio hidrológico o hidráulico de una zona determinada ya que permite obtener de manera precisa datos históricos de los caudales del río de estudio, la calidad de esta información depende de varios factores, entre ellos la antigüedad de la estación y la continuidad de los datos: En cuánto más datos se tenga de una estación se tiene más opciones de elección de un periodo de estudio, tener periodos de estudio de varios años asegura tener registros completos de ciclos donde se presenta variabilidad climática, algunas veces, periodos de varias décadas pueden incluir periodos de cambio climático también; para una mayor precisión del análisis se requiere de periodos continuos de registro. En algunos casos, debido a factores sociales o internos del ente encargado de la estación se suspende la toma de datos por algún periodo. Cuando se encuentra recesos en los datos de menos del 10% se puede aplicar métodos para completarlos, sin embargo en algunos casos es recomendable utilizar los datos sin completar los periodos faltantes.

La ubicación ideal de las estaciones de aforo es en la boca del río, también es bastante útil tener registros de sus afluentes. En algunos casos es necesario aplicar métodos para hallar el caudal requerido en un punto diferente al de la estación, sin embargo no debe olvidarse que nada es mejor que la medida directa de esta variable.

La importancia de las estaciones de aforo radica en la posibilidad de hacer una curva de caudales contra el tiempo, generalmente las estaciones de aforo se ubican en los ríos donde se piensa tener aprovechamiento hidroeléctrico dejando de lado aquellos donde la importancia radica en otros aspectos como tener un control de inundaciones o un control de concesión de aguas. (Céspedes, 2012)

### 5.2.3. El Hidrograma

El hidrograma es un gráfico que muestra la variación del caudal en el tiempo, un hidrograma se puede presentar para una tormenta, o en un periodo determinado como un año. Un hidrograma anual permite analizar claramente el comportamiento de los caudales y seleccionar periodos secos y periodos húmedos en la zona en la que se encuentra la corriente en estudio.



Gráfica 1. Variación temporal del caudal medio mensual intranual año 2010– Río Cali, régimen bimodal

#### 5.2.4. Curva de Duración de Caudales

La evaluación de la disponibilidad de agua sin regulación se representa, generalmente, a través de la curva de duración de caudales. Esta consiste en un gráfico en el cual se relacionan los caudales medios del río, ordenados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos del porcentaje total. Las curvas de duración de caudales indican el número de días del año o período en términos de porcentaje del tiempo en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud.

La curva de duración de caudales se puede construir a partir de datos anuales, mensuales o diarios. La precisión de la curva depende de la cantidad de datos utilizados. Los caudales deben disponerse en orden descendente, usando intervalos de clase si el número de valores es muy grande. Si  $N$  es el número de datos, y  $P$  la probabilidad de excedencia de cualquier descarga,  $Q$  es:

$$p = \frac{m}{n} * 100$$

Donde  $m$  es el número de veces que se presenta en ese tiempo el caudal. Cuando se traza la gráfica con escala logarítmica en el eje de los caudales, se obtiene una línea recta en la zona central. Si en una gráfica con escala logarítmica se presentan pendientes muy altas, es porque los caudales son muy variables, mientras que pendientes pequeñas representan respuestas lentas a la lluvia y variaciones pequeñas de caudal. Al graficar los caudales contra el porcentaje de tiempo que éste es excedido o igualado, permite conocer caudales característicos entre los que se encuentran:

- Caudal característico máximo: caudal rebasado 10 días al año.
- Caudal característico de sequía: caudal rebasado 355 días al año.

- Caudal de aguas bajas: caudal excedido 275 días al año o el 75 % del tiempo.
- Caudal medio anual: es la altura de un rectángulo de área equivalente al área bajo la curva de duración.

La curva también permite hallar otros valores para determinar el caudal ambiental mediante metodologías hidrológicas en particular.

### 5.2.5. Análisis Exploratorio de datos

Antes de iniciar con cualquier prueba estadística a una serie temporal de datos, se debe realizar un Análisis Exploratorio de los Datos (AED) por medio gráfico para entender el comportamiento de la información. El AED es considerado como el primer análisis a realizar antes de cualquier análisis confirmatorio (cuantitativo) y más aún, antes de utilizar la información hidroclimatológica para modelos y simulaciones. Dentro del análisis exploratorio gráfico se recomienda utilizar la gráfica de Serie de Tiempo, el diagrama de cajas, la gráfica de doble masa y la gráfica de normalidad (Castro y Carvajal, 2010).

El examen previo de los datos es un paso necesario, que lleva tiempo, y que habitualmente se descuida por parte de los analistas de datos. Las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico (CVC, 2006).

- Gráfica de Series de Tiempo

En una gráfica de series de tiempo se representan los datos en orden cronológico en las ordenadas y el tiempo en las abscisas. Mediante este tipo de graficas se puede observar el comportamiento de los datos, la estacionalidad, el rango de los datos y los cambios entre otros.

- Diagrama de Cajas

Con el diagrama de cajas, el analista se da una idea del comportamiento de las medidas de tendencia central, la variabilidad, la simetría y la presencia de puntos atípicos. En el diagrama de cajas se muestra el percentil 50 (la mediana), 25 y 75 (límite inferior y superior de la caja respectivamente), el menor y mayor valor observado sin ser considerado atípico, además de puntos atípicos (1.5 veces la longitud de la caja) y extremos (3 veces la longitud de la caja) (Castro y Carvajal, 2010). Para determinar si existe un cambio en la medida de la tendencia central en la serie hidroclimatológica se divide la misma en dos o más partes, de tal forma que se pueda observar a partir del diagrama de cajas de cada una de ellas, si existen diferencias entre las características estadísticas de cada una de las partes de la serie (Maidment, 1993; Sánchez, 1999; Smith y Campuzano, 2000).

- Gráfica de normalidad

Consiste en graficar la información en un papel de probabilidad normal. Si la gráfica muestra una línea recta, indicara que la información se distribuye normalmente, de otra manera la información no se distribuye siguiendo esta distribución y será necesario realizar una transformación a la variable. La transformación más utilizada es la propuesta por Box y Cox (1964) según la cual si  $\{x_t\}$  es una serie cronológica asimétrica se determinaran los parámetros  $a$  y  $\lambda$  tales que la serie  $\{y_t\}$  después de la transformación (Ec. (I)) minimice su asimetría:

$$y_t = \frac{(x_t - a)^\lambda}{\lambda}$$

Cuando  $\lambda$  tiende a cero esta transformación se convierte en (Ec. (II)):

$$y_t = \ln(x_t - a)$$

Si la serie original se supone distribuida log-normal entonces esta transformación la convierte en normal.

### 5.2.6 Programa de mediciones de campo

Las estaciones de muestreo se seleccionaran buscando la mayor representatividad para su caracterización desde el punto de vista hidrológico, hidráulico, cabe anotar que para efectos de este trabajo el muestreo se desarrollara conforme a su viabilidad económica y de situación en el orden público Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Accesibilidad. Es importante establecer los sitios más seguros para realizar los muestreos, ello significaba una ubicación cercana a un caserío o población. Para seleccionar los posibles sitios de muestreo, se debe realizar una primera salida de reconocimiento en la que se hable con el/la representante de la comunidad, a los cuales se les explique de que trata el proyecto y se les solicite el permiso de entrada, con el compromiso de contratar a gente de la región como ayudantes en las labores de campo.
- Las estaciones escogidas debían estar sometidas a un régimen natural de caudales, no afectado (al menos de forma significativa) por los usos consuntivos o de regulación o por cualquier actividad humana que modifique significativamente las condiciones naturales del río.
- Disponer de una estación de aforo próxima y representativa para realizar el análisis de la variabilidad hidrológica del río en condiciones naturales.

- El canal en el sitio de medición debe ser recto y tener sección transversal uniforme y una pendiente que minimice las distribuciones anormales de velocidad.
- Las direcciones de flujo para todos los puntos en cualquier vertical a través del ancho del cauce deben ser paralelas unas a otras y perpendiculares a la sección transversal. Los sitios que presenten vórtices, flujo reversible o zonas muertas deben ser rechazados.
- El lecho y las márgenes del río deben ser estables y bien definidas para todas las condiciones del flujo, de tal manera que se pueda hacer una medición precisa del área de la sección transversal.
- Las condiciones de la sección y de su entorno no deben ocasionar cambios en la distribución de la velocidad durante la medición.
- La profundidad del agua en la sección debe ser suficiente para proveer una inmersión efectiva del molinete en cualquier punto en que se mida
- La sección debe estar ubicada lejos de estaciones de bombeo y vertimientos. Si éstos operan durante las mediciones, probablemente crearán condiciones inconsistentes con la relación natural Nivel – Caudal que se tiene para la estación.
- Los sitios donde hay convergencia o divergencia de flujo deben descartarse.

## Aforos

La instalación de las estaciones de aforo es el primer paso para cualquier estudio hidrológico de una zona determinada ya que permite obtener de manera precisa datos históricos de los caudales del río de estudio, la calidad de esta información depende de varios factores, entre ellos la antigüedad de la estación y la continuidad de los datos: En cuánto más datos se tenga de una estación se tiene más opciones de elección de un periodo de estudio, tener periodos de estudio de varios años asegura tener registros completos de ciclos donde se presenta variabilidad climática, algunas veces, periodos de varias décadas pueden incluir periodos de cambio climático también; para una mayor precisión del análisis se requiere de periodos continuos de registro. En algunos casos, debido a factores sociales o internos del ente encargado de la estación se suspende la toma de datos por algún periodo. Cuando se encuentra recesos en los datos de menos del 10% se puede aplicar métodos para completarlos, sin embargo en algunos casos es recomendable utilizar los datos sin completar los periodos faltantes.

## 5.2.7. Caudales ambientales

### 5.2.7.1. Revisión de Conceptos para el caudal ambiental

A nivel mundial, se han dado diferentes denominaciones al caudal mínimo que se debe dejar en una corriente cuando se planea realizar intervenciones como derivaciones o aprovechamiento de tipo hidráulico. Estas denominaciones varían según el concepto que se tenga acerca del caudal mínimo necesario en la corriente y la utilidad que se le desea dar, desde mantener los ecosistemas. El enfoque de caudal ambiental así como su denominación ha cambiado a través del tiempo. En un principio se partió de una propuesta de dejar en el sistema un caudal mínimo con un valor fijo (años 70). Posteriormente se planteó la necesidad de que este caudal mínimo variaría estacionalmente, simulando la variación natural del sistema (décadas de los 80). Más adelante se propuso establecer el régimen de caudales relacionando los cambios en el hábitat y las funciones ecológicas del sistema (años 90). 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, 2008).

Tabla 2. Denominaciones y conceptos del Caudal Ambiental (Cantera, Carvajal y Castro, 2009).

| DENOMINACIÓN                   | CONCEPTO   | REFERENCIAS   |
|--------------------------------|--|---|
| <b>Caudal ecológico mínimo</b> | Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajos y que mantiene la vida en el río. No aportan una solución ecológica Se calculan de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica.  | King et al., 1999;<br>Palau, 2003.  |
| <b>Caudal ecológico</b>        | Caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial, para preservar la conservación de los ecosistemas fluviales actuales, en atención a los usos de agua comprometidos, a los requerimientos físicos de la corriente fluvial, para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones, tales como: dilución de contaminantes, conducción de sólidos, recarga de acuíferos y mantenimientos de las características paisajistas del medio.   | Ormazabal, 2004;<br>APROMA, 2000.   |
| <b>Caudal de mantenimiento</b> | Régimen de caudal que mantiene todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo el reclutamiento continuo y balanceado de las especies acuáticas y ribereñas. Es un caudal calculado para y dirigido hacia, la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial.   | King y Louw, 1998;<br>Palau, 1994.  |
| <b>Caudal ambiental</b>        | Régimen modificado que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay empleos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin causar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño o, en el caso de ríos gravemente alterados, se considera caudal ambiental a la cantidad de agua necesaria para restablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida. | Dyson, Bergkamp y Scanlon, 2003;<br>Jiménez et al., 2005;<br>King et al., 1999. |



|   |  |                               |
|---|--|-------------------------------|
| <p><b>Caudal de acondicionamiento</b></p> | <p>Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, usos recreativos, etc.)</p>  | <p>Palau, 2003.</p>           |
| <p><b>Caudal de compensación</b></p>      | <p>Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido.</p>  | <p>Espinoza et al., 1999.</p> |
| <p><b>Régimen de caudal ambiental</b></p> | <p>Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En él se detalla caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema para una condición específica.</p> | <p>King et al., 1999.</p>     |

### 5.2.7.2. Delimitación del concepto de caudal ambiental para el contexto colombiano

Históricamente el concepto de caudal ambiental tiene su origen en EE.UU, donde se le denomina “instreamflow”; según Bustamente, Monsalve y García (2007), retomando palabras de Cachón de Mesa (2000), éste término se acuñó para definir el caudal necesario para mantener las condiciones adecuadas en un río o tramo de río, que requerían algunas especies acuáticas indicadoras con algún valor, (como los peces para pesca deportiva), su freza, conservación, maduración o cría y paso. Posteriormente, ésta definición se ha ampliado para abarcar los componentes del ecosistema fluvial. De ahí que no sea muy apropiado el adjetivo «instream» puesto que son caudales para mantener áreas que no están realmente dentro de la corriente que son necesarias para el mantenimiento de los múltiples servicios de provisión, regulación y culturales, que brinda el río y el ecosistema fluvial asociado.

Los caudales ambientales son un aspecto relevante en cada una de las etapas en la historia de una cuenca fluvial o de drenaje, por ello, durante las primeras asignaciones de agua para uso de consumo o evaluaciones de Impacto Ambiental para renovar licencias de infraestructura de almacenamiento de agua, es oportuno comenzar a abordar los caudales ambientales cuando se están desarrollando planes de asignación de agua o programas de rehabilitación de ríos (Dyson et al., 2003).

Dado que Colombia no es ajena al proceso intervencionista de dominio hidráulico y megaminero, que ha favorecido el desarrollo de algunos sectores productivos del país y del capital transnacional, a expensas de un preocupante deterioro de los ecosistemas y calidad de vida de las comunidades que viven en ellos. Sin embargo, el derecho legal para extraer aguade una corriente para finalidades diversas ha sido reconocido durante siglos, es

conveniente aludir a la noción relativamente reciente de Régimen de Caudal Ambiental como preservador de las dinámicas fluviales (Lamb y Doerksem, 1987).

Existen muchas denominaciones y conceptos entorno al caudal ambiental. Para el caso de Colombia es preciso delimitar el concepto para su aplicación en el territorio, entendiendo de antemano que el país cuenta con una gran riqueza en flora y fauna, en oferta del RH, minerales y conflictos de naturaleza política, económica y social, asociados directamente a la tenencia de la tierra y la satisfacción de necesidades básicas de las comunidades. La definición de RCA debe cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. Alcázar (2007) basándose en King, Tharme y Brown (1999), indica que en él se detalla caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual. Todo esto es diseñado para mantener en funcionamiento de los componentes del ecosistema para una condición específica (Alcázar, 2007). Es decir, incluye la suficiente agua en los ríos para asegurar, además del funcionamiento ecológico, beneficios ambientales, sociales y económicos aguas abajo donde el grado de “buena salud” en que se sustentará el río es un juicio de la sociedad (Dyson et al., 2003).

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior el RCA requiere que se integren una serie de disciplinas, incluyendo la ingeniería, el derecho, la ecología, la economía, la hidrología, las ciencias políticas y la comunicación. También exige que se den negociaciones entre partes interesadas para salvar los diferentes intereses que compiten por el empleo del agua, en especial en las cuencas donde la competencia ya es grande (Dyson et al., 2003). Hay que tener en cuenta que la finalidad de obtener un RCA reside en establecer un régimen de caudal adecuado en cuanto a cantidad, calidad y regularidad, que sustente la salud de los ríos y de los ecosistemas acuáticos relacionados. Para establecer el mismo, hay que identificar objetivos claros en la corriente y escenarios para la extracción y utilización tanto periódica como no periódica. Estos objetivos deberían ser indicadores mensurables que pueden constituir la base para las asignaciones de agua. (Dyson et al., 2003). El RCA debe incluir, además, una variabilidad hidrológica oscilando de intra e interanualmente incluyendo los caudales especiales como lo son crecidas periódicas, eventos extremos, caudales basales, entre otros; que son esenciales para el mantenimiento de la flora y fauna, formación del cauce y descontaminación de las aguas.

Conviene decir, que las ventajas ecológicas no serán necesariamente el resultado único, ni primario, de un programa de RCA, si no también que el programa deberá lograr un equilibrio entre asignaciones de agua para satisfacer necesidades ecológicas de agua y otras necesidades de utilización de la misma, como la generación hidroeléctrica, la irrigación, el agua potable o la recreación, es por eso que desarrollar un programa de RCA, significa elaborar los valores centrales sobre los que se tomarán las decisiones, determinando qué resultados se buscan y definiendo qué trueques deben realizarse. Debido a que estos valores determinarán las decisiones acerca de cómo equilibrar las aspiraciones ambientales,

económicas, sociales y las utilidades de las aguas del río (Dyson et al., 2003). Con el propósito de apoyar el proceso de apropiación, compromiso y logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio en el territorio colombiano.

En general, la definición del caudal ecológico tiene que ver con la provisión de agua en los ríos y sistemas asociados de suficiente calidad, cantidad, duración y estacionalidad, para mantener los ecosistemas acuáticos y los humedales. Por su parte, el concepto de caudal ambiental incluye la suficiente agua en los ríos para asegurar, además del funcionamiento ecológico, beneficios ambientales, sociales y económicos aguas abajo (UNAL, 2007). Ahora bien el concepto de RCA considerado en este trabajo, va más allá, incorporando la visión de Lhumeau y Cordero (2012) donde la utilización de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, hacen parte de una estrategia más amplia de adaptación, para ayudar a las comunidades a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático, permitiendo cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño, donde se detallan caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales basales como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra e interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema asociados a la cuenca hidrográfica; La cual constituye una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen un tiempo considerablemente mayor a otras unidades de análisis, además involucran una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).



## 6. METODOLOGIA

### 6.1. Descripción de la zona de estudio.

La cuenca del río Cali se localiza al Sur-Occidente Colombiano; forma parte del Parque Nacional Natural los Farallones (PNF) de Cali, sobre la cordillera Occidental de los Andes, considerado el tercero más importante de los Andes americanos por su alta biodiversidad y especies endémicas. El área de interés presenta los siguientes límites: al norte con la cuenca del río Aguacatal y la vertiente del Pacífico, al sur con las subcuencas del ríos Pance y Meléndez, en el oriente con la subcuenca del río Cañaveralejo y la ciudad de Cali y finalmente su parte occidente limita con la vertiente del Pacífico y la subcuenca del río Anchicayá.

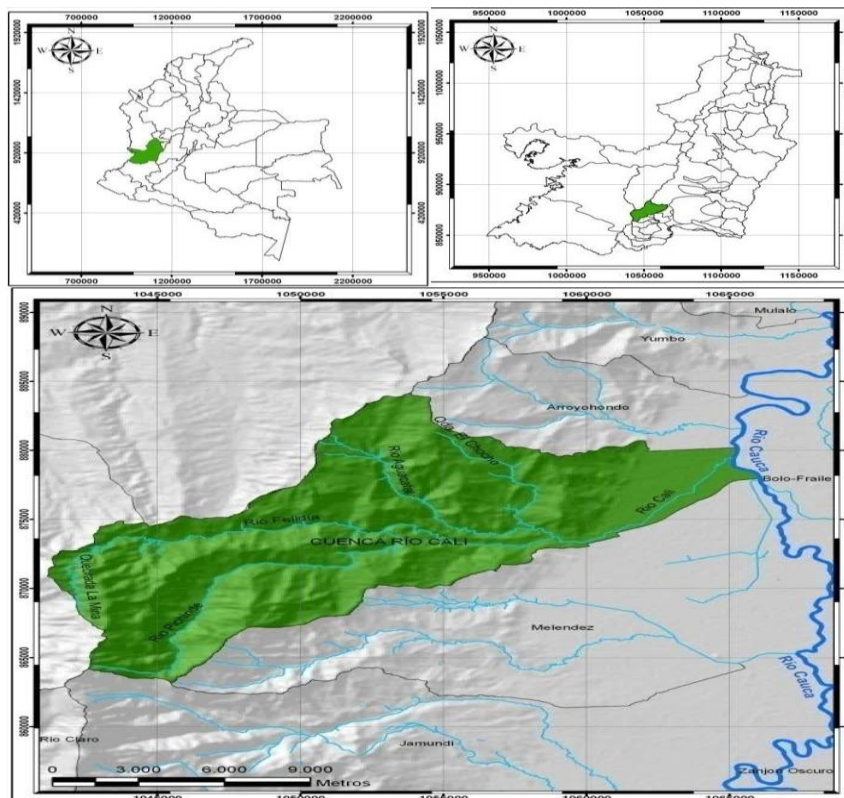


Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Cali.

Partiendo de un análisis más detallado del anterior mapa sobre la red hídrica se puede decir que El río Felidia se forma a partir de la unión de las quebradas El Roble, El Pato y El Socorro; recibe por la margen izquierda las quebradas El Diamante, La Soledad, El Cedro, Felidia y Las Nieves y por la margen derecha las quebradas Los Lucios, La Sierra, El Bosque y Agua Bonita entre otras. El río Pichindé nace en Los Farallones de Cali y recibe por su margen izquierda las quebradas El Ruiz, El Olvido, El Abanico, El Jordán, La Luna, El Sauce, La Margarita, La Hungría y La Marina; por la margen derecha las quebradas El Recreo, El Diluvio, Los Duques, La Honda, La Tulia , Los Andes y el río Pichindécito.

En la cuenca hidrográfica del río Cali tienen jurisdicción tres autoridades ambientales. En la parte alta, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a través de la Unidad de Parques Nacionales Naturales, que constituye la autoridad ambiental del PNF de Cali, para la administración, manejo y protección del ambiente y los recursos naturales renovables en esta área protegida de manejo especial. En la cuenca media, la parte del territorio por fuera del Parque y del perímetro urbano de Cali, la jurisdicción corresponde a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). De acuerdo con la organización territorial interna de la CVC, la División Ambiental Regional, DAR del Suroccidente, es la encargada de administrarla. Dentro del perímetro urbano de Cali, le corresponde al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente, DAGMA la administración y gestión ambiental, siendo esta entidad la autoridad ambiental, con competencias equivalentes a las de las Corporaciones Autónomas Regionales (CVC, 2011).

La ciudad de Santiago de Cali, se encuentra rodeada de cerros y siete ríos que en su mayoría provienen de una de las más importantes reservas del país: el Parque Nacional Natural Farallones de Cali (PNF). Tres de estos siete ríos han sido usados como fuente de abastecimiento para la ciudad de Cali, existiendo cuatro plantas de tratamiento que son: 1) Puerto Mallarino, abastecida del río Cauca; 2) San Antonio, abastecida del río Cali; 3) La Reforma, abastecida del río Meléndez; y 4) Río Cauca, abastecida del río Cauca.

En la zona de estudio además de formar del Parque Nacional Natural los Farallones también se encuentra el Jardín Botánico de Cali , la variación de la altura de la cuenca permite que encontremos desde el bosque de niebla hasta el bosque seco tropical ,de acuerdo con Fandiño y Wyngaarden (2005), la degradación de la región andina es del orden del 70 % (45.000 km<sup>2</sup>), y en ella los bosques subtropicales prácticamente han desaparecido de las vertientes interandinas y los montanos continúan siendo transformados a un ritmo elevado, más del 95 % de los bosques secos tropicales que existían en los Andes ya desaparecieron.





**Figura 3. Imagen satelital de la zona de estudio cuenca del río Cali. Herramienta Google earth.**

Para la zona de estudio se ha considerado la gran importancia que tiene la cuenca del río Cali, la cual además de brindarle suministro de agua potable al 30% de la ciudad provee de servicios ecosistémicos de regulación, provisión y paisajísticos. A lo largo de la historia, el río Cali ha sido crucial para el desarrollo de la ciudad. Sobre su margen derecha reposan las huellas del pasado, y sobre su margen izquierda la evolución de las últimas décadas. El río aún embellece una parte de la ciudad. Pero en la medida en que las presiones de la ciudad sobre el río Cali crecen, afectan la oferta de bienes y servicios ecosistémicos que este nos ofrece.

### 6.1.1. Caracterización Morfométrica

La zona de estudio encierra un área de 117,52 Km<sup>2</sup> de los cuales 59,13 Km<sup>2</sup> corresponden a la microcuenca del río Pichindé, 43,99 Km<sup>2</sup> corresponden a la microcuenca del río Felidia y 14,40 Km<sup>2</sup> corresponden al sector del río Cabuyal. Al unirse los ríos Felidia y Pichindé conforman el río Cali, siendo este un tributario del río Cauca (Montoya, 1995; Avila, 2012; CVC, 2012)

Tabla 3. Caracterización morfométrica de la cuenca del río Cali.

| CARACTERÍSTICA                                  | 1.<br>Pichindé | 2.<br>Felidía | 3.<br>Cabuyal | OBSERVACIONES   |
|---|----------------|---------------|---------------|---|
| Área (km <sup>2</sup> )                         | 59,13          | 43,99         | 14,4          | 1 y 2 son microcuenca (20-100 km <sup>2</sup> ) y 3 es un sector (5-20 km <sup>2</sup> ). Teniendo en cuenta la clasificación de (Reyes et al., 2010)   |
| Longitud del Cauce Principal (Km)               | 21,16          | 20,89         | 8,61          | Longitud más larga para la microcuenca 1  |
| Índice de la Compacidad (Kc)                    | 1,39           | 1,66          | 1,56          | Unidades Rectangulares  |
| Factor de Forma(Kf)                             | 0,13           | 0,1           | 0,23          | 1,2 y 3 unidades alargada con baja susceptibilidad a las avenidas   |
| Índice de Alargamiento (Ia)                     | 2,14           | 2,51          | 1,24          | Unidades Alargadas  |
| Calculo Índice Asimétrico (Ias)                 | 1,17           | 1,24          | 3,3           | Unidades asimétricas, asimetría marcada sobre la derecha en el sentido del flujo de la corriente, lo que traduce mayores caudales para 1 con respecto 2, dada su mayor área de captación en la parte alta |
| Pendiente Media de la Cuenca (Sm) (%)           | 54             | 55            | 39            | Unidades 1 y 2 el tipo de relieve es fuertemente accidentado  |
| Nacimiento-Altura(M)                            | 3,652          | 3,147         | 1,286         | Nacimiento más alto microcuenca 1   |
| Salida-Altura(M)                                | 1,286          | 1,286         | 1,026         | Salida más baja sector 3  |
| Elevación Media (Em) (M.S.N.M.)                 | 2,336          | 2,242         | 1,319         | En 1 es donde se presenta las precipitaciones más altas de la zona de estudio   |
| Coefficiente De Masividad (Km)                  | 39,29          | 48,92         | 77,27         | Producción Hídrica Alta en unidades 1 y 2   |
| Coefficiente Orográfico (Co)                    | 0,09           | 0,11          | 0,1           | relieve accidentado, susceptibilidad de la zona a la erosión hídrica  |
| Densidad Del Drenaje (Dd) (Km/Km <sup>2</sup> ) | 4,95           | 5,09          | 7,34          | Red de drenaje eficiente  |
| Pendiente Media de la Cauce (%)                 | 11             | 9             | 3             | Estas pendientes altas se traducen en altas velocidades de transporte de agua   |
| Sinuosidad del Cauce (Sin)                      | 1,09           | 1,33          | 1,21          | Disipación energía baja   |

Teniendo en cuenta lo expuesto por Avila (2012) la evaluación de los anteriores parámetros morfométricos de las microcuencas del río Cali, permiten establecer que la zona de interés es de forma oval oblonga a rectangular oblonga predominantemente alargada; hecho que influye de manera directa en la eficiencia que puede presentar la red de drenaje al momento de evacuar las aguas lluvias de excesos, debido a que disminuye en magnitud la formación de una creciente en el cauce principal y en los ríos que la drenan, al mismo instante, en que aumenta el tiempo de concentración de los volúmenes de agua que llegan a ella, mejorando en gran medida la eficiencia en la red de drenaje. Además, el río Cali tiene una red de drenaje eficiente, presentando tendencia moderada a concentrar grandes volúmenes de escurrimiento (Montoya, 1995), al igual que mayores velocidades de desplazamiento, produciendo ascensos en los niveles de las corrientes y aumentando de manera proporcional



la erodabilidad; al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad de escorrentía es mayor; por lo tanto los hidrogramas en principio tendrán un tiempo de concentración corto (Reyes et al., 2010).

#### 6.1.2. Caracterización climática de la cuenca

Se aprecian tres tipos de clima: cálido seco, templado y frío. El clima cálido seco está comprendido entre los 1.000 y los 1.800 m.s.n.m, el templado entre los 1.800 y los 2.500 m.s.n.m, y el frío entre los 2.500 y los 4.000 m.s.n.m. Los climas de régimen tropical ecuatorial de montaña se caracterizan, por la presencia de dos periodos lluviosos y dos secos alternos entre sí, a continuación se describen el comportamiento de las variables climatológicas más incidentes de la cuenca en estudio:

**Precipitación:** La cuenca presenta una precipitación anual que oscila entre 1.300 mm en la parte oriental, cerca de la ciudad de Cali, y unos 2.700 mm en los nacimientos de los ríos Felidia y Pichindé, debido a que la precipitación orográfica está influenciada por los vientos húmedos provenientes de Océano Pacífico (Montoya, 1995; Avila, 2012; CVC, 2012).

**Temperatura:** Varía con la altura sobre el nivel del océano y está influenciada por los vientos que se dirigen del valle hacia la cordillera, y viceversa. Se puede decir que la cuenca posee temperaturas promedias anuales que varían entre 18 °C en la parte media y 8 °C en los Farallones de Cali, caracterizándose por pequeñas fluctuaciones a lo largo del año (Avila, 2012).

**Vientos:** Presenta vientos húmedos provenientes del Océano Pacífico. También se presentan dos clases de corrientes: la primera y más importante se dirige de la parte alta de la cordillera hacia el valle geográfico en dirección oeste – este y se presenta generalmente entre las 3 y 6 de la tarde, con velocidades de 3 a 4 m/s. La segunda de menor intensidad y velocidad, se dirige desde el valle hacia la montaña en las horas de la mañana (CVC, 2011).

**Nubes:** En el costado occidental se presenta un “cinturón de nubes” cubriendo entre los 2.000 y 2.200 msnm, hacia la cima de los Farallones de Cali y la Cordillera Occidental, desde las 3 de la tarde en adelante, durante todo el año y en horas de la mañana en forma irregular (CVC, 2011).

**Humedad relativa:** La humedad relativa media mensual oscila entre 67 y 93%. El área de influencia de la estación La Teresita varía a lo largo del año, el promedio mensual de 90 a 93% para las estaciones La Teresita y El Topacio se observa que para el mes de agosto se presentan los registros más bajos de HR con valores que oscilan en 91 y 83%. En el mes de

noviembre se presentan los valores máximos en las estaciones, con valores que oscilan entre 75 y 93% (Avila, 2012).

**Brillo Solar:** Los niveles de radiación varían durante todo el día y a lo largo del año. Se presentan cuando el sol se encuentra en su máxima elevación, esto es entre las 10 a.m. y las 2 p.m. (cerca del 60% de la radiación es recibida a estas horas), mientras que cuando el ángulo del sol está más cercano al horizonte llega menos radiación a la superficie de la tierra debido a que atraviesa una distancia más larga en la atmosfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción (CVC, 2011)., las estaciones La Teresita y El Topacio presentan una distribución monomodal. En la estación La Teresita, el brillo solar varía a lo largo del año, en promedio mensual las horas de sol oscilan entre 90 y 136 horas, con valores extremos mínimos de 70 horas en el mes de noviembre y valores máximos de 136 horas en el mes de agosto (Avila, 2012)

**Caudal:** La distribución de caudal a través del año de manera análoga a la lluvia. Se rige por un patrón de comportamiento bimodal es decir, dos temporadas de caudales altos y dos temporadas de caudales bajos, intercaladas. Las temporadas de caudal reducido corresponden a los meses de Enero, Febrero y Marzo (primer semestre) y Julio, Agosto y Septiembre (segundo semestre); registrándose el menor caudal en el mes de Agosto. Los periodos de caudal elevado se ocurren en los meses de Abril, Mayo y Junio (primer semestre), y Octubre, Noviembre y Diciembre (segundo semestre); presentándose el mayor caudal en mayo. En promedio el caudal medio anual del río Cali es de 3,7 m<sup>3</sup>/s, con valores máximos instantáneos que oscilan entre 0,2 m<sup>3</sup>/s en fuertes estiajes y 193 m<sup>3</sup>/s en periodos de lluvias intensas, generalmente asociados a extremos del ENOS, Niño y Niña, respectivamente

### 6.1.3. Geología y geomorfología

Al igual que en el occidente colombiano, la geología de la cuenca del río Cali se conforma en su mayor parte por rocas volcánicas del cretáceo, constituidas por diabasas y basaltos – grupo diabásico, además de rocas sedimentarias como chert, shales y limonitas, entre otras.

**Suelos:** Según la CVC (2011) existen en la cuenca varias unidades cartográficas de suelos las cuales se describen a continuación en la tabla 15. (CVC, 2011).

Tabla 4. Clasificación de los suelos de la cuenca río Cali.

| SÍMBOLO | UNIDAD CLIMÁTICA        | UNIDAD CARTOGRÁFICA       |
|---------|-------------------------|---------------------------|
| Muefl   | Frio Húmedo             | Asociación Munchique      |
| Vcef2   | Medio Húmedo            | Asociación Villa Colombia |
| Phfg3-4 | Cálido Moderado Seco    | Asociación Pescador       |
| Mrg     | Muy Frio Húmedo(Páramo) | Misceláneo Rocoso         |
| Frf3    | Medio Seco              | Asociación Fraile         |
| Frde2   | Medio Seco              | Asociación Fraile         |

Fuente: (CVC, 2011).

Uso actual del suelo: En relación de los usos del suelo en la cuenca, en la zona de piedemonte y plana de la cuenca hidrográfica del río Cali, nor-orientado y sur-orientado, se encuentran grandes extensiones de ganadería extensiva, con algunos cultivos intensivos de caña de azúcar, y en mayor proporción cultivos transitorios de sorgo, maíz, tomate y zapallo. En la zona centro y sur de la cuenca, se pueden encontrar relictos de bosques de guadua muy aislados. En la zona occidental de la cuenca se encuentra la mayor cobertura de bosque natural en diferentes estados de sucesión y rastrojos, los cuales se utilizan básicamente para la extracción de leña. Estos bosques se ubican en las áreas de mayor pendiente y por ende la accesibilidad es limitada, al igual que la zona de vegetación de páramo, ubicada en el área más alta al sur-occidente de la cuenca. Los bosques plantados corresponden a un menor porcentaje con plantación de madera para utilizarse en la explotación minera.

Respecto al uso potencial del suelo, se evalúa analizando el recurso suelo y cuatro variables principales: pendiente, erosión, profundidad efectiva y susceptibilidad a la erosión. Con base a estos criterios de aptitud de uso se determinan los siguientes grandes grupos de uso: Tierras para pastoreo (P), Tierras a recuperar (AF), Tierras Forestales (F2, F3) y Reservas Naturales o Parques Nacionales (R) y Cultivos (C3, C4). Es importante resaltar que las tierras para cultivos no llegan al 1% del área total de la cuenca, mientras que las Tierras del sistema de Parques Nacionales abarcan el 35,6% del total de la cuenca (7666,9 ha aproximadamente), cubre gran parte de los corregimientos de Felidia, La Leonera, Pichindé y Los Andes. Estas tierras presentan valores excepcionales para el patrimonio nacional, debido a sus características naturales, culturales o históricas. (CVC, 2011).

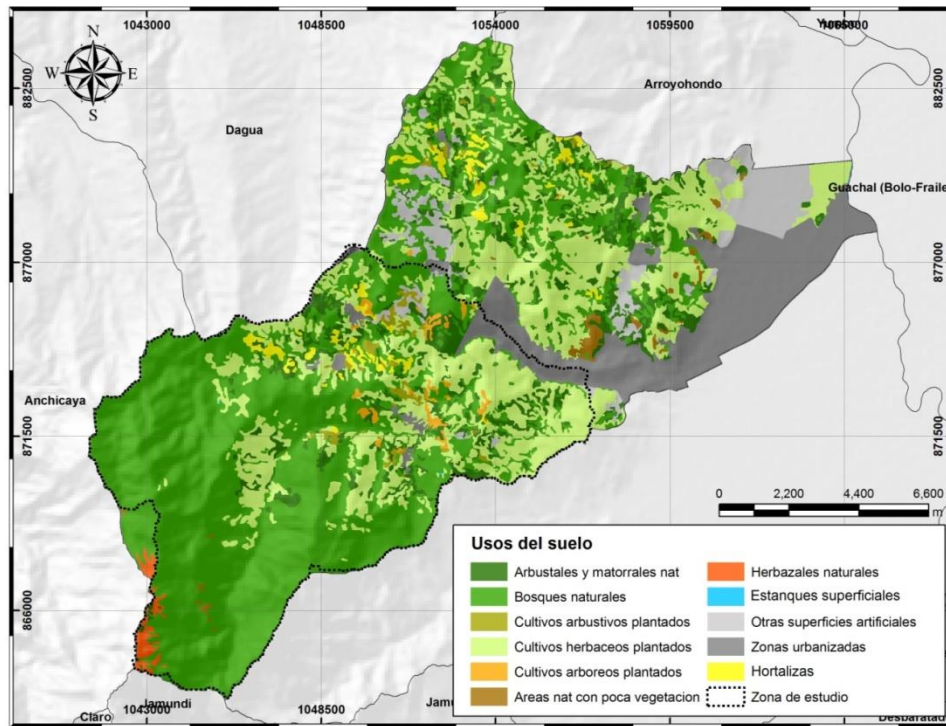


Figura 4. Usos del suelo y cobertura de la cuenca del río Cali para el año 2004 Fuente (CVC, 2011).

#### 6.1.4. Erosión

Los grados de erosión presentes en la cuenca hidrográfica del río Cali, están directamente asociados con los usos y tipos de suelos característicos de cada una de las subcuencas. Se identifica que los procesos de erosión más graves en la cuenca, están relacionados con la práctica ganadería extensiva y a la intercalación de este uso con rastrojos, por otro lado, la erosión menos severa está asociada a las áreas destinadas a bosque natural. En la figura 5, se observa las áreas con un menor impacto de la ganadería son que aparecen intercaladas con el bosque natural; donde se presenta la erosión entre moderada y severa. Estos impactos se presentan al oriente de la subcuenca del río Felidia, al norte de la del Cabuyal, al oriente de la del Felidia y al occidente de la zona plana. Las áreas con mayor presencia de bosques naturales presentan una erosión natural, principalmente al occidente de la subcuenca del río Felidia y del Pichindé.

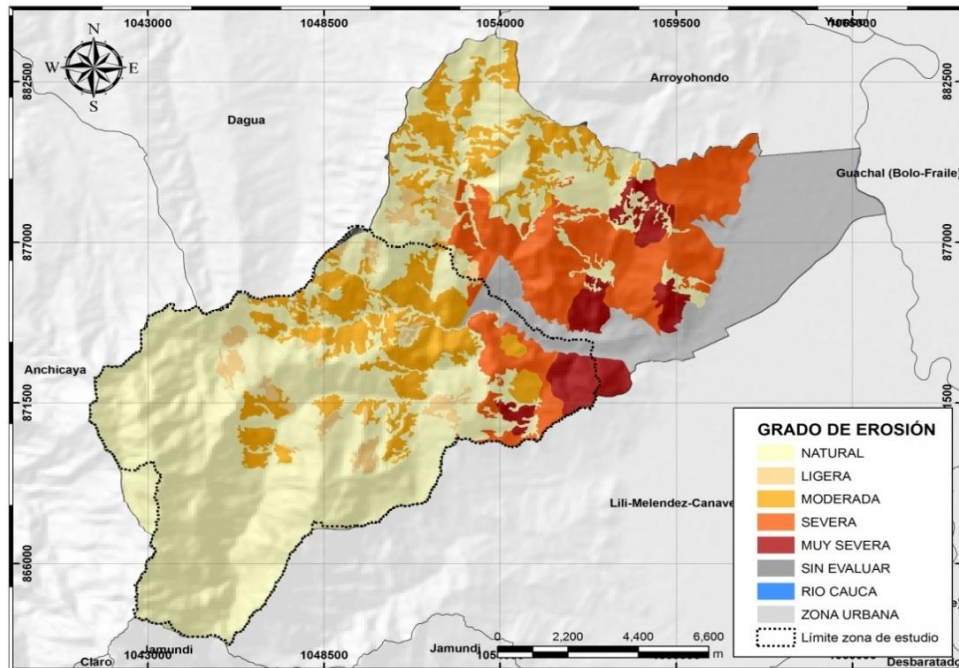


Figura 5. Erosión de la cuenca del río Cali para el año 2009. Fuente (CVC, 2011).

Las características específicas de estas tierras son: relieve escarpado con pendientes mayores al 75%, suelos superficiales o limitados por aspectos de afloramientos rocosos, con presencia de erosión severa a muy severa y alta susceptibilidad a la misma; las precipitaciones promedias anuales van de extremas a muy altas (mayor a 3000 mm) o muy bajas (menores a 1000 mm) (CVC, 2011).

#### 6.1.5. Biodiversidad

Correa (2014) los boques tropicales, presentes en la cuenca hidrográfica del río Cali poseen características que los hacen sumamente importantes en el mantenimiento de la calidad de los suelos, evitando la erosión, los deslizamientos, abrigo para la fauna, diversidad biológica de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas a lo largo de la cuenca, en su corredor biológico denominado cuenca Cali, el cual está conformado por el Jardín botánico y por las veredas El Cedral, La Soledad y el Diamante, pertenecientes al corregimiento de Felidia.

Los bosques presentan un alto grado de sensibilidad, ya que suelen estar asentados en suelos donde a menudo hay una rápida asimilación de minerales, potenciado por la presencia de micorrizas y bacterias descomponedoras. La proliferación de árboles de gran tamaño es capaz de conferir variaciones en los niveles de irradiancia solar, influyendo en el desarrollo

de microclimas y diferentes niveles de humedad. Esto favorece el crecimiento de especies de plantas y animales.

La cuenca media y alta del río Cali se consolida como uno de los espacios de biodiversidad más importante del suroccidente de Colombia en aves, este sector de la cuenca reportan hasta la fecha 257 especies, de las cuales 241 son especies de aves residentes y las 16 restantes son especies de aves migratorias que se reproducen en la zona norte del continente y permanecen en la cuenca entre los meses de septiembre y abril. De las especies reportadas para la cuenca media y alta del río Cali, 7 son especies endémicas como: el Tangara Multicolor (*Chlorochrysa nitidissima*), Habia Copetona (*Habia cristata*), Atrapamoscas Apical (*Myiarchus apicalis*), Perdiz colorada (*Odontophorus hyperythrus*), Guacharaca (*Ortalis columbiana*), Pava Caucana (*Penelope perspicax*) y el Carpintero Punteado (*Picumnus granadensis*) (Correa, 2014)

En la cuenca media existe una notable presencia de murciélagos, en su mayoría especies frugívoras, entre los que se encuentran dos especies de género *Artibeus* (*A. lituratus* y *A. jamaicensis*), *Carolla perspicillata* y *sturnira lilium*, esta última con mayor número de individuos, también hace presencia el murciélago Hematófago *Desmodus rotundus* influenciado por la actividad ganadera. Podemos encontrar ratones silvestres, principalmente el ratón arrocero de Alfaro (*Oryzomys alfaroi*) y el ratón arrocero de garganta blanca (*Oryzomys albigularis*). También es notable la chucha común *Didelphis marsupialis*, la chucha lunada (*Caluromys derbianus*), el guatín *Dasyprocta punctata*, e incluso el armadillo (*Dasyprocta novemcinctus*) y según testimonios de los habitantes de la parte alta se registra presencia del venado de la especie *Mazama americana*. Podemos encontrar desde la zona del Jardín Botánico, como de Felidia la presencia del mono nocturno (*Aotus lemurinus*) (Correa, 2014).

Las especies de anfibios de la cuenca se encuentran amenazadas, debido a su alto grado de requerimientos en cuanto a la calidad de los recursos medioambientales, aquí podemos encontrar especies como *Hypodactylus mantipus* y *Leptodactylus fragilis*.

Los reptiles presentan una proporción de actividad y desplazamiento mucho mayor que la de los anfibios. Una especie puede ser encontrada a lo largo de gradientes altitudinales grandes o dentro de diferentes condiciones paisajísticas en un mismo territorio, podemos encontrar las especies como: *Sibon nebulata*, *Liophis epinephelus* y *Ameiva sp*

La fuerte intervención antrópica, los incendios forestales, la minería, la cacería, los cambios en el uso del suelo tiene amenazadas la riqueza excepcional de especies que cuenta la cuenca y dadas sus condiciones particulares de rendimiento hídrico, Montoya (1995) destaca en la parte alta y media de la cuenca (cuenca del río Pichindé) se presenta un rendimiento hídrico entre 40 l/s - Km<sup>2</sup> – 60 l/s - Km<sup>2</sup> para condiciones climáticas medias a diferencia de la parte baja presenta un rendimiento por debajo de 20 l/s - Km<sup>2</sup> teniendo un promedio de rendimiento hídrico de 31 l/s - Km<sup>2</sup>.

En contraste datos del IDEAM (2014) reportan para la cuenca del río Cali un rendimiento hídrico para condiciones climáticas medias por debajo de los 15 l/s - Km<sup>2</sup>, esta reducción se atribuye a la destrucción de los bosques andinos en la región, para extender la frontera agrícola e implementar sitios de pastizales y fincas de veraneo, minería, desviación de caudales incendios forestales; provocando que en muchos lugares los bosques andinos sean reducidos drásticamente quedando únicamente pequeños remanentes de ellos, rodeados por ecosistemas artificiales. El tamaño y el dinamismo de Cali y sus centros vecinos conllevan la mayor presión de la población urbana sobre los recursos naturales por comparación con el resto del área rural (CVC, 2011).

## 6.2 Metodologías aplicadas

Inicialmente se desarrollara la obtención de caudales ambientales a través de seis métodos comparándolos con lo propuesto por Castro (2008) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA (2013).

### **Método de Tennant**

Conocido también como método de Montana, es uno de los más usados a nivel mundial y se ha utilizado básicamente en corrientes que no tienen estructuras de regulación como represas, diques u otras modificaciones en el cauce (Arthington y Zalucki, 1998; Pyrcce, 2004). En el Servicio de Pesca y Vida silvestre de los Estados Unidos (US Fish and Wildlife Service) desarrollaron este método basados en 10 años de observaciones y mediciones netamente biológicas para una especie en particular (la trucha) en 11 ríos de Montana (Wyooming y Nebraska – Estados Unidos). El objetivo del mismo era encontrar una relación entre el caudal y la disponibilidad de hábitat para la biota acuática. Por medio de este estudio se determinó que el hábitat comenzaba a degradarse cuando el flujo era inferior al 10% del flujo medio anual; esto asociado a una velocidad media de 0.25 m/s y una profundidad media de 0.3m (Tennant, 1976 citado en Bragg et al., 1999; Jamett y Rodrigues, 2005). El método divide el año en dos períodos (seco y lluvioso), para los cuales Tennant (el investigador líder) propuso unos porcentajes del caudal medio interanual para lograr unos grados de conservación del hábitat fluvial (Gómez et al., 2000). De esta forma se reconoce que existe una relación entre los niveles de caudal y las características del hábitat existente; además, se conceptúa que asignar un valor único de caudal puede eliminar todo rastro existente de variabilidad temporal (Tharme, 1996; King et al., 1999; Palau, 2003; Arthington y Zalucki, 1998).

### **Método de Hoppe**

Fue uno de los primeros métodos en desarrollarse y en el cual se reconoce la relación entre los percentiles de la curva de duración caudales (CDC) y las condiciones favorables para la biota. Con el uso de la CDC se define unos caudales mínimos asociados a diferentes estadios



de crecimiento (Díez, 2000). La desventaja que presenta es que las recomendaciones de caudal que sugiere son basadas en estudios realizados a la trucha en el río Frying Pan de Colorado, cuya hidrología presenta un régimen unimodal típico de los registros hidrológicos norteamericanos con épocas de hielo y deshielo.

## Legislación Suiza

La Ley Federal Suiza propone unos algoritmos compuestos por un caudal mínimo base y un caudal complementario variable en función del  $Q_{347}$  (caudal superado 347 días del año), además hace una diferenciación para encontrar el caudal mínimo, si éste es para aguas piscícolas o no piscícolas. Para aguas no piscícolas fija como caudal mínimo el valor de 50 l/s o el 35 % del  $Q_{347}$  siempre que  $Q_{347}$  sea inferior a 1 m<sup>3</sup>/s. Para las aguas piscícolas se especifican unos valores de caudales mínimos en función de los valores de  $Q_{347}$  (Diez, 2000).

## Método de Lyons

el método de Lyons, que recomienda estimar el caudal ambiental como un porcentaje de la mediana de los caudales medios mensuales, 40% para periodos húmedos y 60% para periodos secos. El porcentaje de 60% fue escogido para asegurar un mayor caudal durante los meses críticos de los periodos secos (Bounds y Lyons, 1979).

Lyons es un poco más flexible en cuanto permite ajustar el régimen según los periodos secos y húmedos de la región, lo que para nuestro país es muy importante al tener un régimen bimodal, este método permite dejar a un lado el manejo de un valor de caudal ambiental constante para todo el año. Este método sugiere un caudal similar tanto para los periodos húmedos, Este método permite analizar las diferentes temporadas climáticas que se presentan en la cuenca y así sugerir regímenes un poco más precisos al comportamiento estacional del clima en nuestro país (Céspedes, 2012)

## Método del caudal básico de mantenimiento (QBM)

El método del QBM es un método hidrológico, pero incorpora aspectos hidráulicos y biológicos (habitabilidad). Está basado en la variabilidad temporal del río y en otras características asociadas a los registros hidrológicos históricos, a partir de los cuales calcula un régimen de caudal ambiental, que produzca el menor impacto posible en las comunidades fluviales. El caudal circulante de un río conocido a partir de las series hidrológicas temporales, es la fuente primaria de información y dispone en sí misma de toda la información física y biológica del medio acuático. Todas las variables de un tramo de un río dependen en última instancia del caudal circulante y no al revés (CEDEX, 1998).

Con base en lo anterior el método plantea buscar en primer lugar un caudal básico ( $Q_b$ ) calculado aplicando el método de medias móviles, incrementando el tamaño del intervalo desde 1 hasta un máximo de 100 días. El intervalo de días consecutivos que mejor caracteriza

el caudal básico de cada año de registro, es aquel que representa el mayor incremento relativo entre dos intervalos consecutivos. El  $Q_b$  operacional será el valor promedio de los  $Q_b$  individuales del periodo de registro estudiado (Palau y Alcazar, 1996; Alcázar y Vega, 2008).

Una vez calculado el  $Q_b$ , se determina un caudal adicional, llamado caudal de acondicionamiento, el cual se considera un posible suplemento al  $Q_b$  y se calcula a partir de la simulación de secciones representativas del tramo objeto de aprovechamiento y de la comprobación del cumplimiento de unas condiciones de conservación predefinidas para el valor o componente a proteger. Si el  $Q_b$  es insuficiente para cumplir con condiciones de habitabilidad o de calidad del agua, se puede considerar establecer un caudal de acondicionamiento ( $Q_{ac}$ ). El  $Q_b$  más el  $Q_{ac}$  definen el caudal de mantenimiento (llamado así por el autor Palau y Alcazar, 1996), sobre el caudal se aplica un factor de variabilidad temporal mensual, obteniéndose un régimen de caudales ambientales o de mantenimiento para cada unidad de tiempo definida. El factor se define como el cociente entre el caudal medio de cada mes y el del mes del menor caudal (Palau y Alcazar, 1996; Diez, 2000).

El régimen de caudal ambiental determinado por medio de este método en un régimen que representa el comportamiento medio del río y que varía mensualmente; aun sí, se puede mejorar la metodología, proponiendo que el RCA no se restrinja al uso estricto del régimen propuesto, sino que varíe, además, de acuerdo a las condiciones climáticas impuestas, y que esa variación se conserve dentro de los límites históricos registrados. Los límites estarían definidos por los coeficientes de variación mensual multianual que sirven, además, como metas de manejo (Castro, 2008).

### **Método del Caudal Medio Base (Average Base Flow Method - ABF)**

Fue desarrollado en Nueva Inglaterra por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos. En este método se propuso como el caudal mínimo (llamado así por los autores), el caudal medio de agosto (verano), porque representa la condición natural más severa que la comunidad de especies del cauce podría experimentar. Para corrientes sin registros, el caudal medio de agosto se estima en  $0,50 \text{ pie}^{3/5} \text{ milla}^2$  (cfsm) de área drenante. Cuando son necesarios caudales altos en otras épocas del año para desove, migración y otras necesidades biológicas, se recomiendan: para otoño 1,00 cfsm, para invierno y primavera 4.0 cfsm (Orth y Leonard, 1990). Como se puede notar, el método solo puede ser aplicado en Nueva Inglaterra o en cuencas que tengan las mismas características morfológicas, climáticas, edafológicas, etc, que permitan extrapolar este tipo de valores generalizados para determinar el caudal mínimo a dejar en la fuente hídrica.

## Porcentaje fijo del caudal medio interanual

Este método incluye algunas reglamentaciones, como la Ley Francesa de Aguas que establece como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual calculado para un período mínimo de 5 años (Díez, 2000). El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos establece que el caudal mínimo será el caudal medio del mes más crítico para el metabolismo de los organismos acuáticos (Kulik, 1990). Criterio similar al de la Ley Francesa de Aguas quizo ser adoptado en Colombia en el proyecto de Ley 365 de 2005 (Ley de Aguas).

A continuación se presenta la propuesta del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA (2013) para ser adaptada a las condiciones de la zona de estudio.

## Análisis de Correlación Hidrología – Índices de Fenómenos Macroclimáticos

Considerando que a la escala interanual la hidroclimatología de una buena parte del territorio colombiano está influenciada por la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña (ENSO), La Oscilación del Atlántico Norte (NAO), La Oscilación Quasi-Bienal (QBO), entre otros, se propone dentro de este paso de la metodología realizar la evaluación de esta influencia en dos etapas. Primero a partir del cálculo de regresiones multivariadas, entre los índices climáticos mensuales de estos fenómenos macroclimáticos, ya sean los valores reales, los estandarizados o las anomalías de índices como el SOI (Índice de Oscilación del Sur), SST3-4 (Temperatura Oceánica Superficial en la zona Niño 3-4), ONI (Índice Oceánico del Niño), NAO (Índice de Oscilación del Atlántico Norte), QBO (Índice de la Oscilación Quasi-Bienal) todos ellos reportados desde 1951 y actualizados mensualmente por la Agencia Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA ver <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) y la hidrología mensual de la corriente analizada (obtenida a partir del registro diario homogéneo y completo en la estación A); esta correlación debe partir del concepto de año hidrológico (junio año 0 – mayo año 1).

Estas regresiones multivariadas también pueden incluir datos del mes o meses antecedentes de otras variables hidrometeorológicas locales como temperatura máxima, mínima, media, precipitación, caudales, etc. De encontrarse que este tipo de regresiones explican satisfactoriamente la variabilidad de los caudales mensuales de la corriente (coeficientes de determinación  $R^2 > 0,70$ ) ellas brindarían la posibilidad de pronosticar con cierto nivel de confianza los caudales mensuales para la corriente analizada y a partir de ellos realizar las estimaciones del régimen de caudal ambiental.

## Clasificación de registros por condición hidrológica

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

Una vez agrupados los años por condición hidrológica, se propone calcular los caudales medios mensuales para años secos, promedio y húmedos. A partir de estos caudales promedio mensuales, siendo está la propuesta hidrológica mensual de RCA.

## Índices de la curva de duración de caudales

La curva de duración de caudales es una de las técnicas más usadas para extraer información y es una forma de visualizar el rango completo de caudales, desde los caudales mínimos a los máximos registrados (Smakhtin, 2001). La curva se construye a partir de los datos de caudales diarios, mensuales o anuales donde se presenta la relación entre ciertos rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido (Silveira y Silveira, 2001; Jamett-Dominguez y Rodrigues-Finotti, 2005). En la Tabla 6 se muestran los diferentes usos que se han dado a los índices sacados a partir de la curva de duración de caudales.

Tabla 5. Índices de la curva de duración de caudal usados en el estudio de caudales ambientales.

| ÍNDICE DE FLUJO | USO  | FUENTE   |
|-----------------|--|--|
| Q95             | Usado como índice de caudal mínimo o indicador de condiciones mínimas extremas | Smakhtin(2001), Wallace y Cox (2002), Michigan Department of Enviromental Quality (2002) |
| Q90             | Condición mínima mensual en los puntos de descarga                             | Dakova et al., (2000)  |
|                 | Índice biológico que indica el caudal mínimo mensual                           | Stewardson y Gippel, (2003).   |
|                 | Usado para mantener la variación estacional mensual                            | Smakhtin et al., (1995)  |
|                 | Usado como índice de caudal base   | Smakhtin, (2000)   |
|                 | Valor mensual que brinda condiciones de caudal estable.                        | Caissie y El-jabi (1995)   |

|                    |   |                                       |
|--------------------|---|---------------------------------------|
|                    | Caudal mínimo mensual para el hábitat acuático  | Yulati y Burn(1998)                   |
|                    | Caudal critico considerado como el caudal mínimo limitante  | Rivera -Ramírez et al., (2002)        |
|                    | Describe las condiciones límite de la corriente y fue usado como un estimador conservativo de caudal base | Wallace y Cox (2002)                  |
| <b>Q50 mensual</b> | Caudal base para el manejo y planeación del recurso   | Ries y Friesz (2000), Ries (1997)     |
|                    | Usado para proteger la biota acuática   | U.S. Fish and Wildlife Service (1981) |
|                    | Mínimo caudal recomendado en ríos con represas  | Metcalf et al., (2003)                |

Fuente: Pyrce, (2004)

El uso de los índices Q95% y Q90% debe tomarse con precaución pues en algunos ríos representan caudales mínimos extremos que solo se presentan en las temporadas más secas y que por lo tanto no pueden ser recomendados como caudales ambientales a mantener en un río. En cambio el Q50%, representa la mediana del período de registro, es decir el caudal que ha sido excedido el 50% de las veces, es un caudal generoso con el ecosistema fluvial, pero cuyo valor no puede considerarse único a lo largo del año, porque hay eventos climáticos naturales (fenómeno de El Niño, anomalías climáticas, etc) que impiden que ese caudal sea satisfecho.

El cálculo del Q95% usualmente se ha propuesto en la literatura realizarlo a partir de la totalidad del registro histórico diario (caso de la mayoría de las metodologías que adoptan este índice), o calcularlo mes a mes, como lo propone el método del Northern Great Plains (NGPRP, 1974). En la propuesta aquí presentada, se sugiere adoptar el método NGPRP, con una variación, que incluye el cálculo del índice Q95% a partir de la construcción de las curvas de duración de caudales (CDC) medios diarios (para meses de enero a diciembre) y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), agrupando los registros diarios con base en la clasificación propuesta.

### Índice de caudal 7Q<sub>10</sub>

El índice debe ser interpretado como el caudal mínimo de 7 días consecutivos para un período de retorno de 10 años (Silveira y Silveira, 2001; Pyrce, 2004). A principios de los 70's agencias de los U.S que regulan la contaminación en los ríos, basaron el estándar de calidad del agua en el uso del índice 7Q<sub>10</sub>, pues la calidad fue considerada aceptable a menos que el caudal se encontrará por debajo del índice; cualquier desviación más allá de este valor podría degradar la calidad del agua más allá del estándar aceptado. También existen otras aproximaciones similares como el "7Q<sub>2</sub>" y el "10Q<sub>5</sub>" (Pyrce, 2004; Jamett-Dominguez y Rodrigues-Finotti, 2005). En la Tabla 4 se resume algunos de los usos que se le han dado al índice 7Q<sub>10</sub>, las fuentes bibliográficas reflejan el amplio rango de usos en varias partes del mundo.

Tabla 6. Algunos usos del caudal 7q10.

| ÍNDICE           | USOS  | REFERENCIA  |
|------------------|---|---|
| 7Q <sub>10</sub> | Usado para proteger y regular la calidad del agua cuando hay descargas de agua residual con el fin de prevenir los impactos ecológicos y biológicos | Diamond Et Al., (1994), Ries y Friesz (2000), Mohamed et al., (2003), Deksissa et al., (2003) |
|                  | Caudal diario que asegura la protección de la vida acuática   | New York State Department Of Enviromental Conservation (1996)                                 |
|                  | Caudal mínimo necesario para proteger el hábitat durante una situación de sequia  | Delaware Water Supply (2004)  |
|                  | Posible indicador de la potencial mortalidad de la vida acuática  | Imhof y Brown (2003)  |
|                  | Considerado el peor escenario en la modelación de la calidad del agua   | Mohamed et al (2002)  |

Fuente: Pyrce, (2004)

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

Como resultado del cálculo del 7Q<sub>10</sub> y del Q95% se obtiene la primera propuesta de caudales mensuales ambientales, discriminada por mes y para cada una de las tres condiciones hidrológicas (húmeda, promedio y seca), la cual, de acuerdo con el criterio de consistencia con estas dos metodologías internacionalmente aceptadas, resultaría para cada uno de los 36 casos (3 condiciones hidrológicas x 12 meses) como el valor máximo entre el 7Q<sub>10</sub> y el Q95% (max (7Q<sub>10</sub>, Q95%)) para el correspondiente mes y condición hidrológica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA ,2013).

## Estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales

Teniendo en cuenta lo dicho por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA (2013), dentro del componente hidrológico este es el paso más importante pues permite evaluar la propuesta inicial de caudales ambientales obtenida e ir afinándola de forma iterativa hasta garantizar el cumplimiento de los tres criterios que se detallan a continuación, y que esencialmente intentan preservar el régimen hidrológico de la corriente, con especial énfasis en los caudales más bajos:

i) Alteración máxima de la curva de duración de caudales (CDC) medios diarios para las condiciones sin y con proyecto. Este primer criterio intenta limitar la alteración máxima en la CDC para los caudales más bajos (percentiles mayores del 70% (Smakhtin, 2001) y para las condiciones sin y con proyecto, estableciendo un umbral igual al 0,50 para las relación entre las CDC sin y con proyecto, específicamente para los percentiles 70%, 80%, 90%, 92%, 95%, 98%, 99% y 99,5%. Para realizar la evaluación tanto de este criterio como de los otros dos abajo expuestos, y considerando que dicha evaluación se propone se realice a nivel diario (téngase en cuenta que la propuesta hidrológica de caudales ambientales es a nivel mensual) es necesario construir las series diarias hipotéticas de caudales medios diarios post-intervención. Estas series dependerán de la regla de operación del proyecto, mucho más clara para proyectos de derivación que para proyectos de descarga de caudales. Como primera aproximación, y a partir de las series de caudales diarios en la estación A ( $Q_{diario\_pre}$ ), se propone estimar el caudal diario post intervención ( $Q_{diario\_post}$ ) como el valor mínimo entre el valor de la propuesta mensual de caudales ambientales (para el mes  $i$  y condición hidrológica  $j$ ) y el valor del caudal diario registrado en la estación A, tal como se presenta a continuación:

$$Q_{diario\_post}_{i,j} = \min(Q_{amb}_{i,j}, Q_{diario\_pre})$$

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



ii) Alteración máxima de las frecuencias de valores mínimos de caudal. Este segundo criterio intenta limitar la reducción, por efecto de la intervención sobre la corriente, de los caudales mínimos para períodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años. Para ello, y a partir de las series pre y post intervención, obtenida esta última tal como se mencionó en el numeral previo, se propone que para cada uno de los períodos de retorno mencionados, la relación entre el caudal post y pre intervención, para el mismo período de retorno, sea siempre superior a 0.60. Nuevamente este análisis se encuentra limitado a los caudales mínimos, pero bien pudiera ser extendido a caudales máximos afinando la ecuación que permite estimar las series hidrológicas diarias para el período post intervención. Así, la propuesta mensual de caudales ambientales que cumple el primer criterio es evaluada, y si satisface este segundo criterio se continúa con el análisis, tal como se propone a continuación. En caso contrario, es necesario ajustar la propuesta mensual de caudales ambientales hasta garantizar el cumplimiento de este segundo criterio.

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

De acuerdo con Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA (2013) los IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) permite evaluar tanto las alteraciones del régimen hidrológico por efecto de la intervención (a partir de la comparación de series pre y post intervención) como establecer umbrales máximos de alteración del régimen hidrológico (a partir del análisis estadístico exhaustivo de los registros de las series pre intervención). Para realizar estos análisis IHA considera la evaluación de 32 índices hidrológicos que están agrupados en cinco categorías así: i) Magnitud de los caudales medios mensuales (a partir del cálculo de la mediana: 12 índices). ii) Magnitud y duración de caudales extremos (máximos y mínimos para duraciones de 1, 3, 7, 30 y 90 días: 10 índices) iii) Fecha de ocurrencia de caudales extremos (máximos y mínimos: 2 índices) iv) Frecuencia y duración de pulsos altos y bajos de caudal (4 índices) v) Tasa y frecuencia de cambio en las condiciones hidrológicas (4 índices). IHA permite realizar la caracterización de la variabilidad interanual del régimen hidrológico de la corriente a partir del cálculo de estadísticas descriptivas para cada uno de los 32 índices.

A partir de estos cálculos IHA permite identificar umbrales de alteración del régimen hidrológico asumiendo que las condiciones post intervención para cada uno de los 32 índices deben encontrarse dentro del rango de variabilidad de las condiciones naturales de cada uno de ellos. La estimación de estos umbrales se realiza para cada índice a partir de propuestas iniciales iguales al valor medio más o menos una desviación estándar, para el caso de cálculos

paramétricos, o cuartiles del 25% y 75%, para el caso de cálculos no paramétricos. Esta propuesta inicial de umbrales puede ser modificada por el analista contrastando resultados de análisis ecológicos de la corriente, con datos del régimen hidrológico de la misma. Los umbrales así determinados para cada índice definen los rangos en los cuales debieran encontrarse los valores del índice correspondiente para las series post intervención. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA ,2013).

La evaluación, se reitera a nivel cualitativo y con especial énfasis en los índices de caudales bajos de la propuesta mensual de caudales ambientales obtenida anteriormente, podrá realizarse siguiendo el procedimiento aquí descrito. Debe resaltarse que los índices de las categorías iii), iv) y v), altamente sensibles a las variaciones diarias de caudal, no debieran ser investigados con rigurosidad, dadas las limitaciones en la construcción de las series post intervención aquí expuestas. En caso de encontrar profundas alteraciones en algunos de los índices para los caudales bajos (en exceso por fuera de los umbrales estimados) la metodología sugiere realizar el ajuste de la propuesta mensual de caudales ambientales hasta reducir esta alteración a límites tolerables. Una vez se garantice este último criterio cualitativo y exploratorio de alteración del régimen hidrológico se obtiene la propuesta final de caudales ambientales medios mensuales por condición hidrológica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA ,2013).



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

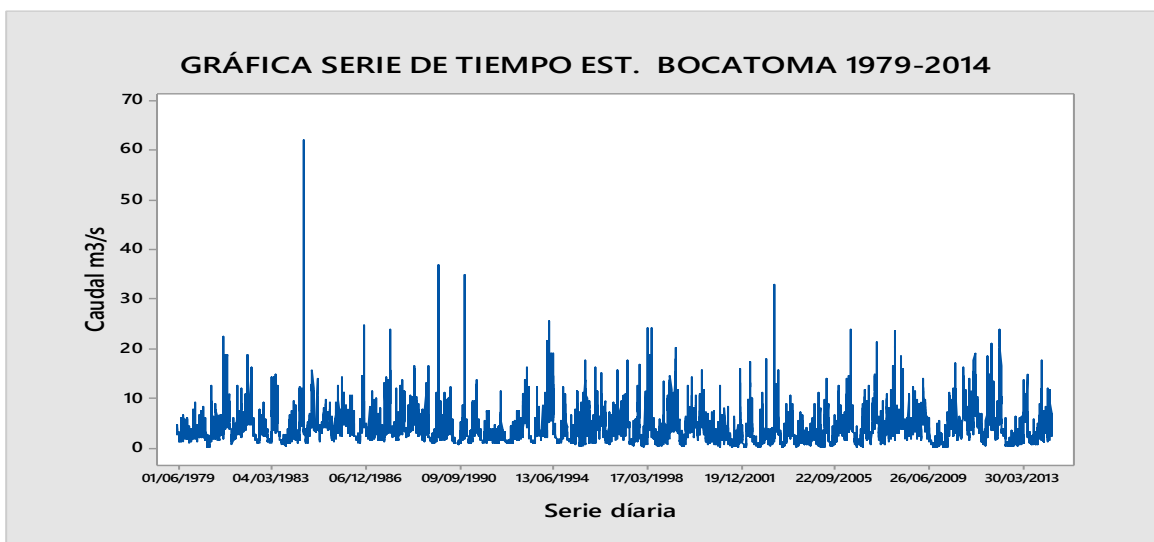
### 7.1. Análisis exploratorio de datos

Las estaciones limnigráficas de Bocatoma y Pichindé, la primera se encuentra ubicada en una latitud de  $3^{\circ}27'$  y una longitud de  $76^{\circ}34'$  a una altitud de 1074 msnm (La estación está en funcionamiento desde enero de 1946), la segunda se encuentra ubicada en una latitud de  $3^{\circ}26'$  y una longitud de  $76^{\circ}37'$  a una altitud de 1500 msnm (La estación está en funcionamiento desde enero de 1969). La información diaria y mensual fue entregada por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC) con un periodo de registro para los caudales medios diarios en Bocatoma con un total de 35 años desde enero de 1979 con un 9,45 % de datos faltantes y en Pichindé con un total de 36 años desde enero de 1978 con un 8,73 % de datos faltantes. La información mensual por su parte en Bocatoma cuenta con un periodo de registro de 68 años desde enero del 1946 tuvo un 5,25 % de datos faltantes, en Pichindé se contó con un registro de 45 años desde enero de 1969 con un 4 % de datos faltantes, adicionalmente la estación presentó datos atípicos para los meses de agosto, septiembre y octubre de 1990 con caudales de 7,60  $\text{m}^3/\text{s}$  y 13,00  $\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente; lapso durante el cual presentó un octubre en serie, posiblemente, a un error sistemático en el método de recolección de los datos, los cuales excedieron a los registrados en la estación La Bocatoma. Se realizó un análisis de correlación lineal, para ajustar los datos atípicos de estos meses con datos inconsistentes. El ajuste se llevó a cabo dado que para estos mismos meses la estación La Bocatoma registro caudales de 1,00, 1,20 y 3,30  $\text{m}^3/\text{s}$ . Los resultados ajustados de la estación Pichindé para los meses de Ago - Sep - Oct, fueron de 0,70, 0,90 y 1,70  $\text{m}^3/\text{s}$ , cabe señalar que la generación de los datos faltantes se realizó aplicando regresiones lineales entre los datos parciales, y mes a mes correspondientes a ambas estaciones de aforo entre sí, se obtuvieron altos coeficientes de correlación ( $> 0,77$ ).

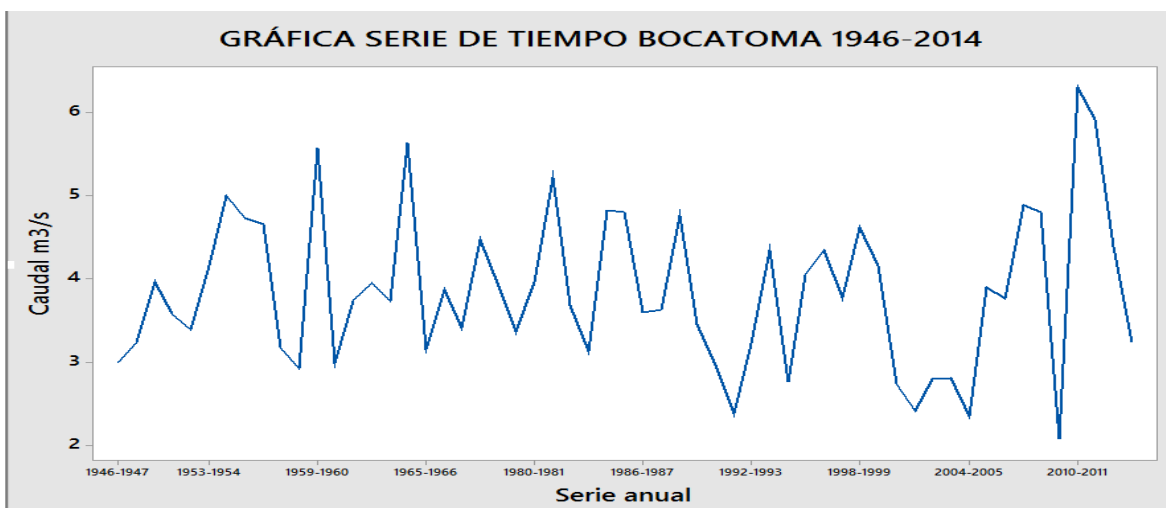
Para que la serie de caudales pueda utilizarse en un proceso estadístico se deben cumplir con los supuestos de persistencia, carecer de tendencia, ser consistente y homogénea. Supuestos que son comprobados por medio del análisis exploratorio de datos. En el documento, se presenta el análisis exploratorio de la serie de caudales medios anuales, a partir de pruebas gráficas y cuantitativas, con el fin de comprobar si hay cambio o tendencia en la media y varianza del registro, además de comprobar su persistencia y homogeneidad. Para ello se aplicaron una serie de análisis estadísticos gráficos y cuantitativos encontrados en la literatura, y cuyos resultados son descritos a continuación.

## Pruebas Gráficas

Para el análisis de las pruebas gráficas se utilizaron gráficas de serie de tiempo, los histogramas de frecuencias, el diagrama de cajas y la gráfica de normalidad. Con la gráfica de serie de tiempo se pueden observar las tendencias y los cambios en la serie de tiempo cuando ella crece o decrece o cuando se presentan saltos bruscos; en los histogramas se puede observar si hay cambios o tendencias en la series si se presenta más de un pico o la forma del histograma se muestra horizontal. El diagrama de cajas se usa para determinar si existe diferencias significativas entre las características estadísticas de la series. Por su parte la gráfica de normalidad muestra si los datos se distribuyen siguiendo la distribución normal o no, análisis que sirve para determinar que pruebas cuantitativas (paramétricas o no paramétricas) se usan para hacer el análisis exploratorio estadístico.



Gráfica 2 Gráfica de serie de tiempo – serie de caudales medios diarios para estación Bocatoma 1979- 2014.



Gráfica 3 Serie de tiempo – serie de caudales medios anuales para la estación Bocatoma 1946- 2014.

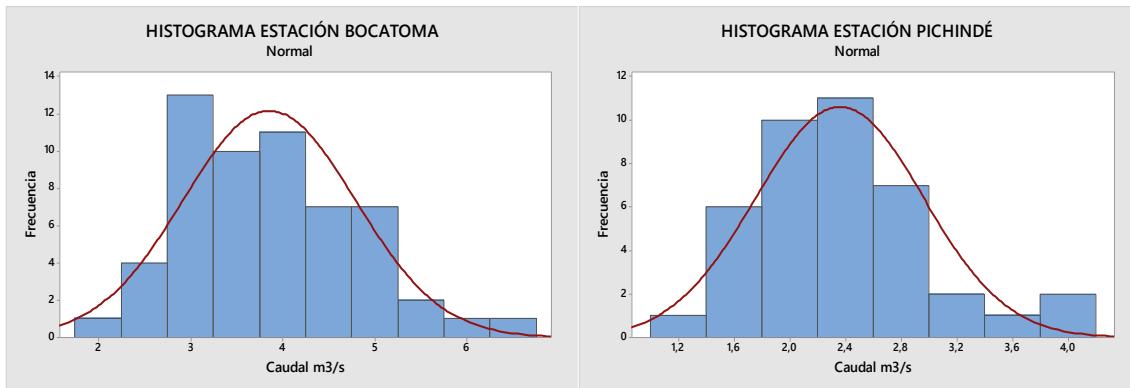
En gráfica 2 se muestra la serie de tiempo del registro de caudal medio diario obtenida con el paquete computación estadístico SPSS-23; es de observar que existe variabilidad en el periodo de registro, no muestran ninguna tendencia o cambio visible significativo, pero si se ve la ocurrencia de crecientes, pequeñas crecientes y caudales mínimos extremos, para el caso de la estación Pichindé muestra una alta dispersión en los datos en algunas partes de las series diarias y mensuales. Se observa en la estación Pichindé un salto en el año 1990, que puede producir un cambio en la medida de tendencia central y también en la varianza, supuesto que será posteriormente comprobado con el análisis confirmatorio. El caudal máximo registrado de la serie de caudales medios diarios en la estación bocatoma fue de  $62,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en el 01 de Julio de 1984 y el caudal mínimo registrado fue de  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  en agosto de 2001, paralelamente la estación Pichindé registra un caudal máximo de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  el 17 de octubre de 1990 y un valor mínimo de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  registrado el 22 de septiembre de 1983. Cabe anotar que los valores máximos instantáneos oscilan entre  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en fuertes estiajes en la estación Pichindé y  $193 \text{ m}^3/\text{s}$  en la estación Bocatoma en periodos de lluvias intensas, generalmente asociados a extremos del ENOS, Niño y Niña, respectivamente.

Para el caso de la serie anual, la media y la mediana no presentan diferencias una respecto de la otra, es decir que la serie de datos no presenta valores extremos que hagan perder representatividad de la media como estadístico estrella; la asimetría es positiva indicando que la media se está dejando arrastrar por los valores altos y es por ello que su valor es superior a la mediana en ambas estaciones, pero no en muy alto porcentaje. La serie anual en la estación Bocatoma y Pichindé presentan un coeficiente de variación de 0,24 y 0,25 respectivamente, es decir la serie de datos tiende en promedio a desviarse un valor de 24,22% y 25,46 % del valor de la media para cada estación.

De acuerdo con Castro (2008) el rango representa la medida más sencilla para ver la variabilidad de los individuos en la serie; el rango es bastante amplio para las dos estaciones, resultado del régimen bimodal (periodos lluviosos y periodos secos) de la hidrología Colombiana, y los efectos de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en el Valle del Cauca. Por su parte, la serie de caudales anuales presenta, debido a su grado de agregación, menor desviación estándar, asimetría y valores máximos y mínimos significativamente diferentes a los presentados en la serie anual.

Las pruebas gráficas y cuantitativas, se llevaron a cabo con la información de la serie anual construida con los registros medio mensuales (Gráfica 3), debido a que presenta independencia en la serie, el grado de agregación disminuye la posibilidad de encontrar tendencias espureas y realmente detectar una tendencia o falta de homogeneidad en la serie debida a la falta de estacionariedad en la media y/o varianza y no debida a los cambios de estaciones que normalmente presentan las series cuando el grado de agregación es menor a un año.

Con respecto al histograma de frecuencias (Gráfica 4), para las dos estaciones muestra dos picos lo que podría hacer suponer que la serie anual muestra cambio o tendencia. El

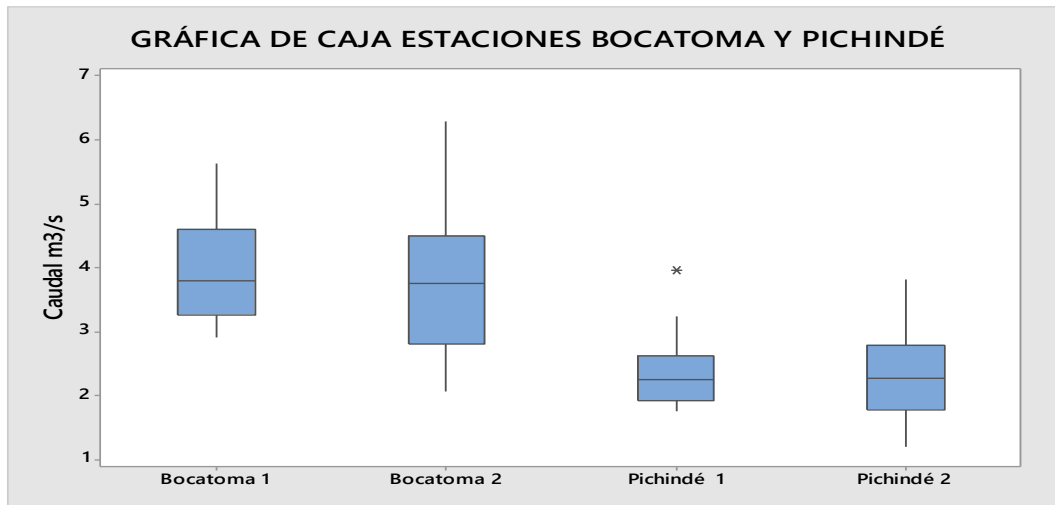


Gráfica 4. Histogramas Estaciones Bocatoma y Pichindé.

histograma es un gráfico de barras que representa la frecuencia absoluta o relativa de la información que cae dentro de intervalos de igual amplitud, para ello la información es agrupada en intervalos de acuerdo a su magnitud. A veces la amplitud del intervalo interfiere en la interpretación del histograma; por ejemplo, si se usa muchos intervalos se puede ocultar el modelo de distribución (Maidment, 1993), pero si se usan pocos, información relevante se puede perder, es por ello que la selección arbitraria de la amplitud de los intervalos se puede considerar una de las desventajas de usar esta herramienta gráfica.

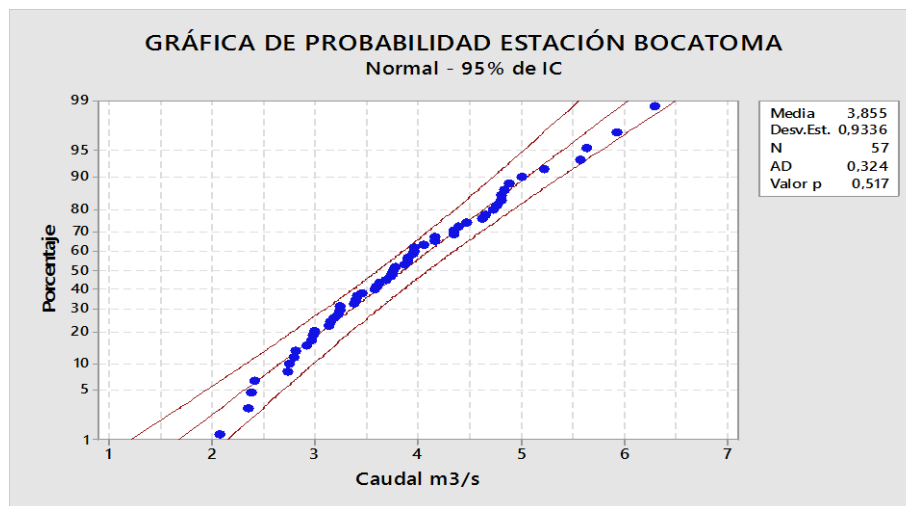
La gráfica de cajas se puede considerar un resumen de la información, que da una idea de la tendencia central, la variabilidad, la simetría y la presencia de puntos atípicos. Este tipo de gráficos juegan un papel importante cuando se comparan dos o más series de datos.

Diferencias significativas entre las características estadísticas de la primera parte de la serie con la segunda, indican cambio en la media de la serie anual (Smith y Campuzano, 2000; Maidment, 1993; Sánchez, 1999). Para realizar el diagrama (Gráfica 5) se dividió la serie en dos partes iguales, de la Gráfica 5 se puede decir que la primera parte de la serie difiere de la segunda parte de la serie anual, tanto en la posición de la media, en el rango y en sus cuantiles, lo que podría suponer que la serie presenta un cambio en la media y en la varianza, es decir, que no presenta estacionariedad en sus parámetros, hipótesis a comprobar con las pruebas cuantitativas.



Gráfica 5. Diagrama de cajas Estación Bocatoma y Pichindé.

Muchos de los modelos en el análisis hidrometeorológicos, asumen que la variable bajo consideración es normalmente distribuida. Castro (2008) recomienda la realización de la prueba de normalidad la cual sería necesaria, antes de realizar modelación o cualquier otro tipo de análisis estadístico. Para ello se gráfica la información en un papel de probabilidad normal, si la gráfica muestra una línea recta, indicara que la información se distribuye normalmente, de otra manera la información no será así. La Gráfica 6 muestra que la serie de caudales anuales se distribuye siguiendo la distribución normal.



Gráfica 6. Probabilidad de Estación Bocatoma.



## Pruebas Cuantitativas

Para comprobar que no existe tendencia en la serie, es decir que no hay correlación entre el orden en que se tomaron las observaciones y el incremento (o decremento) en magnitud de los datos serie anual (Dahmen y Hall, 1990), se usa el método de rango correlación de Spearman, cuya expresión es una medida de la asociación lineal entre los rangos y números de orden de la serie original y la serie ordenada en forma creciente.

Por otra parte, detectar cambios en la varianza y en la media son pasos fundamentales para determinar si la serie presenta estacionariedad o no, el hecho de que no lo sea, significa que los parámetros estadísticos varían ya sea debido a causas naturales o antropogénicas.

Dado que la serie anual se distribuye de forma normal, se escogió la prueba de Shapiro-Wilk, para conocer si la serie es estable o no en la varianza y en la media respectivamente. Los resultados mostraron que ninguno de los dos test fue rechazado, es decir la hipótesis nula de igualdad de varianzas e igualdad de medias no fue rechazada para un nivel de significancia del 5%, lo que permite concluir que la serie es estacionaria en sus dos primeros momentos.



## 7.2. OBJETIVO 1

### 7.2.1. Caracterización hidrológica del régimen natural de caudales

El nivel de conocimiento actual permite concluir que el régimen natural de caudales es el elemento vertebrador de los ecosistemas fluviales, estructurando tanto el medio acuático como el ripario, modelando sus condiciones ambientales y posibilitando la variedad de hábitats y el dinamismo en sus interacciones (Martínez Santa-María y Fernández Yuste, 2003; Poff et al., 1997; Arthington y Zalucki, 1998; Castro, 2008). Es por ello que la etapa inicial en la determinación del RCA es la caracterización del régimen natural de caudales en aquellos aspectos ecológicamente más significativos.

#### **Componentes del Régimen Natural de Caudales**

De acuerdo con Martínez Santa-María y Fernández Yuste (2003) la metodología aplicada se inspira en los planteamientos “holísticos” (Palau, 1999; Arthington, 1998) y García de Jalón (2000), los cuales deben interpretarse más como una filosofía, que como una secuencia rígida y estandarizada de procedimientos. Sus pilares básicos son:

El río es un ecosistema con integridad funcional, en el que la biota acuática, la de ribera, la morfología y el régimen hidro-sedimentológico forman un todo, dinámico e interrelacionado y con una fuerte sinergia entre sus componentes.

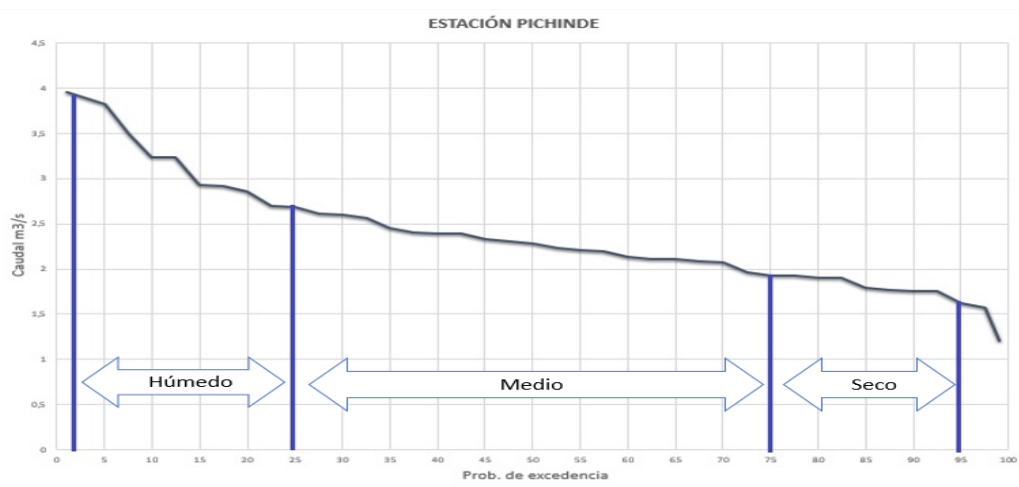
Los elementos y procesos que definen y regulan el ecosistema fluvial están estrechamente vinculados con el régimen natural de caudales, tanto en sus aspectos cuantitativos como en su variabilidad (Arthington, 1998; EPA, 1997; Burgess y Thoms, 1998).

El régimen natural de caudales debe utilizarse como “guía”, para siguiendo el principio de “diseñar con la naturaleza” (Reeves, 1994), proponer un RCA con una estructura y unos rangos derivados del régimen natural.

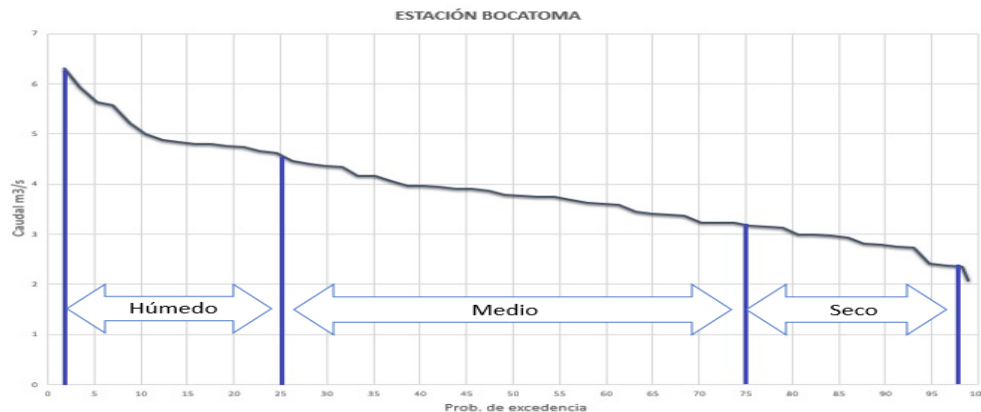
Partiendo de la información disponible en régimen natural de los caudales mensuales en sus valores medios de las estaciones de Bocatoma y Pichindé, desde 1946-2014 y 1969- 2014 respectivamente, Considerando el año hidrológico como el comprendido entre el comienzo de junio de determinado año (Año 0) hasta el fin de mayo del siguiente (Año 1) IDEAM (2010), se caracterizó el régimen natural de caudales en la cuenca hidrográfica del río Cali mediante el análisis de:

## Variabilidad Interanual De Caudales

A partir de la serie de caudales medios anuales de cada año hidrológico, se construyó la curva de percentiles de excedencia para establecer años “húmedos”, “medios” y “secos” y sus umbrales de contribución respectivos. En las Gráficas 7 y 8, se muestra la curva de excedencias y en la Tabla 7 se muestra los umbrales de contribución de cada tipo de año, con ello se puede definir cuales años del registro histórico se precisarán como húmedos, secos o medios, una vez hecho eso se hace un análisis estadístico para determinar si existen diferencias significativas entre los diferentes tipos de años, si hay diferencias se define un régimen de caudal por cada tipo de año y si no las hay se determina un régimen natural para la serie hidrológica en general. Para determinar si existían diferencias significativas entre las medias de los años húmedos, secos y medios, se realizó la prueba no paramétrica U – Mann Whitney, los resultados mostraron que existían diferencias significativas entre los tres tipos de años definidos a partir de la curva de excedencias ( $p$ -value (hum-med) = 0.0007;  $p$ -value (hum - sec) = 0.0034), por lo tanto se determinó un régimen natural de caudal para cada tipo de año.



Gráfica 7. Curva de probabilidades de excedencia – Estación Pichindé.



Gráfica 8. Curva de probabilidades de excedencia – Estación Bocatoma.

Tabla 7. Umbrales de contribución para cada tipo de año.

|                   | TIPO DE AÑO | UMBRAL SUPERIOR (m <sup>3</sup> /S) | UMBRAL INFERIOR (m <sup>3</sup> /S) | Q PROM (m <sup>3</sup> /S)** |
|-------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| ESTACIÓN BOCATOMA | Húmedo      | 6,25                                | 4,62*                               | 5,43                         |
|                   | Medio       | 4,62                                | 3,23*                               | 3,93                         |
|                   | Seco        | 3,23                                | 2,38                                | 2,80                         |
| ESTACIÓN PICHINDÉ | Húmedo      | 3,91                                | 2,68*                               | 3,30                         |
|                   | Medio       | 2,68                                | 2,10*                               | 2,39                         |
|                   | Seco        | 2,10                                | 1,62                                | 1,86                         |

\*Caudales estimados para una probabilidad de excedencia de 0.25 y 0.75 respectivamente

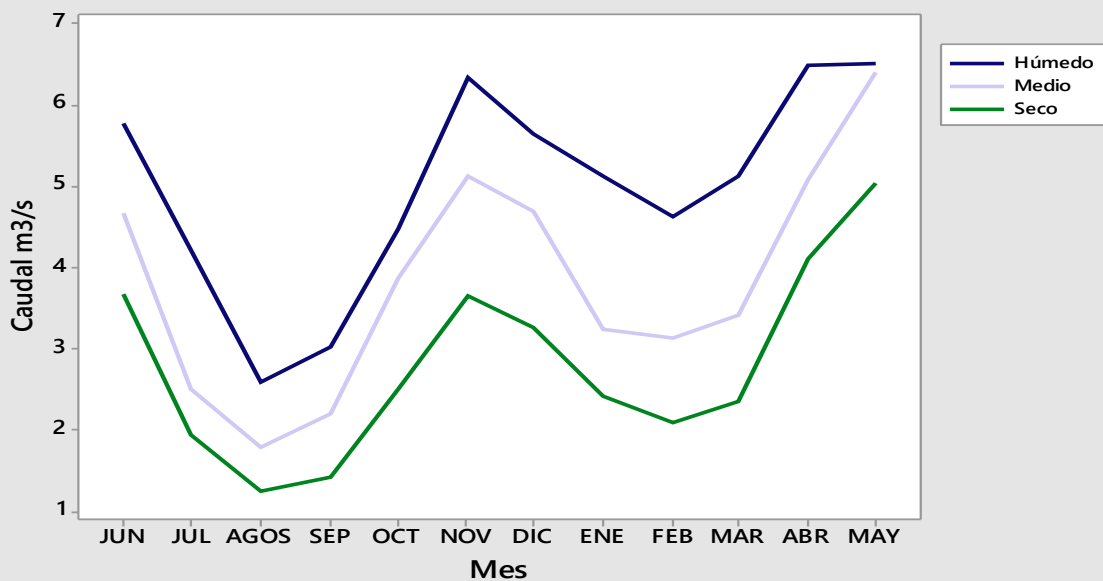
\*\* Caudales calculados con los registrados anualmente por año hidrológico y para cada tipo de año.

### La Variabilidad Intranual.

Obtenidos en el apartado anterior los valores representativos de las contribuciones mensuales para cada tipo de año -“húmedo, medio, seco”. El procedimiento seguido analiza mes a mes si hay diferencias significativas entre las medianas correspondientes a los tres tipos, si esos valores se mantienen como representativos de la variabilidad del mes. Cuando no las hay es necesario reagrupar los datos y estudiar la variabilidad mensual sin considerar la desagregación según el “tipo” de año y establecer sobre la correspondiente curva de duración de caudales de cada uno de estos meses, los umbrales para caracterizar la variabilidad de los caudales.

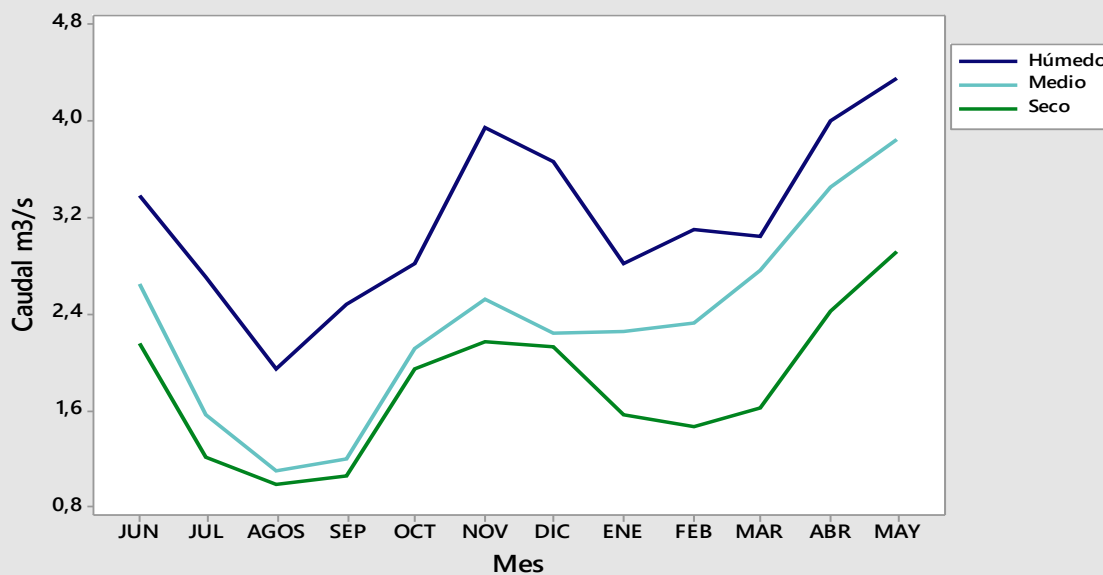
Se aplicó la prueba U-Mann Whitney pero ahora entre las medianas de cada uno de los meses para los tres tipos de años definidos en el aparte anterior. Los resultados mostraron que para los 12 meses del año, existen diferencias significativas entre el estadístico de posición y el tipo de año considerado, luego se determinó el caudal medio representativo de cada tipo de año en régimen natural, como se muestra en la Tabla 8 y en las Gráficas 9 y 10. Es imprescindible mantener ese mismo patrón en un RCA, porque los ciclos biológicos de la biota acuática y de ribera están vinculados a esos ciclos estacionales de los caudales (Martínez Santa-Maria y Fernandez Yuste, 2003).

CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN RÉGIMEN NATURAL Y POR TIPO DE AÑO - ESTACIÓN BOCATOMA



Gráfica 9. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año. Estación Bocatomá

CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN RÉGIMEN NATURAL Y POR TIPO DE AÑO - ESTACIÓN PICHINDÉ



Gráfica 10. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año. Estación Pichindé

Tabla 8. Caudales medios mensuales en régimen natural y por tipo de año.

| Mes     | Estación Bocatoma |       |       | Estación Pichindé |       |       |
|---------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|         | Húmedo            | Medio | Seco  | Húmedo            | Medio | Seco  |
| JUN     | 5,78              | 4,68  | 3,68  | 3,38              | 2,65  | 2,15  |
| JUL     | 4,21              | 2,51  | 1,93  | 2,70              | 1,56  | 1,21  |
| AUG     | 2,59              | 1,79  | 1,23  | 1,94              | 1,10  | 0,99  |
| SEP     | 3,02              | 2,20  | 1,41  | 2,48              | 1,20  | 1,06  |
| OCT     | 4,48              | 3,87  | 2,50  | 2,81              | 2,12  | 1,95  |
| NOV     | 6,35              | 5,13  | 3,66  | 3,95              | 2,52  | 2,17  |
| DEC     | 5,65              | 4,69  | 3,26  | 3,66              | 2,24  | 2,13  |
| ENE     | 5,13              | 3,25  | 2,41  | 2,81              | 2,25  | 1,56  |
| FEB     | 4,63              | 3,13  | 2,08  | 3,09              | 2,33  | 1,46  |
| MAR     | 5,12              | 3,41  | 2,35  | 3,04              | 2,76  | 1,62  |
| APR     | 6,50              | 5,08  | 4,10  | 4,00              | 3,44  | 2,43  |
| MAY     | 6,51              | 6,40  | 5,03  | 4,35              | 3,84  | 2,92  |
| Media   | 4,99              | 3,84  | 2,80  | 3,18              | 2,33  | 1,80  |
| CoefVar | 25,71             | 35,85 | 40,97 | 22,09             | 34,86 | 32,54 |
| Mínimo  | 2,59              | 1,78  | 1,23  | 1,94              | 1,09  | 0,99  |
| Máximo  | 6,51              | 6,40  | 5,03  | 4,35              | 3,84  | 2,91  |

La distribución del caudal durante el año presenta un comportamiento bimodal, es decir dos temporadas de caudales altos y dos temporadas de caudales bajos, intercaladas. Las temporadas de caudal reducido corresponde a los meses de Enero, Febrero, Marzo (primer semestre), y Julio Agosto y Septiembre (segundo semestre); registrándose el menor caudal en el mes de Agosto. Los periodos de caudal elevado corresponde a los meses de Abril, Mayo y Junio (primer semestre) y Octubre, Noviembre y Diciembre (segundo semestre); presentándose el mayor caudal en el mes de mayo

Un RCA deberá mantener una fluctuación estacional análoga a la identificada en el régimen natural. Es imprescindible mantener ese patrón porque los ciclos biológicos de la biota acuática y de ribera están vinculados a esos ciclos estacionales de los caudales (Graficas 9 y 10). Además el RCA deberá respetar el valor natural correspondiente al mínimo caudal medio mensual para cada tipo de año.

### Análisis de fenómeno NIÑO y NIÑA

Bedoya *et al.* (2010) señala, que en algunas regiones, sobre todo en países ecuatoriales, los efectos relacionados a la variabilidad climática predominan sobre los del cambio climático. Los países situados en la zona ecuatorial, como Colombia, están bajo la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical, franja donde se encuentran los vientos alisios procedentes del norte y noreste del hemisferio norte y los vientos del sur y sureste del hemisferio sur, que inciden en las condiciones climáticas del país (Hurtado, 2010).

Trabajos como el de Montoya, (1995); Mayorquín, (1997); Avila, (2012); Avila, Carvajal y Gutiérrez, (2014) evalúan la disponibilidad hídrica de la cuenca río Cali teniendo en cuenta el aumento en la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, asociados a la Variabilidad Climática y/o al Cambio Climático, considerando en la actualidad como el principal problema ambiental del siglo XXI, haciendo más vulnerables las sociedades humanas. Se analizaron la influencia del fenómeno ENOS en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Cali, encontrando correlaciones significativas de Variables Macroclimáticas (VM) asociadas al ENOS con el caudal de las estaciones de Bocatoma y Pichindé.

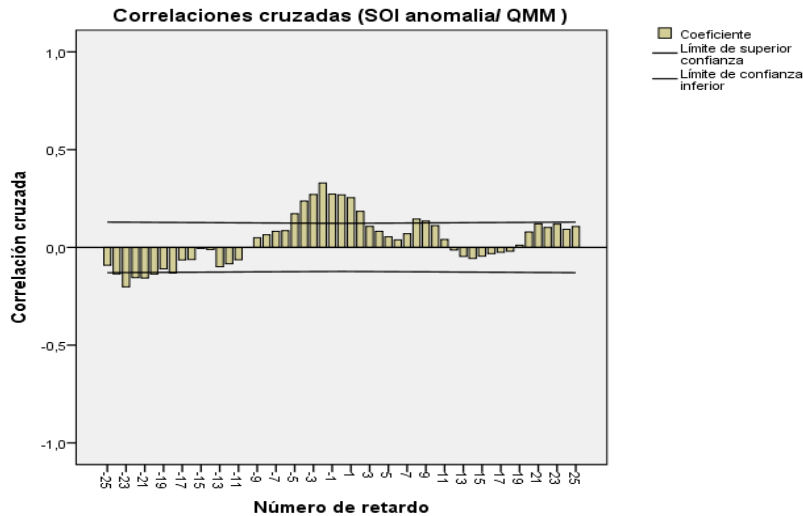
Análisis de anomalías estandarizadas se realizó con base al periodo registros medios mensuales, se calcularon las anomalías promedio de caudales mensuales de años Niño, Niña, con respecto a años normales (No ENOS), siguiendo la metodología usada por Bedoya et al., (2010); esta clasificación se efectuó considerando el índice evaluado Multivariate Enso Index (MEI). De acuerdo con Poveda et al., (2002); Carvajal, (2004); Bedoya et al., (2010) y Avila, (2012), la región Niño 3-4 es la que mejor correlación presenta con la hidroclimatología colombiana. Posteriormente, se calculó la función de correlación cruzada del caudal con respecto a las VM como: MEI, Oceanic Niño Index (ONI) y Southern Oscillation Index (SOI).

De acuerdo (Inzunza, 2001) en palabras de Avila (2012) la intensidad de un fenómeno como El Niño depende de la magnitud de las anomalías, tanto en el océano como en la atmosfera y del área cubierta por las mismas en el Pacífico tropical. Esta intensidad, aunque influye, es diferente de la magnitud del efecto climático y del impacto producido por el fenómeno en las actividades humanas. El efecto climático depende de la época del año en que se presenta el fenómeno y el impacto socioeconómico está más relacionado con la vulnerabilidad de las diferentes regiones del país y de los sectores de la actividad nacional. La variabilidad de la hidrología de una región involucra la influencia de diversas VM, por lo cual es útil cuantificar el grado de dependencia lineal entre las mismas a través de coeficientes de correlación cruzada a diferentes rezagos en el tiempo (Carvajal et al., 2007).

Las VM de ENOS se consideraron teniendo en cuenta la ubicación donde son tomadas, la vigencia de funcionamiento y la relación de estas variables con la hidrometeorología de la zona de estudio en concordancia con lo planteado por Puertas Y Carvajal (2008) citado por Avila (2012) estas VM son: (I) el Índice de Oscilación del Sur (SOI), que se define como la diferencia de las anomalías mensuales de presión atmosférica estandarizadas entre un centro de alta presión en Tahití (17° S, 150° O) y un centro de baja presión cerca de Darwin (12° S, 131° E); la fase cálida de ENOS está asociada a un IOS bajo o negativo; (II) el Índice Multivariado de ENOS (MEI), el cual relaciona las principales variables en el océano Pacífico: presión a nivel del océano, componentes zonal y meridional de los vientos de superficie, temperatura de la superficie del océano, temperatura del aire en la superficie y nubosidad valores positivos del MEI se relacionan con El Niño (Puertas y Carvajal, 2008). (III) el índice oceánico del Niño (ONI) el cual es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del océano en la Región Niño 3-4.



Valores positivos del ONI, mayores o iguales a 0,5 por 5 meses consecutivos o más, indican la ocurrencia de un evento El Niño. Valores negativos del ONI, inferiores o iguales a -0,5 por 5 meses consecutivos o más, indican la ocurrencia de un evento La Niña (Guarín y Ochoa, 2011).



**Gráfica 11. Correlaciones cruzadas entre el Índice de Oscilación del Sur (SOI) y los caudales medios mensuales (QMM)**

Castro y Carvajal, (2010) señalan el uso del análisis de correlación cruzada para medir el grado de asociación lineal entre dos variables y se refiere al grado de variación conjunta que existe entre las variables relacionadas. Y en concordancia con Avila (2012) en el estudio se estimaron coeficientes de correlación de Spearman ( $r$ ), por ser el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre dos variables cuantitativas, relacionando la variable hidrológica de caudal medio mensual en la cuenca del río Cali con VM asociadas a ENOS como: SOI, ONI y MEI; todas las VM y la variable de caudal se correlacionaron.

Puertas y Escobar, (2008) en palabras de Avila (2012) recomiendan determinar el valor de probabilidad o significancia de los resultados con la probabilidad ( $p$ ) de obtener un valor para el estadístico tan extremo como el realmente observado si la hipótesis nula fuera cierta, para el caso de correlación cruzada (Gráfica 11), se rechazó la hipótesis nula de independencia lineal, es decir, la hipótesis de que el coeficiente de correlación vale cero en la población y se determinó que existe relación lineal significativa, cuando el nivel crítico  $p$  fue menor que el nivel de significancia establecido en 5%.

### Estudio de los Caudales Máximos o Avenidas

Para determinar los caudales máximos o avenidas, se hizo un estudio de las avenidas geomorfológicas siguiendo las pautas dadas por Martínez Santa-María y Fernández Yuste (2003) y sintetizadas en la Tabla 9 y en el anexo B donde se muestran los procedimientos y criterios a seguir en su implementación. EL papel del caudal generador del lecho ( $Q_{GL}$ ) o

caudal de Bankfull en la génesis y dinámica morfológica de los ríos está ampliamente reconocido en la literatura especializada (Knighton, 1998). Es fundamental considerar la magnitud, frecuencia y duración, ya que el trabajo geomorfológico necesita que esos caudales circulen durante tiempo suficiente para que sus efectos se manifiesten adecuadamente. Estas avenidas, además del trabajo geomorfológico en un sentido estricto, también afectan a la composición y dinámica de la vegetación riparia y macrófitas, que a su vez condicionan la morfología y la fauna (Martínez Santa-María y Fernández Yuste, 2010). De acuerdo con las pautas dadas, se calculó la avenida geomorfológica y se escogió para el RCA un caudal generador de lecho mayor a  $0.64 Q_{GL}^{NATURAL}$  los resultados se muestran a continuación.

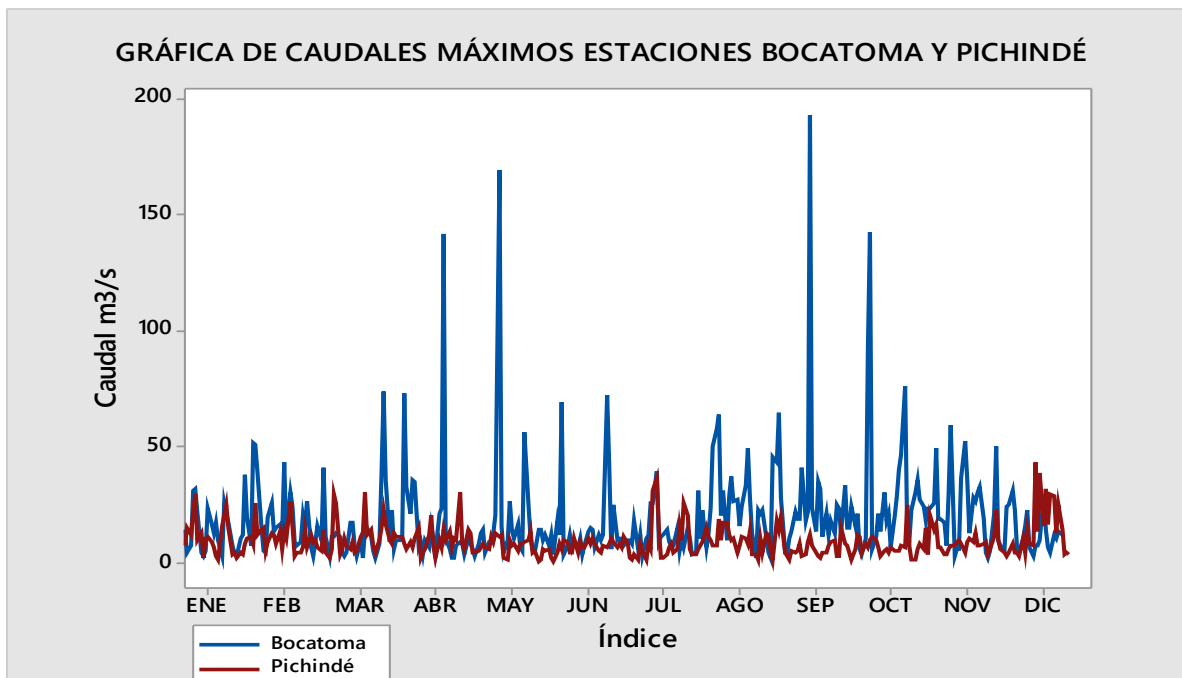
Tabla 9. Características generales de la avenida geomorfológica del río Cali.

| ASPECTO            | BOCATOMA                 | PICHINDÉ                |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Magnitud $Q_{GL}$  | 259,24 m <sup>3</sup> /s | 96,12 m <sup>3</sup> /s |
| Frecuencia         | 1.2 años                 | 1,1 AÑOS                |
| Estacionalidad     | Mayo- Noviembre          |                         |
| Duración           | 5 días                   |                         |
| Máxima instantánea | 193 m <sup>3</sup> /s    | 79,9 m <sup>3</sup> /s  |

La magnitud del  $Q_{GL}$  para los datos de las estaciones analizadas varía considerablemente y esto tiene que ver en concordancia con Montoya (1995) el cual señala que el 78% del área de la cuenca presenta una pendiente entre 10 % - 45 % cuyo relieve oscila de ondulado a fuertemente quebrado, en este sentido la zona alta con mayores pendientes renueva su lecho con más frecuencia.

La duración se hace a partir del criterio de escoger el paso para el cual se produce una variación más significativa. En el caso de máximos será aquel a partir del cual se aprecia una disminución más significativa del caudal, pues eso indicará que pasos más grandes, o lo que es lo mismo intervalos de tiempo mayores, implican reducciones sensibles en el caudal medio de esos intervalos, y por tanto su eficacia a la hora de desarrollar un “trabajo geomorfológico” será menor. La serie de caudales diarios máximos y mensuales máximos presentan los mayores caudales en los meses de Mayo y Noviembre. Los valores extremos registrados en las dos estaciones son de 193 m<sup>3</sup>/s en Bocatoma y 79,9 m<sup>3</sup>/s en Pichindé (Gráfica 12).

Para estudios más rigurosos y con una aplicabilidad específica, como en la determinación de un régimen de caudal ambiental para obras hidráulicas, tales como hidroeléctricas y represas, donde las avenidas frecuentes deben ser caracterizadas en su totalidad con el fin de permitir la renovación geomorfológica necesaria en la protección del río.



Gráfica 12. Caudales máximos estación Bocatoma y Pichindé

### Estructura de los Caudales Mínimos o Sequías

Los caudales mínimos en un RCA, sea cualquier escenario, deben ser consistentes con las descargas registradas para el mes más seco en régimen natural. Así que la caracterización de las sequías para los escenarios del RCA, debe plantearse como la determinación de unos umbrales o de unos valores mínimos observados en régimen natural que deberán ser respetados en el RCA. Se sintetizan en la tabla 10 y en el Anexo B se muestran los criterios para la determinación de los umbrales mínimos según Martínez Santa-María y Fernández Yuste (2003).

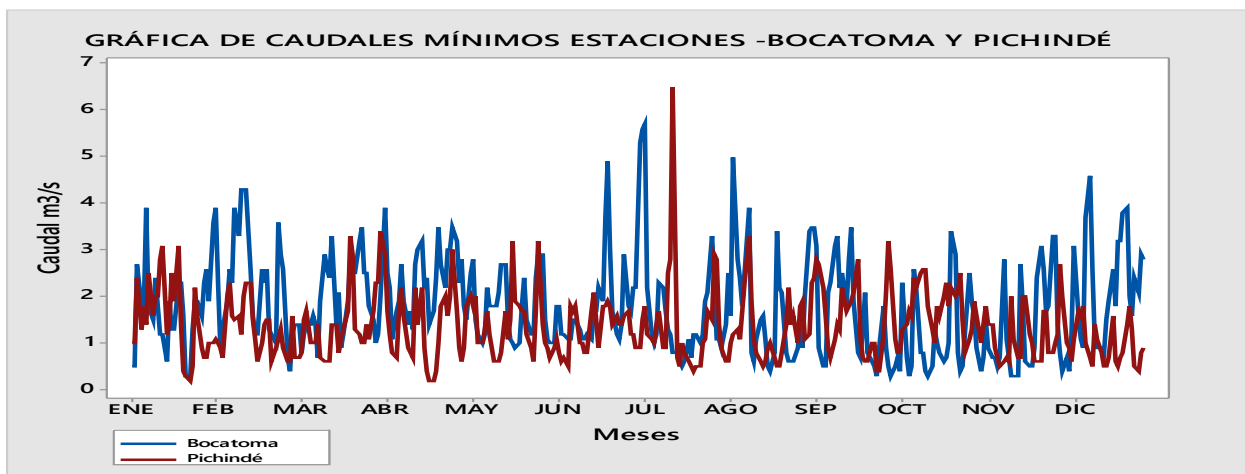
Tabla 10. Estructura de los caudales mínimos o sequías.

| ASPECTO                | BOCATOMA               | PICHINDE |
|------------------------|------------------------|----------|
| $Q_{\min 7\text{med}}$ | 1,01 m <sup>3</sup> /s | 0,83     |
| $Q_{\min 7\text{min}}$ | 0,33 m <sup>3</sup> /s | 0,20     |
| Duración               | 17 días                |          |
| Mínimo histórico       | 0,33                   | 0,20     |
| Estacionalidad         | Julio -agosto          |          |

En la tabla anterior el caudal mínimo de 7 días consecutivos es equivalente al mínimo histórico la serie diaria, el cual debe ser el mínimo caudal en períodos críticos reconociendo

de acuerdo con Richter et al.(1996); Poff et al. (1997) y Lytle y Poff (2004) el establecimiento arbitrario de un caudal mínimo es inadecuada, ya que la estructura y la función de los ecosistemas y adaptaciones de su biota son generadas por patrones de variación temporal en los caudales fluviales. En situaciones de sequía el método propuesto por Martínez Santa-María y Fernández Yuste (2003), recomienda el valor del caudal mínimo medio de 7 días consecutivos, es importante tener en cuenta que el análisis de caudales mínimos para el río Cali se ve condicionado por las limitaciones para la regulación hídrica, propias de su condición natural, es decir, características fisiográficas, conformación hidrogeológica, influencia climática, regímenes de precipitación, además las presiones que generan las actividades antrópicas como la minería, irrigación, deforestación, desviación de caudales , incendios forestales, adicionalmente obras de remodelación de la planta Río Cali y de alcantarillado entre los años 1995 – 1996 sobre quebradas tributarias en cercanías de la estación Bocatoma reportan Ortiz, Chicando y Arias (1996) desviación de caudales lo cual genera una limitación en el estudio de los valores críticos de la cuenca en régimen natural, en mayor proporción para los valores registrados en la estación Bocatoma.

La duración se hace a partir del criterio de escoger el paso para el cual se produce una variación más significativa En los mínimos, el “paso” seleccionado será aquel a partir del cual se aprecia un incremento más significativo, pues eso indicará que intervalos de tiempo mayores implican incrementos sensibles en el caudal medio de esos intervalos, y por tanto su efecto sobre el umbral de resiliencia de la biota acuática será menos presionado. La serie de mínimos diarios y mínimos mensuales presentan los valores de caudal mínimos en los meses de Enero y Agosto, Los valores extremos registrados en las dos estaciones son de 0,33 m<sup>3</sup>/s en Bocatoma y 0,2 m<sup>3</sup>/s en Pichindé (Gráfica 13).



Gráfica 13. Caudales mínimos estaciones Bocatoma y Pichindé.



## 7.3. OBJETIVO 2

### 7.3.1. Aplicación de las metodologías hidrológicas

Para el cálculo y posterior comparación del caudal ambiental de la cuenca torrencial andina se aplicaron algunos de los métodos hidrológicos descritos en el capítulo 6.2 a las estaciones limnimétricas Bocatoma y Pichindé. Es de tener en cuenta que la mayoría de ellos tienen un carácter de simple aproximación, admisible como punto de partida mientras no se disponga de una mejor caracterización biológica y ambiental, y han de tomarse con cierta reserva pues algunos de estos métodos han sido desarrollados para regiones con condiciones hidrológicas y geomorfológicas muy diferentes a las que se estudia.

#### Porcentaje Fijo de Caudal

Según la Ley de Aguas Francesa, se fija como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual, esto significa:  $0.10 * 2,37 \text{ m}^3/\text{s} = 0,24 \text{ m}^3/\text{s}$  para la estación Bocatoma –  $0.10 * 3,74 \text{ m}^3/\text{s} = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

#### Método de Tennant

De acuerdo con Castro, 2008 para aplicar este método se realizó una modificación de la tabla propuesta por el autor, teniendo en cuenta el régimen bimodal que presentan los registros hidrológicos de la cuenca Cali registrados en las estaciones Bocatoma y Pichindé, donde se determinaron los caudales recomendados por Tennant para la época seca y la época lluviosa (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Caudal ambiental según el método de Tennant Estación Bocatoma.

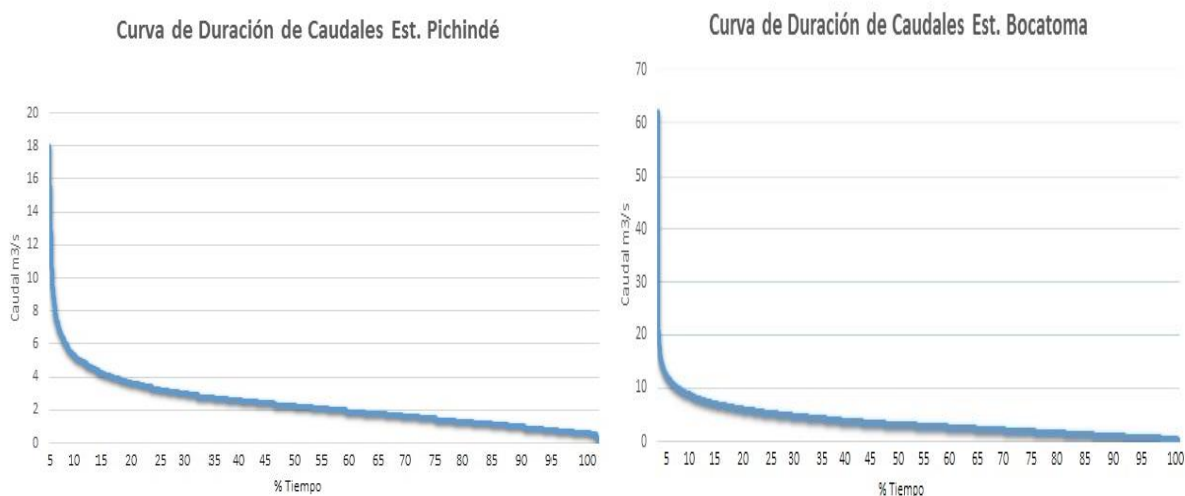
| Categoría del Caudal | Recomendación del régimen de caudal base |                    |                                |                                    |
|----------------------|--|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|
|                      | Época Seca (%)                           | Época Lluviosa (%) | Época Seca (m <sup>3</sup> /s) | Época Lluviosa (m <sup>3</sup> /s) |
| Abundante            | 200                                      | 200                | 7,48                           | 7,48                               |
| Rango Óptimo         | 60                                       | 80                 | 2,24                           | 3,0                                |
| Excepcional          | 40                                       | 60                 | 1,52                           | 2,24                               |
| Excelente            | 30                                       | 50                 | 1,12                           | 1,87                               |
| Bueno                | 20                                       | 40                 | 0,75                           | 1,50                               |
| Degradación          | 10                                       | 30                 | 0,37                           | 1,12                               |
| Pobre o mínimo       | 10                                       | 10                 | 0,37                           | 0,37                               |
| Degradación Severa   | <10                                      | <10                | 0,37                           | 0,37                               |

Tabla 12. Caudal ambiental según el método de Tennant Estación Pichindé.

| Categoría del Caudal | Recomendación del régimen de caudal base |                    |                                |                                    |
|----------------------|--|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|
|                      | Época Seca (%)                           | Época Lluviosa (%) | Época Seca (m <sup>3</sup> /s) | Época Lluviosa (m <sup>3</sup> /s) |
| Abundante            | 200                                      | 200                | 4,8                            | 4,8                                |
| Rango Óptimo         | 60                                       | 80                 | 1,44                           | 1,92                               |
| Excepcional          | 40                                       | 60                 | 0,96                           | 1,44                               |
| Excelente            | 30                                       | 50                 | 0,72                           | 1,2                                |
| Bueno                | 20                                       | 40                 | 0,48                           | 0,96                               |
| Degradación          | 10                                       | 30                 | 0,24                           | 0,72                               |
| Pobre o mínimo       | 10                                       | 10                 | 0,24                           | 0,24                               |
| Degradación Severa   | <10                                      | <10                | 0,24                           | 0,24                               |

### Método de Hoppe

A partir de la curva de duración de caudales (CDC) Gráfica 14, obtenida a partir de los caudales diarios registrados entre el año de 1979-2014 para la estación de Bocatoma y 1978-2014 para la estación Pichindé se calcularon los caudales recomendados para cada uno de los estadios de vida tal como se muestra en las Tablas 13 y 14.



Gráfica 14. Curva de Duración de Caudales Diarios para las Estaciones Bocatoma y Pichindé, Río Cali

A continuación se presentan los datos arrojados del método de Hoppe para las estaciones Bocatoma y Pichindé:

Tabla 13. Caudal ambiental según el método de Hoppe estación Bocatoma.

| Tipo de Caudal       | %Igual/Sup | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|----------------------|------------|-----------------------|
| Lavado               | 17         | 6,10                  |
| Freza-Desove         | 40         | 3,61                  |
| Producción Y Refugio | 80         | 1,50                  |

Tabla 14. Caudal ambiental según el método de Hoppe estación Pichindé.

| Tipo de Caudal       | %Igual/Sup | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|----------------------|------------|-----------------------|
| Lavado               | 17         | 3,5                   |
| Freza-Desove         | 40         | 2,4                   |
| Producción Y Refugio | 80         | 1,2                   |

### Legislación Suiza

A partir de la CDC mostrada en el método anterior, se determinó el Q347 o el caudal que es superado o excedido el 95% del tiempo, que equivale a 0,70 m<sup>3</sup>/s para ambas estaciones. Según recomendá el método propuesto por la legislación Suiza, el caudal ambiental correspondería a 0,24m<sup>3</sup>/s para aguas no piscícolas.

### Índices con la Curva de Duración de Caudales

Con la CDC obtenida a partir de los caudales diarios registrados en las estaciones de Bocatoma y Pichindé, se determinaron los siguientes índices representados en la tabla 15:

Tabla 15. Índices de la curva de duración de caudales para las estaciones Bocatoma y Pichindé

| Índices                 | Bocatoma | Pichindé |
|-------------------------|----------|----------|
| Q95 (m <sup>3</sup> /s) | 0,70     | 0,70     |
| Q90 (m <sup>3</sup> /s) | 0,90     | 0,81     |
| Q50 (m <sup>3</sup> /s) | 2,10     | 3,09     |



## Índice de Caudal 7Q

Para la determinación del caudal mínimo de 7 días consecutivos para un período de retorno de 10 años, se determinó en primera instancia el año hidrológico, pues la determinación de una media móvil depende del lugar donde inicia el año. El año hidrológico que comienza en junio y termina en mayo del próximo año.

En las Tabla 16 se muestran los caudales estimados a partir de los registros medios diarios 1979 -2014 estación Bocatoma y 1978-2014 estación Pichindé , para las estaciones de Bocatoma y Pichindé, información a partir de la cual se determinó los caudales mínimos de siete días consecutivos (Castro & Hoyos, 2004).

Tabla 16. Caudales mínimos de 7 días consecutivos para las estaciones Bocatoma y Pichindé.

| Año       | Bocatoma (m <sup>3</sup> /s) | Pichindé (m <sup>3</sup> /s) | Año           | Bocatoma (m <sup>3</sup> /s) | Pichindé (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|
| 1979-1980 | 3,07                         | 1,96                         | 1997-1998     | 3,79                         | 2,33                         |
| 1980-1981 | 3,97                         | 2,29                         | 1998-1999     | 4,66                         | 2,94                         |
| 1981-1982 | 5,19                         | 3,22                         | 1999-2000     | 4,17                         | 2,6                          |
| 1982-1983 | 3,69                         | 2,19                         | 2000-2001     | 2,73                         | 2,13                         |
| 1983-1984 | 3,10                         | 2,16                         | 2001-2002     | 2,42                         | 1,57                         |
| 1984-1985 | 4,91                         | 2,68                         | 2002-2003     | 2,79                         | 1,77                         |
| 1985-1986 | 4,81                         | 2,38                         | 2003-2004     | 2,82                         | 1,78                         |
| 1986-1987 | 3,57                         | 2,08                         | 2004-2005     | 3,19                         | 1,58                         |
| 1987-1988 | 3,60                         | 1,87                         | 2005-2006     | 4,00                         | 2,13                         |
| 1988-1989 | 4,84                         | 2,72                         | 2006-2007     | 3,70                         | 2,09                         |
| 1989-1990 | 3,38                         | 1,91                         | 2007-2008     | 4,88                         | 2,39                         |
| 1990-1991 | 3,00                         | 4,24                         | 2008-2009     | 4,79                         | 2,84                         |
| 1991-1992 | 2,40                         | 2,32                         | 2009-2010     | 2,09                         | 2,95                         |
| 1992-1993 | 3,25                         | 1,92                         | 2010-2011     | 6,39                         | 3,97                         |
| 1993-1994 | 4,28                         | 2,26                         | 2011-2012     | 5,93                         | 3,55                         |
| 1994-1995 | 2,95                         | 1,20                         | 2012-2013     | 4,41                         | 1,78                         |
| 1995-1996 | 4,17                         | 2,62                         | 2013-2014     | 2,51                         | 2,21                         |
| 1996-1997 | 4,35                         | 2,54                         | <b>mínimo</b> | <b>2,09</b>                  | <b>1,20</b>                  |

## 7.2.2. Análisis de los caudales obtenidos con las metodologías propuestas

### Variación en el Caudal

En las Tablas 17 y 18, se muestra el compendio de los caudales ambientales determinados por algunas de las metodologías hidrológicas propuestas y se muestran también los caudales medios mensuales, los medios mensuales mínimos con el fin de comparar los resultados arrojados entre las metodologías desde el punto de vista meramente hidrológico.

Tabla 17. Resultados de la aplicación de las metodologías hidrológicas Estación Bocatoma entre los años 1979-2014.

| MÉTODO              | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (0.1QMA)/*          | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 |
| Leg Suiza           | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Tennant (Buena)     | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Tennant (Excelente) | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Lyons               | 1,91 | 1,91 | 1,91 | 1,89 | 1,89 | 1,87 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,49 | 1,49 | 1,49 |
| Hoppe               | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 3,61 | 3,61 | 3,61 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 6,10 | 6,10 | 6,10 |
| Q95                 | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  | 0,7  |
| Q90                 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Q50                 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 | 3,09 |
| 7Q10                | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| QMMin               | 0,76 | 0,6  | 0,72 | 1,54 | 2,76 | 1,82 | 1,1  | 0,62 | 0,64 | 0,98 | 1,17 | 1,51 |
| QMM                 | 3,50 | 3,30 | 3,59 | 5,21 | 6,19 | 4,67 | 2,79 | 1,68 | 2,20 | 3,40 | 4,92 | 4,30 |

Donde,

QMMin: caudales mensuales mínimos

QMM: caudales mensuales medios

Unidades: m<sup>3</sup>/s

Tabla 18. Resultados de la aplicación de las metodologías hidrológicas Estación Pichindé entre los años 1978-2014

| MÉTODO              | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (0.1QMA)/*          | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 |
| Leg Suiza           | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Tennant (Buena)     | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Tennant (Excelente) | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| Lyons               | 1,23 | 1,23 | 1,23 | 1,17 | 1,17 | 1,18 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| Hoppe               | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 3,50 | 3,50 | 3,50 |
| Q95                 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Q90                 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 |
| Q50                 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 | 2,10 |
| 7Q10                | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| QMMin               | 0,6  | 0,6  | 0,8  | 1,3  | 1,4  | 1,1  | 0,8  | 0,6  | 0,4  | 0,7  | 0,9  | 1,1  |
| QMM                 | 2,71 | 1,68 | 1,23 | 1,40 | 2,07 | 2,66 | 2,48 | 2,23 | 2,20 | 2,34 | 3,23 | 3,59 |

Donde,

QMMin: caudales mensuales mínimos

QMM: caudales mensuales medios

Unidades: m<sup>3</sup>/s

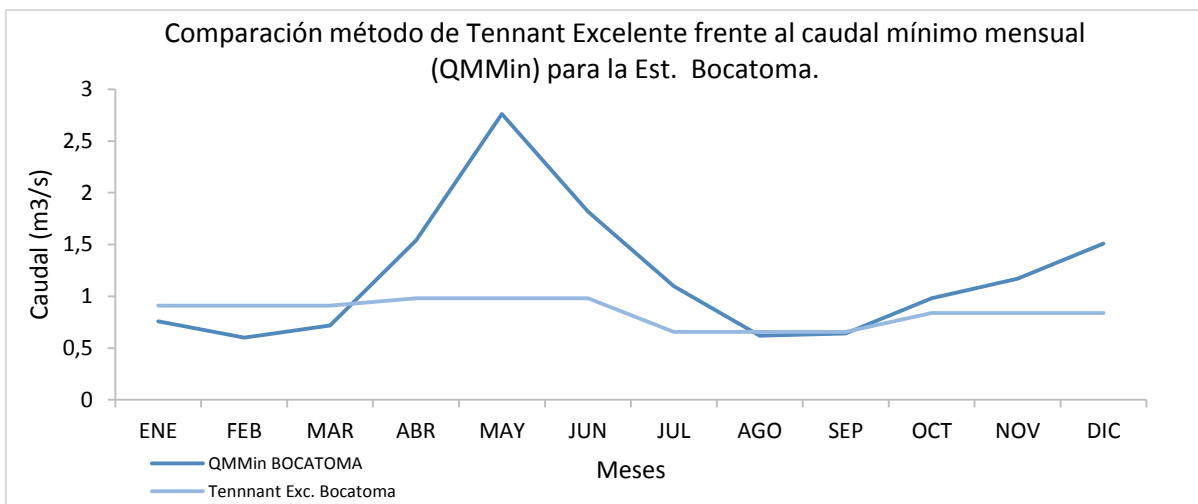
A continuación se describen las metodologías que tuvieron los coeficientes de correlación R<sup>2</sup> más altos frente a los caudales mínimos mensuales (QMMin) y los caudales medios mensuales (QMM); también se presentan las estadísticas descriptivas para este análisis y las gráficas de comparación.

### Método de Tennant

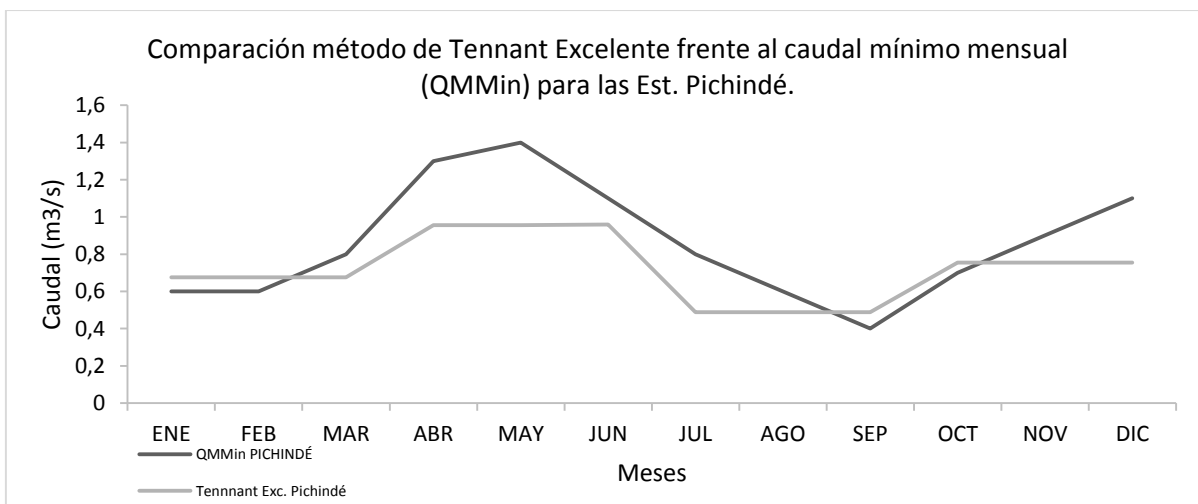
El método de Tennant a pesar de mostrar una variabilidad por períodos estacionales, también presenta condiciones críticas y equivalentes con los caudales mínimos históricos, inclusive en algunos meses el caudal recomendado es inferior al mínimo registrado (Gráfica 15 y 16). En la Tabla 19 se muestran las estadísticas realizadas en el análisis de los datos arrojados por la metodología donde también se observa que los porcentajes de correlación de Pearson son altos al compararlos con el QMM en la estación Bocatoma (ver Anexo C).

Tabla 19. Estadísticas descriptivas metodología de Tennant - Estaciones Bocatoma y Pichindé.

| Tennant                    | Bocatoma | Pichindé |
|----------------------------|----------|----------|
| Media (m <sup>3</sup> /s)  | 0,29     | 0,72     |
| Máximo (m <sup>3</sup> /s) | 0,33     | 0,96     |
| Mínimo (m <sup>3</sup> /s) | 0,22     | 0,49     |
| Coef. R2 (QMMin)           | 0,29     | 0,70     |
| Coef. R2 (QMM)             | 0,65     | 0,001    |
| Desv. Estándar             | 0,04     | 0,18     |



Gráfica 15 Comparación método de Tennant Bueno frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma.



Gráfica 16. Comparación método de Tennant Excelente frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Pichindé.

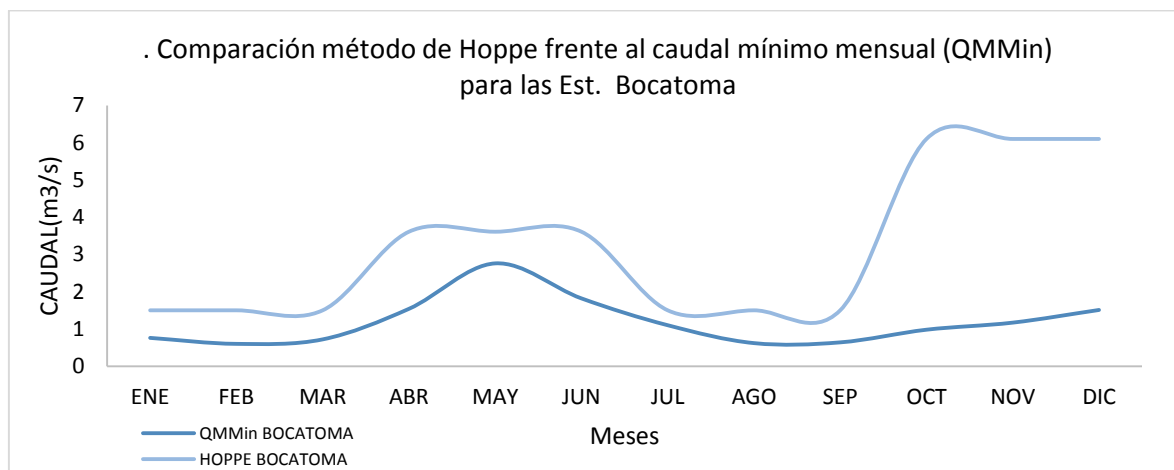
Es un método desarrollado y aplicado con éxito en los ríos de Wyoming y Nebraska (Estados Unidos) y para los salmónidos, pero no es conveniente su aplicación en cuencas andinas pues no hay ni siquiera coincidencia con el régimen hidrológico y las especies a preservar. Cada río tiene una estructura biológica particular así como un régimen hidrológico que depende de las condiciones climatológicas presentes en la zona, así como también de la geomorfología de la cuenca.

### Método de Hoppe

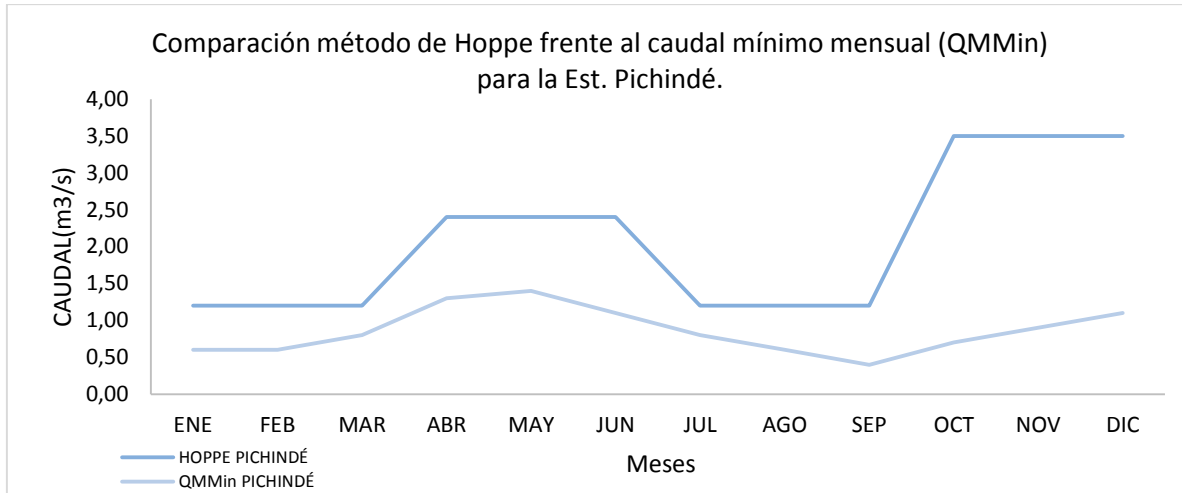
En el método de Hoppe se proponen unos caudales con valores altos con respecto al QMMin y con una variabilidad que depende del estadio de vida de la trucha. Muestra incluso variación positivas por encima de los caudales medios mensuales multianuales, y que desde luego no permitirían ningún tipo de uso del recurso. No es un método aconsejable en cuencas andinas por varias razones: fue desarrollado para ríos nivales, para especies particulares y sus escenarios de vida y presenta en muchas ocasiones es una sobreestimación del caudal ambiental por encima de los caudales medios registrados (Tabla 20 Gráficas 17 y 18 y Anexo C).

Tabla 20 Estadísticas descriptivas metodología d Hoppe Excelente - Estaciones Bocatoma y Pichindé

| Hoppe Excelente            | Bocatoma | Pichindé |
|----------------------------|----------|----------|
| Media (m <sup>3</sup> /s)  | 3,18     | 2,08     |
| Máximo (m <sup>3</sup> /s) | 6,10     | 3,50     |
| Mínimo (m <sup>3</sup> /s) | 1,50     | 1,20     |
| Coef. R2 Qmmin             | 0,18     | 0,27     |
| Coef. R2 Qmm               | 0,30     | 0,30     |
| Desv. Estándar             | 1,98     | 1,00     |



Gráfica 17. Comparación método de Hoppe frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Bocatoma.



Gráfica 18. Comparación método de Hoppe frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Pichindé.

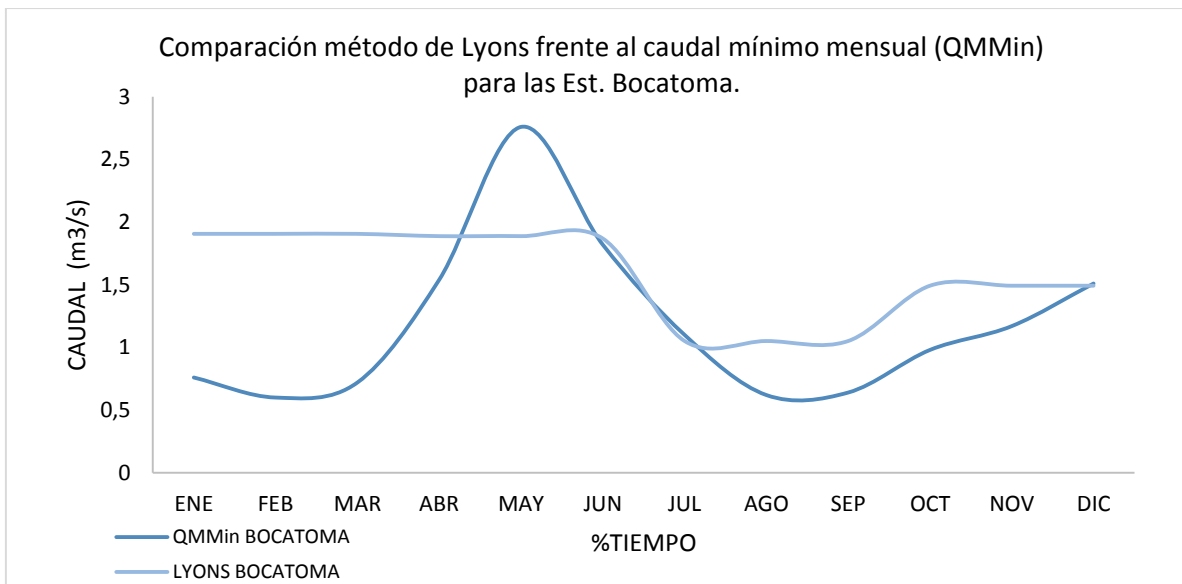
### Método de Lyons

Este método recomienda estimar el caudal ambiental como un porcentaje de la mediana de los caudales medios mensuales, 40% para periodos húmedos y 60% para periodos secos para este caso se tomó en cuenta los datos históricos de las estaciones Bocatoma (1979-2014) y Pichindé (1978-2014) para la cuenca del Río Cali(Gráfica 19 y 20).

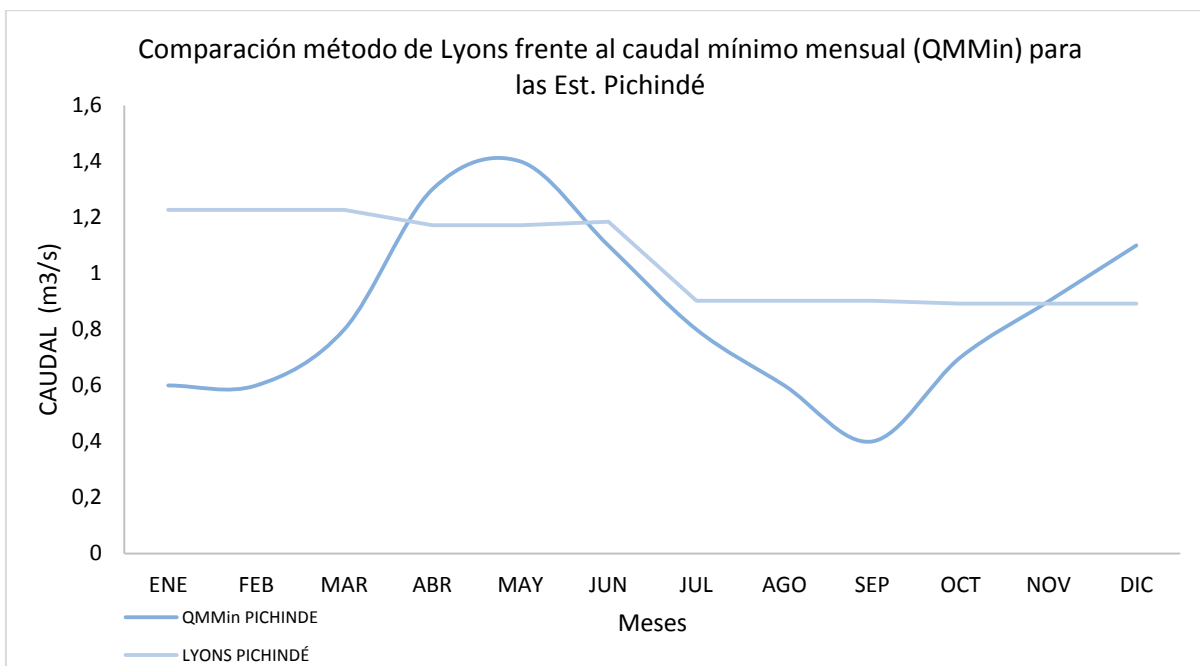
Donde el porcentaje de 60% fue escogido para asegurar un mayor caudal durante los meses críticos de los periodos secos (Bounds y Lyons, 1979); obteniendo respecto a los QMM correlaciones por encima de los QMMin, sin embargo estas correlaciones siguen siendo bajas (Tabla 21).

Tabla 21 Estadísticas descriptivas metodología de Lyons Excelente - Estaciones Bocatoma y Pichindé

| Lyons                      | Bocatoma | Pichindé |
|----------------------------|----------|----------|
| Media (m³/s)               | 1,58     | 0,84     |
| Máximo (m³/s)              | 1,91     | 1,40     |
| Mínimo( m³/s)              | 1,05     | 0,40     |
| Coef. R <sup>2</sup> QMMin | 0,13     | 0,07     |
| Coef. R <sup>2</sup> QMM   | 0,45     | 0,31     |
| Desv Estándar              | 0,35     | 0,30     |



Gráfica 19. Comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Bocatoma.



Gráfica 20. Comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est. Pichindé.

## ANÁLISIS METODOLÓGIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

En las tablas 22 y 23 se muestra el compendio de los caudales ambientales determinados por la metodología propuesta por el ministerio de medio ambiente comparándolos también con



los caudales medios mensuales y los medios mensuales mínimos de las estaciones Bocatoma y Pichindé:

Tabla 22 Resultados de la aplicación de la metodología hidrológica del ministerio del medio ambiente- Estación Bocatoma entre los años 1979-2014

| MÉTODO         | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT  | NOV  | DIC  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MIN. NIÑO BOCA | 0,70 | 0,50 | 0,70 | 1,10 | 2,90 | 1,00 | 0,80 | 0,60 | 0,40 | 0,70 | 1,20 | 1,70 |
| MIN. NIÑA BOCA | 1,10 | 1,40 | 2,60 | 1,50 | 2,40 | 2,80 | 1,10 | 0,70 | 0,80 | 1,30 | 2,23 | 1,40 |
| MIN. PROM BOCA | 0,88 | 0,70 | 0,80 | 1,20 | 2,50 | 1,80 | 0,90 | 0,50 | 0,60 | 0,80 | 1,20 | 1,90 |
| QMMin BOCA     | 0,76 | 0,6  | 0,72 | 1,54 | 2,76 | 1,82 | 1,1  | 0,62 | 0,64 | 0,98 | 1,17 | 1,51 |
| QMM BOCA       | 3,50 | 3,30 | 3,59 | 5,21 | 6,19 | 4,67 | 2,79 | 1,68 | 2,20 | 3,40 | 4,92 | 4,30 |

Donde,

QMMin: caudales mensuales mínimos

QMM: caudales mensuales

Unidades: m<sup>3</sup>/s

Tabla 23 Resultados de la aplicación de la metodología hidrológica del ministerio del medio ambiente-Estación Pichindé entre los años 1978-2014

| MÉTODO         | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SEP  | OCT   | NOV  | DIC  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| QMMin PICH     | 0,60 | 0,60 | 0,80 | 1,30 | 1,40 | 1,10 | 0,80 | 0,60 | 0,40 | 0,70  | 0,90 | 1,10 |
| QMM PICH       | 2,71 | 1,68 | 1,23 | 1,40 | 2,07 | 2,66 | 2,48 | 2,23 | 2,2  | 2,34  | 3,23 | 3,59 |
| MIN. NIÑO PICH | 1,50 | 1,20 | 1,55 | 1,40 | 2,35 | 2,10 | 1,40 | 0,75 | 0,80 | 1,208 | 2,20 | 1,50 |
| MIN. NIÑA PICH | 2,20 | 2,10 | 2,30 | 2,25 | 2,90 | 2,60 | 1,80 | 1,15 | 1,10 | 2,00  | 2,50 | 2,40 |
| MIN. PROM PICH | 1,70 | 1,45 | 1,80 | 2,00 | 2,60 | 1,78 | 1,00 | 0,80 | 0,85 | 1,70  | 1,50 | 2,00 |

Donde,

QMMin: caudales mensuales mínimos

QMM: caudales mensuales medios

Unidades: m<sup>3</sup>/s

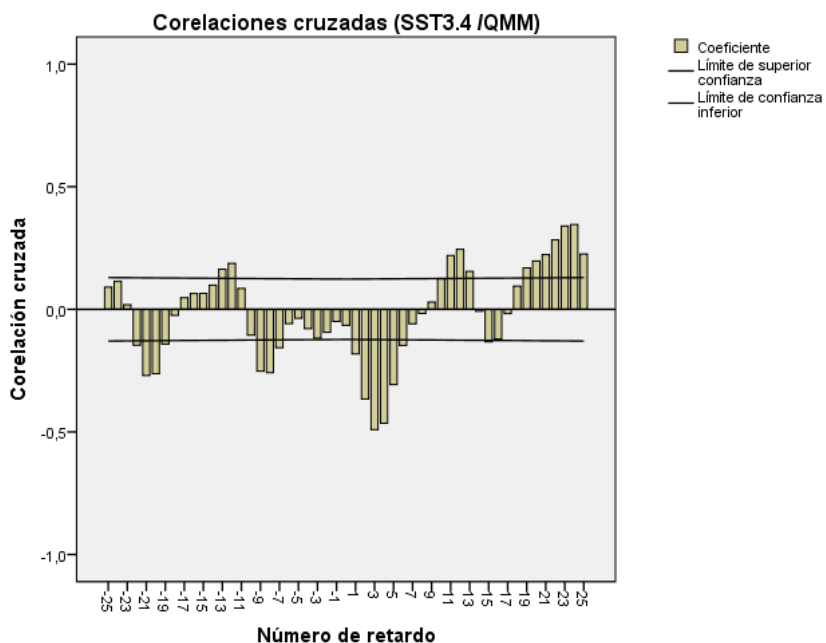
A continuación se presentan los resultados arrojados del análisis de correlación de la metodología de ministerio del medio ambiente para cada fase de año hidrológico frente a los caudales medios mensuales multianuales QMM, y los medios mensuales mínimos QMMin, donde se tiene en cuenta las correlaciones altas de la metodología frente a los caudales como algunas correlaciones que no cumplen con la hipótesis del problema:

## Propuesta de Régimen de caudal ambiental

### Análisis de Correlación Hidrología – Índices de Fenómenos Macroclimáticos

A partir de regresiones multivariadas entre los índices climáticos mensuales los fenómenos macroclimáticos, con los valores reales y las anomalías de índices como el SOI (Índice de Oscilación del Sur), SST3-4 (Temperatura Oceánica Superficial en la zona Niño 3-4), ONI (Índice Oceánico del Niño), NAO (Índice de Oscilación del Atlántico Norte), QBO (Índice de la Oscilación Quasi-Bienal) todos ellos reportados desde 1951 y actualizados mensualmente por la Agencia Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA ver <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) y la hidrología mensual de la corriente del río Cali (obtenida a partir del registro diario homogéneo y completo en las estaciones Bocatoma y Pichindé); esta correlación debe partir del concepto de año hidrológico (junio año 0 – mayo año 1).

Estas regresiones explican satisfactoriamente la variabilidad de los caudales mensuales de la corriente si coeficientes de determinación  $R^2 > 0,70$ , pero encontramos que los coeficientes de determinación están muy por debajo de 0,70, en este caso, de no encontrar coeficientes de determinación apropiados para las regresiones multivariadas efectuadas, se procede a evaluar la influencia entre los fenómenos macro climáticos y la hidrología de la corriente, a partir del cálculo de correlaciones cruzadas entre los índices mensuales de estos mismos fenómenos y los caudales medios mensuales.



Gráfica 21. Correlaciones cruzadas entre el Caudal medio mensual QMM y Temperatura Oceánica Superficial en la zona Niño 3-4 (SST 3-4)

La Gráfica 21 muestra los resultados del análisis de correlación cruzada entre la anomalía del SST 3-4 y los caudales medios mensuales (de aquí en adelante QMM) en la estación Bocatoma, en la que se muestran correlaciones positivas significativas, superiores a 0.25 para rezago (desplazamiento) igual a cero. Rezagos negativos indican que el fenómeno antecede a la hidrología y lo contrario para rezagos positivos. Correlaciones positivas indican efectos directos entre el fenómeno y la hidrología

### Clasificación de registros por condición hidrológica

Se clasifican los años en húmedos, promedio y secos, utilizando para ello las tablas basadas en el Índice Oceánico del Niño (ONI) disponibles en la página web <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Dentro de la metodología, se propone que dicha información sea utilizada para clasificar los años del registro homogéneo, consistente y casi completo en la estación A bajo condiciones hidrológicas Niño (años secos), Niña (años húmedos), y años promedio para los años en los que no se reporta la ocurrencia de ninguna de las dos fases del ENSO.

Una vez agrupados los años por condición hidrológica en la Tabla 24, se propone calcular los caudales medios mensuales para años secos, promedio y húmedos. A partir de estos caudales promedio mensuales se hará la propuesta hidrológica mensual de caudales ambientales

Tabla 24. Años por condición hidrológica.

|           | EL NIÑO   | LA NIÑA   | PROMEDIO  |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1992-1993 | 2002-2003 | 1998-1999 | 1993-1994 |
| 1994-1995 | 2004-2005 | 2000-2001 | 1996-1997 |
| 1995-1996 | 2006-2007 | 2007-2008 | 2001-2002 |
| 1997-1998 | 2008-2009 | 2010-2011 | 2003-2004 |
| 1999-2000 | 2009-2010 | 2011-2012 | 2005-2006 |

Fuente: IDEAM (2010)

### Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95%

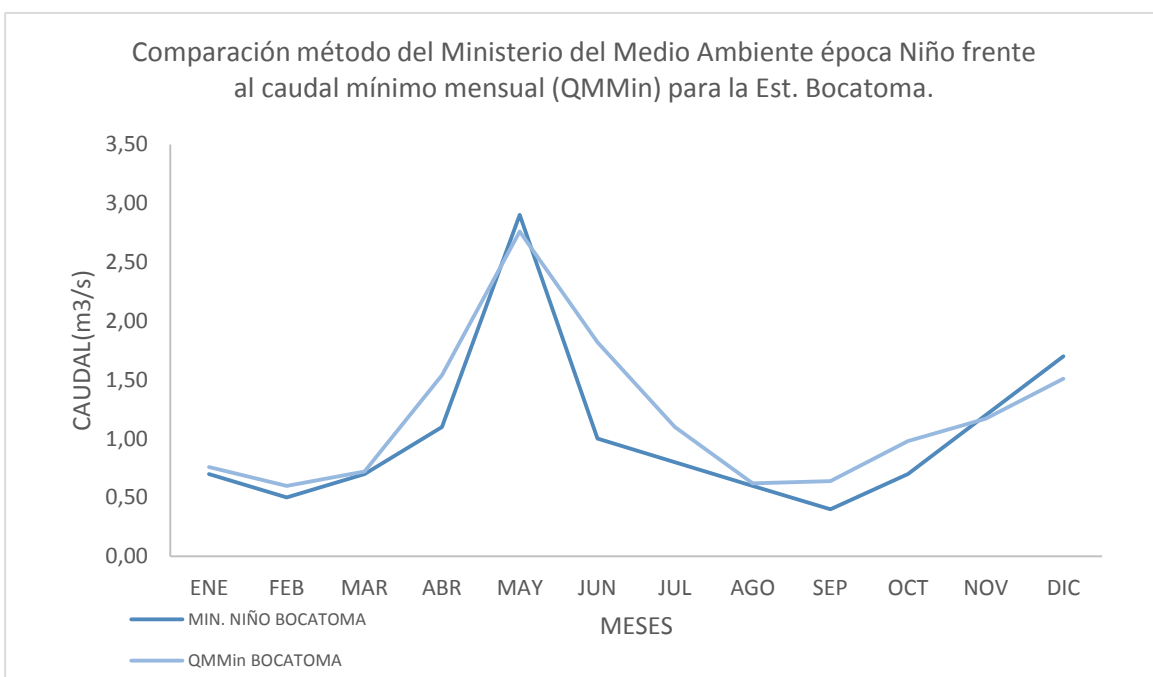
La metodología incluye la estimación de los índices 7Q10 y Q95% a partir de los registros diarios homogéneos, consistentes y casi completos de la estación Bocatoma y Pichindé

### Estación Bocatoma

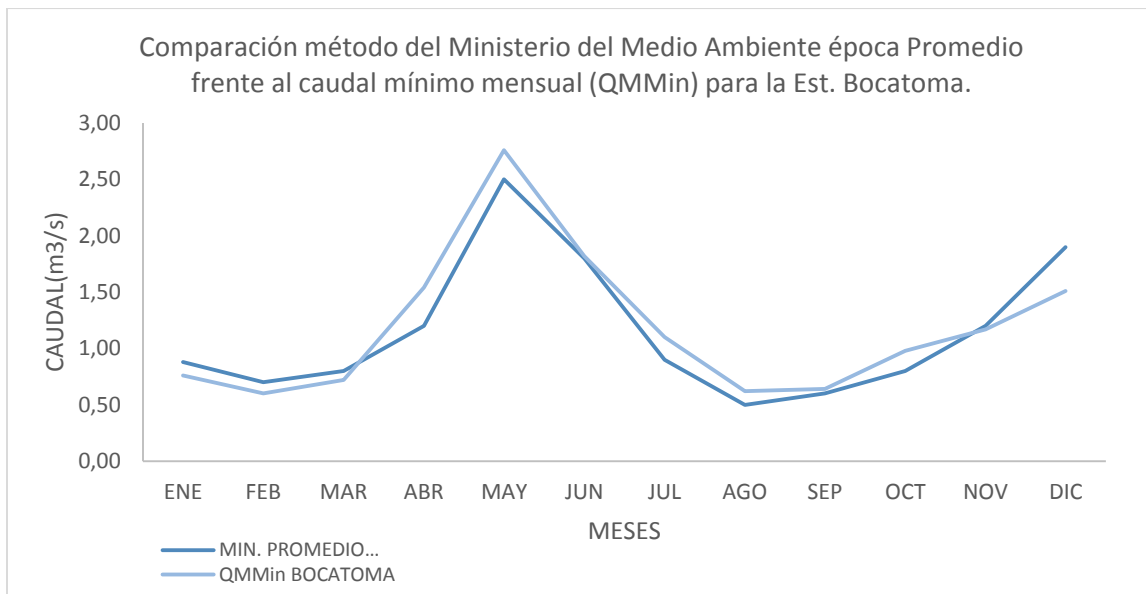
Para la estación Bocatoma encontramos valores de correlación altos para la propuesta de RCA Aguas debajo de la estación a partir del valor máximo de los índices los índices 7Q10 y Q95% a partir de los registros diarios homogéneos, consistentes y casi completos de la estación Bocatoma, tomando el valor máximo entre los dos índices, los resultados se ajustan al régimen bimodal propio del río Cali. Como se muestra en la Tabla 25 y en la Gráfica 22 y 23.

Tabla 25 Estadísticas descriptivas metodología de Ministerio del medio ambiente-Estación Bocatoma.

| MET. MINISTERIO            | NIÑO | NIÑA | PROM |
|----------------------------|------|------|------|
| Media (m <sup>3</sup> /s)  | 1,03 | 1,61 | 1,15 |
| Mínimo (m <sup>3</sup> /s) | 0,40 | 0,70 | 0,50 |
| Máximo (m <sup>3</sup> /s) | 2,90 | 2,80 | 2,50 |
| Coef. R <sup>2</sup> QMMin | 0,84 | 0,32 | 0,90 |
| Coef. R <sup>2</sup> QMM   | 0,62 | 0,51 | 0,70 |

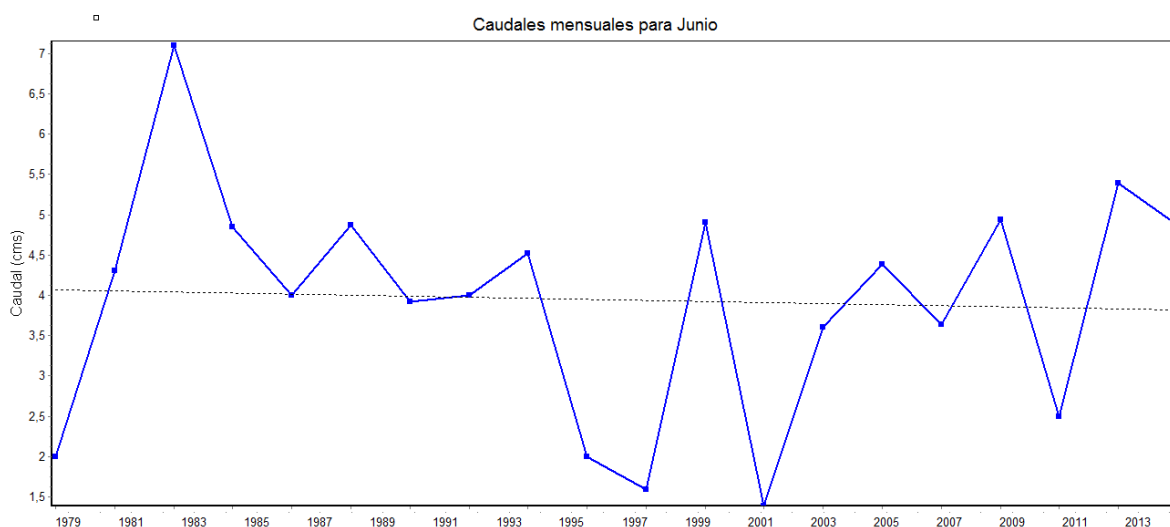


Gráfica 22. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma.



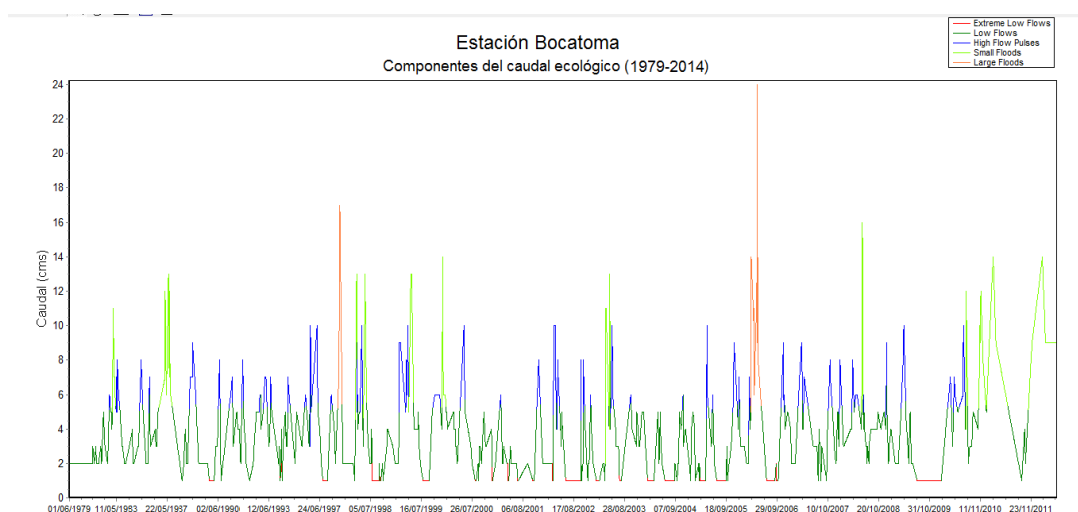
Gráfica 23. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Promedio frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma.

Haciendo uso del software IHA tomamos la media correspondiente al registro por condición hidrológica de meses secos QMMIn como propuesta mensual de caudales teniendo en cuenta los valores presentes en el 70% de los registros (Gráfica 24), los cuales influyen en el ecosistemas con valores superiores a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  en periodos secos: disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos disponibilidad de humedad del suelo para las plantas, disponibilidad de agua para los animales terrestres disponibilidad de alimentos/ cobertura para mamíferos con pelo Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres acceso de los depredadores a los de anidación, influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua



Gráfica 24. Caudales recomendados para el mes de Junio, estación Bocatoma.

La frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos, definiendo los pulsos altos para valores superiores  $5,30 \text{ m}^3/\text{s}$  y pulsos bajos como los inferiores a  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$  (Gráfica 25), valores que están relacionados con la Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas, disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos, intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación, disponibilidad de minerales del suelo, acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas, influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos).



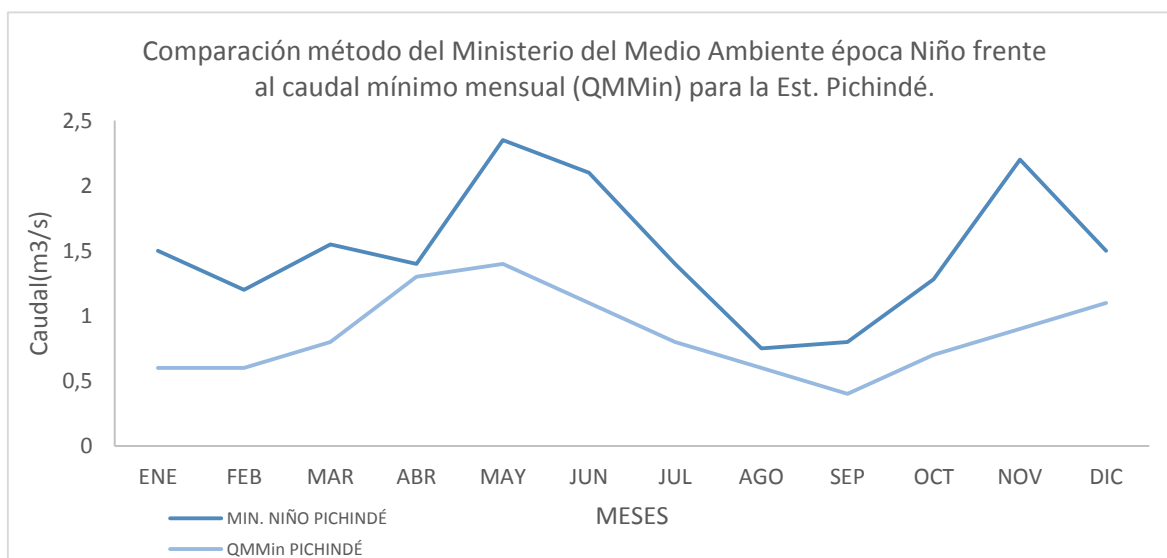
Gráfica 25 Componentes del caudal ecológico IHA

### Estación Pichindé

Para el caso de Pichindé, encontramos correlaciones aceptables para los registros mínimos, sin embargo para los registros medios mensuales las correlaciones son muy bajas, dadas sus características de rendimiento hídrico de esta zona, alta susceptibilidad a la erosión y abundante diversidad biológica, se procede a estimar la propuesta a partir de los valores presentes en el percentil 70 debido a que realizar la propuesta considerando solo los mínimos es inadecuado ya que la estructura y función de un ecosistema en este caso los bosques andinos y adaptaciones de su biota son generadas por los patrones de variación temporal en los caudales (Tabla 26, Graficas 26 y Anexo C)

Tabla 26. Estadísticas descriptivas metodología de Ministerio de Medio Ambiente-Estación Pichindé.

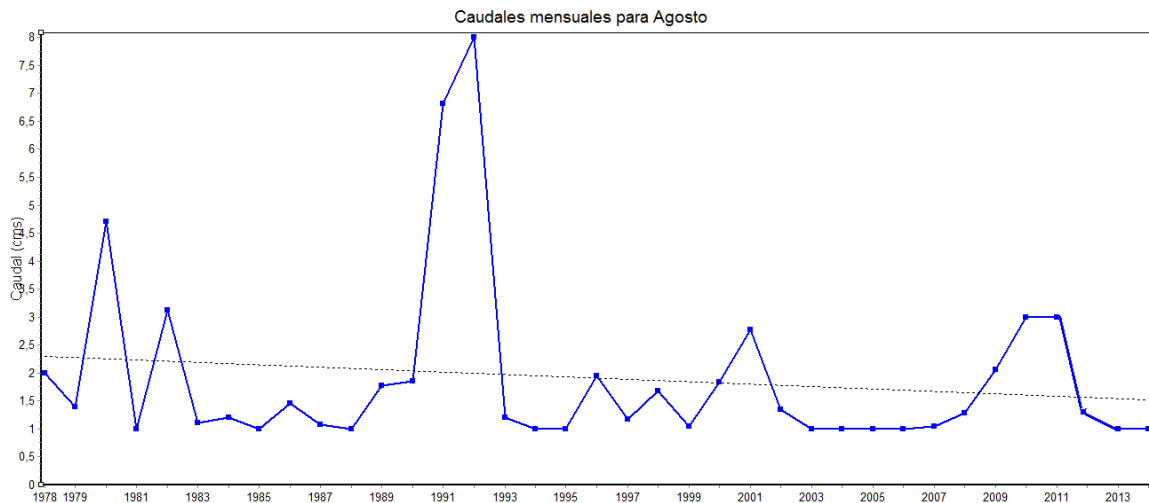
| Met. Ministerio            | NIÑO  | NIÑA  | PROM |
|----------------------------|-------|-------|------|
| Media (m <sup>3</sup> /s)  | 0,95  | 1,51  | 0,88 |
| Mínimo (m <sup>3</sup> /s) | 0,50  | 0,90  | 0,40 |
| Máximo (m <sup>3</sup> /s) | 1,80  | 2,00  | 1,40 |
| Coef. R <sup>2</sup> QMMin | 0,78  | 0,59  | 0,64 |
| Coef. R <sup>2</sup> QMM   | 0,001 | 0,004 | 0,01 |



Gráfica 26. Comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Pichindé.

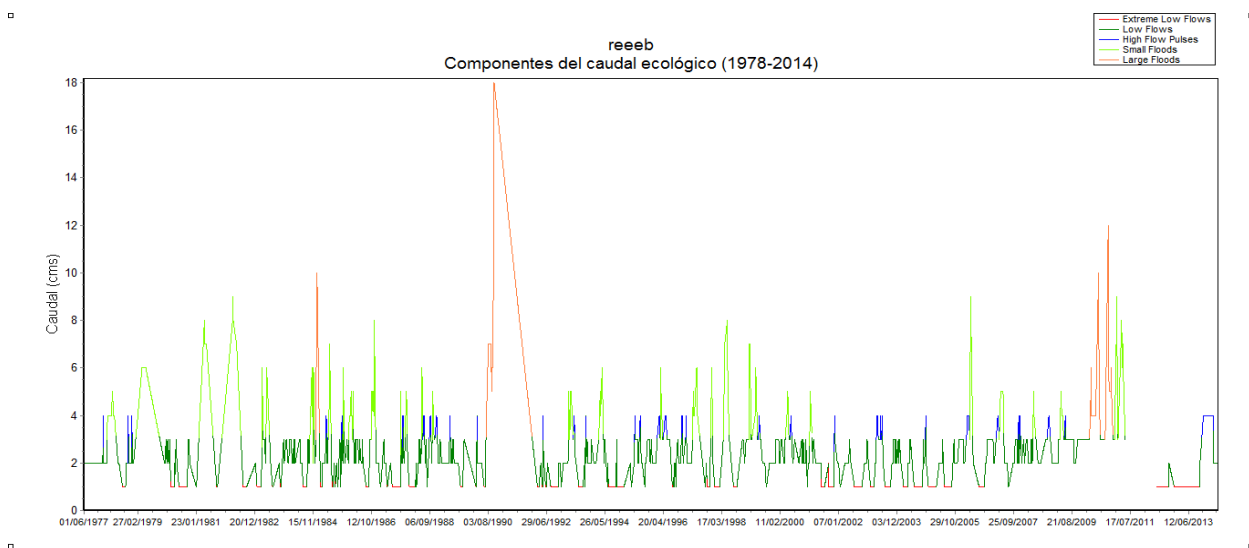
Haciendo uso del software IHA tomamos la media correspondiente al registro por condición hidrológica de meses secos QMMIn como propuesta mensual de caudales teniendo en cuenta los valores presentes en el 70% de los registros(Gráfica 27), los cuales influyen en el ecosistemas en : disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos disponibilidad de humedad del suelo para las plantas, disponibilidad de agua para los animales terrestres disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos con pelo Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres acceso de los depredadores a los de anidación, influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua





Gráfica 27. Caudales recomendados para el mes de Agosto Estación Pichindé

Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos, definiendo los pulsos altos para valores superiores  $5,20 \text{ m}^3/\text{s}$  y pulsos bajos como los inferiores a  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Gráfica 28) valores que están relacionados con la Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas. Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas, disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos, intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación, disponibilidad de minerales del suelo, acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas, influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos).



Gráfica 28. Componentes del caudal ecológico con IH



## 7.4. OBJETIVO 3

### 7.4.1. Recomendaciones, para la determinación del régimen de caudal ambiental, en el contexto colombiano

El establecimiento del RCA es una necesidad para el manejo integral con enfoque holístico e integrador en el espacio geográfico de la cuenca hidrográfica, dirigido hacia la gestión integrada del RH en cuencas andinas. La cuenca del río Cali forma parte del Parque Nacional Natural los Farallones de Cali, sobre la cordillera Occidental de los Andes, considerado el tercero más importante de los Andes americanos por su alta biodiversidad y especies endémicas, esta riqueza excepcional de especies que cuenta la cuenca es atribuida a las condiciones particulares de rendimiento hídrico en sus zonas altas y media según Montoya (1995) se presenta un rendimiento hídrico entre  $40 \text{ l/s} - \text{Km}^2 - 60 \text{ l/s} - \text{Km}^2$  para condiciones climáticas medias lo cual implica darle un manejo prioritario para poder preservar los ecosistemas de agua dulce y los servicios ecosistémicos que suministran estos a la humanidad (Anderson et al., 2012), reconociendo el valor social y ambiental del RCA; ya que atender las necesidades del caudal de los ecosistemas normalmente genera beneficios para la sociedad (Dyson et al., 2003).

De acuerdo con Pérez, Rojas y Ordoñez (2010) las debilidades institucionales son una de las principales causas para que la situación ambiental en Colombiano sea óptima, haciendo necesario el establecimiento de parámetros para el manejo, conservación y preservación del RH, como es el establecimiento del RCA. Es así como, el fortalecimiento y consolidación del Sistema Nacional Ambiental (SINA), de sus instituciones vinculadas y del marco normativo, de regulación y de políticas en el campo ambiental, es considerado como uno de los principales pilares de una adecuada política para establecer el RCA más adecuado para las circunstancias propias de las cuencas andinas.

Fortalecer y consolidar la estructura institucional del SINA y de sus instituciones vinculadas, con el propósito de mejorar su papel como ente rector del sector ambiental y sus roles de planificador, coordinador, regulador y ejecutor de la política ambiental colombiana (Pérez et al., 2010), vinculando las visiones del enfoque ecosistémico y la adaptación basada en ecosistemas, las cuales reconocen la resiliencia y la dinámica de los ecosistemas junto a la implementación de acciones de adaptación planificada, con el fin de reducir la vulnerabilidad

de los ecosistemas y las poblaciones a la variabilidad climática y cambio climático (Lhumeau y Cordero, 2012).

Es oportuno señalar las prioridades en la investigación según Anderson et al. (2010), para facilitar un manejo del caudal más sustentable en los ríos colombianos y son aplicables en la cuenca del río Cali, los cuales se describen a continuación:

- Investigaciones de las relaciones entre el caudal y la ecología de la biota acuática y de los bosques andinos junto a los patrones de migración de especies migratorias. Comprendiendo la dependencia entre el caudal y la biota de agua dulce en los ecosistemas, siendo esencial para determinar los caudales que mantengan los servicios ecosistémicos. En términos de las preferencias de caudal de la biota, es necesario la colecta y análisis de datos cuantitativos del hábitat junto a un nuevo inventario de especies, la cual proporcionan información clave para establecer su dependencia.
- Identificación de las metas del manejo de los ríos junto a los niveles aceptables de alteración fluvial para la sociedad. Los ríos colombianos además de ser una fuente de agua y energía proveen una serie de servicios ecosistémicos, que al momento de presentarse alteraciones de los caudales en un ecosistema acuático puede modificar la calidad del agua y afectar de forma importante la biota acuática (Dallas y Day, 1993). Es de interés de la sociedad reconocer los beneficios que proporciona la cuenca hidrográfica en su conjunto al momento de tomar decisiones sobre su manejo y preservación.
- Mayor conocimiento de los efectos acumulativos de las variadas formas de extracción de agua sobre los distintos sistemas fluviales y las posibles interacciones con la variabilidad climática y cambio climático. La tendencia de implementar múltiples desviaciones del agua cada vez se hace más creciente en Colombia. Conocer que ríos no regulados deberían preservarse para conservar su biota y servicios ecosistémicos es determinante para el manejo del caudal.
- Implementación de nuevos enfoques de las actuales metodologías del caudal ambiental para su aplicación a escala regional desde la noción de adaptación basada en ecosistemas propuesta por Lhumeau y Cordero (2012) y el enfoque planteado por Ortega et al. (2010) asociado a la reducción de las emisiones por deforestación y degradación forestal (REDD) para el manejo sostenible de los bosques andinos y el mejoramiento de las existencias de carbono forestal. Dado que el ritmo de alteración fluvial es creciente en Colombia, superando en gran medida el tiempo y capacidad necesaria para la realización de los estudios en cada río; estos deben contar con metodologías apropiadas a nivel regional y de cuenca; estas estrategias de manejo de caudal pueden adoptarse para hacer frente a escenarios de cambio de patrones del caudal.

- Las metodologías descritas en este documento, han surgido en países donde sus ríos y ecosistemas presentan características muy particulares; consideración a tener en cuenta a la hora de ser implementadas en Colombia, ya que estas deben contar con una evaluación previa que permita su aplicación y adaptación al contexto nacional.
- Es importante que la definición del régimen de caudal ambiental se encuentre enmarcado dentro de un conjunto de prácticas de gestión en la cuenca relacionadas con el uso del suelo, los derechos de agua, control de la contaminación y control de las actividades humanas. Limitarse a establecer un caudal ambiental en un río en grave proceso de degradación puede resultar inútil o incluso perjudicial.
- Otro aspecto importante a tener en cuenta es no confundir el término de caudal ambiental con el volumen necesario para diluir carga contaminante y mejorar su calidad. Un río contaminado y con concentraciones de metales pesados en sedimentos superficiales y mercurio en agua, con niveles críticos de cromo como reporta el IDEAM (2014) para el río Cali , esta afirmación es sustentada Claudia Jiménez gestora ambiental de las empresa municipales de Cali – EMCALI (Villada, 2015)<sup>2</sup>, *“con la deforestación, los desechos de un centenar de minas y las 231 toneladas de residuos contaminantes que le caen cada año de tres corregimientos e invasiones en las Lomas de Quintero, en La Fortuna (vía al mar), en las Pilas del Cabuyal (parte alta del Zoológico) y en todas partes por donde pasa el río”*. Requerirá de acciones pertinentes para mejorar la calidad del agua antes de comenzar a aplicar este tipo de metodologías.
- La definición del régimen de caudal ambiental es un tema relativamente nuevo en el entorno nacional y son pocos los estudios o investigaciones para determinar los caudales que deben permanecer en una determinada corriente hídrica después de un aprovechamiento. Por lo tanto, es necesario empezar a desarrollar trabajos que permitan aplicar, construir y estructurar conocimiento sobre el régimen de caudales ambientales enmarcados al contexto nacional. Dichas metodologías servirán de base a las autoridades ambientales en la toma de decisiones para conceder asignaciones, cobro de tasa por uso del agua, licencia de construcción y modernización de obras hidráulicas.
- Metodologías tan simplistas, como aquellas que fijan un porcentaje del caudal medio multianual o utilizan la curva de duración de caudales para fijar índices, no tienen en cuenta la variabilidad hidrológica del río, las condiciones de hábitat para las especies

---

<sup>2</sup> Especiales río Cali, Cali ¿un sueño atravesado por un río? , diario El país 2015.

presentes, los caudales formadores del cauce; en sí, son una solución ingenieril sin fundamento teórico

- No es necesario seguir al pie de la letra cada una de las metodologías planteadas, es más acertado definir las propias conceptualizadas a la región y río en estudio, donde se valore la variación hidrológica en magnitud, duración y frecuencia, los rangos en los que se puede permitir esa variación, se evalué las condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas representativas, calidad de agua y usos potenciales con los caudales propuestos.

El desarrollo actual y futuro del país depende de la conservación, protección y restauración de su base ecosistémica, de esta forma se asegura una alta calidad ambiental que garantice el disfrute de una vida saludable a la población colombiana y la preservación de la biodiversidad (Pérez et al., 2010), para que ésta pueda utilizarse de manera sustentable, sin exceder la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y respetando sus límites naturales propios como lo es el RCA Carvajal (2010), para generar un desarrollo social que respete los límites naturales de los ecosistemas, asignando equitativamente el recurso; previendo la sustentabilidad ambiental del mismo.

La problemática para el establecimiento del RCA está relacionado con la falta de conocimiento sobre el mundo natural y sus capacidades de resiliencia, resistencia y sus límites, no sólo para identificar potencialidades de uso y el desarrollo de tecnologías ecoamigables que contribuyan al desarrollo sustentable, sino también para delimitar la extracción y aprovechamiento del RH. De acuerdo con Pérez et al. (2010), mejorar la capacidad de investigación, conocimiento e información del país sobre el patrimonio natural y la calidad ambiental que disfrutan sus habitantes y los otros seres vivos, permitirá una mejor gestión del desarrollo sustentable, buscando recuperar e incorporar el conocimiento ancestral, dando cabida a mecanismos que permitan disminuir, neutralizar y armonizar el crecimiento económico con la calidad ambiental. De esta manera el RCA se convierte en una herramienta que brinde información sobre las relaciones entre economía y ambiente y el diseño de un sistema de incentivos y cargas que contribuyan a una toma de decisiones más consciente e informada de sus impactos ambientales, en los recursos genéticos y el conocimiento ancestral, para avanzar hacia la sustentabilidad.

La necesidad de conservar, proteger y restaurar la base ecosistémica del país requiere la obtención de información clave para el establecimiento del RCA; el cual debe estar enmarcado en criterios: hidrológicos, hidráulicos, de calidad de agua y ecológicos (King, et al., 1999; Martínez Santa-María y Fernández Yuste, 2003; Castro et al., 2006; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y ANLA, 2013).

Por consiguiente para abordar metodológicamente el RCA e la cuenca del río Cali y teniendo como insumo el análisis de la información hidrométrica e hidrológica de la propuesta inicial

de RCA aplicando métodos hidrológicos, es necesario: en primer lugar, contar con la, caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramos, evaluación de usos actuales y prospectivos del agua y articulación con instrumentos de planificación con su debida evaluación del impacto en la calidad del agua y factor de asimilación; dado que los usos del recurso están limitados por valores admisibles de calidad del agua. Y dentro del componente ecológico se debe proceder con enfoque biótico y no específico, utilizar variables que integren información de una determinada comunidad biótica, emplear las propiedades de sensibilidad y/o tolerancia de grupos de especies indicadoras y hacer uso de un Índice de Integridad del Hábitat como base para el desarrollo de las comunidades bióticas, que para el caso de pequeñas cuencas andinas como el río Cali, señala Zuñiga y Cardona (2010), siendo más acertado establecer caudales ecológicos analizando macroinvertebrados, en lugar de considerar peces como especie objetivo.

En segundo lugar, se deben realizar los cálculos hidráulicos, de calidad del agua y del Índice de Integridad del Hábitat, IIH, para lo cual se utilizarán los resultados de cálculos hidráulicos y de calidad del agua para la propuesta mensual inicial de los caudales ambientales definidos en la estimación iterativa de la propuesta mensual inicial del RCA por métodos hidrológicos presentados en este trabajo, dichos cálculos proporcionarán la valoración de los cambios en una serie de variables físicas y químicas que conformarán un Índice de Integridad del Hábitat que estará sustentado en cálculo de tiempos de viaje y factores de asimilación, cálculo del criterio de calidad del agua donde el cálculo debe ser coherente con la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas basado en la información que surja de los componentes hidrológico, hidráulico y de calidad del agua, este índice multimétrico permitirá predecir qué sucederá con el ambiente físico en el que se desarrollan las comunidades biológicas, cuando se varía el caudal del río.

Por último se debe realizar revisión de la estimación inicial mensual del RCA a partir de los resultados del Cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del Índice de Integridad del Hábitat, es posible que se requiera la modificación de la propuesta inicial de caudales ambientales mensuales generada en la estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales. Dicha modificación presenta dos opciones: puede requerirse aumentar el valor del RCA mensual propuesto de un mes determinado para cumplir el criterio de calidad del agua y/o de no disminución del IIH. Sin embargo, cumpliendo los dos criterios anteriores, también podrá suceder que se disminuya el valor de caudal ambiental mensual propuesto. Como resultado de este procedimiento iterativo se obtendrá la propuesta de RCA mensuales para pequeñas cuencas andinas como la del río Cali.

## 8. CONCLUSIONES Y REMENDACIONES

La gestión del recurso hídrico como proceso tecnocrático y técnico no impactará de la forma deseada si no se entiende que dicha gestión es un proceso humano en todas sus dimensiones y mientras que no involucre a la población no se va tener un mecanismo efectivo para responder a los escenarios de eventos extremos, tomando la medición técnica y económica como insumo para la decisión social encaminada hacia una cultura del agua, reconociendo este recurso como patrimonio de toda la comunidad, siendo el RCA una herramienta esencial para recuperar la atención en la conservación del agua, y llevar así a una mejora socioambiental.

El término de régimen de caudal ambiental RCA es un tema relativamente nuevo en Colombia y son pocos los estudios o investigaciones desde la visión holística de la conservación para determinar los caudales que deben permanecer aguas debajo de una corriente hídrica después de un aprovechamiento. En este sentido, es imperioso empezar a desarrollar trabajos que permitan implementar, construir y estructurar conocimiento sobre el RCA para cuencas andinas. Estas experiencias metodológicas servirán de base a las autoridades ambientales y territoriales en la toma de decisiones concertadas a todos los niveles para establecer los límites permisibles de uso del recurso garantizando el bienestar de los ecosistemas claves en la regulación hídrica

El método de Tennant presenta algunas falencias, primero define dos semestres aplicables a ríos con características donde se desarrolló y que presentan esas particulares características hidrológicas, su aplicación en otras regiones debe hacerse después de definir la variación hidrológica propia de la cuenca de estudio. En el caso del Valle del Cauca, se encuentra documentado el comportamiento bimodal del caudal, por ello se realizó la modificación presentada en el documento, sin embargo los caudales presentados difieren del comportamiento variable natural del río. Mostrando que los caudales aconsejados como mínimos para una condición excelente, representan valores mínimos presentados en algunos años de registro en periodos de fuerte estiaje para la estación Bocatoma con un valor  $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$  y para de Pichindé de  $0,38 \text{ m}^3/\text{s}$  por tanto no deben ser permanentes porque implica desde el punto de vista biológico, reducción de las condiciones mínimas de vida de la biota asociada y del ecosistema regulador.

Del método de Hooppe, se puede concluir que los caudales mínimos mostrados representan, de alguna forma, la variabilidad de caudales que debe presentar el río para que la vida acuática se mantenga, es decir, los peces y demás organismos acuáticos requieren que los caudales circulantes aumenten o disminuyan, para completar sus estados de vida. En el caso del río Cali habría que entrar a analizar las especies de macroinvertebrados que habitan en el río para definir cuáles son los caudales mas favorables. la desventaja del método de Hoppe radica en que determina caudales para la trucha a partir de experiencias en el río Frying Pan



de Colorado (USA), cuyo régimen hidrológico es diferente a las pequeñas cuencas andinas presentando dos periodos bien definidos de caudales altos y bajos, típico de los registros hidrológicos norteamericanos con épocas de hielo y deshielo. En este sentido la aplicación del método de Hoppe no podría tenerse en cuenta en las cuencas andinas.

Los índices Q90, Q95, Q50 presentan diferencias significativas, el Q95 y el Q90 representan el caso más crítico con caudales que solo se presentan en los años más secos 0,33 m<sup>3</sup>/s y 0,2 m<sup>3</sup>/s. En cambio el Q50, constituye la mediana del periodo de registro, es decir el caudal que ha sido excedido el 50% de las veces, es un caudal un poco más robusto con el río y el ecosistema fluvial, pero cuyo valor no puede considerarse único a lo largo del año para la estación Bocatoma con un valor de 3,09 m<sup>3</sup>/s y Pichindé de 2,10 m<sup>3</sup>/s, porque pueden presentarse meses en años secos en los que ese caudal no se pueda efectuar. Con respecto al 7Q<sub>10</sub> los resultados encontrados no se recomiendan el uso de este índice puesto que representa condiciones muy severas y nunca antes medidas en el río. El uso del índice puede, como estimado del caudal mínimo, subestimar el caudal y perjudicar la biota acuática.

El caudal encontrado a partir del 10% del caudal medio multianual, representa uno de los casos más críticos, inferior a los caudales medios mínimos multianuales registrados y mínimos históricos registrados en la estación Bocatoma con 0,24 m<sup>3</sup>/s y en Pichindé 0,38 m<sup>3</sup>/s. Esta metodología, aunque es de fácil aplicación, muestra que es simplista y reduce de manera significativa la cantidad de agua que pasa por el río y con ello las limitando la variabilidad natural de los caudales.

El método propuesto por el Ministerio de Ambiente presenta las mayores correlaciones para la estación Bocatoma y Pichindé, sin embargo en la estación Pichindé el criterio para el manejo debe ser prioritario y de acuerdo con el ajuste del software IHA se recomienda hacerlo con valores mes a mes del caudal excedido el 70% del tiempo es decir 0,95 m<sup>3</sup>/s para la estación Bocatoma y 1,00 m<sup>3</sup>/s, para Pichindé como umbrales mínimos

Dado su alto rendimiento hídrico, sensibilidad del ecosistema y gran biodiversidad, de la zona alta, estos valores deben ajustarse al estudio de la relación de la biota (macroinvertebrados) con el caudal, priorizando al ecosistema como usuario y regulador del ciclo hidrológico.

La zona alta y media de la cuenca presenta un rendimiento hídrico entre 40- 60 l/s- km<sup>2</sup> característica que permite que esta zona sea considerada como la tercera más biodiversa de América y la preservación y conservación de estos ecosistemas claves en la regulación hídrica, está sujeta a políticas que deben robustecerse para así garantizar el suministro del líquido vital, enmarcándose en el uso consensuado del recurso, la asignación necesaria a los ecosistemas y la restauración de la base ecosistémica presente, pues se trata de un ecosistema extremadamente vulnerable que ejerce una función reguladora de gran relevancia para la ciudad de Cali.

Los métodos del tipo hidrológico estadístico tienen un carácter de simple proximidad, el cual puede considerarse admisible como punto de partida mientras no se disponga de una mejor caracterización hidráulica, biológica y socioambiental, y han de tomarse con precaución por tanto algunos métodos han sido desarrollados para regiones con condiciones hidrológicas y geomorfológicas diferentes a la zona de estudio.

## 9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

Determinación del RCA por medio de la metodología IFIM evaluada con las especies de macroinvertebrados y la ictiofauna propia del río.

Evaluación del régimen de caudal ambiental a nivel de cuenca tomando en cuenta consideraciones sociales, actividades económicas y la planeación y ordenamiento territorial a corto, mediano y largo plazo.

Evaluación del RCA a partir de modelos de calidad del agua, hidráulicos e hidrológicos a nivel de cuenca y considerando varios sus tributarios.

Evaluación de modelos de regresión con base en índices bióticos (BMWP, integridad biótica o el ETP) correlacionados con índices de calidad del agua.

Estudio de la dinámica de población de anfibios y peces y su relación con la variabilidad del caudal.

Definir metodologías que permitan mejorar el sistema de monitoreo hidrometeorológico existente en cuencas torrenciales andinas, para definir umbrales de alerta ante posibles eventos extremos asociados al fenómeno ENOS.

Aplicación de los índices de alteración hidrológica (IHA) para los aprovechamientos del recurso identificando el grado de afectación que han tenido a nivel hidrológico.

Restitución de corredores biológicos del río Cali, a partir de la definición de estrategia de adaptación al Cambio Climático y Variabilidad Climática.

## 10. REFERENCIAS

Alcázar, M. J. (2007). El método del caudal básico para la determinación de caudales de mantenimiento aplicación a la cuenca del Ebro. Universidad de Lleida. Escuela técnica superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. España. Documento disponible en línea en, <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8236/Tjam1d1.pdf;jsessionid=320272CD25F184D8C6412CDDE2A1FDC6.tdx2?sequence=1>. Visitado en Diciembre 02 de 2013, a las 07: 41 pm.

Alcázar, J., Palau, A., & Vega-García, C. (2008). A neural net model for environmental flow estimation at the Ebro River Basin, Spain. *Journal of Hydrology* 349, 44-55

Anderson, E. P., Encalada, A. C., Maldonado-Ocampo, J. A., McClain, M. E., Ortega, H., & Wilcox, B. P. (2010) Caudales Ambientales: un Concepto para el Manejo de los Efectos de las Alteraciones Fluviales y el Cambio Climático en los Andes. En Herzog, S., Martinez, R., Jorgensen, P., Tiessen, H. (Ed.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* 387-400. documento disponible en línea en, [http://www.spar.dir.iai.int/files/communications/publications/scientific/Climate\\_Change\\_and\\_Biodiversity\\_in\\_the\\_Tropical\\_Andes\\_SP/capitulo23.pdf](http://www.spar.dir.iai.int/files/communications/publications/scientific/Climate_Change_and_Biodiversity_in_the_Tropical_Andes_SP/capitulo23.pdf). Visitado en Mayo 04 de 2015, a las 09: 50 am.

APROMA (Asociación Profesionales del Medio Ambiente). (2000). In proceedings: 1° Congreso sobre Caudales Ecológicos. Ponencias y conclusiones. Barcelona, p. 407.

Arthington, A.H. (1998). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of holistic methodologies. Land and water resources research and development corporation. Canberra. Documento disponible en línea en <http://www.lwrrdc.gov.au>, visitado en febrero 5 de 2015

Arrojo Agudo, P., & Gracia Santos, J. (2000). Los trasvases del Ebro a debate, en *Revista Nueva Cultura del Agua. Serie Informes*. Zaragoza. Documento disponible en línea en, [http://pdf.bakeaz.efaber.net/publication/full\\_text/295/NCAinf08.pdf](http://pdf.bakeaz.efaber.net/publication/full_text/295/NCAinf08.pdf). Visitado en, Enero 08 de 2014, a las 06: 06 pm.

Arthington, A. H. (1998). Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Holistic Methodologies. LWRRDC Occasional Paper 26/98.

Ávila, A. (2012). Simulación hidrológica Utilizando HEC-HMS como herramienta para estimar caudales máximos en la cuenca hidrográfica del Río Cali. Trabajo de grado, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). El niño and la niña analysis influence in the monthly water supply at Cali River basin. *Tecnura*, 18(41), 120-133.

Arthington, A., & Zalucki, J. (1998). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods. LWRRDC Occasional Paper 27.

Barlow, M. (2001). El Oro Azul "La crisis mundial del agua y la reificación de los recursos hídricos del planeta". Council of Canadians, Canadá. Documento disponible en línea en, <http://todaypdf.org/oro-azul.pdf-id4143890>. Visitado en Diciembre 03 de 2013, a las 07: 29 pm

Baron, J., Poff, N., Angermeier, P., Dahm, C., Gleick, P., Haiston, N., Jackson, R., Johnston, C., Richter, B., & Steinman, A. (2003). *Ecosistemas de Agua Dulce. Tópicos en Ecología*. Ecological Society of América. Número 10. USA.

Bedoya, M., Contreras, C., & Ruiz, F. (2010). Alteraciones del Régimen Hidrológico y de la Oferta Hídrica por Variabilidad y Cambio Climático. Capítulo 7. Bogotá, D.C.: IDEAM, Estudio Nacional del Agua: pp 281-320.

Benavides. (2010). Evidencias del cambio climático en Colombia - análisis de tendencias de precipitación y temperatura para diferentes pisos térmicos. IDEAM. ISBN: 978-958-8067-25-4. 45-50p. Colombia.

Beck, E. Bendix, I. Kottke, Makeschin, & R. Mosandl. (Eds.). (2008). Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. Ecological Studies, Vol. 198. Analysis and Synthesis. 543 p.

Beiderwieden, E., T. Wrzesinsky & O. Klemm. (2005). Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes cordillera. Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.2: 863–885.

Bovee, K.D. y Milhous, R.T. 1978. Hydraulic simulation in stream flow studies: Theory and techniques. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33. 130 pp.

Bounds, R. y Lyons L. 1979, Statewide Fishery Management Recommendations. Performance Report. Austin, Texas.

Box, G.E & Cox, D.P. (1964). An analysis of transformation. J.R. Statistic Soc. B-26, pp. 211-252.

Bragg, O., Black, A., & Duck, R. (1999). Anthropogenic impacts on the hydrology of rivers and lochs. Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research. Report N°W98 (50) I1. University of Dundee. Stirling-Escocia.

Bruijnzeel, I.A. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forests: A Reassessment. Land Use and Water Resources Research 1: 1.1-1.18.

Burgeois, G., Cunjak, R.A., Caissie, D. y El-Jabi, N., 1996. A spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile Atlantic salmon in a small stream. North American Journal of Fisheries Management, 16 (1): 154-166.

Burgess, G.K. & M.C. Thoms. (1998). Environmental flow management in Queensland river systems. In: Water for the environment: Recent approaches to assessing and providing environmental flows. Proceedings of AWWA forum. Arthington, A.H. & J.M. Zalucki Eds. pp.11-20.

Cachón de Mesa, J. 2002. Los regímenes de caudales con fines ambientales. Herramienta básica en la gestión y mejora del medio ambiente. CETA-CEDEX. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Fomento. España.

Cachón de Mesa, J. 2000. Instremflows in Spain. Wageningen, the Netherland.

Campo Erazo, Y. y Ruiz Cobo, D. 2001. Estimación del régimen de caudales ecológicos en el río Palacé, aguas debajo de la futura bocatoma que abastecerá de agua potable a la ciudad de Popayán. Tesis de Grado Biología Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Exactas y de la Educación. Popayán, Colombia. 111 P.

Cantera, J., Carvajal, Y., Castro, L. Comp. (2009). *Caudal Ambiental. Conceptos, experiencias y desafíos*. Programa editorial Universidad del Valle, Cali.

Carvajal, Y. (2010). Dimensiones para usar metodologías en la estimación de caudales ambientales en Colombia. Revista de investigación Respuestas Universidad Francisco de Paula Santander, 15 (2), 34-46.

Carvajal-Escobar, Y. 2004. El Uso de Funciones Ortogonales Empíricas y Análisis de Correlación Canónica en el Estudio de la Variabilidad Hidrometeorológica. Aplicación al Valle del Cauca- Colombia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Carvajal-Escobar, Y., Restrepo, I., & Tucci, C. 2005. El Cambio Climático y las Estrategias de Desarrollo para América Latina. En Conferencia internacional Agua 2005. Octubre de 2005. Cali-Colombia, p.1-11.

Carvajal, Y., Martínez, D., & Quintero-Angel, M. (2006). Conceptos Fundamentales. Documento de trabajo proyecto Prácticas Útiles de Adaptación Frente a Eventos Hidrometeorológicos Asociados al Cambio y la Variabilidad Climática en América Latina y el Caribe.

Carvajal, Y., Correa, A. & Muñoz, M. (2007). Modelos de predicción de caudal utilizando variables macroclimáticas y técnicas estadísticas multivariadas en el Valle del río Cauca. Colombia: Escuela EIDENAR. Universidad del Valle. 14-15p. Cali. Colombia.

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

Castro Heredia, L., Carvajal Escobar, Y., & Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y Universidad*, 10(2) Documento disponible en línea en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47710203>. Visitado en Febrero 11 de 2014, a las 06: 15 pm.

Castro Heredia, L. M. (2008). Caracterización del régimen de caudal ambiental en la cuenca baja del Río Dagua. Universidad Del Valle. Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente. Facultad de Ingeniería, Cali.

Castro, L. & Carvajal, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista EIDENAR: Ejemplar 9: Disponible En:* <http://eidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/9/c.htm>. Santiago de Cali. Colombia.

Cap-Net., GWP., & PNUD. (2005). Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Agencia Canadiense para el desarrollo internacional CIDA, Canadá. Documento disponible en línea en, [http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM\\_Files/Manual%20Planes%20GIRH.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/Manual%20Planes%20GIRH.pdf). Visitado en Noviembre 29 de 2013, a las 10: 10 pm.

CEDEX. (1998). Metodología de cálculo de regimenes de caudales de mantenimiento. Realización del asesoramiento técnico en temas ambientales relacionados con las obras hidráulicas. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Madrid. Ministerio de Medio Ambiente.

Céspedes, G. (2012). Simulación hidráulica utilizando PHABSIM como contribución para determinar el régimen de caudal ambiental (RCA) en el río Pance mediante la metodología Ifim. Universidad del Valle. Cali – Colombia.

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

Comunidades Europeas. (2004). Agua para la Vida. *Comisión Europea*, Luxemburgo. Documento disponible en línea [http://ec.europa.eu/research/water-initiative/pdf/agua\\_vida\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/research/water-initiative/pdf/agua_vida_es.pdf). Visitado en Noviembre 19 de 2013, a las 04: 36 pm.

Corporación Regional de Caldas, Proagua. (2005). Propuesta metodológica para la determinación del caudal de recuperación ambiental del río Chinchiná. Tomo VI. Ordenamiento del uso del agua en la subcuenca del río Chinchiná localizada entre los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná y Palestina – Dpto de Caldas. Convenio C087 – 2004.

Corporación Autónoma regional del Valle del Cauca-CVC. (2011). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali, departamento del Valle del Cauca. Colombia.

Correa (2014). Proceso de restauración ecológica en la cuenca media del río Cali. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- CVC, Universidad Autónoma de Occidente. Cali. 49 p

Dahmen, E. R., & Hall, M. J. (1990). *Screening of Hydrological Data: Tests for Stationary and Relative Consistency*. International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI. Wageningen, The Netherlands.

Dakova, S., Uzunov, Y., & Mandadjiev, D. (2000). Low flow - the river's ecosystem limiting factor. *Ecological Engineering* 16, 167-174.

Deksissa, T., Ashton, P. J., & Vanrolleghem, P. A. (2003). Control options for river water quality improvement: a case study of TDS and inorganic nitrogen in the Crocodile River (South Africa). *Water SA* 29, 209-217.

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

Delaware Water Supply. (2004). *The "100-year drought" of 2002*. <http://www.delawarewatersupply.com/pages/drought.htm>.

Diamond, J. M., Hall, J. C., Pattie, D. M., & Gruber, D. (1994). Use of an integrated monitoring approach to determine site-specific effluent metal limits. *Water Environment Research* 66, 733- 743.

Díaz, C.; Vicenta, M. & López F. 2005. Recursos Hídricos; Conceptos Básicos y Estudio de Caso en Iberoamérica; Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua; Centro Interamericano de Recursos de Agua; facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de México; editado en Uruguay 2005.

Diez H, J.M. 2010. Documentación del Curso – Taller Determinación de caudales ecológicos: Metodología IFIM – PHABSIM.



Díez, J. M. (2000). Metodologías para la estimación de Caudales Ecológicos. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. España.

Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. Ed. (2003). Caudal. Elementos esenciales de caudales ambientales. International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources. UICN-ORMA, Suiza. Documento disponible en línea en <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2003-021-Es.pdf>, visitado en Noviembre 19 de 2013, a las 06: 10 pm

Espinoza, C., Vargas, X., & Pardo, M. (1999). Metodología Incremental para la Asignación de Caudales Mínimos Aconsejables, IFIM. VI Jornadas del CONAPHI-CHILE.

EPA (Environmental Protection Authority), (1997). Proposed interim environmental objectives for NSW waters: Inland rivers. Chatswood.

Ferwerda W., I. Hadeed, T. Mcshane & S. Rietbergen S., con la asistencia de S. Stolton & N. Dudley. (2000). Bosques Nublados Tropicales Montanos. WWF International/IUCN The World Conservation Union.

Fandiño-Lozano, M. y W. van Wyn gaarden (2005). Prioridades De Conservación Biológica para Colombia. Grupo ARCO, Bogotá. 186 pp.

García, L. (1998) *Manejo integrado de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe Informe técnico*. Washington, D.C.: Banco interamerica de Desarrollo No. ENV-123.

García de Jalón, D. (2000). Fijación de regímenes de caudales ecológicos. Criterios para su aplicación en ríos españoles. In: Jornada sobre evaluación de regímenes de caudales ecológicos mediante modelización del hábitat físico. CEDEX. Madrid.

Giraldo, L (1995). *Identificación de pérdidas de caudal en la subcuenca hidrográfica del río*. Informe Técnico (Resumen). Santiago de Cali. Corporación Autónoma Regional del Cauca · CVC.

Global Water Partnership (GWP). (2005). *GWP in action 2005*. <http://www.gwpforum.org/servlet/PSP?iNodeID=215&itemId=471>.

Global Water Partnership (GWP), TAC (Comité de consejo técnico). (2000). Manejo Integrado del Recurso Hídrico. Santiago de Chile, P.80.

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

Gómez Criado, M., Loné Pérez, P., & Canga Cabañes, J. (2000). El régimen de caudales medioambientales. Su cálculo en la cuenca del Guadiana. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (51), La Gestión del Agua, II.

Guerrero, E, Otto De Keizer, y Rocío. Córdoba. *La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos*. Quito: UICN, 2006.

Guarin, G., & Ochoa, A. (2011). Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño. Numeral 10. Índices Macroclimáticos, precipitación y producción en Urabá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Colombia

Hurtado, G. (2010). El clima: Origen y aplicaciones. Trabajo presentado en el I congreso nacional del clima 2010 "El desarrollo económico de Colombia bajo un nuevo escenario climático". Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá

Imhof, J.G., & Brown, D. (2003). *Guaranteeing environmental flows in Ontario's rivers and streams*. A Position Statement prepared by Trout Unlimited Canada & Ontario Federation of Anglers and Hunters, p. 7.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2001). El Medio Ambiente en Colombia. Bogotá.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2002). Efectos Naturales y Socioeconómicos del Fenómeno El Niño en Colombia. Bogotá.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2008). Segunda versión nacional de agua, balance hídrico y relaciones de demanda -oferta de agua en Colombia. Ministerio de Medio Ambiente. IDEAM, Bogotá. Documento disponible en línea en, <http://corpomail.corpoica.org.co/BACFILES/BACDIGITAL/55629/55629.pdf>, visitado en diciembre 05 de 2013, a las 06: 21 pm.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. Estudio Nacional del agua 2010, 282-320.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2014) Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D. C., 2015. 496 páginas.

Inzunza, J. (2001). Cambio Climático Global. Pedagogía en Ciencias Naturales y Carreras de la infancia. Tema 7. Universidad de Concepción. Chile

Jaffe, W., Rivas Villamizar, N., & Ardila, J. (2013). Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe: 2014 (No. IICA E14-644). IICA, San José (Costa Rica). FAO, Roma (Italia). CEPAL, Santiago (Chile)

Jamett Dominguez, G., & Rodrigues Finotti, A. (2005). Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil. Revista de Gestión del Agua de América Latina, Santiago: GWP 2(1), 96.

Jiménez, J. A., Calvo, J., Pizarro, F., & González, E. (2005). Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el Río Tempisque. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica: UICN, Área Temática de Humedales, Agua y Zonas Costeras, p. 40.

Knighton, (1998): Fluvial Forms and Processes. A new perspective. Arnold London.

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

King, J., R., Tharme, & Brown, C. (1999). Definition and Implementation of Instream flows Southern Waters. University of Cape Town, South Africa. Prepared for Thematic Review II.1: Dams, ecosystem functions and environmental restoration. Documento disponible en línea en: <http://www.dams.org/>. Visitado en Noviembre 6 de 2013, a las 10: 00 am.

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

Kulik, B. H. (1990). A method to refine the New England aquatic base flow policy. *Rivers* (1), 8–22.

Homa, E., Vogel, R., Smith, M., Apse, C., Huber-Lee, A., & Sieber, J. (2005). *An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow Needs. It presented and published*. In: Proceedings of the EWRI 2005 World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Anchorage, Alaska.

Ingenieros Consultores S.S. INCOL S.A – ROCHE LTEE. (2000). Estudio del caudal ecológico, balance hídrico, indicadores ambientales e inventario del recurso hídrico en los ríos Cali, Aguacatal, Cañaveralejo y Meléndez del Municipio de Santiago de Cali. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. Departamento Administrativo de la Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). Municipio de Santiago de Cali, Colombia.

Puertas, O. & Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 23. 104-118p. Colombia.

Jamett Domínguez, G., & Rodríguez Finotti, A. (2005). Evaluación del instrumento caudal ecológico, panorama legal e institucional en Chile y Brasil. *Revista de Gestión del Agua de América Latina, Santiago: GWP* 2(1), 96.

Jimenez Escobar, Henry. (1986). Hidrología Básica I. Universidad del Valle.

Lamb, B., Doerksen, H. (1987). Instream water use United States. Water laws methods for determining flow requirements, en *Revista National Water Summary*. Hydrologic event and water supply and use. US Geological Survey, Washington. Documento disponible en línea en, [http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=tUNtGe2mPR4C&oi=fnd&pg=PA109&dq=Instream+water+use+United+States+Water+laws+methods+for+determining+flow+requirements+lamb&ots=K3FCfj4oaa&sig=kpAfcGNVhugiZCFUdajLLpU8fxE#v=onepage&q=Instream%20water%20use%](http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=tUNtGe2mPR4C&oi=fnd&pg=PA109&dq=Instream+water+use+United+States+Water+laws+methods+for+determining+flow+requirements+lamb&ots=K3FCfj4oaa&sig=kpAfcGNVhugiZCFUdajLLpU8fxE#v=onepage&q=Instream%20water%20use%20)

20United%20States%20Water%20laws%20methods%20for%20determining%20flow%20requireme  
nts%20lamb&f=false. Visitado en Febrero 02 de 2014 a las 06: 38 pm.

Lee, T. R. (1990). Water resources management in Latin America and the Caribbean. Boulder, Colorado. WestviewPress.

Lhumeau, A., & Cordero, D. (2012). Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al cambio climático. UICN, Quito, Ecuador: Documento disponible en línea en, <http://intranet.catie.ac.cr/intranet/posgrado/BB507%20Cambio%20Global/Documentos/2013/lecturas/Lhumeau,%20Cordero%20%202012%20adaptaci%C3%B3n%20basado%20en%20ecosistemas.pdf>. Visitado en Abril 06 de 2014, a las 08: 23 am.

Lytle, D., & Poff LeRoy, N. (2004). Adaptation to natural flow regimes. Trends in Ecology and Evolution 19(2). February 2004.

Martínez Santa-María, C., & Fernandez Yuste, J. A. (2003). *Régimen ambiental de caudales en el tramo inmediato aguas abajo de la presa de "El Vado". Río Jarama (Guadalajara)*. En: Régimen Ambiental de Caudales, del 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. E.U.I.T. Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Cuenca. España, p. 1-18.

Martínez Santa-María, C., & Fernandez Yuste, J. A. (2010). Régimen Ambiental de Caudales. Manual de Referencia Metodológica.

Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology*. McGRAW – HILL, INC. United States of America.

Mayorquín, J. (1997). Evaluación de diferentes métodos para determinar caudales máximos en las cuencas de los ríos Cali, Pichindé, Cañaveralejo, Meléndez y Lili. *Universidad del Valle*

Metcalfe, R. A., Smakhtin, V. Y., & Krezek, C. (2003). Simulating and characterising natural flow regimes. Waterpower Project Science Transfer Report 1.0, Ontario Ministry of Natural Resources, p. 14.

Michigan Department of Environmental Quality, Surface Water Quality Division.(2002). Total maximum daily load for mercury for Hammell creek. Houghton County, Michigan. <http://www.deq.state.mi.us/documents/deq-wd-water-tmd/-hammellcreek.pdf>, p. 7.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Autoridad nacional de licencias ambientales (2013). Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental, Bogotá.

Mohamed, M., Stednick, J. D., & Smith, F. M. (2002). Comparison of field measurements to predicted reaeration coefficients,  $k_2$ , in the application of a water quality model, QUAL2E, to a tropical river. *Water Science and Technology* 46, 47-54.

Monsalve, E. A & Bustamante C. A. 2006. Informe final proyecto de investigación 247: determinación de las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía – puente Balboa. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad del Quindío. Armenia. Colombia.

Monsalve, E., & Bustamante, C. (2007). Estudio de caso: determinación de las características e interrelaciones de los componentes del caudal ecológico para el río Quindío en el tramo Boquía – Puente Balboa. Universidad del Quindío. (Entregado por comunicación personal).

Montoya, R. (1995). Sistematización y actualización del balance de producción hídrica de la cuenca hidrográfica del Río Cali. Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia.

New York State Department of Environmental Conservation, Division of Water. (1996). *Total maximum daily loads and water quality-based effluent limits*. Documento disponible en línea en, <http://www.dec.state.ny.us/>. Visitado en Abril 05 de 2014, a las 07: 23 am.

NOAA. (2013). National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved 12 01, 2013, from <http://www.noaa.gov/>

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

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

Ortega P, S. C., García-, A., Ruiz, C. A., Sabogal, J., & Vargas, J. D. (2010). Deforestación evitada: Una guía REDD+ Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Conservación Internacional Colombia; Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF); The Nature Conservancy; Corporación Ecovera; Fundación Natura; Agencia de Cooperación Americana (USAID); Patrimonio Natural - Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas y Fondo para la Acción Ambiental. Bogotá. 72p Documento disponible en línea en, [www.cambioclimatico.gov.co](http://www.cambioclimatico.gov.co). visitado en mayo 04 de 2014, a las 03: 05 pm.

Orth, D. J., & P. M., Leonard. (1990). Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regulated Rivers: Res. & Manag.* 5, 129-138.

Ortiz Flórez, R., Chicango Angulo, H., & Arias Chasqui, A. (1996). Modernización de la planta río Cali. Vol. 05 No. 1996 revista Energía y Computación, Cali.

Pabón, J.D. (2006). Escenarios de Cambio Climático para Colombia; IV Encuentro RUPSUR Sobre Variabilidad y Cambio Climático. Santiago de Cali, Noviembre de 2006.

Palau, A. (1994). Los mal llamados caudales “ecológicos”. Bases para una propuesta de cálculo. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (28). Ríos, II, 84–95. OP (Obras Públicas).

Palau, A., & Alcazar, J. (1996). The Basic Flow: An alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. Proceedings of 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics. Quebec (Canada) A, 547–558.

Palau, A. (1999). Aspectos biológicos de los caudales ecológicos. In: *I Congreso sobre caudales ecológicos*. Terrassa.

Palau, A. (2003). Régimen Ambiental de Caudales: estado del arte. En: Régimen Ambiental del Caudales. Cuenca, del 29 de septiembre al 3 de octubre. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Palta, M.V. (2008). Marco jurídico y tendencias en las políticas ambientales para el establecimiento de los caudales ambientales. Capítulo 3, del Libro *Caudal Ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. Cantera, Jaime; Carvajal, Yesid; Castro, Lina. Comp. (2009). Programa editorial Universidad del Valle, Cali.

Pérez Rincón, M., Rojas Padilla, J., Ordoñez Barona, Camilo. Comp. (2010). Desarrollo sostenible. Principios, aplicaciones y lineamientos de política para Colombia. Programa editorial Universidad del Valle

Parra, E. (2012). Modelamiento Y Manejo De Las Interacciones Entre La Hidrología, La Ecología Y La Economía En Una Cuenca Hidrográfica Para La Estimación De Caudales Ambientales. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Medellín, Colombia.

Payne, T. R. (2003). The Concept of Weigthed Usable Area as Relative Suitability Index. Proceedings of International IFIM user’s workshop (CD), 1-5/6/03, Fort Collins, Colorado.

Pérez Rincón, M., Rojas Padilla, J., Ordoñez Barona, Camilo. Comp. (2010). Desarrollo sostenible. Principios, aplicaciones y lineamientos de política para Colombia. Programa editorial Universidad del Valle.

Poff, N. L., & Ward, J. V. (1989). *Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. (46), 1805–1818.

Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, D., Mejía, J., Barco, J. & Correa P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*. Vol. 6. ISSN 0124-6984. 121-130p. Bogotá. Colombia.

Postel, S. (1992). *Último Oasis, Frente a la escasez de agua*. Norton and Company, New York.

PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2009). *Water and Sustainable Development*. Naciones Unidas,.

Pyrce, R. (2004). Hydrological Low Flow Indices and their Uses. Watershed Science Centre. Trent University. Ontario. Canada. Documento disponible en línea en, <http://www.trentu.ca/wsc>. Visitado en Diciembre 06 de 2013, a las 08: 20am

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente- PNUMA. (2003). *Gestion de Recursos hidricos en America Latina y el Caribe*. Banco Mundial. Ciudad de Panamá: Documento disponible en línea en, <http://www.pnuma.org/forodeministros/14panama/pan05nfeGestionRecursosHidricos.pdf>. Visitado en Diciembre 06 de 2013, a las 08: 20am.

Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA. *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio Ecosistemas y bienestar humano: Informe de síntesis*. Washington, DC,: World Resources Institute, 2005.

Rangel, O. (2000). Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna. Universidad Nacional de Colombia- Instituto de Ciencias Naturales, Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá.

RedRío. (2003). Seguimiento Continuo A La Cantidad Y Calidad Del Agua Del Río Aburra - Medellín, En Varios Tramos, En Sus Principales Quebradas Afluentes Y En Las Aguas Subterráneas Del Valle De Aburrá. Grupo de investigación de la Universidad de Antioquia Ingeniería y Gestión Ambiental, GIGA. Medellín, Colombia. Disponible En:[http://www.udea.edu.co/portal/page/portal/bActualidad/Principal\\_UdeA/UdeANoticias/Historial/Historial%202013/Ciencia/Caudal%20de%20vida%20para%20recuperar%20el%20r%20C3%ADo](http://www.udea.edu.co/portal/page/portal/bActualidad/Principal_UdeA/UdeANoticias/Historial/Historial%202013/Ciencia/Caudal%20de%20vida%20para%20recuperar%20el%20r%20C3%ADo). Consultado el 23/02/2015.

Reeves, A. (1994). Urgent need for holistic approach to environmental flows. In: Environmental flows seminar proceedings. pp. 163-169. (AWWA Inc.: Artarmon)

Ries, K. G. (1997). August median streamflows in Massachusetts. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4190, p. 27.

Ries, K. G., & Friesz, P. J. (2000). *Methods for estimating low-flow statistics for Massachusetts streams*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4135.



Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*, 1163-1174.

Rivera-Ramirez, H. D., Warner, G. S., & Scatena, F. N. (2002). Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Journal of the American Water Resources Association* 38, 693-704.

Saile, Peter. & Torres, M. (Eds.)(2004). Los múltiples servicios de los bosques y el desarrollo sostenible en Colombia”, en Conferencia Internacional de Bosques, Colombia País de Bosques y Vida, Memorias, p. 99-114. Bogotá: GTZ, 2004.

Sánchez, J. (1999). *Manual de análisis estadístico de los datos*. Segunda edición. Alianza Editorial S.A. Madrid.

Sanchez, E., Yewande, A., & Kulsum, A. (2007). Prioridades Ambientales para la Reducción de la Pobreza en Colombia. Edición Banco mundial en coedición con Mayol Ediciones S.A, Bogotá.

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

Silveira, L. A., & Silveira, L. G. (2001). *Vazões mínimas*. En: Paiva, J. B. D., & Paiva, E. M. C. D. Hidrología Aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre, Brasil: Ed. Associação Brasileira de recursos Hídricos.

Smakhtin, V. Y., Watkins, D. A., & Hughes, D. A. (1995). Preliminary analysis of lowflow characteristics of South African rivers. *Water SA* 21, 201-210.

Smakhtin, V. Y. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240, 147- 186.

Smith, R., & Campuzano, C. (2000). *Análisis exploratorio para la detección de cambios y tendencias en series hidrológicas*. XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Stalnaker, C.B., Lamb, B.L, Henrikson, J., Bovee, K.D. y Bartholow, J. (1995). The Instream Flow Incremental Methodology. A Primer for IFIM. National Biological Service. Washington D.C, EEUU.

Stewardson, M. J., & Gippel, C. J. (2003). Incorporating flow variability into environmental flow regimes using the flow events method. *River Research and Applications* 19, 459-472.

Tennant, D. (1976). Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1, 6–10.

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



Tobón, C., Gil, G., & Villegas, C. (2008). Aportes de la niebla al balance hídrico de los bosques alto-andinos. En: Ecología de Bosques Andinos, Universidad Nacional de Colombia. J.D. León Ed. 213p.

Tobón, C. (2009). Los bosques andinos y el agua. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito.

Universidad Nacional de Colombia-UNAL (2007). Metodología para la estimación del Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Grupo de Investigación en Recursos Hídricos GIREH, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - Dirección de Licencias – OEI, Bogotá. Documento disponible en línea en, [http://www.minambiente.gov.co/documentos/4205\\_081009\\_info\\_comen\\_final\\_caudal\\_ambiental\\_301109.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/4205_081009_info_comen_final_caudal_ambiental_301109.pdf). Visitado en Enero 10 de 2014 a las 06: 30pm.

U.S. Department of Interior. 1979. Instream flow guidelines. Bur. Land Manage. Rept. 57 p.

U.S. Fish & Wildlife Service.(1981). Interim regional policy for New England stream flow recommendations. Region 5 of U.S. Fish and Wildlife Service, Newton Corner, MA., p. 3.

Vásquez, G., Ramírez, J., Blanco, J., Navarrete, A., & Cantera, J. (1998). *Determinación de los Caudales Ecológicos para el Normal Desarrollo de la Biota Acuática, en las Cuencas Media y Baja de los Ríos: Timba, Claro, Amaime, Tulúa y Pescador en el Departamento del Valle del Cauca*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

Villada, Ossiell., et all. (2015). Cali, Un sueño atravesado por un río. Diario El País, sección, especiales río Cali, Documento disponible en línea en, <http://www.elpais.com.co/elpais/especiales/rio-cali/>.

Wallace, T. B., & Cox, W. E. (2002). Locating information on surface water availability in Virginia (draft). <http://www.rapriverbasin.state.va.us/studies>, p. 24.

Wesche, T.A. y Rechar, P.A. 1980. A summary of instream flow methods for fisheries and related research notes. Eisenhower Consortium Bulletin 9.122 p.

World Resources. *Environmental change and human health*. Oxford and New York: Joint publication of the World Resources Institute, UNEP, UNDP and the World Bank, Oxford University, 1998.

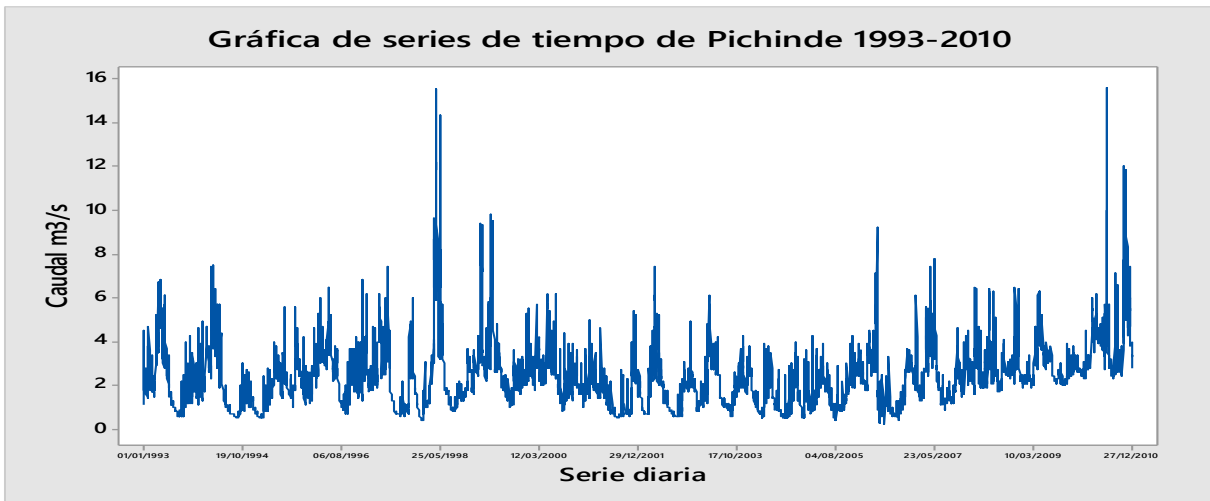
World Water Assessment Programme, UNESCO. *Agua para todos, Agua para la vida*. Paris - Francia: Ediciones UNESCO, 2003.

Yulanti, J. S., & Burn, D. H. (1998). Investigating links between climatic warming and low streamflow in the Prairies region of Canada. *Canadian Water Resources Journal* 23, 45-60.

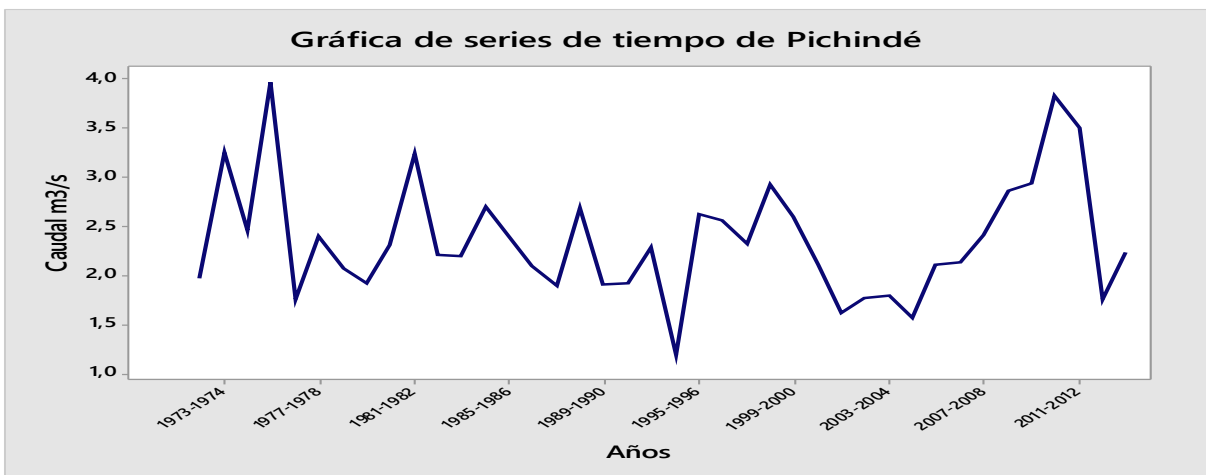


# Anexos

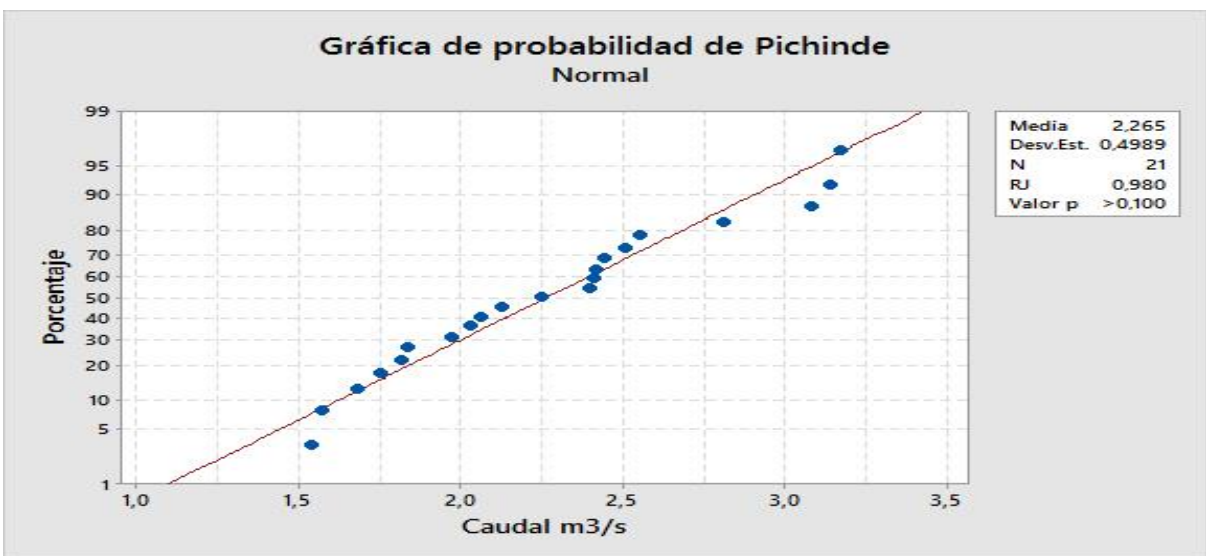
## Anexo A. Graficas del Análisis Exploratorio de datos.



Gráficas de serie de tiempo estación bocatoma



Serie de tiempo – serie de caudales anuales estación Pichindé 1969- 2014.



Probabilidad de Estación Pichindé.

## Anexo B. Pautas para la caracterización del régimen natural de caudales.

## Pautas para la implementación de avenidas geomorfológicas en el RCA

| Aspecto               | Datos de partida   | Procedimiento  | Criterio  |
|-----------------------|--|--|---|
| <b>MAGNITUD</b>       | Serie de máximos caudales medios diarios anuales en régimen natural ( $Q_c$ )<br>Obtener el valor medio de la serie ( $Q_c m$ ) y su coeficiente de variación $CV(Q_c)$  | Estimar el Caudal Generador del Lecho en régimen natural ( $Q_{GL}^{NAT}$ ) asimilándolo al correspondiente a la máxima crecida ordinaria ( $Q_{MCO}$ ):<br>$Q_{MCO} = (Q_c m) * (0,7 + 0,6 * CV(Q_c)) \cong Q_{GL}$ | El valor de $Q_{GL}^{NAT}$ es la referencia para fijar la magnitud de la avenida geomorfológica en el RCA ( $Q_{GL}^{RCA}$ )<br>$Q_{GL}^{RCA} \geq 0,64 Q_{GL}^{NAT} \rightarrow$ status excelente<br>$0,36 Q_{GL}^{NAT} < Q_{GL}^{RCA} < 0,64 Q_{GL}^{NAT} \rightarrow$ status bueno |
| <b>FRECUENCIA</b>     |  | Estimar el periodo de retorno ( $T_{GL}$ ) correspondiente a $Q_{GL}^{NAT}$ (Distribución de frecuencias GUMBEL)   | La avenida geomorfológica en el RCA debe reproducirse, como promedio, cada $T_{GL}$ años.   |
| <b>ESTACIONALIDAD</b> | Conjunto de avenidas geomorfológicas en régimen natural, es decir aquellos eventos con $Q_{min} > Q_{GL}^{NAT}$  | Estudiar la pauta estacional de las avenidas geomorfológicas naturales, es decir discriminar aquellos meses en los que se producen.  | Respetar en el RCA la pauta estacional de las avenidas geomorfológicas naturales.   |
| <b>DURACIÓN</b>       | I) Conjunto de avenidas habituales en régimen natural, es decir aquellos eventos con $Q_{min} < Q_{GL}^{NAT}$<br>II) Conjunto de avenidas geomorfológicas en régimen natural, es decir aquellos eventos con $Q_{min} > Q_{GL}^{NAT}$ | Estimar la duración media (crecida+pico+defluencia) del conjunto de avenidas pertenecientes a cada grupo   | Si $Q_{GL}^{RCA} \geq Q_{GL}^{NAT}$ , asignar a la avenida geomorfológica en RQA, la duración media obtenida para el grupo II<br>Si $Q_{GL}^{RCA} < Q_{GL}^{NAT}$ , asignar a la avenida geomorfológica en RQA, la duración media obtenida para el grupo I                            |
| <b>TASA DE CAMBIO</b> |  | Evaluar las máximas tasas diarias relativas ( $tasa_{dai} = Q/Q_{max}$ ) observadas en crecida y defluencia en cada grupo  | $Q_{dai}^{RCA} = tasa_{dai} * Q_{GL}^{RCA}$<br>Si $Q_{GL}^{RCA} \geq Q_{GL}^{NAT}$ , se asignan las tasas diarias obtenidas para el grupo II<br>Si $Q_{GL}^{RCA} < Q_{GL}^{NAT}$ , se asignan las tasas diarias obtenidas para el grupo I   |

## Pautas para la implementación de sequías con caudales no nulos en el RCA

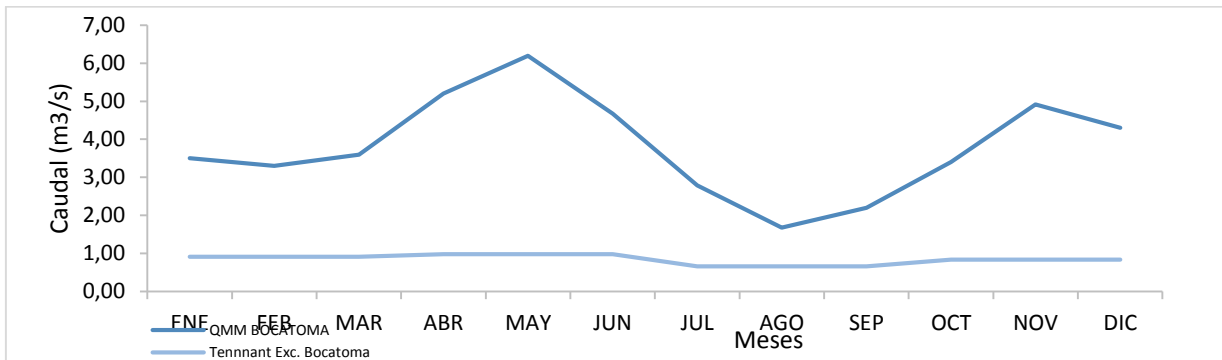
| Aspecto                                | Datos de partida  | Procedimiento   | Criterio   |
|--|---|---|--|
| <b>MAGNITUD, DURACIÓN Y FRECUENCIA</b> | Serie de caudales medios diarios para n años en régimen natural ( $Q$ ) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Para cada año, calcular el caudal correspondiente a media móvil con paso de siete días (<math>Q_7</math>) y seleccionar el mínimo (<math>Q_{min7}</math>)</li> <li>El valor mediano (MED) y el valor mínimo (MIN) de la serie de mínimos obtenida</li> </ul> | En situaciones de sequía el RCA durante siete días consecutivos, puede reducir el caudal circulante hasta el valor definido por (MED) y reducir en periodos críticos este umbral hasta el definido por (MIN) |

Pautas para determinar avenidas geomorfológicas e implementación de caudales no nulos en el RCA (adaptado de Castro (2008))

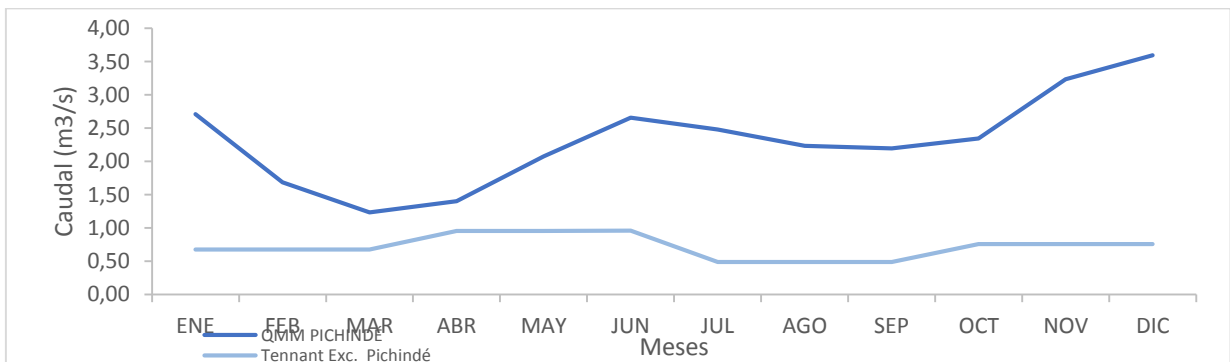


## Anexo C. Gráficas comparativas objetivo 2

## Método Tennant

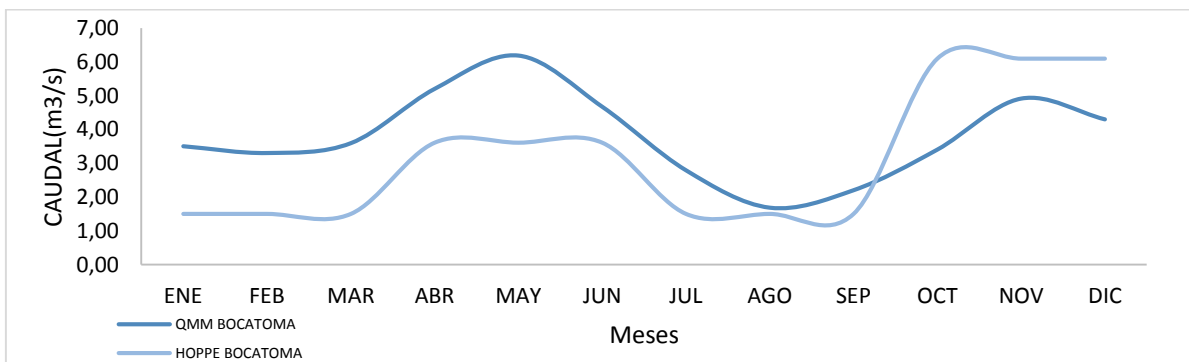


Gráfica de comparación método de Tennant Excelente frente al caudal mínimo mensual (QMM) para las Est. Bocatoma.



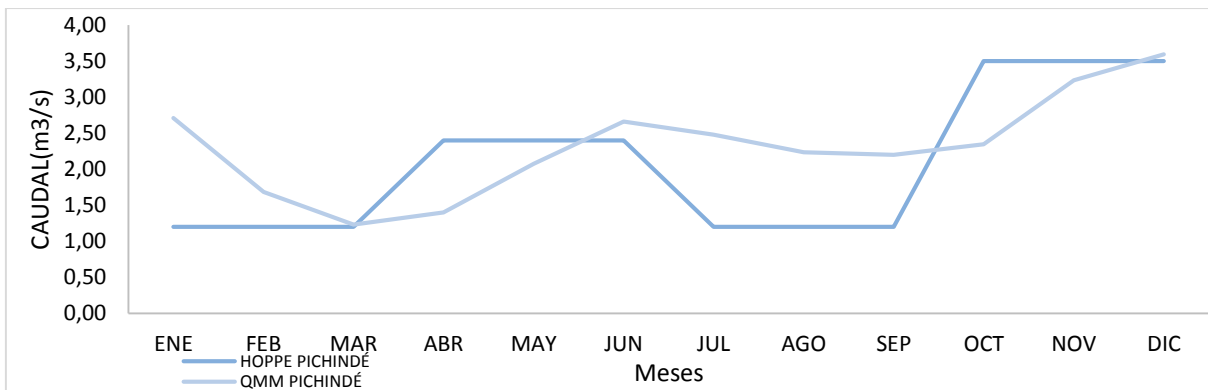
Gráfica de comparación método de Tennant Excelente frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para las Est, Pichindé.

## Método HOPPE

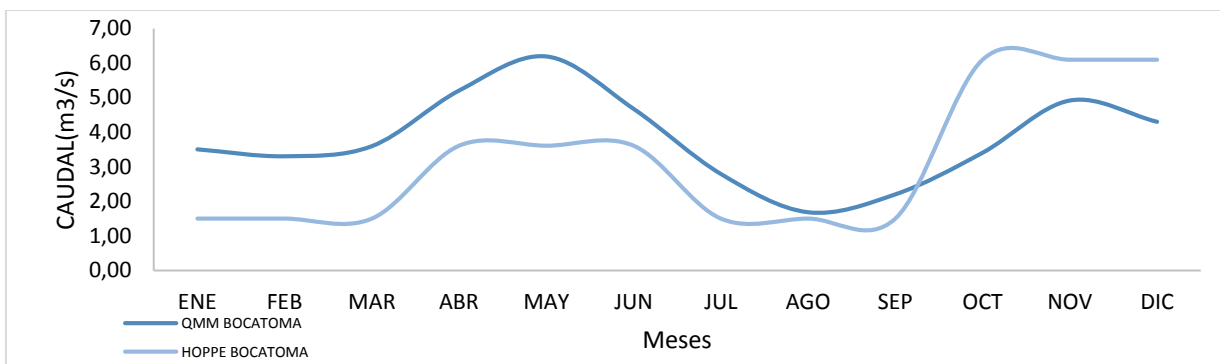


Gráfica de comparación método de Hoppe frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la estación Bocatoma.

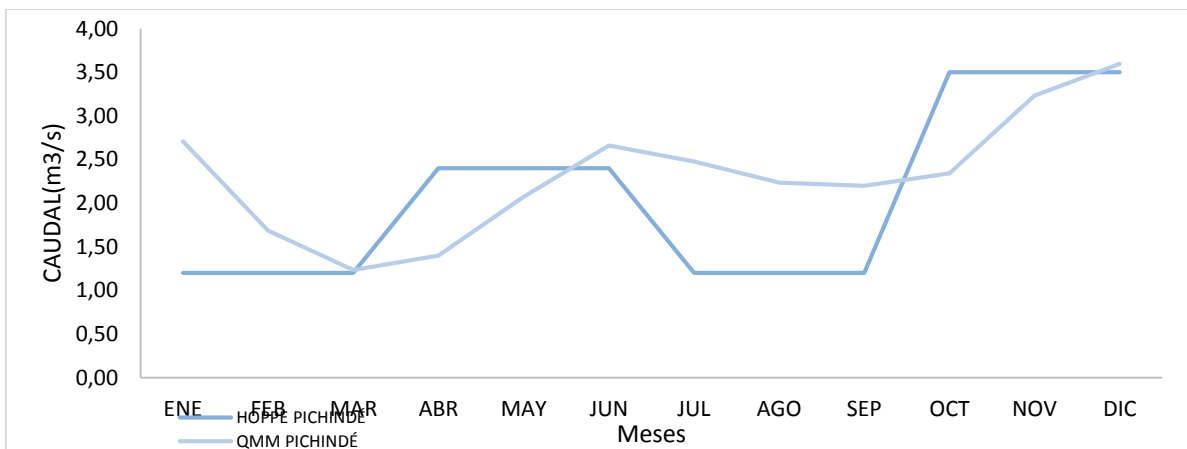




Gráfica de comparación método de Hoppe frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Pichindé.

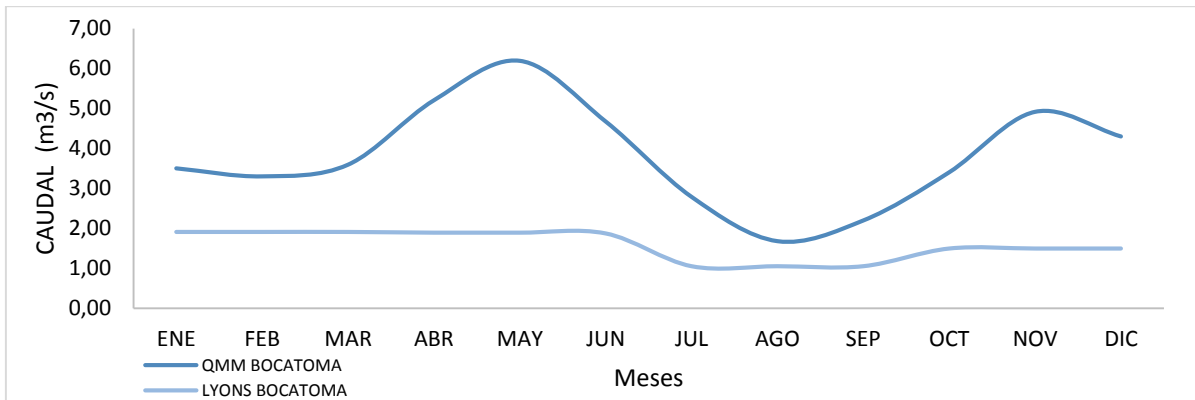


Gráfica de comparación método de Hoppe frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la estación Bocatoma.

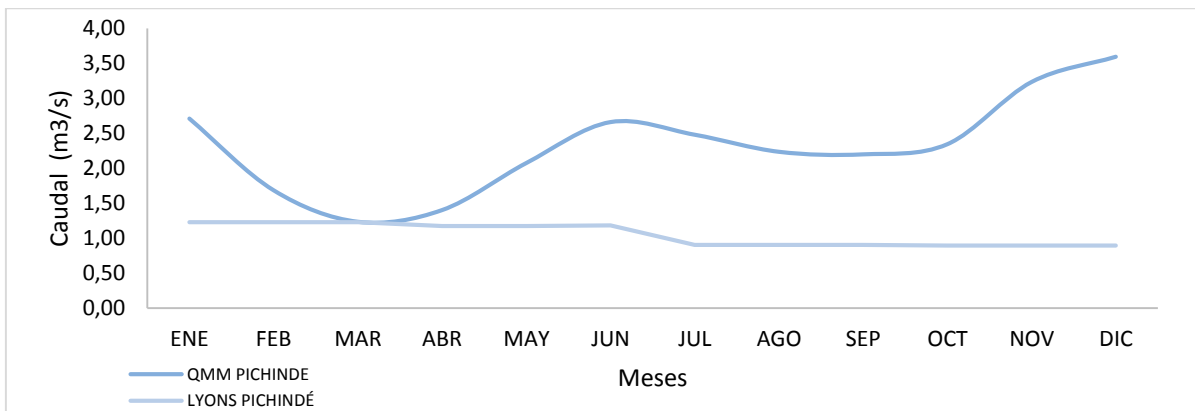


Gráfica de Comparación método de Hoppe frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Pichindé.

## Método Lyons



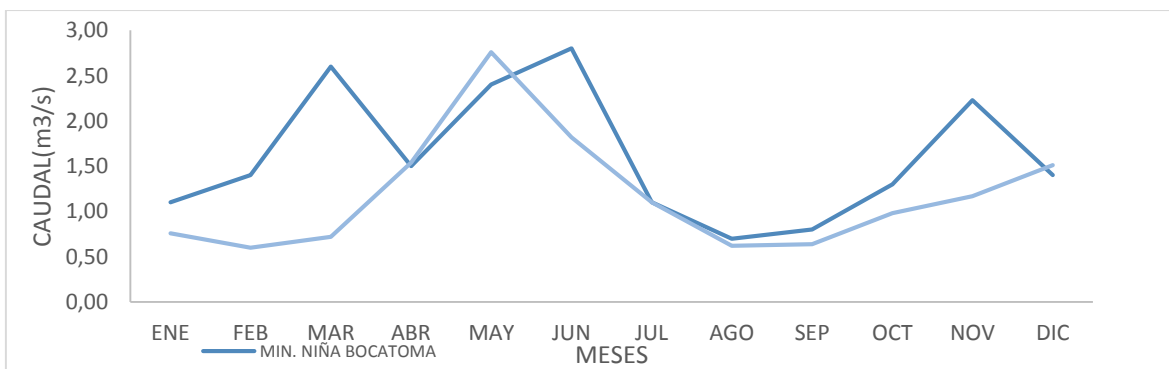
Gráfica de comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMM) para las Est. Bocatoma.



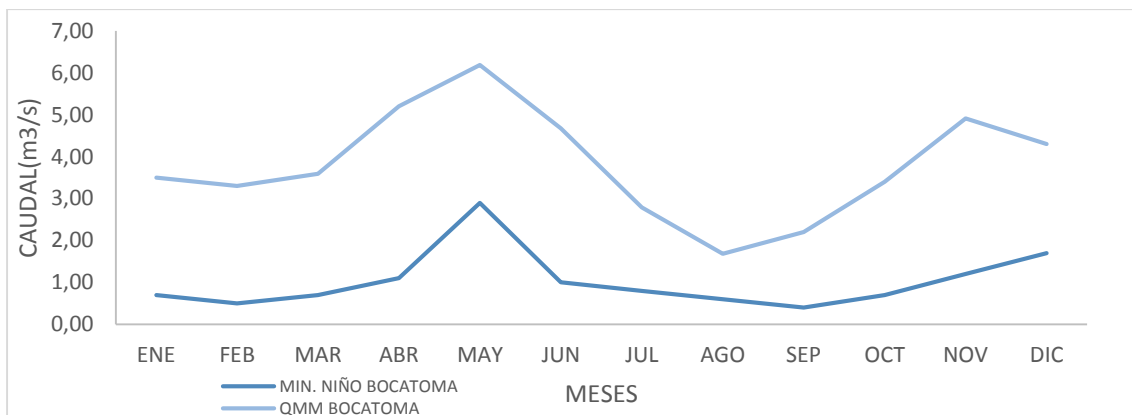
Gráfica de Comparación método de Lyons frente al caudal mínimo mensual (QMM) para las Est. Pichindé.

## Método Ministerio de Medio Ambiente

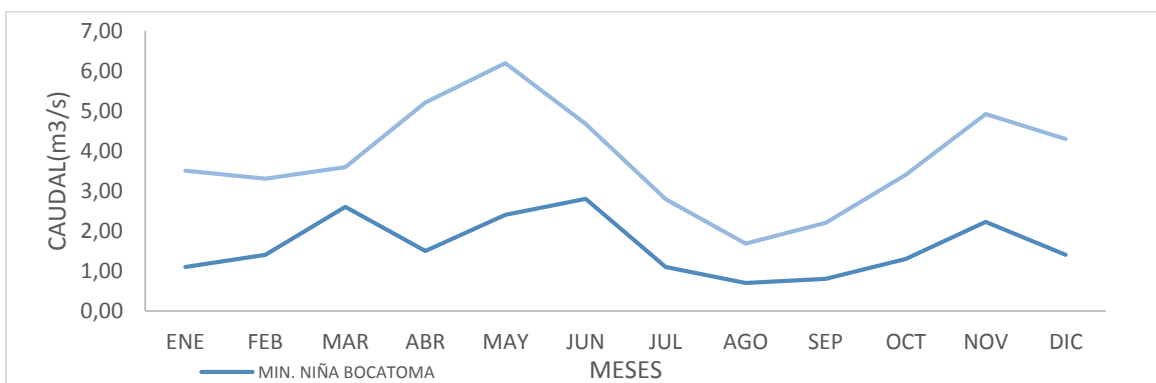
### Estación Bocatoma



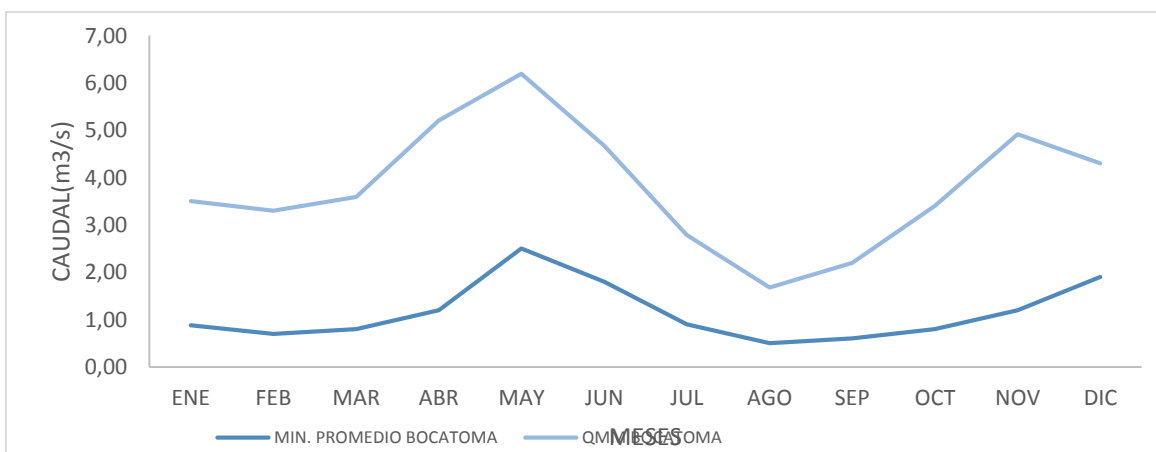
Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niña frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Bocatoma.



Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Bocatoma.

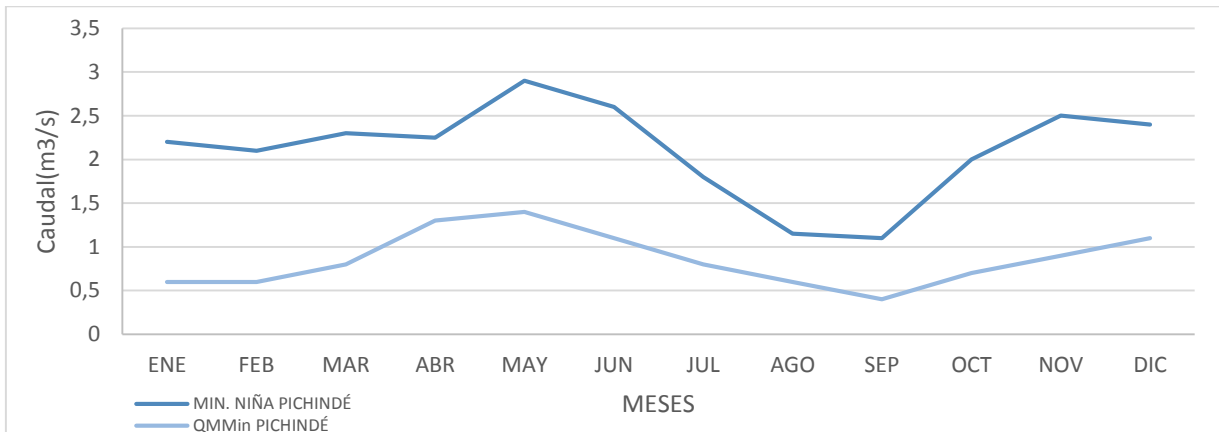


Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niña frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Bocatoma.

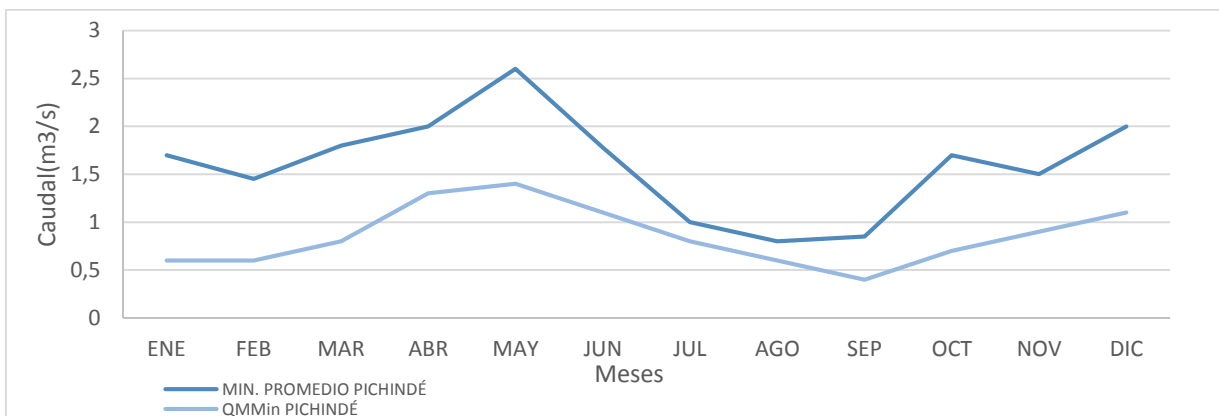


Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Promedio frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Bocatoma.

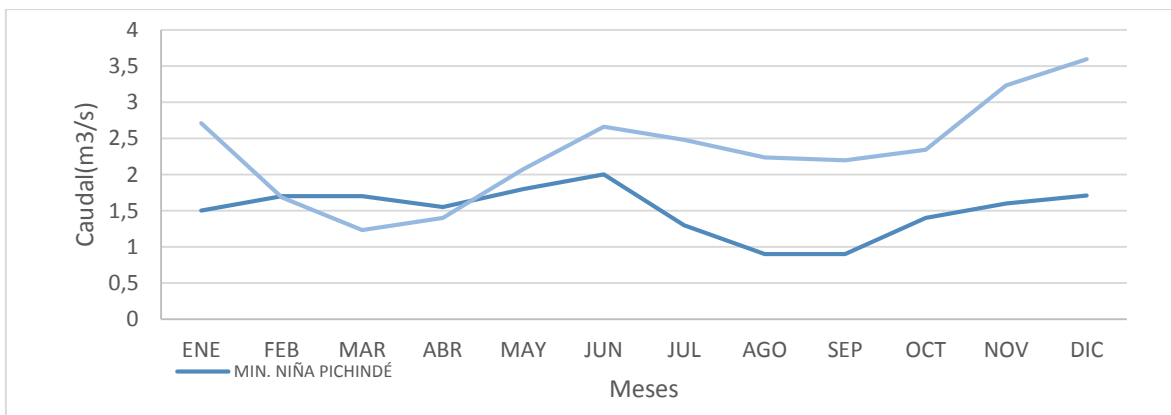
## Estación Pichindé



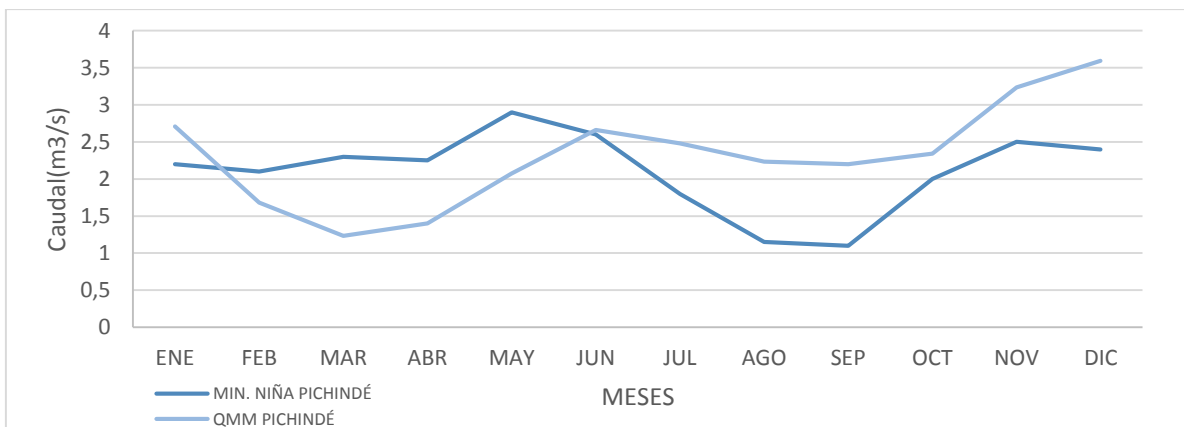
Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niña frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Pichindé.



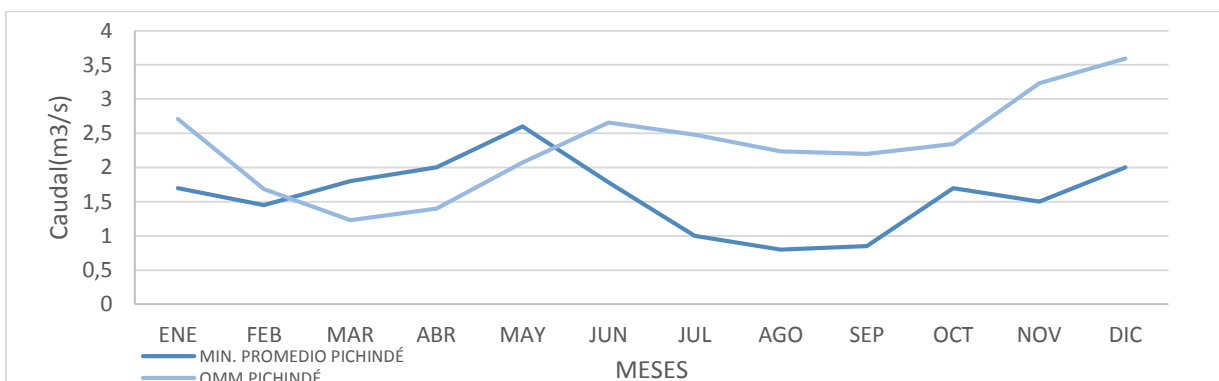
Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Promedio frente al caudal mínimo mensual (QMMin) para la Est. Pichindé.



Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niño frente al caudal mínimo mensual (QMM) para la Est. Pichindé.



Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Niña frente al caudal medio mensual (QMM) para la Est. Pichindé.



Gráfica de comparación método del Ministerio del Medio Ambiente época Promedio frente al caudal mínimo mensual (QMM) para la Est. Pichindé.

Tabla de valores extremos bajo los parámetros del IHA

| Simulación IHA              | Pichindé | Bocatoma |
|-----------------------------|----------|----------|
| <b>1-día mínimo</b>         | 1,139    | 1        |
| <b>3-días mínimo</b>        | 1,144    | 1        |
| <b>7-días mínimo</b>        | 1,153    | 1        |
| <b>30-días mínimo</b>       | 1,228    | 1,071    |
| <b>90-días mínimo</b>       | 1,536    | 1,806    |
| <b>1-día máximo</b>         | 6,375    | 11,5     |
| <b>3-días máximo</b>        | 6,269    | 10,88    |
| <b>7-días máximo</b>        | 6,082    | 10,1     |
| <b>30-días máximo</b>       | 5,243    | 7,693    |
| <b>90-días máximo</b>       | 4,241    | 5,584    |
| <b>Núm días cero caudal</b> | 0        | 0        |
| <b>Indice caudal base</b>   | 0,4692   | 0,3024   |



## Anexo D. Informe de salidas de campo

| Salidas de campo | Fecha                | Resumen salida  |
|------------------|----------------------|---|
| 1                | 11 de Enero del 2015 | Se reconoció la zona de estudio. Iniciado el reconocimiento de las Estación limnigráfica de Bocatoma y sitios estratégicos donde se da la derivación del caudal para aprovechamiento.     |
| 2                | 13 de Abril del 2015 | Se realizó el primer aforo de reconocimiento antes de la primera bocatoma de la hidroeléctrica Planta 1 rio Cali identificando un caudal medio para el muestreo de 2,83 m <sup>3</sup> /S |
| 3                | 18 de abril de 2015  | Se reconoció la subcuencas Félida, Pichindé y el sector de la parte media área es conocida como el Cabuyal.   |
| 4                | 28 de Abril de 2015  | Se realizó el segundo aforo de reconocimiento en la estación bocatoma de la hidroeléctrica Planta 2 rio Cali identificando un caudal medio para el muestreo de 2,63 m <sup>3</sup> /S     |

③

M. Pineda Calle

WENIA R. CAJED

| CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
|---|----------|-----------------|-----------|-----------------|--------|------------------------|----------|------------------|---------|----------------|----------------|---------|----------|-----------|------------------------|------------------------------|
| DIRECCION TECNICA AMBIENTAL                       |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| OFICINA SISTEMA DE INFORMACION AMBIENTAL          |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| NOTAS DE AFORO                                    |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| ESTACION: RIO CALI - 20 RIB. DUTES                |          | HORA INI: 13:00 |           | HORA FIN: 19:20 |        | INST. MARCA: ACH       |          | CAUDAL: 2.9940   |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| FECHA: 13 de abril 2015                           |          | M. PPAL. INI:   |           | M. PPAL. FIN:   |        | NÚMERO: 912616         |          | ÁREA: 0.955      |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| AFORADORES: CAROLINA VERNISLO                     |          | M. AUX. INI:    |           | M. AUX. FIN:    |        | HÉLICE No.: 1-31804    |          | VELOCIDAD: 0.933 |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| MÉTODO: VADCO                                     |          | TEMP. INI:      |           | TEMP. FIN:      |        | ECUACION 1: 2.151.1026 |          | ECUACION 2:      |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| D.P.R. (m)  | A.A. (°) | A.S. (m)        | LS+c1 (m) | C1 (m)          | LS (m) | % Prof                 | P.A. (m) | REV. (seg)       | T (seg) | V.M.P. (m/seg) | V.M.V. (m/seg) | C.2 (m) | P.T. (m) | ANCHO (m) | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | CAUDAL (m <sup>3</sup> /seg) |
| 13.00   |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |
| 1.50  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.3250           |         | 0.659          |                | 0.20    |          |           | 0.160                  | 0.1102                       |
| 1.40  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.280            |         | 0.970          |                | 0.30    |          |           | 0.240                  | 0.2328                       |
| 2.40  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 2.30             |         | 1.261          |                | 0.18    |          |           | 0.144                  | 0.1701                       |
| 3.20  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.99             |         | 1.025          |                | 0.42    |          |           | 0.320                  | 0.3280                       |
| 4.00  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.77             |         | 0.915          |                | 0.50    |          |           | 0.400                  | 0.3660                       |
| 4.50  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.73             |         | 0.894          |                | 0.53    |          |           | 0.424                  | 0.3791                       |
| 5.00  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.25             |         | 0.654          |                | 0.59    |          |           | 0.472                  | 0.3087                       |
| 6.40  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.47             |         | 0.764          |                | 0.63    |          |           | 0.504                  | 0.3887                       |
| 7.20  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 1.99             |         | 1.025          |                | 0.60    |          |           | 0.480                  | 0.4425                       |
| 8.00  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 32               |         | 0.132          |                | 0.45    |          |           | 0.360                  | 0.2643                       |
| 9.40  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 31               |         | 0.182          |                | 0.40    |          |           | 0.320                  | 0.2500                       |
| 9.40  |          |                 |           |                 |        |                        |          | 05               |         | 0.307          |                | 0.35    |          |           | 0.280                  | 0.2965                       |
| 10.30   |          |                 |           |                 |        |                        |          |                  |         |                |                |         |          |           |                        |                              |

D.P.R. = Distancia Punto de Referencia - A.A. = Ángulo de Arrastre - A.S. = Altura de Suspensión - LS = Longitud Cable Sumergido - P.A. = Profundidad de Aforo - REV = Numero de revoluciones - T = Tiempo de Medición -  
V.M.P. = Velocidad Medida en el Punto - V.M.V. = Velocidad Media en la Vertical - P.T. = Profundidad Total - C2 = Corrección de Profundidad por ángulo de Arrastre

Notas de aforo realizado el 13 de abril del 2015

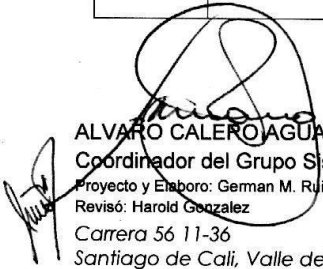
Santiago de Cali, 5 de Junio de 2015

Ingeniero  
YESID CARVAJAL ESCOBAR  
Director Grupo IREHISA  
Calle 13 No. 100 – 00 Edificio 344  
Cali

0650 - 21629 -02 - 2015

En respuesta a su solicitud escrita de fecha 23 de abril de 2015 de la universidad del valle grupo IREHISA, el grupo de Hidroclimatología desplazo una comisión al río Cali, en el Municipio de Cali, a realizar los aforos correspondientes de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

| FECHA    | SITIO  | CAUDAL M <sup>3</sup> /<br>Seg |
|----------|--|--------------------------------|
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 10:10 am | 3.0878                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 10:40 am | 3.0950                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 11:05 am | 2.755                          |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 11:20 am | 2.9939                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 11:45 am | 2.7503                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 12:10 pm | 2.9649                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 12:35 pm | 2.9730                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 1:00 pm  | 2.9940                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 1:25 pm  | 2.8129                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 1:50 pm  | 2.7058                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 2:15 pm  | 2.7750                         |
| Abril-15 | Rio Cali – 30 mts antes de bocatoma canal 10:40 am | 2.7980                         |



ALVARO CALERO AGUADO  
Coordinador del Grupo Sistema de Información Ambiental  
Proyecto y Elaboro: German M. Ruiz  
Revisó: Harold Gonzalez  
Carrera 56 11-36  
Santiago de Cali, Valle del Cauca  
PBX: 620 66 00 – 3181700  
Fax: 3396168  
[www.cvc.gov.co](http://www.cvc.gov.co)

Versión: 06

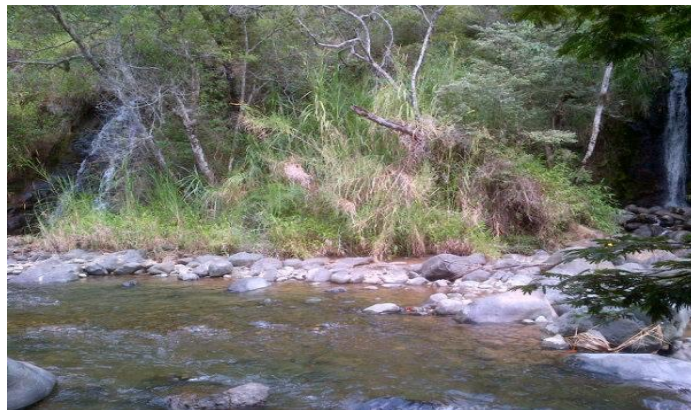




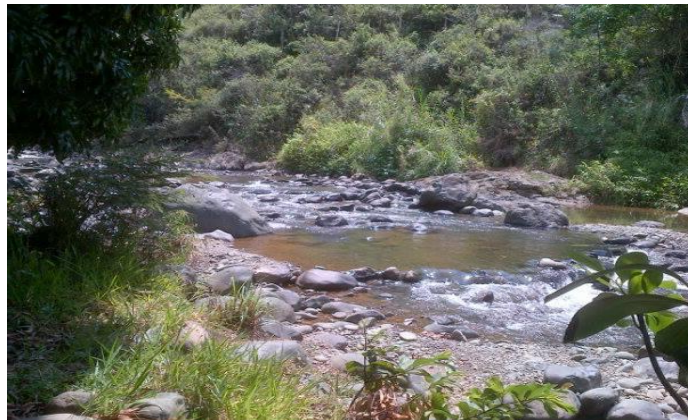
## Anexo E. Documento fotográfico



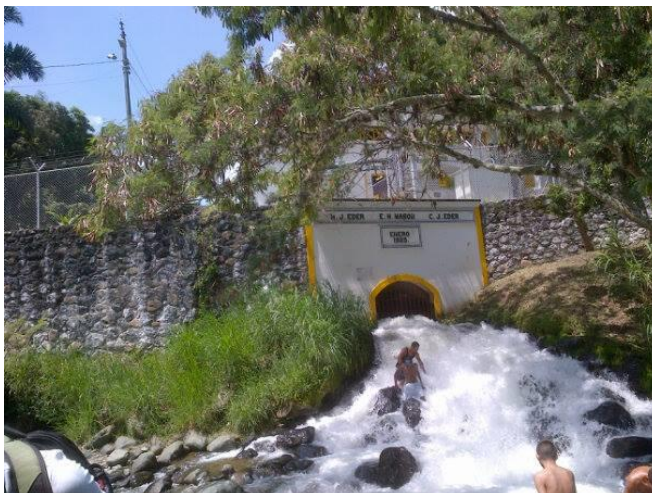
Salida de reconocimiento río Cali antes de planta 1.



Salida de reconocimiento río Cali



Salida de reconocimiento río Cali



Planta 1 salida de reconocimiento río Cali.



Vista de la cuenca desde Patio Bonito – Terrón Colorado



Vista da la cuenca zona media.

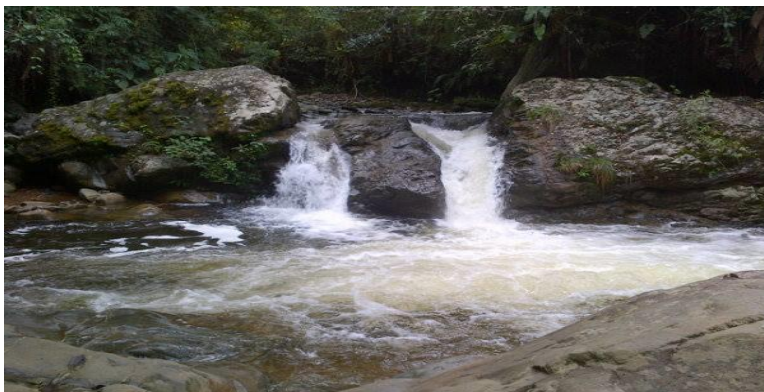




Bocatoma planta 2 río Cali



Bocatoma planta 2 la canal río Cali



Río Pichindé El jacuzzi.



Río Pichindé.

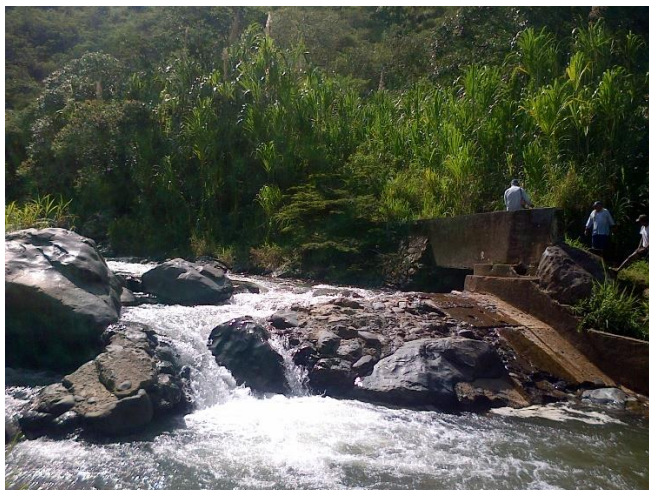


Panorámica ciudad de Cali



Aforo de reconocimiento antes Bocatoma planta 1.





Bocatoma planta 1 río Cali.



Caudal desviado para aprovechamiento Planta 1



La Canal zona colindante a patio Bonito río Cali.

