



El ambiente
es de todos

Minambiente

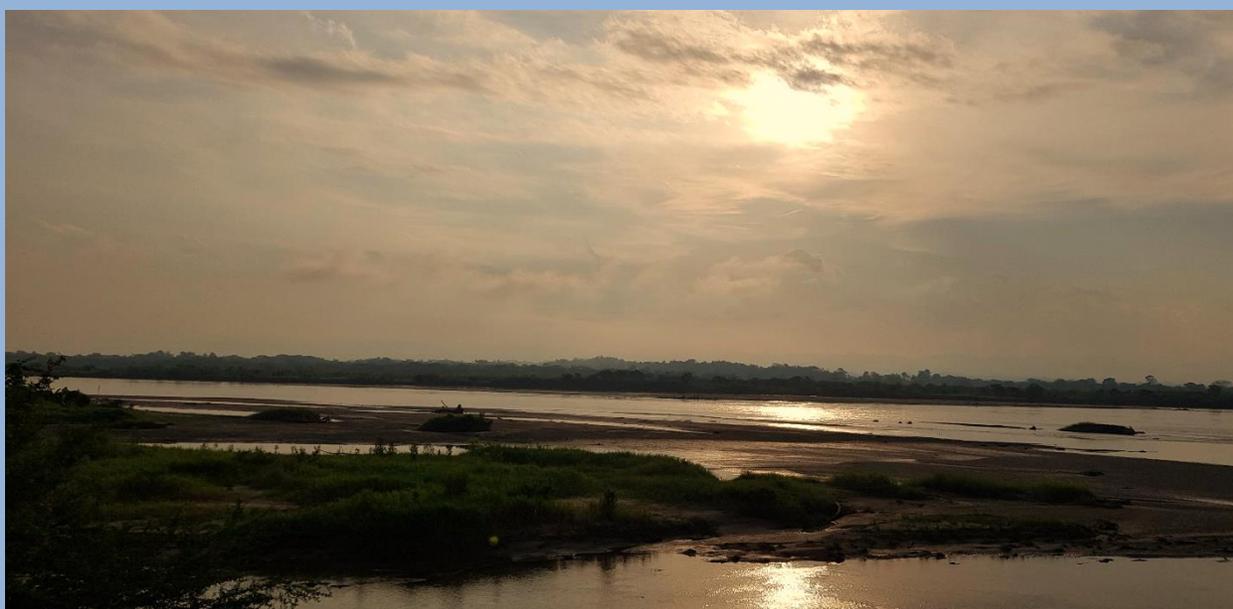


Foto: Río Magdalena - Puerto Triunfo (Antioquia) 15 de enero 2020

Caudal ambiental a nivel de piloto en Subzona y nivel subsiguiente las áreas de interés de Ecopetrol.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA
GRUPO DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA.
GRUPO MADELACIÓN HIDRLÓGICA.
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL.
AREA OPERATIVA No. 8

2021



Bogotá, D.C. Colombia - Sur América
Sede correspondencia
Calle 25 D No. 96 B - 70 Bogotá D.C. Código postal: 110911
PBX (571) 3527160 Fax Server: 3075621 - 3527160 Opc.2
Línea Nacional 018000110012 - Pronóstico y Alertas (571) 3527180
Sede Puente Aranda: Calle 12 No 42B - 44 Bogotá D.C. PBX. 2681070
• www.ideam.gov.co

Producto 5

Caudal ambiental a nivel de piloto en Subzona y nivel subsiguiente las áreas de interés de Ecopetrol.



	Versión	Nombre	Cargo	Fecha
Autor(es)	1.1	Julián David Rojo Hernández Diana María Agudelo Echavarría Nicolás Duque Gardeazábal	Contratistas IDEAM	30/06/2022
Revisó		Juan José Montoya Monsalve Fabio Andrés Bernal Quiroga	Contratista IDEAM – Líder técnico Coordinador grupo de modelación hidrológica-IDEAM	
Aprobó		Nelson Omar Vargas	Subdirector de Hidrología - IDEAM	



Tabla de Contenidos

1	Introducción	15
1.1	Área de estudio	19
2	Marco conceptual y revisión de las metodologías para la estimación de caudales ambientales	21
2.1	Caudal ambiental	21
2.1.1	Métodos de base hidrológica	23
2.1.2	Métodos de valoración hidráulica	24
2.1.3	Métodos holísticos	25
2.1.4	Métodos aplicados por la institucionalidad colombiana	27
2.2	Conceptos hidrobiológicos en la temática de caudal ambiental	28
2.2.1	Comunidades hidrobiológicas	29
2.2.2	Información hidrobiológica	32
3	Metodología de referencia para el cálculo del caudal ambiental en el área de interés IDEAM-ECOPETROL	33
3.1	Definición de las series hidrológicas de trabajo	33
3.1.1	Caracterización del régimen hidrológico natural	33
3.1.2	Identificación de alteración del régimen de flujo cuando existen series de tiempo	34
3.2	Caracterización del régimen natural de caudales	34
3.3	Métricas de interés ecológico	37
3.3.1	Estimación de métricas hidrológicas de interés ecológico	37
3.3.2	Estimación de métricas morfo-hidrológicas de interés ecológico	37
3.4	Eventos de interés ecológico del régimen hidrológico natural	39
3.5	Propuesta iterativa de aprovechamiento	40
3.6	Requerimientos de información desde la componente hidrológica para la aplicación de la metodología MADS-IDEAM -2018	42
3.7	Aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales	43
3.7.1	Información hidrobiológica de línea base	45
3.7.2	Índices ecológicos	47
3.7.3	El hábitad como base para el desarrollo de las comunidades bióticas: utilización de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH)	52

4	Aspectos de la aplicación de la metodología en el VMM	55
4.1	Priorización de los cuerpos hídricos y tramos para la aplicación de la metodología	55
4.1.1	Criterios para la priorización de tramos de interés	55
4.1.2	Corrientes objeto de priorización en la región del Valle del Magdalena Medio (VMM)	57
4.1.3	Criterios para la priorización de tramos de interés	58
4.2	Información hidrológica básica disponible para la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación del caudal ambiental	60
4.2.1	Información cartográfica disponible	60
4.2.2	Información hidrológica	60
4.2.3	Información hidráulica	61
4.2.4	Estudios e información adicional relevante	61
4.2.5	Idoneidad de la información disponible	62
4.3	Reporte de la campaña de campo sobre información hidrológica e hidráulica	64
4.3.1	Resultados de la campaña de campo para el río Sogamoso	65
4.3.2	Resultados de la campaña de campo para el río La Colorada	67
4.3.3	Resultados de la campaña de campo para la quebrada La Gómez	69
4.4	Aspectos de la aplicación del análisis hidrobiológico	71
4.5	Reporte del monitoreo de campo hidrobiológico	72
4.5.1	Clasificación taxonómica de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos	72
4.5.2	Clasificación taxonómica de la comunidad de algas perifíticas	74
4.6	Métricas de interés ecológico hidrobiológico	74
4.7	Aplicación de la metodología IDEAM - Estudios Nacionales del Agua	75
5	Resultados y análisis	77
5.1	Estimación de caudal ambiental sobre el río Sogamoso en el tramo de interés	77
5.1.1	Definición de la serie hidrológica de trabajo para el río Sogamoso	77
5.1.2	Caracterización del régimen de caudal del río Sogamoso en el tramo de interés	81
5.1.3	Métrica de interés ecológico para el río Sogamoso	83

5.1.4	Eventos de interés ecológico para el régimen hidrológico natural del río Sogamoso en el tramo de Interés	87
5.1.5	Propuesta de aprovechamiento máximo de caudales para el río Sogamoso en el tramo de interés	89
5.1.6	Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés	92
5.2	Estimación de caudal ambiental sobre el río La Colorada en el tramo de interés	96
5.2.1	Definición de la serie hidrológica de trabajo para el río La colorada en el tramo de interés	96
5.2.2	Caracterización del régimen de caudales del río La colorada en el tramo de interés	98
5.2.3	Métricas de interés ecológico para el río La colorada en el tramo de interés	100
5.2.4	Eventos del régimen hidrológico natural para el río La Colorada en el tramo de interés y propuesta máxima de aprovechamiento	103
5.2.5	Caudal ambiental para el río La Colorada	105
5.3	Estimación de caudal ambiental sobre la quebrada La Gómez	108
5.3.1	Definición de la serie hidrológica de trabajo para la quebrada La Gómez en el tramo de interés	108
5.3.2	Caracterización del régimen de caudales para la quebrada La Gómez en el tramo de interés	108
5.3.3	Métricas de interés ecológico para la quebrada La Gómez en el tramo de interés	110
5.3.4	Eventos del régimen hidrológico natural para la quebrada La Gómez en el tramo de interés y propuesta de máximo aprovechamiento	111
5.3.5	Caudal ambiental para la quebrada La Gómez	113
5.4	Línea base hidrobiológica. Campaña de monitoreo	114
5.4.1	Macroinvertebrados acuáticos	114
5.4.2	Algas Perifíticas	124
5.5	Índices ecológicos	130

5.5.1	Índices Macroinvertebrados acuáticos	130
5.5.2	Índices Algas Perifíticas	135
5.6	Índices de integridad de hábitat (IIH)	136
5.7	Estimación del caudal ambiental en unidades de análisis mediante metodología IDEAM - ENAs	142
6	Conclusiones y recomendaciones	146
6.1	Requerimientos de información adicional para mejorar la estimación del caudal ambiental en los tramos priorizados	146
6.1.1	Requerimientos de información adicional para el desarrollo de modelos de calidad del agua en los tres tramos priorizados	147
6.1.2	Requerimientos de información adicional para el desarrollo de modelos hidráulicos sobre la quebrada La Gómez y el río La Colorada	150
6.1.3	Costos aproximados para complementar el cálculo por tramos	153
6.2	Conclusiones desde la hidrología	153
6.3	Conclusiones desde la hidrobiología	155
7	Referencias	157

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en ríos de Colombia (MinAmbiente y ANLA, 2013)	44
Tabla 3.2 Comunidades hidrobiológicas y algunos rasgos biológicos tenidos en cuenta para su análisis frente a alteración del flujo (MinAmbiente y IDEAM, 2019)	47
Tabla 3.3 Variables hidrobiológicas sugeridas para análisis en sitios de monitoreo (MinAmbiente y IDEAM, 2019)	47
Tabla 3.4 Puntuación dada para las diferentes familias de macroinvertebrados acuáticos en el índice BMWP/Colombia. fuente (Roldán, 2003).....	49
Tabla 3.5 Clase, calidad, valores, significado del BMWP (Fuente: Roldán, 2003).....	50
Tabla 3.6 Valores de las categorías de las variables para calcular el Índice de Integridad Biótica	52
Tabla 3.7 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).	53
Tabla 3.8 Variables físicas y químicas y sus puntajes, utilizadas en la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).....	53
Tabla 3.9 Puntajes del IIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).....	54
Tabla 4.1 Priorización de as fuentes hídricas objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental	59
Tabla 4.2 Resumen sobre la calidad de la información para la aplicación completa de la metodología de caudales ambientales	63
Tabla 4.3 Códigos asignados a las 6 estaciones de muestreo correspondientes a una campaña de colecta de muestras.....	74
Tabla 5.1 Estaciones hidrológicas de interés para la simulación del río Sogamoso	77

Tabla 5.2 Estaciones hidrológicas de interés para la simulación del río Sogamoso	78
Tabla 5.3 Resultados del análisis de homogeneidad estación Puente Sogamoso	80
Tabla 5.4 Caudales característicos (m ³ /s) del régimen hidrológico del río Sogamoso	82
Tabla 5.5 Resultados del análisis de homogeneidad estación Puente Sogamoso	86
Tabla 5.6 Estimación de los caudales máximos para el río Sogamoso estación Puente Sogamoso por análisis de frecuencias.....	86
Tabla 5.7 Estimación de los caudales mínimos para el río Sogamoso estación Puente Sogamoso por análisis de frecuencias.....	87
Tabla 5.8 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q \geq Q_B$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.	88
Tabla 5.9 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q \geq Q_{MAX15}$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.	89
Tabla 5.10 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q \leq Q_{MIN10}$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.	89
Tabla 5.11 Fracción de caudal aprovechable con respecto al caudal medio mensual multianual río Sogamos en el tramo de Interés.....	90
Tabla 5.12 Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés (m ³ /s).....	93
Tabla 5.13 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones húmedas	94
Tabla 5.14 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Normales	94
Tabla 5.15 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Secas.....	95
Tabla 5.16 Estación hidrológica de interés para el río La Colorada	96
Tabla 5.17 Datos faltantes de la serie hidrológica de interés para el río La Colorada	97
Tabla 5.18 Resultados del análisis de homogeneidad río La Colorada, estación AYACUCHO...	98

Tabla 5.19 Caudales característicos del río La Colorada, estación AYACUCHO	100
Tabla 5.20 Estimación de los caudales máximos para el río La Colorada –Estación Ayacucho.	102
Tabla 5.21 Estimación de los caudales máximos para el río La Colorada –Estación Ayacucho.	102
Tabla 5.22 fracción del caudal aprovechable con respecto del caudal medio mensual multianual.	103
Tabla 5.23 Caudales ambientales para el río La Colorada en el tramo de interés (m ³ /s).....	105
Tabla 5.24 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones húmedas	106
Tabla 5.25 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones Normales	107
Tabla 5.26 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Secas.....	107
Tabla 5.27 Caudales característicos la quebrada La Gómez.....	110
Tabla 5.28 Fracción del caudal aprovechable con respecto del caudal medio mensual multianual.	111
Tabla 5.29 Caudal ambiental para la quebrada La Gómez (m ³ /s).....	113
Tabla 5.30 Listado taxonómico de macroinvertebrados béticos identificados en las 6 estaciones durante la campaña de muestreo	114
Tabla 5.31 Registro cuantitativo de la densidad de macroinvertebrados béticos por unidad de área en las 6 estaciones monitoreadas durante la campaña.....	121
Tabla 5.32 Listado de algas perifíticas identificadas	124
Tabla 5.33 Registro cuantitativo de la densidad de algas perifíticas por unidad de área (Org/cm ²)	126
Tabla 5.34 Resultados de los índices de diversidad, equidad y dominancia para cada una de las estaciones de muestreo	130

Tabla 5.35 Resultados del índice BMWP registrado en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo. Los códigos de las estaciones corresponden se encuentran definidos en la metodología	131
Tabla 5.36 Composición taxonómica de macroinvertebrados acuáticos para la campaña de muestreo septiembre 2021	132
Tabla 5.37 Valores de las variables para cada sitio de muestreo	134
Tabla 5.38 Valores de las categorías de VRA e IIBMA para cada sitio de muestreo.....	134
Tabla 5.39 Variables requeridas para el cálculo de las métricas de interés ecológico del Río Sogamoso	136
Tabla 5.40 Variables requeridas para el cálculo de las métricas de interés ecológico del Río La Colorada	137
Tabla 5.41 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) del Río Sogamoso.....	138
Tabla 5.42 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) del Río La Colorada	139
Tabla 5.43 Variables de calidad de agua. Resultado de las campañas de monitoreo de calidad en el marco del acuerdo de cooperación ECOPETROL - IDEAM	140
Tabla 5.44 Índice de integridad de hábitat (aproximado) para los ríos Sogamoso y La Colorada	140
Tabla 5.45 Valores del caudal ambiental para cada unidad de análisis de nivel subsiguiente en el VMM.....	143

Índice de Figuras

Figura 1.1 Localización del área de interés.....	20
Figura 2.1 Esquematación del levantamiento integrado de información hidrométrica, fisicoquímica e hidrobiológica en inmediaciones de sitios de monitoreo establecidos (Minambiente-CORNARE, 2015)	32

Figura 3.1 Categorización de caudales medios diarios en las condiciones hidrológicas normal, seca y húmeda (en este caso Neutral, El Niño, y La Niña). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015 .35

Figura 3.2 Media de los caudales mínimos anuales para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal,húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....36

Figura 3.3 Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica (seca,normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.36

Figura 3.4 Esquematación de la información hidrométrica disponible. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....39

Figura 3.5 Esquematación de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.39

Figura 3.6 Visualización de serie de tiempo de caudales y métricas definidas por los componentes ambientales del régimen Q_t - Q y Q_B , $Q_{maxTr}=15$ y $Q_{minTr}=10$. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.....40

Figura 3.7 Caudal de aprovechamiento mensual como un porcentaje P del caudal medio mensual. Fuente: Minambiente-CORNARE, 201540

Figura 3.8 Caudales ambientales y aprovechables para condición hidrológica seca en un punto de la red de drenaje41

Figura 3.9 Diagrama de flujo de la aplicación de la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá.43

Figura 3.10 Distribución hipotética de una especie en función del caudal46

Figura 4.1 Sección transversal de la estación puente Sogamoso (2406702).....66

Figura 4.2 Localización vista general de la estación puente Sogamoso (2406702).....66

Figura 4.3 Ficha de campo de la estación puente Sogamoso (2406702)67

Figura 4.4 Sección transversal de la estación Ayacucho (2314704).....68

Figura 4.5 Localización vista general de la estación Ayacucho (2314704).....68

Figura 4.6 Ficha de campo de la estación Ayacucho (2314704)69

Figura 4.7 Localización vista general de la quebrada La Gómez en el sitio de interés70

Figura 4.8 Ficha de campo de la quebrada La Gómez en el sitio de interés	70
Figura 4.9 Esquema metodológico para el análisis de comunidades hidrobiológicas	71
Figura 4.10 Sitios de muestreo hidrobiológico	72
Figura 4.11 Almacenamiento de muestras.	73
Figura 4.12 Extracción de ninfas de los paquetes de muestras.	73
Figura 4.13 Esquema de cálculo y categorización del IRH y del caudal ambiental. Tomado de: IDEAM (2019)	75
Figura 4.14 Procedimiento para la determinación del caudal ambiental. Tomado de: IDEAM (2013)	76
Figura 5.1 Reconstrucción de los datos faltantes del río Sogamoso estación Puente Sogamoso usándolos datos de la estación Tablazo El.	78
Figura 5.2 Análisis de homogeneidad caudales medios mensuales río Sogamoso estación Puente Sogamoso.	80
Figura 5.3 Caracterización del régimen de caudales del río Sogamoso usando el ENSO.	81
Figura 5.4 Régimen característico de los caudales del río Sogamoso en la estación Puente Sogamoso.	82
Figura 5.5 Batimetría del río Sogamoso en el tramo de interés.	83
Figura 5.6 Tamaño promedio del material del lecho en el tramo priorizado para el río Sogamoso	83
Figura 5.7 Estimación del caudal de conectividad longitudinal para el río Sogamoso.....	84
Figura 5.8 Comparación entre los caudales medios mensuales y los caudales aprovechables para el río Sogamoso en el tramo de interés.	90
Figura 5.9 Comparación de los eventos de interés ecológico para el río Sogamoso en el tramo de interés antes y después del aprovechamiento máximo.....	91
Figura 5.10 Régimen hidrológico para el río Sogamoso en el tramo de Interés antes y después del aprovechamiento máximo.	92

Figura 5.11 Caudales ambientales y máximos aprovechables por condición hidrológica para el río Sogamoso en el sitio de interés.	93
Figura 5.12 Comparación de los caudales ambientales del río Sogamoso en el sitio de interés con otras metodologías aplicadas en la gestión del recurso hídrico en Colombia.	96
Figura 5.13 Análisis de homogeneidad para los caudales medios mensuales del río La Colorada en la estación AYACUCHO.	97
Figura 5.14 Caracterización del régimen de caudales del río La Colorada usando el ENSO.	99
Figura 5.15 Régimen característico de los caudales del río La Colorada	99
Figura 5.16 Secciones transversales levantadas para el río La Colorada en el tramo de interés.	100
Figura 5.17 Eventos de interés ecológico para la quebrada La Colorada en el tramo de interés.	104
Figura 5.18 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado.	105
Figura 5.19 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado.	106
Figura 5.20 Caracterización del régimen de caudales del río La Colorada usando el ENSO.	109
Figura 5.21 Régimen característico de los caudales de la quebrada la Gómez.....	110
Figura 5.22 Eventos de interés ecológico para la quebrada La Gómez en el tramo de interés	112
Figura 5.23 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado.	112
Figura 5.24 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado.	114
Figura 5.25 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R, QGP2R, PS, RCP1O.....	117
Figura 5.26 Perfil porcentual del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R, QGP2R, PS, RCP1O.	117

Figura 5.27 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R Y QGP2R..... 119

Figura 5.28 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en la estación Puente Sogamoso..... 119

Figura 5.29 Restos de desechos inorgánicos (restos plásticos) encontrados en las dos muestras de la estación Puente Sogamoso. 120

Figura 5.30 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en la estación Río La Colorada, P1, Orilla (RCP1O) 121

Figura 5.31 Distribución espacial de los morfotipos de macroinvertebrados bénticos en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo 123

Figura 5.32 Densidad Total de organismos (este valor corresponde al total de organismos colectados por género en cada estación) y Número de morfotipos de macroinvertebrados bénticos (# de géneros diferentes) en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo 124

Figura 5.33 Perfil porcentual del total de la abundancia de las algas perifíticas encontradas en las seis estaciones 126

Figura 5.34 Distribución espacial de los morfotipos de algas perifíticas registrados en las 6 estaciones 128

Figura 5.35 Densidad Total (Org/cm²) y Número de morfotipos de algas perifíticas en las 6 estaciones 129

Figura 5.36 Índices de diversidad de Shanon (H'), equidad de Pielou (J') y dominancia de Simpson (D) registrados en las en las 6 estaciones 135

Figura 5.37 Caudal ambiental por metodología IDEAM-ENAs para año normal..... 142

Figura 5.38 Caudal ambiental por metodología IDEAM-ENAs para año seco 143

1 Introducción

El esquema tradicional de concesiones (o derechos) de agua en cuerpos lóticos (río, arroyos o manantiales) supone la extracción del recurso hídrico para satisfacer los diferentes usos asociados con el desarrollo humano. Durante las últimas décadas ha surgido la necesidad de mantener en el cauce natural una cantidad de agua que asegure la conservación de los ecosistemas, dicha cantidad de agua ha sido conocida internacionalmente como caudal ecológico o caudal ambiental (en inglés e-flows). Más concretamente los caudales ambientales corresponden a una métrica que describe la cantidad, la duración, la frecuencia, el momento y calidad de los caudales necesarios para sustentar los ecosistemas de agua dulce y los medios de vida y el bienestar social que dependen de estos ecosistemas. En algunos contextos, los caudales ambientales también pueden proponerse para sustentar las necesidades paisajísticas, culturales y espirituales cuando las mismas adquieren especial relevancia y o valor.

Si bien la definición anterior puede tener diferentes matices según la legislación local, resulta relevante resaltar que, a través de la implementación de caudales ambientales, quienes administran el recurso hídrico se esfuerzan por lograr un régimen o patrón de caudal que permita proveer agua de manera sostenible para satisfacer al máximo los diferentes usos a lo largo de la red de drenaje manteniendo los procesos esenciales necesarios para garantizar ecosistemas fluviales saludables.

De acuerdo con la definición de caudal ambiental incorporada en el Decreto 1076 de 2015 modificado por el Decreto 050 de 2018, en la cual este se reconoce como el “*Volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos*”. Además, en el marco del desarrollo de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH (MAVDT, 2010), se establece al caudal ambiental como una herramienta fundamental para la toma de decisiones frente a los usos del agua y la conservación de ecosistemas acuáticos y sus ecotonos (Magdaleno, 2018), puesto que es necesario entender que estos ecosistemas requieren un régimen de flujo variable, más allá de un valor mínimo, para mantener unos límites de sostenibilidad en su aprovechamiento (Richter, 2010).

No es un secreto que la explotación (o sobreexplotación) del recurso hídrico a nivel mundial ha tenido como principal consecuencia una reducción significativa de la biodiversidad y de los sistemas acuáticos de agua dulce, incluyendo los servicios ecosistémicos que dichos cuerpos de

agua proveen al ser humano (WWF, 2010). Los ríos poseen funciones muy complejas y por ende bastante frágiles, razones por las cuales normalmente son de difícil conservación a largo plazo, no obstante, en el otro lado de la balanza se encuentran los objetivos de desarrollo social y económico, englobados dentro de los usos del agua, los cuales normalmente incluyen el consumo agrícola, la hidro-energía, el uso humano y doméstico, pecuario, industrial, minero, institucional, recreacional, navegación fluvial, etc. En todos los casos se pone en juego la cantidad del agua, su capacidad de dilución de contaminantes, y el sostenimiento de los ecosistemas existentes.

Desde principios del siglo XX hasta la década de 1960, la gestión del recurso hídrico en los países desarrollados se centró principalmente en maximizar la protección contra inundaciones, el suministro de agua y la generación de energía hidroeléctrica. Durante la década de 1970, los efectos ecológicos y económicos de estos proyectos llevaron a los científicos a buscar formas de modificar las operaciones de las presas para mantener ciertas especies de peces. El enfoque inicial fue determinar el caudal mínimo necesario para preservar una especie individual, como la trucha, en un río. Los caudales ambientales evolucionaron a partir de este concepto de "caudales mínimos" y, más tarde, "caudales internos", que enfatizaba la necesidad de mantener el agua dentro de las vías fluviales. Poco a poco se fueron integrando criterios hidráulicos a la estimación de caudales ambientales, bajo el supuesto de que variables como la lámina de agua, la velocidad del flujo, los esfuerzos cortantes y el sustrato definen las condiciones de hábitat que pueden tolerar cierta alteración antes de representar una pérdida en las condiciones eco-sistémicas.

La inclusión de nuevos parámetros asociados a la hidro-biología, como la inclusión de áreas de desove, la construcción de las curvas de preferencia, y la incorporación de servicios eco-sistémicos dentro de las métricas de cálculo han permitido reconocer la calidad del agua y otros componentes como parte fundamental del proceso de estimación del caudal ambiental. Finalmente, parece claro suponer que las mejores metodologías son aquellas que exponen una visión interdisciplinaria, que consideran el cuerpo de agua como un todo, donde convergen múltiples aspectos interrelacionados, los cuales deben considerarse en su conjunto para dar una respuesta global. Esta aproximación recibe el nombre de método holístico, y, para el caso de la estimación del caudal ambiental, incluye aquellas metodologías donde se analiza de forma conjunta la hidrología, la hidráulica, la calidad del agua y la hidrobiología. A la fecha existen más de 200 metodologías para estimar los caudales ambientales, esto es muestra de la enorme incertidumbre en el proceso de estimación.

Es claro que el régimen natural de flujo puede condicionar características fisicoquímicas como la temperatura, geomorfología del cauce y diversidad de hábitats (Poff et al., 1997). Por lo que es de esperar que este limite la distribución y abundancia de especies y regule la integridad ecológica en los sistemas fluviales, y por tanto las comunidades biológicas puedan responder a los cambios establecidos en dicho régimen.

Considerando lo anterior, el caudal ambiental en el contexto de la PNGIRH permite orientar los límites de sostenibilidad para el aprovechamiento del recurso hídrico a escala regional. Esta incorporado en la estimación de la oferta hídrica disponible en el marco de instrumentos de planificación como los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA y los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico – PORH. Así como en instrumentos de administración como las reglamentaciones del uso de las aguas y los permisos de concesión de aguas de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015.

En Colombia, la institucionalidad del país ha incorporado el tema de caudal ambiental (o ecológico) desde múltiples visiones que han evolucionado a lo largo de los años. Por ejemplo, desde el año 2000, los caudales ecológicos solo representaban valores constates o porcentajes de descuento dentro de los cálculos de disponibilidad hídrica. Sin embargo, desde el ENA 2010 se han propuesto técnicas de caudales ambientales variables considerando los regímenes hidrológicos, y a partir del año 2013, desde el IDEAM y el MADS se estudiaron técnicas holísticas que integran la cantidad, la calidad y los ecosistemas, en particular para los proyectos sujetos de licenciamiento ambiental.

Los resultados preliminares de estas propuestas metodologías fueron posteriormente retomados en conjunto con la Universidad Nacional en el 2017, para presentar un nuevo esquema de estimación de los caudales ambientales en Colombia. La guía metodológica fue aplicada a manera de ejemplo sobre algunas cuencas en jurisdicción de CORNARE, y posteriormente sobre la cuenca del río Bogotá. Esta guía posee un amplio proceso de difusión que ha incluido a diversos sectores, y además sus resultados son objeto de revisión permanente. Muchas de las observaciones surgidas se centran en la complejidad de procedimiento holístico, así como en los grandes requerimientos de información y presupuesto para su aplicación. Además, existen escenarios a nivel nacional, relacionados con la cuantificación de la tasa por uso del agua, u otros instrumentos asociados a la gestión integral del recurso hídrico, donde las discusiones alrededor de la disponibilidad hídrica a veces implican mayor simplicidad.

La metodología desarrollada por el MADS-IDEAM, como está propuesta, es aplicable *únicamente* a tramos de ríos donde se presume habrá una afectación por extracción. Alrededor de dicho tramo se deben considerar las características hidrológicas, geomorfológicas, hidráulicas, hidrobiológicas y de calidad, que permitan elaborar una propuesta de aprovechamiento, sin alterar el régimen natural, preservando al máximo los servicios ecosistémicos. Esto es fundamental, porque el inicio de la aplicación de la metodología propuesta por MADS-IDEAM en el 2017 parte del supuesto de aplicación en un tramo de interés.

Es importante tener en consideración que no hay una normatividad vigente que defina el alcance para otras zonas diferentes al río Bogotá para esta metodología. Por tanto, al ser este un proceso en construcción este documento es un aporte a la definición que se debe hacer a nivel normativo para aplicaciones de este componente en otras regiones del país. Asimismo, el documento compara los resultados contra los de otras metodologías y con esas otras hace una estimación del caudal para las unidades de nivel subsiguiente definidas para la presentación de resultados.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y ECOPETROL firmaron el acuerdo de cooperación AC No. 4 3034153 de 2020 con objeto “Actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad de agua superficial del Valle Medio del Magdalena – VMM” bajo el Convenio Marco No. 52112957 cuyo objeto es “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para el intercambio de conocimiento científico e información, y el desarrollo de productos y servicios que contribuyan al cumplimiento de las funciones, objetivos e intereses de las partes”, suscrito por ECOPETROL y el IDEAM el 22 de enero de 2014 y con un plazo de diez (10) años, esto es hasta el 22 de enero de 2024.

Este documento se inscribe en la Actividad 2.3.2 del acuerdo “*Realizar la aplicación de la propuesta metodológica de Caudal Ambiental para las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo (incluido Tramo río Magdalena)*”. Esta actividad está asociada a las actividades del Grupo de Modelación y Pronóstico Hidrológico de la subdirección de Hidrología del IDEAM.

En particular el documento da respuesta a uno de los contenidos del Producto 5 “Caudal ambiental a nivel de piloto en Subzona y nivel subsiguiente las áreas de interés de Ecopetrol” y al Producto del numeral 2.3.2.1., denominado “Documento con los resultados de la aplicación de la metodología de caudal ambiental a nivel de piloto en Subzona y nivel subsiguiente, para las

subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo, incluyendo unidades hidrográficas priorizadas.”.

El documento se encuentra estructurado en siete capítulos, comenzando con la introducción. En el segundo capítulo se detalla el marco conceptual y el estado del arte de las metodologías para la estimación de caudales ambientales. El tercer capítulo expone la metodología utilizada para el cálculo del caudal ambiental en el área de interés IDEAM-ECOPETROL. El cuarto capítulo reporta la aplicación de la metodología en el Valle Medio del Magdalena. El quinto capítulo se centra en los resultados y análisis. En el sexto capítulo se reseñan las conclusiones y recomendaciones y el séptimo capítulo lista las referencias bibliográficas consultadas.

1.1 Área de estudio

Dentro de los alcances propuestos por el convenio se propone la Modelación del Comportamiento del Recurso Hídrico Superficial (Alcance 2.3) cuyo numeral 2.3.2. plantea la aplicación de la propuesta metodológica de Caudal Ambiental para las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo (incluido Tramo río Magdalena). Cuyo producto principal será la entrega de un documento con los resultados de la aplicación de la metodología de caudal ambiental a nivel de piloto en subzona y nivel subsiguiente, para las cuencas de los ríos Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo, incluyendo unidades hidrográficas priorizadas (ver Figura 1.1). Esto incluye un componente hidrobiológico que busca analizar la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos y algas perifíticas a los cambios asociados con la estimación del caudal ambiental, en lo referente a la cantidad y calidad del hábitat.

En el caso de las cuencas de los ríos Lebrija, Sogamoso y Opón y su relación con el área de influencia de ECOPETROL, se puede asumir que dichos ríos o alguno de sus afluentes, poseen tramos que se intersecan con el área de interés, y por tanto podrían ser sujetos de extracción del recurso. La pregunta a resolver es ¿Cuánta agua puede extraerse sin alterar los ecosistemas, garantizando los servicios ambientales en las fuentes que se encuentran al interior del área de influencia de ECOPETROL?

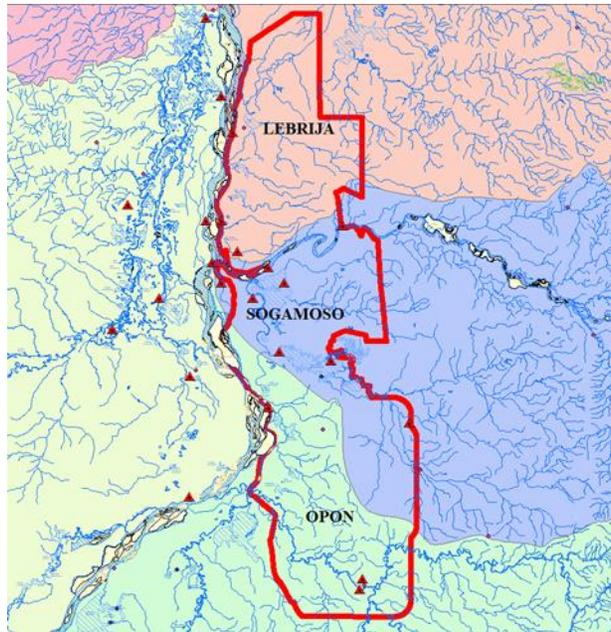


Figura 1.1 Localización del área de interés

Aun cuando la respuesta a esta pregunta es compleja, pueden existir aproximaciones tipo piloto, en tramos definidos al interior del área de interés, que demuestren (o no) la potencial aplicación de la metodología propuesta por el MADS-IDEAM en 2017 considerando las limitaciones de tiempo y de información existentes. En tal sentido, el análisis se ha reducido solo al cálculo de la propuesta de aprovechamiento de caudales considerando únicamente la componente hidrológica de la guía metodológica, cuya descripción paso a paso se presenta en este documento.

2 Marco conceptual y revisión de las metodologías para la estimación de caudales ambientales

2.1 Caudal ambiental

Existen múltiples definiciones del concepto de caudal ambiental donde, en general, todas se refieren a la idea del volumen y calidad de agua que se debe mantener en un río para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida de los organismos que lo habitan (Aguilera, 2012).

Inicialmente se consideraron dos términos: el caudal mínimo y el caudal interno necesario. Sin embargo, están poco vinculados con la idea de dinámica y funcionamiento ecológico, por lo que en la actualidad son menos usados, reemplazándose por los términos de caudal ambiental y caudal ecológico, muchas veces usados como sinónimos, aunque pueden reflejar una visión complementaria de los ecosistemas. El caudal ecológico se define como la cantidad y calidad de agua necesaria para mantener o restaurar la biodiversidad y un funcionamiento casi óptimo del ecosistema acuático (decreto 3930 de 2010). Para esto, se supone que el nivel de conservación o restauración puede ser alcanzado con un caudal menor que el caudal natural, asumiendo que la extracción de la parte del caudal que diferencia el caudal natural del caudal ecológico no tendrá consecuencias notables sobre el sistema. Este caudal ecológico debe ser considerado como una parte del caudal ambiental, el cual incluye todos los usos a realizarse en el río ya sean de servicios básicos, industriales, agrícolas, energéticos, turísticos, ecológicos, cultural, etc. Este concepto de caudal ambiental ha sido incluido en las normas legislativas de muchos países, pero el término es definido de manera muy general y su nivel de precisión en algunos casos no permite una aplicación concreta y directa.

Es así como, el caudal ambiental busca contestar a la pregunta, ¿en qué medida podemos modificar (reducir) el caudal de un río de su estado natural sin alterar de forma perjudicial su funcionamiento e integridad ecológica? En ríos regulados, el concepto se aplica para restaurar un «buen estado ecológico» y los servicios ambientales relacionados. Para calificar el estados e integridad ecológica de los ecosistemas se emplean distintos métodos, los cuales se basan en criterios e indicadores indirectos cualitativos o cuantitativos que dan cuenta del funcionamiento del río. A través de estos criterios e indicadores es posible estimar las variaciones de estado o valor por un rango de caudal y en algunos casos por diferentes periodos hidrológicos del río.

Estos criterios, en general, están basados en objetivos específicos relacionados a la futura condición deseada del ecosistema, como por ejemplo el mantenimiento o mejoramiento de los ecosistemas acuáticos, incluyendo la biota acuática y de ribera, la maximización de la producción comercial de peces, la conservación de especies en peligro, o la protección de valores culturales, recreacionales o científicos (Tharme, 2003).

Para efectos del presente estudio, se considera el caudal ambiental como el “volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos”, de acuerdo con la definición contemplada en el Decreto 1076 de 2015 (artículo 2.2.3.3.1.3). Esta definición fija un enfoque en el cual se condiciona el estado de los ecosistemas acuáticos y los beneficios que estos prestan a los seres humanos, y orienta unos límites de sostenibilidad para su aprovechamiento, de acuerdo con el régimen natural de flujo (Richter, 2010), preservando o restaurando los principales atributos de dicho régimen.

Por lo anterior, el régimen natural de flujo se ha asumido como la variable más importante, ya que representa el marco que influencia el cómo las especies pueden persistir y adaptarse a cambios hidrológicos naturales o producidos por los humanos (Poff et al., 1997). Sin embargo, debido a los múltiples factores ambientales (cambios de coberturas, crecimiento poblacional, aumento en la demanda de agua, etc.) es fundamental tratar de entender la respuesta de los sistemas ecológicos a las variaciones impuestas por el ambiente. En tal sentido, se reconoce que el caudal ambiental es un régimen de caudales o niveles con sus respectivos atributos ecológicamente relevantes, requeridos para soportar y/o regular los procesos físicos, químicos y biológicos que sostienen la biodiversidad y su prestación de servicios ecosistémicos desde un objetivo ambiental o condición ecológica que sea definida.

El régimen natural de flujo regula una serie de factores de los ecosistemas acuáticos como nutrientes, disponibilidad de oxígeno, sedimentos, temperatura, hábitat, entre otros, que son los encargados de disparar en los organismos los mecanismos de respuesta de adaptaciones fisiológicas, cambios morfológicos y de comportamiento (Leland, 2003; Franklin et al., 2008; Riis et al., 2008). Es por esto que, el análisis de la relación entre el régimen natural de flujo y evolución de los organismos es definitiva, ya que cualquier alteración antrópica implica cambios en el comportamiento y ciclo biológico de las especies, presentándose alteraciones como la llegada y

dispersión de especies introducidas o invasoras, reducción o pérdida de biodiversidad y cambios en los servicios ecosistémicos relacionados con el aprovisionamiento y valores culturales (e.g. la pesca, asociada a la seguridad alimentaria) (Lytle y Poff, 2004).

2.1.1 Métodos de base hidrológica

Es el grupo más simple de metodologías para estimar los caudales ambientales. Utilizan los registros históricos de caudal: datos diarios, mensuales, medias, etc. para derivar directamente de ellos las recomendaciones de caudales de mantenimiento. Fueron desarrolladas principalmente en Estados Unidos durante los setenta y los ochenta y nacieron con el objetivo principal de garantizar la “conservación de especies de importancia económica y en los ríos de tipo permanente con variación hidrológica estacional escasa” (Lis et al., 2007).

Se asume que el desempeño de los ecosistemas está adaptado a las “variaciones naturales del régimen hídrico de una corriente y a sus tendencias históricas, y que, por lo tanto, el estudio hidrológico de series de caudales ayuda en la recomendación de un régimen de caudales ambientales” (Rodríguez, 2008). A continuación, se presenta una selección de algunas de las metodologías hidrológicas más reportadas en la literatura latinoamericana.

Métodos basados en porcentajes fijos o valores promedio del ciclo anual:

- Determinar un porcentaje fijo de los aportes naturales de la cuenca vertiente al tramo considerado. Aun cuando se desconocen las bases científicas de esta propuesta, fue una de las primeras aproximaciones en la obtención de caudales ecológicos.
- Determinar un porcentaje fijo de aportes, considerando el ciclo anual: En el caso colombiano, la resolución 865 de 2004 recomienda como caudal ambiental un porcentaje de descuento equivalente al 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la fuente.
- Método del caudal medio base United States Fish & Wildlife Service, 1981: Para series con registros de más de 25 años, el caudal ecológico se define como la mediana de los caudales medios mensuales para el mes más seco (Consuegra, 2013).
- Ley Vasca: La Dirección general de obras públicas el país Vasco en 1980 estimó un caudal de circulación permanente para los cauces regulados consistente en el 10% del caudal medio anual (Consuegra, 2013).

Métodos basados en la curva de duración de caudales:

- Teniendo en cuenta si los regímenes son torrenciales o si las fluctuaciones son poco pronunciadas, se diseñan caudales mínimos con base en la Curva de Duración de Caudales diarios, a partir de una serie larga de caudales históricos. En el caso colombiano, el Estudio Nacional del Agua (ENA) del

año 2000 propuso el Q97.5. El proyecto de Ley del Agua de 2005 de Colombia (ley 365 de 2005) sugirió el Q95.

- Método de Hoppe Estados Unidos de América: Asume que los caudales para lavado corresponden al Q17, para el desove al Q40 y para conservar el refugio el Q80.
- Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP, 1974) Estados Unidos de América: Qe determinado a nivel mensual, para condiciones hidrológicas normales y para ríos con especies salmónidas, determinado a partir de las Curvas de Duración de Caudales (CDC) medios diarios para el mes analizado, considerando para meses secos el Qe como el Q90 y para los meses húmedos el Q50 (Consuegra, 2013).
- Método Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010: Considerando la curva de duración de caudales, se estima el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) como el volumen por debajo del caudal medio, dividido por el volumen por debajo de la curva de duración. Cuando el IRH es superior a 0.7 el caudal ambiental a adoptar es el Q85, si el IRH está por debajo de 0.7 el caudal a adoptar es Q75. Los cálculos deben determinarse a nivel mensual.
- La FAO ha sugerido como caudal ecológico un Q91 o aporte medio diario o superado por 335 días en un año. En Francia se emplea el siguiente criterio:

$$\text{Periodo de estiaje: } Q_e = 0.7 \cdot Q_{90}$$

$$\text{Periodo invernal: } Q_e = 1.3 \cdot Q_{90}$$

Métodos basados en caudales mínimos:

- Determinación de la medida de los caudales mínimos registrados durante una serie de años. No tiene en cuenta las necesidades de las poblaciones del río, ya que la fauna fluvial está adaptada a vivir con esos caudales mínimos, pero durante pocos periodos de tiempo, y no permanentemente o más o menos duradera.
- Método 7Q10 (Chiang & Jhonson, 1976) Estados Unidos de América: determina a partir del cálculo del caudal mínimo promedio con duración de 7 días y período de retorno de 10 años. Esta metodología proporciona el valor de un caudal mínimo estadístico, que corresponde al valor que, en promedio de cada diez años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivas.

Es importante resaltar que los caudales mínimos son susceptibles de regionalización, esto es, que pueden estimarse ciertos parámetros y características medias a lo largo de la red de drenaje para estimar el caudal mínimo (y por tanto el caudal ambiental) en cualquier punto de la cuenca.

2.1.2 Métodos de valoración hidráulica

Mediante estas metodologías se busca analizar la variación de diferentes parámetros hidráulicos en secciones transversales identificadas como críticas y limitantes de la capacidad biogénica del tramo

fluvial. Estas metodologías tienen como objetivo principal establecer relaciones entre el caudal y alguna característica o parámetro del cauce. Por lo general los factores que se evalúan durante períodos de tiempo son los siguientes: perímetro mojado, velocidad y profundidad máxima (Castro & Carvajal, 2009).

- Método del perímetro mojado: Relaciona el hábitat con el caudal. En 1976, White, desarrolló en los Estados Unidos este método, en el cual se comparan los caudales circulantes con sus correspondientes perímetros mojados. Para su estimación se toma la sección transversal y la curva de caudales correspondientes. Se grafican el perímetro mojado y su caudal ecológico, considerando el punto de cambio más notorio, de tal manera que al mayor perímetro mojado corresponda la mayor capacidad biogénica del río.
- Método de múltiples transeptos: Proviene de estudios empíricos en los cuales se determina el cambio de hábitat asociados a los cambios en el caudal en múltiples secciones transversales. Para aplicar este método se requiere ubicar una serie de transeptos donde se mide profundidad, velocidad, sustrato y cobertura en diferentes condiciones de caudal, de tal forma que los cambios de dichas variables con el caudal puedan ser determinados (Arthington & Zalucki, 1998a). Si los requerimientos de algunas de estas variables son conocidas para ciertas especies acuáticas, el cambio de hábitat a diferentes descargas puede ser determinado.
- Método del micro-hábitat: Para poder utilizar este método es necesario desarrollar algunas curvas de preferencia para distintas especies que habitan los ríos y sus correspondientes estadios. Estas curvas de preferencia de hábitat relacionan cada especie y estadio con parámetros del río tales como profundidad, velocidad, sustrato y cobertura. En Colombia, son pocas las curvas de este tipo que se han desarrollado, lo que dificulta la aplicación del método.

2.1.3 Métodos holísticos

Metodología del área potencial útil o caudales progresivos “IFIM” (Instream Flow Incremental Methodology)

La metodología IFIM la cual es de caudales progresivos ha sido desarrollada por un conjunto de organizaciones de los Estados Unidos de Norteamérica, con el objeto de enfrentar la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua de sistemas fluviales (Stalnaker (1979) y Bovee (1982). El cual está basado en las relaciones cuantitativas (obtenidas por simulación) entre los caudales que circulan y los parámetros físicos e hidráulicos que determinan el hábitat biológico.

La metodología requiere de mediciones en terreno y una modelación computacional, permite cuantificar cambios en la cantidad y calidad del hábitat disponible en función de incrementos o disminuciones de caudal. Al respecto, IFIM, permite cuantificar los cambios en el hábitat, a través de la evaluación de modificaciones en las variables físicas del río, asumiendo que existe una

relación directa entre el caudal y la disponibilidad y calidad del hábitat acuático (HABITAT» C (caudal). De esta manera, los efectos de cualquier cambio en el caudal del río, pueden ser representados en términos de alteraciones en la calidad del hábitat potencial.

La metodología IFIM comienza con un análisis en cascada, es decir, desde un análisis de las características de la cuenca (macro) a las características de una fracción de un segmento de río (micro). Al respecto, ha sido diseñada para considerar de manera secuencial cada tema relacionado con el río, forzando una decisión sobre la variable del recurso que está siendo manejada.

La metodología IFIM tiene como objetivo evaluar los efectos del cambio del caudal sobre determinado hábitat; por esta razón, simula las condiciones hidráulicas del micro hábitat por medio de un modelo computacional conocido como PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model), el cual calcula la profundidad del agua, velocidad y demás características del cauce que podrían verse afectadas. Este modelo fue diseñado para ser aplicado en el hábitat de los peces, por lo que requiere de mucha información para poder ser aplicado (Tharme, 1996). Al aplicar esta metodología también se toma en cuenta la afectación que puede haber sobre el microhábitat estudiando la calidad del agua y controlando el aumento o disminución de la temperatura.

Una de las primeras decisiones que tiene que ser tomada antes de la aplicación de esta metodología es la selección de la o las especies. Esto puede considerarse un problema dado que se debe dar prioridad a una especie por sobre las otras para preservarla; es por tal razón, muy importante recoger abundante información antes de su aplicación. Así también, se tendrá que tomar en cuenta los tramos del río en el que se encuentra la especie elegida. Cabe resaltar, que las decisiones tienen que ser tomadas con mucho cuidado, siempre considerando cuáles son los intereses que motivan la aplicación de la metodología.

Métodos del caudal del área máxima de desove (método a) y área máxima de desove (método b)

Los dos métodos tienen capacidad limitada para acceder a recomendaciones de caudal, porque solo evalúan una condición del mismo y un estadio de vida.

El método A está basado en la estimación del caudal para el cual se da el área máxima de desove como una función de la velocidad y la profundidad, determinada a partir de información existente de las características de la cuenca y la corriente.

El método B sirve para la estimación del área máxima de desove como una función del caudal a sección llena. Requiere una visita de campo para la obtención de la geometría del canal.

Las premisas de las dos técnicas son: i) Los ríos que corren en lechos y bancas de materiales comparables exhiben relaciones consistentes entre ancho, profundidad y velocidad como funciones del caudal. ii) las características de la cuenca se relacionan con las características del canal y el caudal, que a su vez pueden relacionarse con las características preferidas para el desove.

Osborn (1982), desarrolló las ecuaciones para estimar las áreas en cada método, analizando características hidrológicas de la cuenca, características del canal y criterios de sitios de desove (velocidad y profundidad) existentes para la trucha (*Oncorhynchus* sp) al oeste de Washington.

Metodología construcción de bloques (BBM) y los enlaces de modelos de reserva

Se realiza en base a estudios multidisciplinarios realizados del sitio, con el fin de comprender la relación caudal-características hidráulicas, éste tipo de análisis es a mediano o largo plazo y requieren de inversiones considerables (Guevara & Rodríguez, 2013).

2.1.4 Métodos aplicados por la institucionalidad colombiana

Desde comienzos del presente milenio, el IDEAM, mediante sus Estudios Nacionales del Agua (ENA), ha sido la entidad abanderada en la implementación de los conceptos asociados a caudales ambientales y/o ecológicos en el país. Comenzado con valores teóricos constantes, hasta los hoy métodos holísticos a nivel de tramos; no obstante, con la complejidad metodológica también llegan los problemas de implementación, incluyendo su adaptación en las normas del país, las cuales, por lo general requieren de una visión generalista (Mesa, 2009). Para efectos prácticos, en general el caudal ambiental ha sido adoptado como un valor mínimo a respetar, y su incorporación por parte de las autoridades ambientales en los instrumentos de planificación todavía requiere de mayores análisis. Una revisión rápida de la estimación de los caudales ambientales en Colombia fue presentada por Pantoja (2017) y allí se resumen las siguientes propuestas:

- Estudio Nacional del Agua –ENA- (IDEAM, 2000): El caudal ambiental corresponde al Q97 de la curva de duración de caudales.
- Estudio Nacional del Agua –ENA- (IDEAM, 2004): El caudal ambiental corresponde al Q97.5 de la curva de duración de caudales o al 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la cuenca.

- Resolución 865 de 2004 (MAVDT): Básicamente adopta dentro del cálculo del índice de escasez, el caudal ecológico como un porcentaje de descuento equivalente al 25%. No obstante, tanto en la forma como en el fondo, la resolución 865 de 2004 se adhiere a lo propuesto por el IDEAM en el ENA del 2004.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial (MAVDT, 2008): Basados en un estudio elaborado por la Universidad Nacional, propone una visión holística para la estimación del caudal ambiental, donde la primera propuesta de estimación corresponde a los valores mensuales que resultan del valor máximo entre el 7Q10 y Q95% para el correspondiente mes y condición hidrológica.
- Estudio Nacional del Agua –ENA- (IDEAM, 2010): Propone una estimación de caudal ambiental que puede ser el Q85 o el Q75 de la curva de duración de caudales según la capacidad de retención y regulación hídrica de la cuenca.
- Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental (ANLA, 2013): Una metodología holística integral, desarrollada en consultoría con la Universidad Nacional, sede Bogotá, desarrolla el cálculo de los caudales ambientales desde el punto de vista hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y de calidad del agua. Dicha metodología es aplicable a proyectos que requieran captar agua de fuentes superficiales y que impliquen el trasvase de aguas, la generación de energía a filo de agua y/o la formación de embalses, cualquiera que sea su propósito. Otras captaciones deberán verificar su aplicabilidad. La primera aproximación considera el máximo valor entre 7Q10, Q95 y Q75 por condición hidrológica. Los caudales ambientales deben ser ajustados según los criterios de integridad de hábitat.
- Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico (MADS, 2014): se retoman las dos visiones del MAVDT (2008) y el ENA 2010, con propuestas de caudales ambientales para cada mes y para cada condición hidrológica (36 caudales ambientales) considerando lo descrito en la resolución 865 de 2004, los indicadores 7Q10 y Q95, y el IRH y el Q85 y Q75. Luego de implementar las diferentes metodologías son las autoridades ambientales, bajo la asesoría de los equipos consultores, quienes proponen en conjunto un caudal ambiental que mejor represente y se adapte a las condiciones de la cuenca.
- Recientemente se ha definido que para la cuenca del río Bogotá solo aplicará la metodología desarrollada por el MADS-IDEAM (resolución 2130 del 18 de diciembre de 2019 del MADS). Ésta se basa en métricas de interés ecológico e índices de integridad de hábitat que provienen de cálculos hidrológicos, consideraciones de calidad del agua, y consideraciones hidrobiológicas. Es esta metodología la que se aplica en este estudio piloto.

2.2 Conceptos hidrobiológicos en la temática de caudal ambiental

En el desarrollo del presente estudio, la biota acuática o información hidrobiológica requerida para cumplir con los objetivos propuestos de caudal ambiental está enfocada hacia la caracterización (línea base). En esta se realiza una aproximación al análisis de la condición ecológica de los ecosistemas acuáticos en las tres subzonas antes descritas, basados en la metodología para la

estimación y evaluación del caudal ambiental determinada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013). Esta aproximación tomó como comunidades bioindicadoras del estado de los ecosistemas a los macroinvertebrados acuáticos y a las algas perifíticas.

2.2.1 Comunidades hidrobiológicas

Macroinvertebrados acuáticos

El agua superficial puede clasificarse según el flujo natural que lleve el cauce. Algunos sistemas no presentan movimiento horizontal del agua, es decir, el agua no fluye si no que está relativamente estancada, a estos se les denomina sistemas lénticos e incluye por ejemplo lagos y embalses. Estos sistemas suelen tener mayores profundidades y por esta razón pueden resistir mejor a los periodos de sequía.

Los sistemas que fluyen a través de la fuerza de la gravedad se denominan sistemas lóticos, en estos sistemas el movimiento del agua es predominantemente en una dirección, así, el agua sigue el curso según la pendiente, el caudal, la profundidad, entre otros, por esta razón los parámetros físicos de la cuenca juegan un papel importante en la dinámica del ecosistema acuático. Estas dinámicas también están determinadas por las condiciones en particular que posee cada sistema, medidas a través de las variables fisicoquímicas, y las diferentes perturbaciones ambientales, donde se resaltan los estresores a escala de cuenca como los cambios en el uso del suelo y las alteraciones hidrológicas por ser las más severas que promueven el deterioro de los ecosistemas fluviales del continente (Rodríguez-Olarte et al., 2020). Finalmente, todas estas variables en conjunto determinan la estructura y la composición de las comunidades hidrobiológicas e influyen en los procesos ecosistémicos que se pueden dar (Ríos-Touma y Ramírez 2019; Sabater et al., 2019).

Las principales comunidades hidrobiológicas que habitan las aguas corrientes son las macrófitas, el perifiton, los macroinvertebrados y la ictiofauna. Una parte fundamental de estos ecosistemas son los macroinvertebrados acuáticos, ya que dichos organismos son relevantes por su aporte en los procesos ecológicos tales como descomposición de materia orgánica, oxígeno disuelto, ciclado de nutrientes, entre otros (Maass et al., 2005, Portillo-Quintero y Azofeifa 2010, Longo et al., 2010). Además de que han sido ampliamente investigados y usados para determinar el estado de calidad de los diferentes sistemas lóticos a nivel mundial (Hurlbert 1981, Hogue y Bedoya 1989, Nieser 1970, Illies 1961, Sioli 1964, Roldan 1988, 1999, 2016). El término macroinvertebrado agrupa a los diferentes organismos que se pueden observar a simple vista, es decir, todos aquellos

que tienen un tamaño superior a 0,5 mm de largo (Chavez y Santamaría 2006) y el término acuático se refiere a las características de los lugares en los cuales viven los diferentes grupos, algunos viven adheridos a la vegetación y rocas, mientras que otros nadan sobre la superficie o prefieren el fondo lodoso o arenoso (Roldán y Ramírez 2008, Chavez y Santamaría 2006). Dentro de la categoría de macroinvertebrados se encuentran los hidozoos, los poríferos, los turbelarios, los oligoquetos, los hirudíneos, los insectos, los arácnidos, los crustáceos, los gastrópodos y los bivalvos. El phylo Artrópoda, representado en su mayoría por insectos, agrupa el mayor porcentaje de taxones, en términos de riqueza y abundancia, que dominan los sistemas lóticos (Chavez y Santamaría 2006).

Los macroinvertebrados acuáticos han sido ampliamente utilizados a nivel de la ingeniería para analizar el estado ecológico, en términos de calidad, de los ecosistemas acuáticos a nivel mundial. Este grupo hidrobiológico se incluye en la normatividad, por ejemplo, en el planteamiento de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), debido a que presentan un comportamiento sésil, tienen diferentes sensibilidades y tolerancias a la contaminación ambiental y se cuenta con una amplia información ecológica en los diferentes lugares donde habitan, lo cual demuestra un buen reflejo de la calidad ambiental. El conocimiento de la taxonomía de los macroinvertebrados en los ecosistemas acuáticos es todavía incompleto en Colombia. Los grupos más utilizados en evaluaciones de la calidad del agua corresponden a taxones de la entomofauna como efemerópteros, tricópteros, plecópteros y coleópteros (Perla et al., 2014).

Los parámetros hidrobiológicos, acompañados de los análisis ambientales que incluyen la integridad del hábitat y las variables fisicoquímicas, permite establecer a través de diferentes índices la calidad o integridad ecológica del ecosistema acuático. Uno de estos índices es el BMWP (Biological Monitoring Working Party) el cual fue establecido en Inglaterra en 1970, como un método simple y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores. Las razones para ello fueron básicamente económicas y por el tiempo que se necesita invertir. El método sólo requiere llegar hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia o ausencia). El puntaje va de 1 a 10 de acuerdo con la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica. Las familias más sensibles como Perlidae y Oligoneuriidae reciben un puntaje de 10; mientras que, las más tolerantes a la contaminación, por ejemplo, Tubificidae, reciben una puntuación de 1.0 (Armitage et al. 1983). La suma de los puntajes de todas las familias proporciona el puntaje total BMWP. En Colombia se ha empleado el BMWP en los estudios de Zuñiga de Cardozo et al (1997) en el Valle del Cauca, de Zamora y Sarria (2001) en el departamento

del Cauca, del Instituto Mi Quebrada (2001) en Antioquia (Quebrada Medellín), entre otros. En Roldán (1999) y en Roldán y Ruiz (2001) se presenta una visión del índice modificado y adaptado para Antioquia.

Algas periféricas

La comunidad de algas perifíticas ha sido empleada como indicador biológico para la evaluación de la calidad del agua, por lo que existen abundantes estudios sobre su capacidad bioindicadora. Esto se encuentra asociado al hecho que las algas perifíticas son sensibles a cambios ambientales en cortos periodos de tiempo y su grado de tolerancia en algunas especies permite deducir o asociar niveles de contaminación, donde su abundancia y composición reflejan las condiciones ambientales del pasado reciente ya que este tipo de comunidad permanece unida al sustrato, siendo testigo confiable de los procesos ocurridos en el sistema (Masseret et al., 1998); adicionalmente, las mediciones periódicas de esta comunidad en combinación con la determinación de parámetros fisicoquímicos aumentan su valor informativo. De esta manera los métodos biológicos complementan los fisicoquímicos, constituyendo la base para una correcta evaluación de la calidad de aguas corrientes (Lobo et al., 2002). Finalmente, la integración de medidas biológicas en este caso la composición y estructura de la comunidad perifítica, proporciona un conocimiento más relevante acerca de la ecología de un ambiente acuático.

En sistemas lóticos es común encontrar organismos de la división Bacillariophyta, conocidas como “diatomeas”, puesto que este grupo posee células incluidas en una pared celular rodeada de silicio, lo que les confiere más peso y, en consecuencia, una mayor adaptación para colonizar sustratos firmes inmersos en las corrientes expuestas a la velocidad. Como organismos pertenecientes al primer nivel de la cadena trófica alimenticia en el medio acuático de un sistema lótico y por su frecuente presencia, las diatomeas son un componente fundamental como grupo productor y fotosintetizador en el sistema (Bold y Wynne, 1985). Las comunidades de algas reflejan en alto grado la calidad del medio en el que se desarrollan. El estudio de las algas como indicadores de la calidad del agua ha involucrado el tipo de hábitat, nivel de organización celular y hábito de vida, su categorización incluye la denominación de algas de aguas limpias y algas de aguas contaminadas, así como también son referenciadas cualidades organolépticas como algas que causan sabor y de algas que producen olor en el agua (Ramírez y Roldan, 2008). Diferentes estudios sobre la relación del perifiton y la calidad física y química del agua de los sistemas lóticos

concluyen que, al igual que otras comunidades, algunas algas perifíticas se desenvuelven mejor en medios oligotróficos y otras en medios eutróficos (Ramírez y Roldan, 2008).

2.2.2 Información hidrobiológica

Las comunidades hidrobiológicas deben ser muestreadas en los mismos tramos definidos para la estimación del caudal ambiental, dentro de los cuales pueden darse diferentes unidades de análisis y/o hábitats físicos, que pueden ser utilizadas o no, como variables suplementarias para análisis que requieran mayor detalle. En la Figura 2.1 se ilustra un tramo con diferentes unidades morfológicas (poza y rápido).

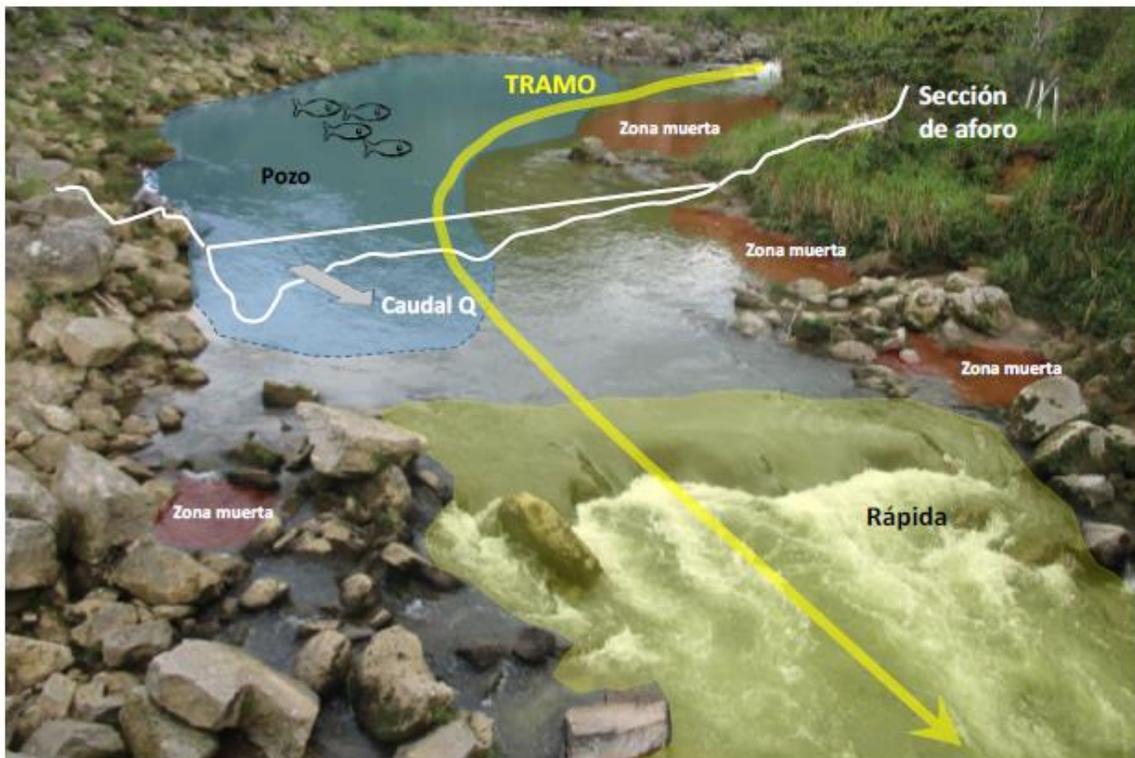


Figura 2.1 Esquemización del levantamiento integrado de información hidrométrica, fisicoquímica e hidrobiológica en inmediaciones de sitios de monitoreo establecidos (Minambiente-CORNARE, 2015)

En todo caso, es importante tener en cuenta que, en el marco de la caracterización del medio biótico requerida, se debe caracterizar los ecosistemas acuáticos continentales localizados en el área de influencia del proyecto.

3 Metodología de referencia para el cálculo del caudal ambiental en el área de interés IDEAM-ECOPEPETROL

A continuación, se describe las componentes hidrológica e hidrobiológica de la metodología propuesta por el MADS-IDEAM. Se describe el paso a paso que se debe desarrollar para obtener una propuesta preliminar de aprovechamiento de caudales para un tramo de estudio en función de la información disponible.

3.1 Definición de las series hidrológicas de trabajo

3.1.1 Caracterización del régimen hidrológico natural

El primer paso para la estimación del caudal ambiental desde su componente hidrológica consiste en caracterizar el régimen natural del flujo, que como pudo describirse en las metodologías hidrológicas, tiene una amplia influencia en el funcionamiento de los ecosistemas. En tal sentido la primera actividad que deberá adelantarse corresponde a la caracterización de la información hidrológica disponible considerando la instrumentación existente.

Cuando se tienen datos hidrológicos para los tramos o sectores, condición considerada ideal, se debe garantizar que los registros posean información diaria de al menos 10 años, y no tener dentro de esta longitud más del 10% de datos faltantes. Si ambos criterios son cumplidos, pueden efectuarse los debidos análisis de homogeneidad, consistencia y detección de datos anómalos. Otro escenario podría ser el de existencia de estaciones hidrológicas en sitios cercanos a los tramos de análisis, en este caso el prorrateo por áreas podría ser considerado. Y, finalmente, se tiene el caso donde los caudales son inexistentes, pero se cuenta con información de precipitación, con lo cual se puede calibrar un modelo lluvia-escorrentía de escala diaria a fin de estimar los caudales de forma indirecta en los sitios de interés, previo el cumplimiento de los protocolos típicos de modelación hidrológica.

La serie de caudales obtenida por cualquiera de los procesos de estimación juega un rol importante en la descripción del régimen de flujo que sostiene de las necesidades ecosistémicas. De ahí que, los esfuerzos iniciales deban concentrarse en la caracterización del régimen natural de caudales que existen en una corriente, bajo condiciones naturalizadas.

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

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

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

3.2 Caracterización del régimen natural de caudales

El régimen de caudales está definido por el ciclo anual de los caudales, los cuales, para el caso colombiano pueden ser unimodales, o bimodales. No obstante, la regla dictada por el ciclo anual, está gobernada por la variabilidad climática de escala inter-anual, la cual define los periodos secos y húmedos en los tramos de estudio. Quizás el evento macro-climático de mayor impacto para buena parte del territorio Colombia sea el sistema EL Niño Oscilación del Sur (o ENSO por sus siglas en inglés). Y, dependiendo de la localización sobre el territorio nacional, las series de tiempo hidrológicas deben considerar tal variabilidad natural, por lo que deben ser clasificadas por condición hidrológica normal, húmeda o seca.

Un primer ejercicio para considerar los efectos de la variabilidad climática consiste en determinar la correlación de algunos indicadores que caracterizan el sistema ENSO con la hidrología de Colombia. Según la guía Metodológica estos podrían ser el Índice Oceánico El Niño (Oceanic Niño Index, ONI), el Índice de Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index, SOI) y el índice multivariado del ENSO (Multivariate ENSO Index, MEI), todos ellos definidos por la NOAA.

<https://psl.noaa.gov/enso/>. Para la selección del indicador más apropiado en el área de estudio, se recomienda evaluar cuál de éstos posee mayor correlación con variables medias mensuales (precipitación, caudal, temperatura, etc.) en el área de estudio.

En particular el índice ONI permite clasificar los registros hidrológicos por condición del ENSO, en función de la magnitud de las anomalías de temperatura en la superficie del mar, y, si se asume que las condiciones secas están dadas por los eventos de El Niño, mientras que las condiciones húmedas se atribuyen a eventos de La Niña, los registros históricos podrán separarse según las condiciones del año analizado como se muestra en la Figura 3.1.

Una vez conformada la muestra de caudales medios diarios correspondiente a cada una de las condiciones hidrológicas, se estima para cada mes y cada condición hidrológica el valor medio de los caudales mínimos anuales, tal como se ilustra en la Figura 3.2, en donde comparan dichas cantidades con los caudales medios multianuales.

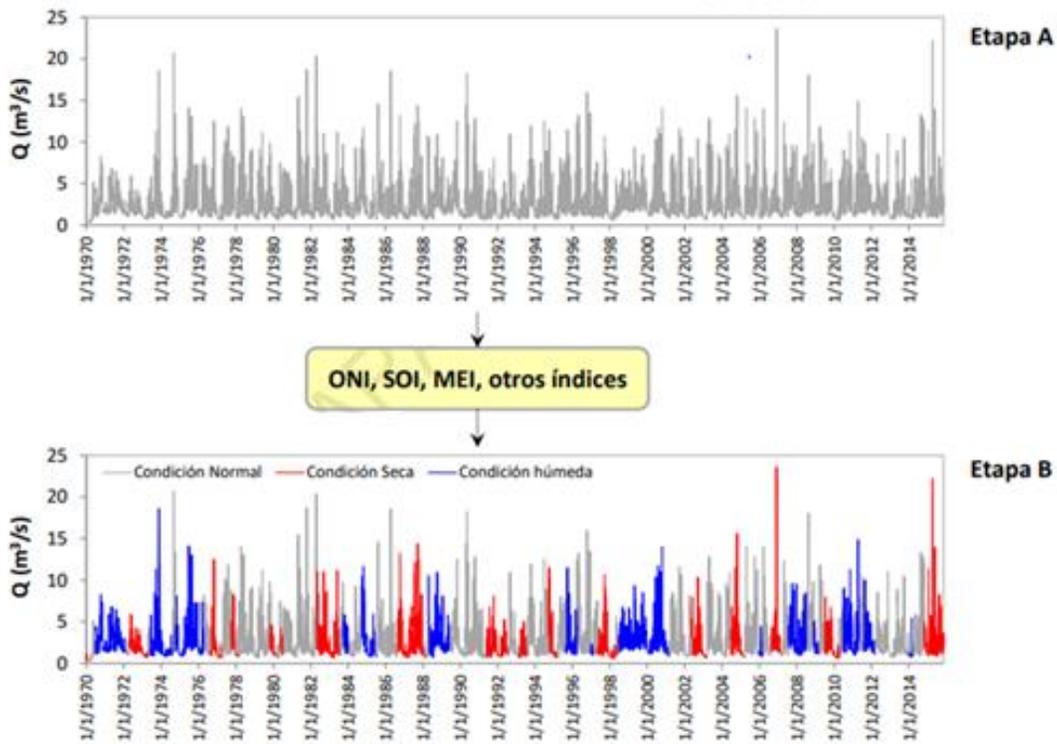


Figura 3.1 Categorización de caudales medios diarios en las condiciones hidrológicas normal, seca y húmeda (en este caso Neutral, El Niño, y La Niña). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015

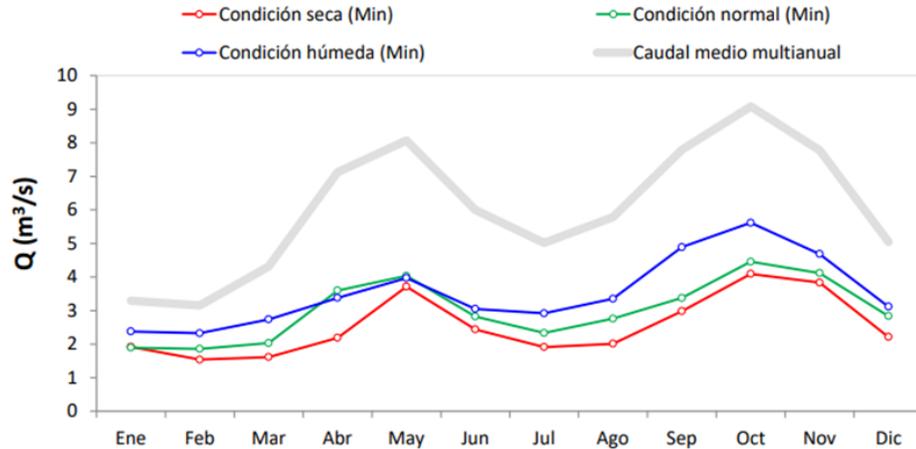


Figura 3.2 Media de los caudales mínimos anuales para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

En forma análoga, se requiere la estimación de caudales máximos representativos de cada mes y cada condición hidrológica. Para condición normal, éste corresponde, para cada mes, al mayor valor entre el caudal máximo correspondiente a un período de retorno de 2.33 años y la media de los caudales máximos para dicha condición. Para condiciones húmedas, este corresponde, para cada mes, al valor más alto entre el caudal máximo correspondiente a 15 años de período de retorno (estimado con toda la serie de caudales) y la media de los caudales máximos para dicha condición, y para condiciones secas a la media de los caudales máximos para dicha condición. En la Figura 3.3 se ilustra la clasificación de los valores medios de caudales mínimos y caudales máximos por condición hidrológica.

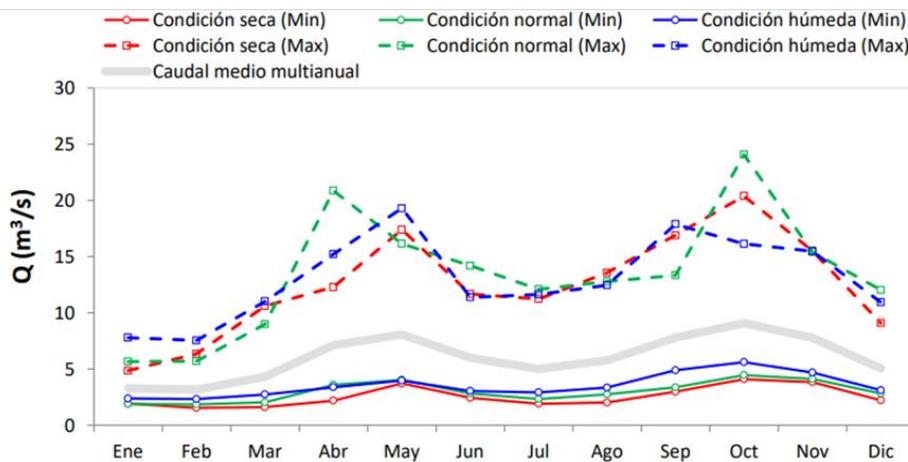


Figura 3.3 Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda). Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

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

3.3 Métricas de interés ecológico

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

3.3.1 Estimación de métricas hidrológicas de interés ecológico

A partir de la serie de caudales medios diarios obtenida en pasos anteriores, para el período de tiempo de referencia, se pueden obtener los valores de los eventos extremos anuales (máximos y mínimos) para el respectivo análisis de frecuencias previo análisis de bondad de ajuste. Las métricas hidrológicas de interés ecológico para extremos mínimos son el caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años ($Q_{MinTr=10}$) y el valor mínimo de flujo base y para extremos máximos se consideran métricas hidrológicas el caudal de banca llena (que podría aproximarse al caudal máximo con periodo de retorno de 2.33 años) y el caudal máximo con período de retorno de 15 años ($Q_{Max Tr=15}$).

3.3.2 Estimación de métricas morfo-hidrológicas de interés ecológico

Caudal de conectividad longitudinal

El caudal que fluye por una corriente bajo flujo crítico recibe el nombre de caudal de conectividad longitudinal o Q_t-Q , mismo que puede ser estimado por simulación hidráulica cuando se tiene batimetría de detalle al definir los tramos donde caracterizados por bajas profundidades y altas velocidades.

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

Para estimar el caudal Q_t-Q , la guía metodológica propuesta por el IDEAM y el MADS sugiere construir el diagrama tiempo de residencia vs caudal para cada uno de los tramos definidos con

información detallada. Dicho diagrama representa el tiempo medio de tránsito - t_m - que un soluto emplea para moverse desde el extremo aguas arriba del tramo hasta el extremo aguas abajo del mismo.

En particular, cuando se carece de información topo-batimétrica detallada, se propone emplear en ríos de alta pendiente (morfologías step-pool, cascade o transicionales) la aproximación propuesta por Jiménez y Wohl (2013) y para ríos de baja pendiente (plane bed, pool-riffle, dunne-ripple) el modelo MDLC propuesto por Camacho y Lees (1999). Una aproximación al diagrama tiempo-caudal se puede lograr mediante las relaciones adimensionales y aproximaciones análogas pueden encontrarse en Ferguson (2007).

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

Caudal a banca llena

La información hidrométrica disponible (primaria y secundaria) se emplea en este paso para estimar el caudal de banca llena - Q_B - en el tramo de estudio, así como el ancho de flujo - W_B y profundidad de flujo - H_B correspondientes. Dicha información es requerida como insumo para la definición de las componentes ambientales del régimen y para la parametrización de las propiedades geométricas de la red de drenaje en sitios desprovistos de información. Aquí son requeridas secciones transversales y propiedades hidráulicas levantadas en el marco de planes de monitoreo y/o seguimiento, tal como se ilustra en la Figura 3.4.

Las propiedades de banca llena pueden estimarse como el promedio (cuando se cuenta con modelo hidráulico) o como un valor singular (cuando se cuenta sólo con una sección transversal) correspondiente al estado de flujo que maximiza la dicha condición puede identificarse cuando la relación ancho profundidad - W/H - alcanza un mínimo local.

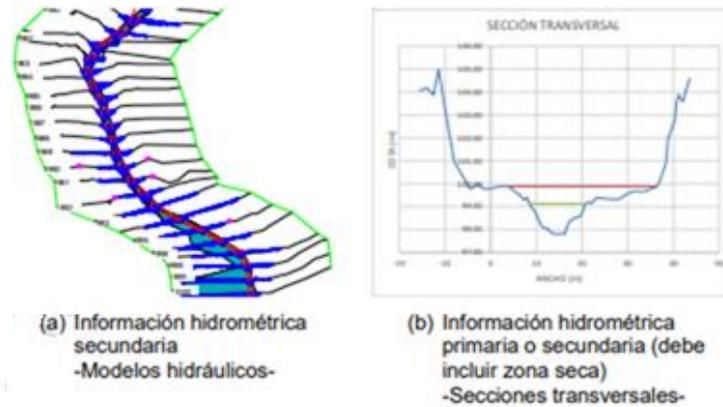


Figura 3.4 Esquemización de la información hidrométrica disponible. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015

3.4 Eventos de interés ecológico del régimen hidrológico natural

De las series de caudal medio diario simuladas u observadas, se obtiene la caracterización de los eventos de interés ecológico caracterizados por de los siguientes indicadores: duración T, magnitud D, e intensidad I. En este caso se elabora un análisis de las rachas que encuentran por encima de las métricas QB y QMax Tr=15, o por debajo de los caudales Qt-Q y QMinTr=10 tal como se recapitula en la Figura 3.5.

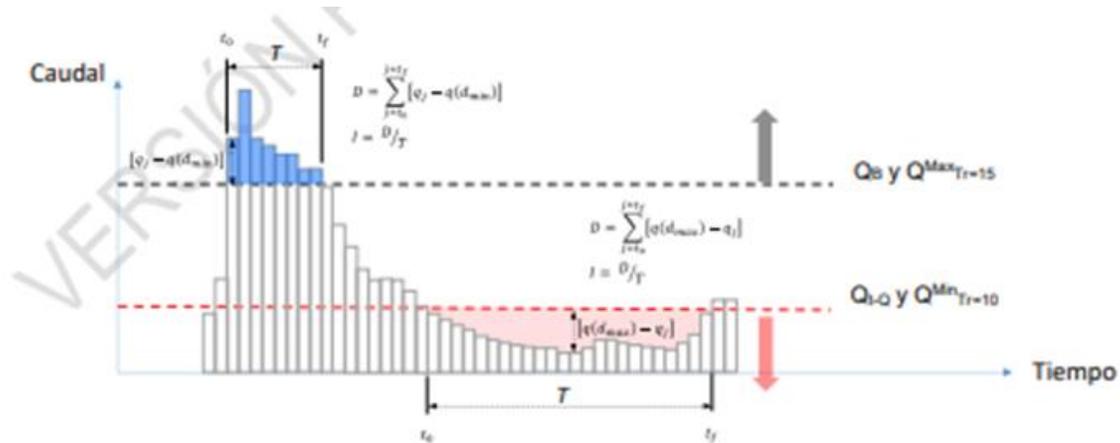


Figura 3.5 Esquemización de eventos de interés hidrológico y ecológico (excesos y déficits) y caracterización de sus atributos. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

El procedimiento consiste en identificar y separar para cada mes cada uno de los eventos de interés ecológico esquematizados en la Figura 3.6.

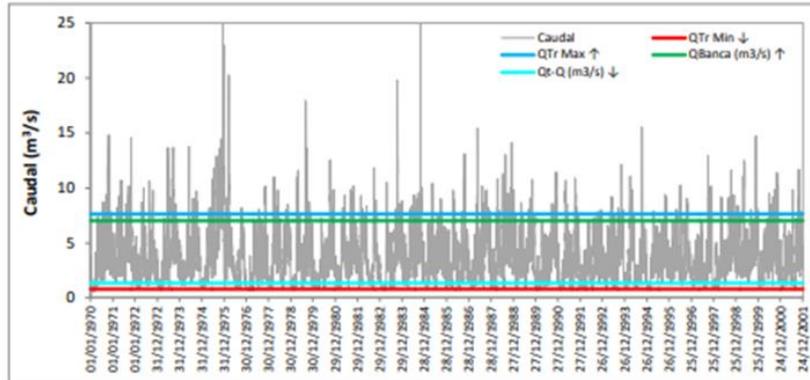


Figura 3.6 Visualización de serie de tiempo de caudales y métricas definidas por los componentes ambientales del régimen Q_t-Q y Q_B , $Q_{maxTr}=15$ y $Q_{minTr}=10$. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015.

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

3.5 Propuesta iterativa de aprovechamiento

Una vez caracterizada la duración, la magnitud y la intensidad de los eventos de interés ecológico en condiciones naturales, es posible hacer la siguiente pregunta: ¿Cuál es la magnitud máxima de caudal que puede extraerse (captarse, desviarse, etc.) sin alterar significativamente dicho régimen? El primer paso consiste en definir el caudal extraído mes a mes como un porcentaje P del caudal medio mensual, tal como se ilustra en la Figura 3.7.

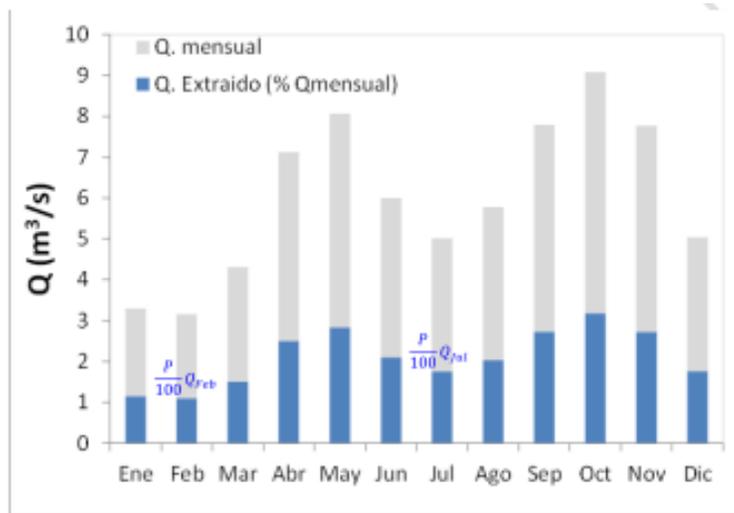


Figura 3.7 Caudal de aprovechamiento mensual como un porcentaje P del caudal medio mensual. Fuente: Minambiente-CORNARE, 2015

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

Con la nueva serie de caudales obtenida aguas abajo $Q^*(t)$, es posible aplicar nuevamente el proceso de identificación y caracterización de los estadísticos de los eventos de interés ecológico, y comparar éstos con aquellos correspondientes a las condiciones naturales. Mediante una prueba hipótesis, es posible analizar si las métricas de interés ecológico para condiciones naturales y post-intervención poseen la misma media. Aquí cabe resaltar que la metodología del MADS-IDEAM básicamente obliga a que no existan alteraciones significativas del régimen post-intervención probadas por hipótesis estadística con cierto grado de significancia.

El proceso anterior se evalúa iterativamente mediante la comparación entre las condiciones naturales y las posteriores al aprovechamiento mediante una prueba estadística t para muestras independientes, la cual se lleva a cabo mes a mes para cada uno de los eventos ($QB\uparrow$; $QTr=15\uparrow$; $Qt-Q\downarrow$; $QTr=10\downarrow$) y métricas (duración, magnitud e intensidad) analizadas. De esta manera es posible definir para cada mes el máximo caudal aprovechable que no induce alteración del régimen hacia aguas abajo. Una vez determinado el máximo caudal aprovechable que no induce alteración del régimen, se debe clasificar la serie de tiempo de caudales aguas abajo (t) obtenida para los tres periodos hidrológicos: normal (e.g. Neutral), seco (e.g. El Niño) y húmedo (e.g. La Niña). En la Figura 3.8 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos para condición hidrológica seca. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

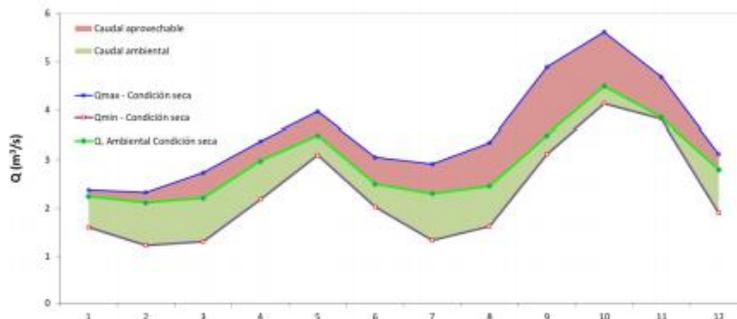


Figura 3.8 Caudales ambientales y aprovechables para condición hidrológica seca en un punto de la red de drenaje

3.6 Requerimientos de información desde la componente hidrológica para la aplicación de la metodología MADS-IDEAM -2018

En general, la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá, (MADS-IDEAM, 2018) posee diferentes fases, y en cada una de ellas existen unos requerimientos de información. Dichas fases son las siguientes:

- Fase 1: Del levantamiento de la información y la caracterización del cuerpo de agua: Aquí se requiere definir con claridad el cuerpo de agua objeto del estudio
- Fase 2: De la estimación del régimen de caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico: Implica la aplicación de la componente hidrológica del caudal ambiental, incluyendo además la hidro-biología.
- Fase 3: De la evaluación del régimen de caudales ambientales considerando los servicios eco sistémicos: en esta fase se valora en particular la capacidad de dilución como principal servicio eco sistémico.
- Fase 4: Seguimiento e implementación de los caudales ambientales: Incorporación del caudal ambiental dentro de la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca por parte de las autoridades competentes.

El paso a paso de la metodología de caudales ambientales, incorporando las demás componentes, se muestra en la Figura 3.9 . Allí se exponen los principales requerimientos de información en cada actividad o paso desarrollado. En general los mayores requerimientos están al inicio del proceso, es decir dentro de la Fase 1, los cuales implican

Así pues, como requerimientos fundamentales de información para la aplicación de la componente hidrológica se encuentran:

- La priorización y/o definición de los tramos de análisis.
- La obtención de imágenes satelitales que permitan clasificar los tramos morfológicamente.
- Toda la cartografía base existente, en especial la red de drenaje, con los tramos de interés, incluyendo sistemas lenticos.
- La información hidrometeorológica disponible, de escala diaria, con longitud temporal superior a 10 años, y porcentaje de datos faltantes inferior a 10%.
- De ser posible, la mejor topo-batimetría de los tramos, para considerar su posible inclusión dentro del cálculo de algunos parámetros hidráulicos.

- Las curvas nivel-caudal de las estaciones hidrológicas existentes, incluyendo su sección transversal.
- Programar una visita de campo que sirva para verificar algunas métricas hidrológicas e hidráulicas.

Metodología para la estimación del caudal ambiental

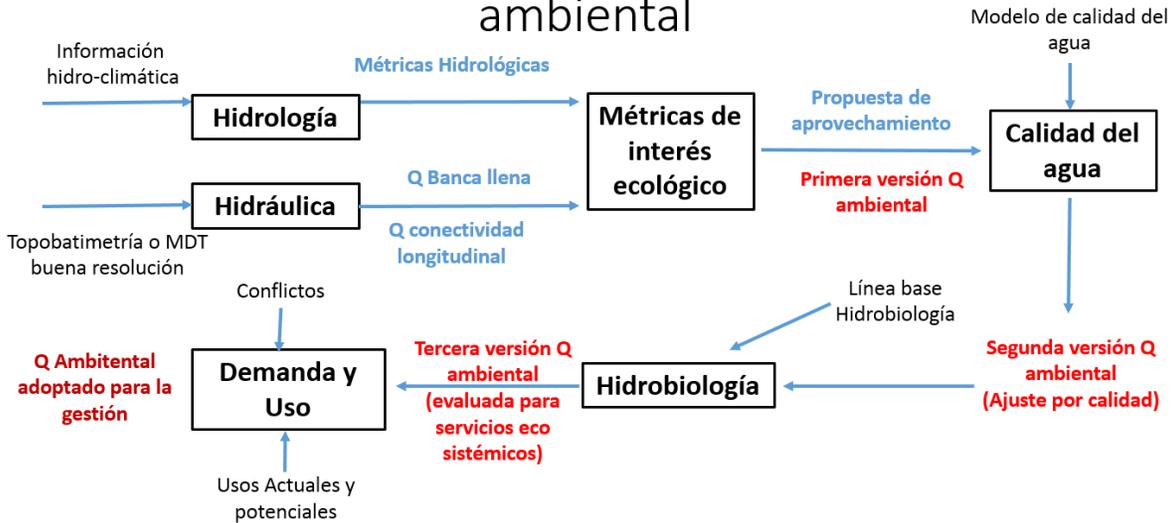


Figura 3.9 Diagrama de flujo de la aplicación de la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá.

3.7 Aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales

La determinación de caudal ambiental, empleando la metodología para la estimación del caudal ambiental en el Río Bogotá, se realiza sobre la base del conocimiento del cuerpo de agua. Esto con el fin de mantener o alcanzar unos servicios ecosistémicos en el marco de las medidas de gestión integral del recurso hídrico en su cuenca hidrográfica. Como se puede ver en la Figura 3.9, la determinación del conocimiento se hace a través de una *línea base hidrobiológica* que *modifica posteriormente los valores definidos* en los pasos anteriores para el caudal ambiental.

En esta metodología la condición ecológica se entiende como la valoración sobre el estado de la integridad del ecosistema acuático. La integridad se entiende como la capacidad que tiene un sistema y sus componentes de sostener y mantener el rango completo de procesos y funciones ecológicas que son esenciales para el sustento de la biodiversidad y de los servicios provistos para la sociedad (Flotemersch et al., 2015). Dicha valoración es multidimensional, de manera que considera funciones clave como la regulación hídrica, las condiciones fisicoquímicas del agua y de los sedimentos, la conectividad hidrológica y la provisión de hábitat, y se puede abordar a partir de la valoración de los principales agentes de alteración de origen antrópico (Flotemersch et al., 2015).

En la Tabla 3.1 se propone un conjunto de variables para el análisis de aspectos ecológicos en la determinación de caudales ambientales en ríos de Colombia, donde se fundamentan las dos consideraciones esenciales de disponibilidad y calidad de hábitat.

Tabla 3.1 Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en ríos de Colombia (MinAmbiente y ANLA, 2013)

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

En este caso, se considerarán solo dos comunidades hidrobiológicas en el análisis piloto (Macroinvertebrados y perifiton), por lo cual no se evaluará la información relacionada con las comunidades de vegetación riparia y peces.

Es así como la estimación o evaluación del caudal ambiental debe comenzar con la estimación de caudales mensuales a partir de un análisis hidrológico; con esta primera aproximación de caudales mensuales se realizan cálculos hidráulicos y de calidad del agua y del índice de integridad del hábitat (IIH). Este último es el que proporciona información del impacto sobre las comunidades hidrobiológicas dado el caudal ambiental.

En general, la metodología para el análisis del componente hidrobiológico en el marco de la estimación de caudal ambiental puede considerar tres fuentes de información: 1. Levantamiento de información de línea base, 2. Determinación de índices ecológicos y 3. Análisis de hábitat. A continuación, se describen dichas fuentes.

3.7.1 Información hidrobiológica de línea base

Los atributos del régimen de caudales en un cuerpo de agua tienen repercusiones, no sólo sobre cambios físicos, sino también en la estructura, composición taxonómica y la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, las comunidades hidrobiológicas son fundamentales como bioindicadores en el manejo y monitoreo de los recursos hídricos, pues reflejan las modificaciones físicas y químicas generadas por cambios en el régimen de caudales presente en el cuerpo del agua.

De acuerdo con lo anterior, es fundamental seleccionar herramientas o sistemas de bioindicación que evidencien claramente el tipo de impacto a evaluar. Algunas de estas herramientas se citan a continuación y permiten orientar a la autoridad ambiental en la obtención de información relacionada con el régimen de caudal, los cuales se enfocan en las condiciones físicas de interés ecológico para el mantenimiento de la biodiversidad, funcionalidad y servicios ecosistémicos.

1. Cambios en la estructura y composición de la comunidad hidrobiológica, los cuales son evaluados usando índices ecológicos como riqueza y diversidad.
2. Metodología para determinar a mediano plazo los valores óptimos y de tolerancia de las comunidades hidrobiológicas, con el fin de tener argumentos que orienten a futuro la toma de decisiones relacionadas con modificaciones del régimen de caudal.
3. Evaluación sobre los aspectos funcionales a través de los rasgos biológicos, los cuales permiten evaluar de manera directa e integral la relación entre los procesos ligados a los regímenes de caudal y la funcionalidad, reflejada en el papel o rol que cumplen las especies, así como sus estrategias de vida.

Desarrollo de indicadores ecológicos

El conocimiento de la relación entre las variables ambientales (componente abiótico) y las especies (componente biótico) es fundamental en la valoración de los potenciales impactos que pueden causar los cambios generados en el hábitat de una especie. En este sentido, la estimación del **óptimo** y **tolerancia** de una especie a lo largo de un gradiente ambiental es útil para evaluar las condiciones actuales en la cual se distribuye la especie y a futuro cual o cuales condiciones deben mantenerse para asegurar la presencia de esta especie y de manera indirecta las especies asociadas y su hábitat.

A partir del modelo se pueden obtener tres atributos con significancia ecológica: por un lado, el óptimo, el cual se define como el valor del gradiente en el cual la especie presenta su mayor probabilidad de ocurrencia o la preferencia ambiental de la especie, en una distribución simétrica el óptimo equivale a estadísticamente a la mediana. El siguiente es la tolerancia la cual es la

amplitud o capacidad que tiene la especie para vivir en ambientes fuera de su óptimo, en una distribución simétrica la tolerancia equivale a la desviación de la distribución (Figura 3.10).

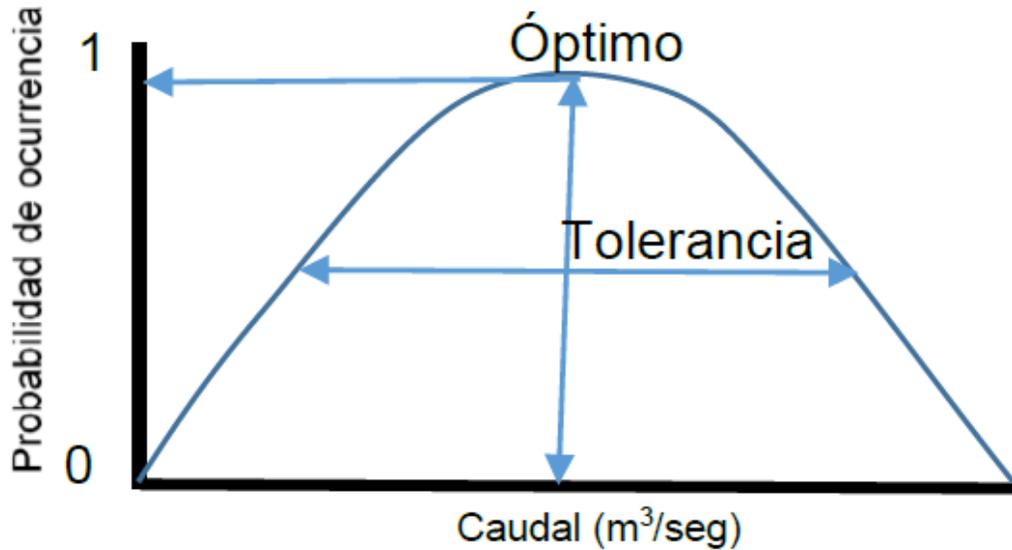


Figura 3.10 Distribución hipotética de una especie en función del caudal

Evaluación funcional

La perspectiva funcional provee una interpretación más directa de los cambios que ocurren en los ecosistemas, ya que está basada en rasgos biológicos que exhiben las especies. Dichos rasgos biológicos evolutivamente han sido seleccionados por los factores ambientales y en el tiempo ecológico los que se encuentran en un determinado momento y espacio nos dan información de cuáles son las condiciones locales que gobiernan estos ecosistemas. Para cada una de las comunidades hidrobiológicas se han desarrollado metodologías y codificación de los rasgos que permiten estandarizar los resultados para que puedan realizarse comparaciones a nivel local y regional. Los rasgos adecuados para los análisis serán aquellos que intuitivamente se puedan relacionar fácilmente con los procesos asociados al régimen de caudal (Poff et al., 2017).

En la Tabla 3.2 se presenta un ejemplo de la codificación de los rasgos seleccionados para los posteriores análisis y ejemplos en la literatura que pueden ser consultados con el fin de orientar la interpretación de los resultados y en la obtención de métricas de síntesis de la información, tales como riqueza y diversidad funcional.

Tabla 3.2 Comunidades hidrobiológicas y algunos rasgos biológicos tenidos en cuenta para su análisis frente a alteración del flujo (MinAmbiente y IDEAM, 2019)

Comunidad hidrobiológica	Rasgos biológicos	Autor
Algas	Forma de vida Motilidad Agarre al sustrato	Lange et al., (2016)
Macroinvertebrados	Grupo trófico Forma de cuerpo Flexibilidad del cuerpo Habito Tipo de respiración	Poff et al., (2006); Statzner & Bêche, (2010); González-Trujillo & Donato-Rondon, (2016)
Peces	Estado trófico Afinidad al sustrato Preferencia geomorfológica Locomoción Reproducción Afinidad al tamaño del río	Goldstein & Meador (2004)
Vegetación de ribera y macrófitas	Historia de vida Estrategias reproductivas Morfología Perturbación fluvial Balance de agua	Merrit et al. (2010)

3.7.2 Índices ecológicos

En la Tabla 3.3 se presenta el listado de índices que se deben calcular en el levantamiento de la línea base hidrobiológica. Esta información provee un nivel de conocimiento básico sobre estado actual previo a la modificación del régimen y proporciona una línea base para el seguimiento a futuro del efecto temporal y espacial de dichos cambios.

Tabla 3.3 Variables hidrobiológicas sugeridas para análisis en sitios de monitoreo (MinAmbiente y IDEAM, 2019)

Variable hidrobiológica	Métricas ecológicas
Algas	<ul style="list-style-type: none"> • Riqueza taxonómica • Abundancia, Densidad y/o biomasa • Diversidad (ej. Diversidad de Shannon) • Equidad (Ej. Índice de Simpson) • Dominancia (ej. Índice de Simpson)
Macroinvertebrados acuáticos	
Peces	
Vegetación riparia y macrófitas	

Índices de Diversidad

Se determinó la diversidad a partir de los índices de diversidad de Shannon y Weaver (1949), Equidad de Pielou (1966), dominancia de Simpson (1949), los cuales fueron calculados por medio de las siguientes expresiones:

- Índice de Shannon-Weaver (H'):

$$H' = \sum p_i * \ln(p_i)$$

Dónde:

- p_i = abundancia proporcional de la especie i , es decir, el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

Este índice calcula el grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección. Asume que los individuos son seleccionados al azar y que todas las especies están representadas en la muestra. Adquiere valores entre cero, cuando hay una sola especie, y el logaritmo de S , cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Shannon & Weaver 1949).

- Índice de Simpson (D):

$$D = \sum p_i^2$$

Dónde:

- p_i = abundancia proporcional de la especie i , es decir, el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

Este índice manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie. Está fuertemente influido por la importancia de las especies más dominantes (Simpson 1949; Moreno 2001).

- Índice de Equidad de Pielou (J'):

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}; \text{ donde } H'_{max} = \ln(S)$$

Calcula la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Su valor va entre 0 y 1, donde el número 1 indica que todas las especies son igualmente abundantes y el 0 señala la ausencia de uniformidad (Pielou 1966; Martella et al. 2012).

La finalidad de la aplicación de estos índices, como lo plantea la Guía Técnica Para La Formulación De Planes De Ordenamiento Del Recurso Hídrico (Abba et al. 2014) es analizar la distribución de las especies en los diferentes puntos de monitoreo.

Índice BMWP

La calidad biológica del agua de acuerdo con el índice BMWP/Col, se valoró teniendo en cuenta el nivel taxonómico de familia de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, en el que se

utilizó una escala que va de 1-10 de acuerdo con la tolerancia a la contaminación, asignando el mayor valor a las familias más sensibles y el menor a las más tolerantes. Específicamente, los puntajes empleados para cada familia encontrada fueron los reportados por Roldán (2003) para Colombia (Tabla 3.4). Una vez obtenida la sumatoria para cada sitio de monitoreo por el índice BMWP/col; la clase, calidad biológica del agua, el significado y colores se utilizará en la construcción de un mapa cartográfico para cada punto de monitoreo de la cuenca del río Grande, de acuerdo con lo establecido en Roldán (2003) (Tabla 3.5).

Tabla 3.4 Puntuación dada para las diferentes familias de macroinvertebrados acuáticos en el índice BMWP/Colombia. fuente (Roldán, 2003).

Familias	Puntajes
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelphusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenogrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohiphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae	7
Aeshnidae, Ancylidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae	4
Ceratopogonidae, Glossiphonidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae	3

Familias	Puntajes
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae	2
Tubificidae	1

Tabla 3.5 Clase, calidad, valores, significado del BMWP (Fuente: Roldán, 2003).

Clase	Calidad	Valor	Significado	Color
I	"Buena"	>150, 101-120	Aguas muy limpias a limpias	Azul
II	"Aceptable"	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	Verde
III	"Dudosa"	36-60	Aguas contaminadas	Amarillo
IV	"Crítica"	16-35	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	"Muy Crítica"	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Índice de integridad biótico

Es claro que los ecosistemas acuáticos mantienen una gran diversidad de organismos, y los impactos como la contaminación inducen cambios en la estructura de la comunidad, la función biológica en el sistema y en los propios organismos, afectando su ciclo de vida, crecimiento y su condición reproductiva (Bartram & Ballance, 1996; Gibbson, Barbour, Stribling, Gerritsen & Karr, 1996).

En 1987 Karr definió la integridad biótica como: “La capacidad de soportar y mantener una comunidad adaptada, integrada y balanceada, con una composición, diversidad y organización funcional comparable con el hábitat natural de la región”. Es por esto que las metodologías de integridad biótica buscan aproximarse a la medición de las alteraciones en los ecosistemas acuáticos a través del análisis de distintos bioindicadores, destacando a los macroinvertebrados acuáticos, por las diversas respuestas y ventajas que proporcionan (Piñón et. al., 2014). En este sentido, estos organismos son especialmente útiles para reconocer cambios en estos ecosistemas, puesto que constituyen ensamblajes estructurados por una amplia gradación de especies generalistas a microespecialistas que responden rápidamente a los cambios que ocurren en los sistemas acuáticos (Pérez et al., 2006).

Para la construcción del Índice de Integridad Biótico basado en macroinvertebrados acuáticos (IIBMA), se emplearon los datos biológicos y de campo obtenidos durante el muestreo el mes de septiembre. Para este índice, se asume que es posible obtener información sobre la integridad de las asociaciones biológicas, con base en las características de estas, las cuales pueden variar de una forma predecible, cuando se incrementa la influencia humana sobre los ecosistemas. A este grupo de características se les define como las variables de respuesta al ambiente (VRA) (Pineda-López et. al., 2014).

El tratamiento de los valores de las variables en categorías, al igual que en el índice de calidad ambiental, permite eliminar unidades propias para cada medición. De lo que se deriva una fórmula, cuya expresión matemática es una suma no ponderada:

$$IIB = \Sigma VRA$$

En la que el efecto aditivo de las variables tiende a indicar la integridad del sistema en estudio. Las variables de respuesta al ambiente (VRA) que se emplean para calcular el Índice de Integridad Biótica, son:

Riqueza de taxa (RT). Se refiere al número de familias de macroinvertebrados encontradas en el sitio de referencia.

Número de familias de Efemerópteros, Plecópteros Tricópteros (REPT). Se calcula con el número de familias de Efemerópteros (excepto la familia Baetidae), Plecópteros y Tricópteros; encontradas en la muestra.

El número de taxa de insectos intolerantes (RII). Se refiere al número de familias de insectos acuáticos que son intolerantes (sensibles) o muy intolerantes (muy sensibles).

Número de taxa intolerantes (#TI). A la variable anterior hay que sumarle el número de otras familias de macroinvertebrados que no son tolerantes. Para el ejemplo esta variable vale cero (0).

Valor de la Tolerancia media (TM). Corresponde al promedio de los valores de tolerancia presentes en la muestra.

El # de Taxa fijos (#TF). Corresponde al número de taxa que tienen hábitos de vida fijos al substrato

Ahora hay que recurrir al cuadro de calificación de las variables de acuerdo con el valor que tuvieron (Tabla 3.6), para conocer la categoría a la que pertenece la variable. En esta tabla la letra “Y” indica el valor de la variable.

Tabla 3.6 Valores de las categorías de las variables para calcular el Índice de Integridad Biótica

VARIABLE	CAT1	CAT2	CAT3	CAT4	RESPUESTA AL IMPACTO
RT	$Y < 23$	$23 \leq Y < 27$	$27 \leq Y < 30$	$Y \geq 30$	DESCIENDE
REPT	$Y < 9$	$Y = 9$	$Y = 10$	$Y \geq 11$	DESCIENDE
RII	$Y < 9$	$9 \leq Y < 12$	$12 \leq Y < 14$	$Y \geq 14$	DESCIENDE
#TI	$Y < 10$	$10 \leq Y < 12$	$12 \leq Y < 14$	$Y \geq 14$	DESCIENDE
TM	$Y \geq 5.33$	$5.13 \leq Y < 5.33$	$4.65 \leq Y < 5.13$	$Y < 4.65$	AUMENTA
#TF	$Y < 9$	$9 \leq Y < 11$	$Y = 11$	$Y \geq 12$	DESCIENDE

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

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

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

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

Para el cálculo del IIH se utilizará la información que surja de los componentes hidrológico, hidráulico y de calidad del agua. A continuación, se relacionan las tablas que establecen las

métricas seleccionadas para la construcción del IHH (Tabla 3.7) y las variables utilizadas en la construcción del IHH y sus puntajes (Tabla 3.8).

Tabla 3.7 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IHH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).

Métrica	Tipo	Descripción
Profundidad Relativa	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Medio de la Superficie del Agua] / [Profundidad Media] del tramo estudiado. Corrientes anchas y someras proveen poco hábitat y se calientan excesivamente. Un valor alto de esta métrica corresponde a sitios menos apropiados para el desarrollo de la biota.
Ancho Relativo	Disponibilidad de hábitat	[Ancho Máximo de la Planicie Inundable] / [Ancho Medio del Canal] . El ancho máximo de la planicie es el ocasionado por los caudales máximos. Valores bajos corresponden a lugares con menor interacción entre la zona riparia y el río. Por lo tanto esta relación se hace mayor en sitios más favorables para la biota.
Diversidad de Hábitats	Disponibilidad de hábitat	[Profundidad real del flujo] / [Profundidad normal del flujo] . Una mayor diversidad de hábitats (flujo no uniforme) favorecerá un mejor desarrollo de los distintos grupos de organismos.
Variabilidad de la Corriente	Disponibilidad de hábitat	[Velocidad Promedio Máxima] / [Velocidad Media] . Una mayor variabilidad de la velocidad de la corriente ofrece mejores oportunidades para el desarrollo de una biota más diversa.
Saturación de Oxígeno	Calidad del hábitat	Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el agua. Valores altos de saturación muestran un ambiente físico más apropiado para el buen desarrollo de la biota.
Relación de Nutrientes	Calidad del hábitat	[Nitrógeno Total] / [Fósforo Total] . Una relación ideal de estos dos nutrientes para la biota fluctúa entre 14:1 y 20:1. Relaciones por debajo de 7:1 y por encima de 20:1 desfavorecen un buen desarrollo de los organismos.
Demanda Béntica	Calidad del hábitat	Cantidad de oxígeno requerido por los organismos bentónicos para degradar la materia orgánica ($\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Valores altos pero no exagerados indican una buena disponibilidad de materia orgánica para los individuos de hábito bentónico.

Tabla 3.8 Variables físicas y químicas y sus puntajes, utilizadas en la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IHH) para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).

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

Como se ve en la Tabla 3.8, el puntaje de cada variable oscila entre 0 y 1 (0 para valores que corresponden a sitios donde la variable muestra condiciones de hábitat poco apropiadas para la

biota y 1 para valores donde la variable muestra sitios de buenas características ambientales). El IIIH es la suma de los puntajes de cada variable, dividida por el número de variables. El IIIH fluctúa por tanto entre 0 y 1. Los umbrales propuestos a priori deberán confirmarse o modificarse con base en investigaciones posteriores de campo. Las siglas PR, AR, DH, etc., utilizadas en la siguiente ecuación, corresponden a las variables de la Tabla 3.8.

Índice de integridad de hábitat (IIIH)

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

De acuerdo con el puntaje obtenido con el IIIH la integridad del hábitat se podrá clasificar conforme se especifica en la Tabla 3.9. No se permitirá que el IIIH baje de categoría con el caudal ambiental propuesto, ya que esto estaría indicando un impacto potencial negativo en la integridad del hábitat y por ende en la integridad y calidad de las comunidades de perifiton, macroinvertebrados, vegetación riparia y peces definidas. Los resultados obtenidos reflejarán las condiciones necesarias para el establecimiento y desarrollo de las comunidades y grupos funcionales identificados.

Tabla 3.9 Puntajes del IIIH para la determinación de caudales ambientales en ríos colombianos (MinAmbiente y ANLA, 2013).

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

4 Aspectos de la aplicación de la metodología en el VMM

Se detalla en este capítulo algunos aspectos sobre la información necesaria para la aplicación de la metodología propuesta por el IDEAM-MADS, para el cálculo de los caudales ambientales en tramos de cuerpos de agua. Asimismo, se describen algunas de las otras metodologías usadas para determinar el caudal ambiental en las unidades de nivel subsiguiente.

4.1 Priorización de los cuerpos hídricos y tramos para la aplicación de la metodología

4.1.1 Criterios para la priorización de tramos de interés

Como está diseñada, la metodología MADS-IDEAM para la estimación de caudales ambientales solo es aplicable a escala de tramo o segmento, ello debido al gran volumen de información requerido por cada uno del componente metodológico (Hidrología, Hidráulica, Calidad, Hidrobiología). Los caudales ambientales son específicos para cada tramo, ello considerando su régimen natural, las comunidades hidrobiológicas y las particularidades socio-ambientales. Ante la especificidad de los resultados, surge la pregunta sobre su posible regionalización, esto teniendo en cuenta su aplicación y generalización en el marco de instrumentos asociados a la gestión integral del recurso hídrico.

¿Puede una región específica, con un conjunto de datos limitados, obtener por regionalización resultados confiables de estimación del caudal ambiental aplicando métodos holísticos? La respuesta más probable sería un no debido a que los faltantes de información, si no pueden suplirse, impedirían la aplicación de la metodología esto incluso se complica cuando los resultados de la aplicación de la metodología son múltiples, los cuales representan valores que cambian con el tiempo y la condición climática, o métricas asociadas de los cuales debe proponerse una reproducción.

Conscientes de las limitaciones presupuestales y de información, el presente análisis solo será aplicado en uno tramos pilotos, cuya localización deberá priorizarse para obtener la mejor información disponible. El área de estudio corresponde al área directa y de influencia de las subzonas hidrográficas Opón, Sogamoso y Lebrija Medio-Bajo, incluido tramo del río Magdalena, esto enmarcado dentro del acuerdo de cooperación AC No. 4 3034153 de 2020 cuyo objeto pretende la “Actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad de agua superficial del Valle Medio del Magdalena – VMM”. El área que se está estudiando en todo el convenio abarca la totalidad cuencas de los ríos Lebrija, Sogamoso y Opón. No obstante, el área

de influencia directa de ECOPETROL es mucho menor como se muestra en la Figura 1.1 en la sección 1.1 de área de estudio.

Es por ello, que en el marco de la presente priorización se han definido los siguientes criterios a fin de establecer cuales corrientes a nivel regional son más adecuadas para la aplicación de la metodología considerando la información disponible:

1. Localización al interior de las subzonas hidrográficas priorizadas: Contractualmente, cada tramo piloto debe ubicarse al interior de cada una de las subzonas hidrográficas analizadas.
2. Localización al interior o cercana del área de influencia directa de Ecopetrol: En consideración a la entidad contratante, sería de vital importancia focalizar los esfuerzos para ampliar el conocimiento sobre las características del caudal ambiental dentro del área de influencia de Ecopetrol o sus inmediaciones.
3. Disponibilidad de información hidrometeorológica: De ser posible, se deberá aplicar la metodología de caudal ambiental donde exista hidrometría del IDEAM, de preferencia datos de caudales medios diarios extraídos de estaciones limnimétricas, limnigráficas o automáticas. En caso de no contarse con dicha información, se deberá privilegiar la existencia de datos que permitan calibrar y validar modelos lluvia escorrentía de escala diaria.
4. Existencia de información hidrobiológica y de calidad del agua: La información hidrobiológica y de calidad del agua para adelantar el proceso de cálculo de caudal ambiental es bastante específica. En el caso de calidad del agua se requiere un modelo que permita conocer las capacidades de dilución de contaminantes, a su vez la hidrobiología requiere construir varios indicadores a partir de macro-invertebrados y otras especies.
5. Existencia de información hidráulica o secciones transversales: Cuando existen estaciones de monitoreo hidrológico se lleva un registro continuo de la evolución de la sección transversal donde se construye las curvas nivel caudal. También podría existir un levantamiento topo-batimétrico para efectos de modelación hidráulica.
6. Existencia de estudios de planificación en Gestión Integral del Recurso Hídrico: Las cuencas de los ríos Opón, Sogamoso y Lebrija poseen planes de Ordenamiento y Manejo de cuencas Hidrográficas (POMCAS), en general se desea conocer otro tipo de información asociada a los usos del agua y la demanda hídrica (tanto agregada como local) para cada tramo de interés.
7. Posible complementación con los resultados de otras componentes del convenio: El convenio entre el IDEAM y ECOPETROL arrojará en la presente vigencia información importante sobre la cantidad, la calidad y el uso del agua a escala regional. Es importante saber que parte de dicha información podrá ser incorporada dentro del presente análisis.
8. Potencial de seguimiento y mejora: es importante observar, si en los tramos analizados es posible desarrollar a futuro mayores análisis que permitan mejorar las estimaciones de caudal ambiental, esto podría implicar determinar la facilidad para estructurar campañas topo-batimétricas que

amplíen el alcance de los modelos hidráulicos, el futuro desarrollo de monitoreo de calidad e hidrobiológicos, así como la posible construcción de modelos de calidad del agua.

9. Relevancia en su aplicación: La metodología para el cálculo del caudal ambiental se encuentra en fase de evaluación, siendo muy pocos los casos en los cuales se aplicado país, sería importante implementar esta metodología en situaciones con objetivos diferentes, y tengan cierta relevancia, como, por ejemplo, cuando el río se encuentra controlado por un embalse, o cuando se carece de información hidrológica y debe acudir a la modelación. También es importante aplicar la metodología en cuencas con especial relevancia ecológica regional, o donde exista una amenaza desde el uso del agua o una posible afectación a su calidad las áreas de producción.
10. Accesibilidad: Se buscará que los tramos seleccionados sean fácilmente accesibles por carretera para efectos de monitoreo y seguimiento.

4.1.2 Corrientes objeto de priorización en la región del Valle del Magdalena Medio (VMM)

A nivel regional, se presentan las siguientes cuencas, localizadas en el área de interés para Ecopetrol o sus inmediaciones, considerando las subzonas hidrográficas del convenio.

Río Opón:

- Cauce principal: Representa uno de los límites del área de influencia de ECOPEPETROL, posee hidrometría, y POMCA formulado.
- Quebrada la Vizcaína: Afluente menor del río Opón, alimenta la ciénaga El Opón, ubicado dentro del área de influencia ECOPEPETROL. No posee hidrometría y es de extensión pequeña
- Río La Colorada: Mayor afluente del río Opón dentro del área de influencia de Ecopetrol, abarca casi todo el bloque Centro, posee hidrometría
- Río Oponcito: Afluente del río La Colorada. No posee hidrometría, se encuentra dentro del área de influencia.

Río Sogamoso:

- Cauce principal: Atraviesa el área de influencia de Ecopetrol, en particular el bloque petrolero Llanito, es un río controlado hidrológica e hidráulicamente por el proyecto Hidrosogamoso. Es quizás uno de los ríos más importantes del país. Posee buena hidrometría, y el modelo hidráulico desarrollado al interior del convenio comprende una parte del río Sogamoso.
- Quebrada la Vizcaína - Zarzal ciénaga san silvestre: Se encuentra al interior del área de interés para ECOPEPETROL, es afluente del río Sogamoso, posee hidrometría, pero las estaciones se encuentran dentro de la ciénaga o salieron de circulación.
- Río Sucio: Mayor afluente del río Sogamoso en la región, no posee hidrometría y se encuentra por fuera del área de influencia.

- Caño Corazones: afluente del río Sogamoso, se encuentra al interior del área de influencia, no posee hidrometría.

Río Lebrija:

- Cauce principal: El cauce principal se encuentra por fuera del área de influencia de Ecopetrol, posee buena hidrometría.
- Quebrada la Gómez: Es el afluente del río Lebrija que se encuentra más cerca del área de influencia de Ecopetrol. Hizo parte del estudio del proyecto: “Línea base para el ordenamiento del recurso hídrico de la Subcuenca hidrográfica de las quebradas La Gómez, Santos Gutiérrez, Pescado, Islitas, Caño Peruétano y Ciénaga Paredes ubicada en los municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander.” El cual realizó UNISANGIL para ECOPETROL y la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS, en el año 2015.
- Quebrada La Pescado: Afluente del río Lebrija cercano al área de influencia de ECOPETROL. Hizo parte del estudio del proyecto: “Línea base para el ordenamiento del recurso hídrico de la Subcuenca hidrográfica de las quebradas La Gómez, Santos Gutiérrez, Pescado, Islitas, Caño Peruétano y Ciénaga Paredes ubicada en los municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander.” El cual realizó UNISANGIL para ECOPETROL y la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS, en el año 2015.
- Quebrada Santo Gutiérrez: Afluente del río Lebrija cercano al área de influencia de ECOPETROL. Hizo parte del estudio del proyecto: “Línea base para el ordenamiento del recurso hídrico de la Subcuenca hidrográfica de las quebradas La Gómez, Santos Gutiérrez, Pescado, Islitas, Caño Peruétano y Ciénaga Paredes ubicada en los municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander.” El cual realizó UNISANGIL para ECOPETROL y la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS, en el año 2015.

4.1.3 Criterios para la priorización de tramos de interés

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados del proceso de priorización de los tramos objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental, incluyendo los puntajes asignados a cada criterio. Los tramos seccionados para la aplicación de la metodología son fueron: por la subzona hidrográfica del río Opón el río La Colorada con 80 puntos, por las subzona hidrográfica del río Sogamoso, el cauce principal del río Sogamoso con 100 puntos, y por la Subzona hidrográfica del río Lebrija, la quebrada La Gómez con 75 puntos.

En el caso de la quebrada la Colorada, pesa mucho estar al interior de uno de los bloques de producción de ECOPETROL (Bloque centro), además de tener hidrometría y buena accesibilidad, su tamaño la convierte en uno de los afluentes más relevantes del río Opón a nivel regional.

El río Sogamoso será un caso bastante interesante pues posee muy buena hidrometría, empresas como ISAGEN posee un historial de monitoreo de la cantidad, la calidad y la hidrobiología, que de acceder al mismo será de especial relevancia en la aplicación de la metodología, el río es de fácil acceso, además de estar controlado por una presa de gran tamaño y ubicarse al interior del área de estudio, será un caso de especial interés para la aplicación de la metodología.

La quebrada La Gómez se caracteriza por tener un PORH en curso, esto implica que sobre la misma existe un modelo de calidad del agua, gran información hidrobiológica y un modelo lluvia escurriente calibrado y validado de manera regional. La cuenca es de especial interés ecológico por alimentar la ciénaga de paredes, lugar de refugio para los manatís en la zona.

Tabla 4.1 Priorización de las fuentes hídricas objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental

Criterio	Río-Opón				Río-Sogamoso				Río-Lebrija			
	Cauce-principal	Quebrada-la-Vizcaína	Río-La-Colorada	Río-Oponcito	Cauce-principal	Quebrada-Zarzal	Río-Sucio	Caño-Corazones	Cauce-principal	Quebrada-La-Gómez	Quebrada-Pescado	Quebrada Santos-Gutiérrez
Interior-Subzona	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Área-de-Interés	5	10	10	8	10	10	5	5	0	5	3	4
Información-hidrologica	10	0	10	0	10	5	0	3	10	10	10	10
Hidrobiología-y-Calidad	5	0	0	0	10	0	0	0	5	10	10	10
Información-Hidráulica	5	0	5	0	10	3	0	0	5	0	0	0
POMCA	10	5	5	3	10	3	3	3	10	5	5	5
Complementariedad	10	3	10	3	10	3	3	0	10	5	5	5
Seguimiento-y-mejora	10	3	10	3	10	3	3	0	10	10	8	8
Relevancia	3	3	10	3	10	5	3	3	3	10	5	10
Accesibilidad	10	3	10	3	10	3	3	5	10	10	5	10
TOTAL	78	37	80	35	100	45	30	29	73	75	61	72

Puntajes según el criterio

- Estar al interior de la subzona: 0: si no está, 10: si está
- Estar al interior o cerca del área de interés: 0: Está por fuera, 5: está cerca, 8: está parcialmente.
- Información hidrológica: 0: no posee hidrometría, 3: Información muy desactualizada, 5: información desactualizada, 10 Posee información.
- Hidrobiología y calidad: 0: No existe información, 5: Solo la información del POMCA o monitoreos, 10: Información detallada (PORH).
- Información Hidráulica: 0: No existe información, 5: Solo sección transversal en estación hidrológica: 10: Modelo Hidráulico.
- POMCA: 0: La cuenca no posee POMCA, 3: La cuenca es poco relevante dentro del POMCA, 5: medianamente relevante, 10: La cuenca posee POMCA.
- Complementariedad: 0: Los resultados del proyecto no complementan la información, 3: Poco complementan, 5: Complementan medianamente, 10: Complementan.
- Seguimiento y Mejora: 0: No hay potencial de seguimiento y mejora, 3: Poco potencial, 5: Mediano potencial, 8: Con buen potencial, 10: Con alto potencial.

- Relevancia: 0: La cuenca es poco relevante social, ecológica o económicamente, 3: Poca relevancia, 5: Mediana relevancia, 8: Buena relevancia, 10: Alta Relevancia.
- Accesibilidad: 0: No hay acceso, 3: De difícil acceso, 5: Con acceso moderado, 8: Con buen acceso, 10: de fácil acceso

4.2 Información hidrológica básica disponible para la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación del caudal ambiental

4.2.1 Información cartográfica disponible

Se cuenta con la cartografía base 1:25.000 del IGAC la cual incluye curvas de nivel, red de drenaje sencilla, red de drenaje doble, bancos de arena y cuerpos lenticos (ciénagas, lagos, lagunas). Además de la red de canales y la infraestructura existente, la cual incluye ubicación de carreteras, pasos de líneas de energía, cascos urbanos, centros poblados, etc.

El proyecto en general cuenta con cartografía actualizada de las subzonas hidrográficas y las subdivisiones de nivel sub-siguiente, La definición del área de influencia, así como el área de interés de ECOPETROL. Además, existen los polígonos que demarcan los campos o bloques de extracción petrolera.

De manera general, se ha definido un modelo digital de terreno (MDT) de referencia para el proyecto, con resolución de 30m y abarca todas las subzonas hidrológicas, igualmente se cuenta con los MDT ajustados por el IGAC para el desarrollo de los Planes de Ordenación y Manejo de las Cuencas de interés (POMCAs ríos Opón, Sogamoso, y Lebrija). Igualmente se dispone del modelo Alos Palsar de 12.5 m de resolución para los tramos de estudio.

4.2.2 Información hidrológica

Sobre el río La Colorada, luego de su confluencia con el río Oponcito, el IDEAM posee la estación AYACUCHO - AUT [23147040], estación automática con telemetría, instalada el 14 de octubre de 1992, por lo cual cuenta con 29 años de registro continuos. Los datos extraídos la presente estación, corresponden a datos de caudales medios diarios, caudales medios mensuales, caudales máximos instantáneos mensuales y caudales mínimos instantáneos mensuales.

Para el río Sogamoso se tiene la estación PUENTE SOGAMOSO - AUT [24067020], también automática, instala el 14 de octubre de 1992. Por lo cual existen 29 años de registro. Se cuenta con datos de caudales medios diarios, caudales máximos y mínimos instantáneos, además de los caudales medios mensuales.

Básicamente la información hidrológica existente es necesaria y suficiente para la aplicación de la metodología en su componente hidrológica.

La cuenca de la quebrada La Gómez fue estudiada en el marco del proyecto: “Línea base para el ordenamiento del recurso hídrico de la Subcuenca hidrográfica de las quebradas La Gómez, Santos Gutiérrez, Pescado, Islitas, Caño Peruétano y Ciénaga Paredes ubicada en los municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander.” El cual realizó UNISANGIL para ECOPETROL y la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS, en el año 2015. En dicho proyecto se calibró y validó un modelo lluvia-escorrentía de escala diaria, específicamente el modelo de tanques, con el cual se simularon los caudales medios diarios de la quebrada La Gómez. El modelo está disponible para simular los caudales en cualquiera de los puntos a lo largo de la red de drenaje, los aspectos conceptuales y metodológicos del proceso de simulación serán abordados más adelante.

4.2.3 Información hidráulica

Para el tramo del río La Colorada no existe un levantamiento topo-batimétrico; no obstante, sobre la estación AYACUCHO – AUT hay un registro histórico la sección transversal sobre la cual se ubica la estación automática. Dicha información, con el registro de los aforos y la hidrología básica, podrían servir para estimar algunas de las métricas hidráulicas y de calidad del agua solicitadas por la metodología para la evaluación del caudal ambiental.

En el caso del río Sogamoso, existe información topo-batimétrica levantada en el marco del presente convenio para calibrar el modelo hidráulico del río Magdalena para el pronóstico hidrológico. También la estación PUENTE SOGAMOSO posee un registro con la evolución de la sección transversal en el sitio de aforo.

Finalmente, para la quebrada La Gómez, no existe información hidráulica.

4.2.4 Estudios e información adicional relevante

- Monitoreo y seguimiento limnológico, Central Hidroeléctrica Sogamoso. Plan de Manejo Ambiental: estudio y monitoreo desarrollado por la Universidad Católica de Oriente (UCO) con sede en la ciudad de Rionegro Antioquia para la empresa privada de generación y comercialización de energía ISAGEN. El tramo de monitoreo justamente corresponde al río Sogamoso aguas abajo del sitio de presa, y de forma recurrente se analizan las condiciones hidrológicas (aforos), de calidad e hidrobiológicas del río. A la fecha se tiene el contacto de las entidades involucradas y se está en solicitud de la información hidrobiológica y de calidad existente.
- Línea base para el ordenamiento del recurso hídrico de la Subcuenca hidrográfica de las quebradas La Gómez, Santos Gutiérrez, Pescado, Islitas, Caño Peruétano y Ciénaga Paredes ubicada en los

municipios de Sabana de Torres y Puerto Wilches, Santander. Estudio adelantado por UNISANGIL para ECOPEPETROL y la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS, en el año 2015. Como todo PORH posee un estudio hidrológico robusto, así como un monitoreo de calidad del agua e hidrobiológico obtener el registro de una colección biológica de referencia de macro invertebrados acuáticos, identificada con el acrónimo CBMUS. Dicho registro fue otorgado por El Instituto Alexander Von Humboldt, adscrito al Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Además, el PORH desarrolló los modelos para la simulación de la calidad del agua en las fuentes de interés, y por tanto se puede considerar que la quebrada la Gómez es la única que cuenta con dicha información.

- Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica (POMCA) del río Opón (código 2314): estudio adelantado por el consorcio Santander POMCA Ambiental Opón, con interventoría del fondo de adaptación, y aprobado por la CAS en el año 2018, cuenta con información de referencia sobre la cartografía, la hidrología, la calidad del agua, los usos del suelo y la gestión del riesgo (inundaciones) en el área de interés.
- Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica (POMCA) del río Sogamoso (código 2405): estudio adelantado por el consorcio Santander POMCA Ambiental, con interventoría del fondo de adaptación, y aprobado por la CAS en el año 2018, cuenta con información de referencia sobre la cartografía, la hidrología, la calidad del agua, los usos del suelo y la gestión del riesgo (inundaciones) en el área de interés.
- Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica (POMCA) afluentes directos al río Lebrija Medio (código 2319-04): estudio adelantado por el consorcio Santander POMCA Ambiental, con interventoría del fondo de adaptación, y aprobado por la CAS en el año 2018, cuenta con información de referencia sobre la cartografía, la hidrología, la calidad del agua, los usos del suelo y la gestión del riesgo (inundaciones) en el área de interés.
- Los detalles de la información hidrobiológica extraída de los estudios mencionados serán presentados por el profesional encargado.

4.2.5 *Idoneidad de la información disponible*

Desde el punto de vista hidrológico, se considera que la información existente es suficiente, posee buena longitud de registro y además puede considerarse idónea para estimar el caudal ambiental desde la componente hidrológica (objeto principal del presente trabajo).

En cuanto a la información hidráulica, solo el río Sogamoso contaría con los datos necesarios para la aplicación de la metodología. En el caso del río La Colorada, usando la sección transversal del área de estudio y algunas mediciones en campo asociadas a la pendiente del canal, además de algunos aforos históricos, podría considerarse el ajuste de un modelo hidráulico bajo flujo uniforme con énfasis en la estación de aforo, lugar donde además se colectarán las especies hidrobiológicas durante la fase de campo. Aun cuando no es la condición ideal, la presente aproximación podrá

servir de base para el establecimiento de métricas como el caudal de banca llena y el caudal de conectividad longitudinal descritos en la metodología. Para la quebrada la Gómez, es necesario levantar una sección transversal, preferentemente con un aforo, en el sitio donde se colecten las muestras hidrobiológicas durante la campaña de campo.

Desde la calidad del agua, no existe información en el río la Colorada, salvo lo que pueda encontrarse en las bases de datos de la CAS, lo que exista en el POMCA del Opón, o pueda levantarse en una salida de campo posterior. Para el río Sogamoso y la Quebrada la Gómez, nos apegamos a la información de monitoreo existe en el PORH o disponible por parte de ISAGEN.

Desde la hidrobiología, se espera encontrar buena línea base en los estudios existentes, o en sus defectos, colectar las muestras necesarias dentro de la campaña de campo desarrollada entre del 6 al 10 de septiembre.

En la Tabla 4.2 se presenta un resumen, sobre la calidad de la información existente para aplicar la metodología de caudal ambiental en los tramos priorizados. El color verde indica idoneidad de la información, el color naranja implica que se pueden adelantar algunas aproximaciones para obtener resultados parciales mientras se mejora la información, y el color rojo representa un déficit de información que implica paro en la aplicación metodológica. Son ruta crítica en la aplicación completa de la metodología la topobatimetría de la quebrada la Gómez y el río La Colorada. Además de la construcción de los modelos de calidad del agua sobre La Colorada y el río Sogamoso.

Tabla 4.2 Resumen sobre la calidad de la información para la aplicación completa de la metodología de caudales ambientales

Componente al cual pertenece la información	Río la Colorada (Afluente río Opón)	Río Sogamoso	Quebrada La Gómez (Afluente río Lebrija)
Hidrología	Información hidrológica completa.	Información hidrológica completa.	Información hidrológica proveniente del modelo lluvia escorrentía - PORH
Hidráulica	Sección transversal en estación de monitoreo.	Topobatimetría modelo hidráulico de pronóstico	No existe información
Calidad del agua	Monitoreos POMCA. Posible monitoreo noviembre 2021.	Monitoreos POMCA. Posible línea base ISAGEN. Posible monitoreo noviembre 2021.	Modelo de calidad del agua del PORH. Monitoreos POMCA. Posible monitoreo noviembre 2021.
Hidrobiología	Línea base visita de campo.	Línea base ISAGEN Línea base visita de campo	Línea Base del PORH. Línea Base visita de campo.

4.3 Reporte de la campaña de campo sobre información hidrológica e hidráulica

Durante los días 06 y 09 de septiembre del año 2021 se desarrolló la campaña de campo por parte del grupo de modelación, en el marco del acuerdo de cooperación No. 3034153 de 2021 IDEAM – ECOPETROL, cuyo principal objeto fue el de: Reconocer procesos naturales asociados al flujo de agua, sedimentos y sustancias químicas que se relacionan con procesos biológicos y recoger muestras hidrobiológicas para la componente de caudal ambiental del área de influencia.

En el caso de la componente caudal ambiental, la visita de campo buscaba adelantar las siguientes actividades:

- Visita a las fuentes hídricas priorizadas objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental.
- Análisis de las condiciones geomorfológicas de los tramos objetos de aplicación de la metodología.
- Observación de los principales procesos de agradación o degradación del cuerpo de agua.
- Identificación cualitativa de los niveles de banca llena, secciones transversales, pendiente media del cauce y coeficientes de rugosidad.
- Ubicación y reconocimiento de las estaciones hidrológicas automáticas sobre las corrientes objeto de interés.
- Análisis sobre la implementación futura de monitoreos hidrológicos y de calidad del agua.
- Apoyo a la componente hidrobiológica en la toma de muestras.

En función de la GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL AMBIENTAL, se adelantó la recolección de información primaria con el ánimo de llenar las fichas de recopilación y consolidación de información de campo. En ésta se recoge la información que apunta hacia una caracterización objetiva (hidrométrica y morfológica) en cada uno de los sitios de monitoreo. La ficha contiene:

- I. Localización y descripción del sitio de monitoreo: Mediante la georreferenciación.
- II. Propiedades de sección transversal y tramo: Proviene información local, en particular los registros históricos de aforos del IDEAM.
- III. Tipo morfológico: Identificación visual y definición a partir de categorías de clasificación preestablecidas.
- IV. Sección transversal: El levantamiento de la sección transversal en el sitio de monitoreo.

Aun cuando la visita se esperaba efectuar en época de bajas afluencias, la primera y semana de septiembre de 2020 fue caracterizada por altas precipitaciones creando alerta de crecientes en la región, seguidas de un proceso de apertura en las compuertas del embalse Sogamoso. Las fuentes priorizadas para la visita de campo son bastante grandes, en algunos recorridos se accedió por lancha, en otros casos se puede acceder a los sitios de monitoreo desde las orillas, facilitando la toma de muestras y el chequeo de las condiciones de flujo.

Para efectos hidrológicos, la visita de campo es importante para unir los datos y registros existentes en el IDEAM con las métricas que desde el campo se puedan tomar, en particular las observaciones aproximadas sobre la pendiente del cauce, el nivel de banca llena, la localización de las estaciones de aforo entre otras actividades que den luces en el proceso de cálculo del caudal ambiental.

4.3.1 Resultados de la campaña de campo para el río Sogamoso

La estación Puente Sogamoso se ubica en el corregimiento del mismo nombre del municipio de Puerto Wilches, posee una elevación de 90 m.s.n.m. en visita de campo se identificó que el material del lecho corresponde a cantos rodados con tamaño superior a los 64 milímetros observables en las orillas del río. No se tomaron muestras para granulometría per es común ver dicho material a lo largo de las orillas e islas del río Sogamoso conforme se pudo comprobar en la visita de campo.

Para definir características como el ancho del río en condición de banca llena, se tiene como referencia los aforos adelantados periódicamente por el IDEAM, incluyendo el levantamiento de la sección transversal. Allí se define como cota de desborde la 95.81 msnm y cota de fondo de 87.26 msnm.

Como parámetro de banca llena se tomará la cota de desborde. Una forma indirecta de estimar el caudal de banca llena corresponde al uso de la ecuación de Manning considerando las principales propiedades hidráulicas en banca llena bajo condiciones de flujo uniforme:

Material: Cantos

Manning (n)= 0.060 (río de planicie, pozos profundos, cantos y pendiente ineficiente, valor máximo)

Área Mojada banca llena (Aproximada)= 1336 m²

Perímetro mojado banca llena (Aproximado)= 177.78 m

Radio Hidráulico banca llena: 7.52 m

Pendiente del tramo: 0.00034 m/m

Caudal de banca llena estimado: 1575.8 m³/s

En general la sección de control es bastante estable y han existido pocos cambios en el registro histórico que posee el IDEAM. Para llenar los demás datos de la tabla se usó un aforo del 02 de diciembre de 2013 cuyo caudal estimado fue de 404.5 m³/s. En la Figura 4.1 se presenta la sección de aforo y sus principales características, una vista de dicha estación se presenta en la Figura 4.2 y los datos de campo para Puente Sogamoso se muestra en la Figura 4.3.

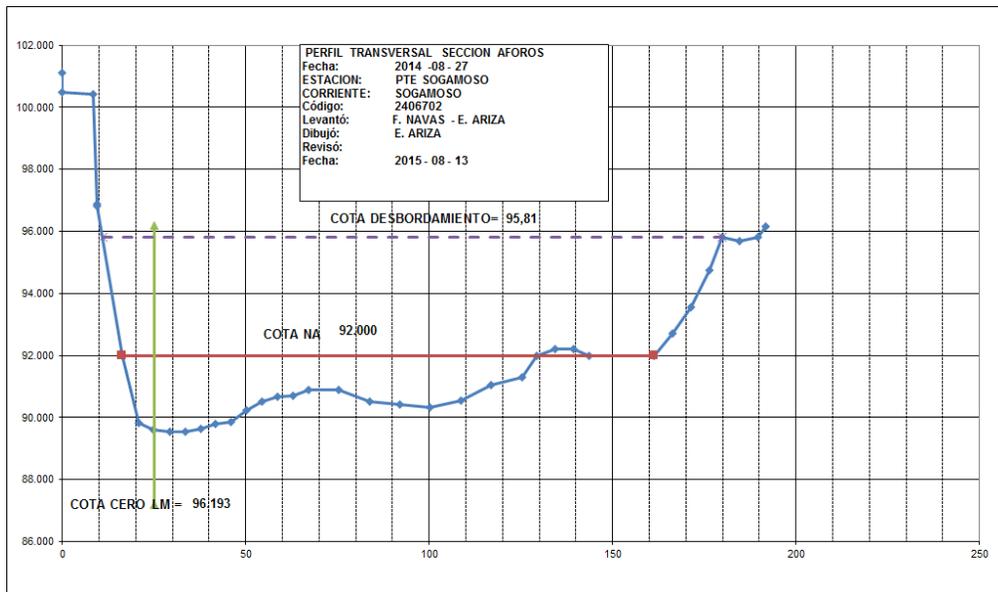


Figura 4.1 Sección transversal de la estación puente Sogamoso (2406702)



Figura 4.2 Localización vista general de la estación puente Sogamoso (2406702)

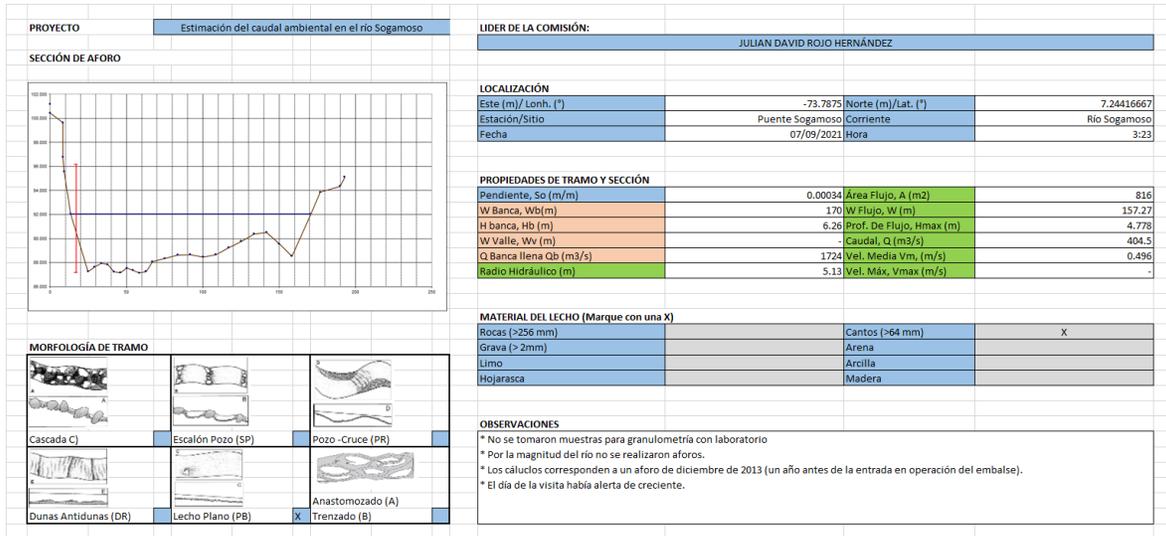


Figura 4.3 Ficha de campo de la estación puente Sogamoso (2406702)

4.3.2 Resultados de la campaña de campo para el río La Colorada

La visita a dicha estación se presentó el día 9 de septiembre de 2021 en horas de la mañana. La estación automática se ubica bajo un puente metálico en límites entre los municipios de Simacota y Barrancabermeja, a la altura del corregimiento El Centro sobre la vía Nacional conocida como ruta del sol. El material de lecho observado corresponde a rocas de gran tamaño (superiores a 256 mm), notables porque son mayores a las encontradas en el río Sogamoso y de fácil observación en las orillas del cauce.

Según los registros del IDEAM la cota de desborde es de 88.67 msnm, y teniendo la sección de aforo levantada, puede procederse al cálculo del caudal de banca llena con los siguientes datos:

Material: Rocas

Manning (n)= 0.080 (río de planicie, pozos profundos, cantos y pendiente ineficiente, valor máximo)

Área Mojada banca llena (Aproximada)= 523.1 m²

Perímetro mojado banca llena (Aproximado)= 83.28 m

Radio Hidráulico banca llena: 6.28 m

Pendiente del tramo: 0.00027 m/m

Caudal de banca llena estimado: 365.8 m³/s

En cuanto a la sección de aforo los cálculos fueron efectuados con un aforo del IDEAM del 18 de marzo del 2017, la sección ha sido relativamente estable.

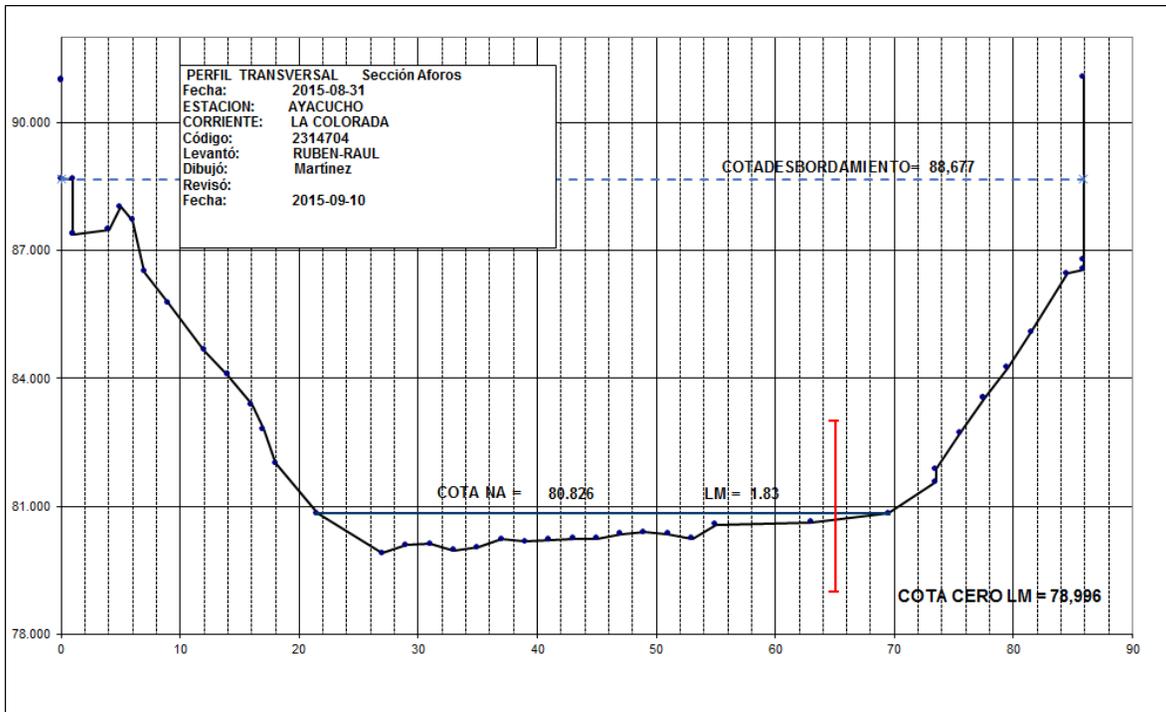


Figura 4.4 Sección transversal de la estación Ayacucho (2314704)



Figura 4.5 Localización vista general de la estación Ayacucho (2314704)

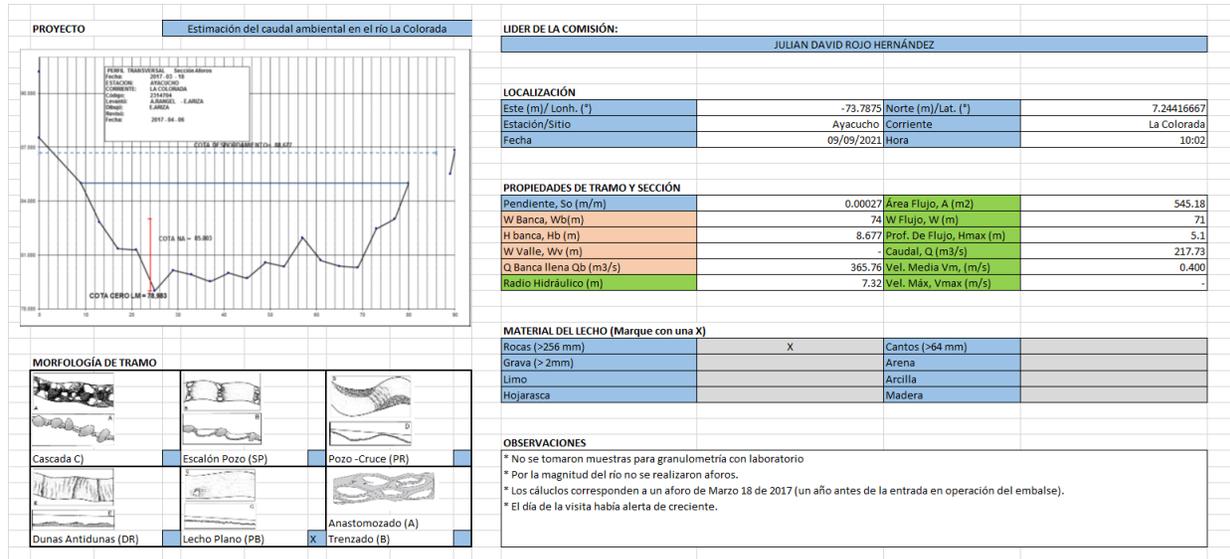


Figura 4.6 Ficha de campo de la estación Ayacucho (2314704)

4.3.3 Resultados de la campaña de campo para la quebrada La Gómez

La quebrada la Gómez no posee estación limimétrica o limingráfica que lleve un registro continuo de los caudales en su cauce principal. No obstante, se ha definido como sitio de monitoreo el parador turístico sobre el cruce de la quebrada La Gómez con la ruta 45 (ruta del Sol) a la altura del corregimiento La Gómez, 400 metros antes de las partidas para el municipio de Sabana de Torres.

La morfología del tramo es del tipo pozo-cruce claramente definido, y cuenca con una planicie de inundación que no parece ser muy amplia. En general el nivel de desborde se aprecia a una altura que puede variar entre los 2 y 2.5 metros desde la base del canal, las bancas son relativamente verticales, y se observa exposición de raíces a entre 1.7 y 2 metros de elevación. De manera tentativa se definirá la elevación de la Banca llena a 2 m. Considerando estas precisiones, se puede aproximar el cálculo del caudal de banca llena para la quebrada la Gómez de la siguiente forma:

Material: Cantos

Manning (n)= 0.060 (río de planicie, pozos profundos, cantos, valor máximo)

Área Mojada banca llena (Aproximada)= 46 m²

Perímetro mojado banca llena (Aproximado)= 27 m

Radio Hidráulico banca llena: 1.70 m

Pendiente del tramo: 0.00179 m/m

Caudal de banca llena estimado: 46.21 m³/s

Para llenar los demás datos de campo se tomaron velocidades superficiales con flotadores arrojando un aproximado de 0.52 m/s. la profundidad media durante la toma de muestras hidrobiológicas fue de 40 cm. La quebrada La Gómez se encuentra bastante cubierta por los árboles que crecen en la planicie de inundación y es común encontrar dentro del material del lecho hojarasca y troncos grandes dentro de los pozos. Para esta quebrada el valor del caudal de banca llena debe ser un valor a refinar dado que los caudales medios diarios serán estimados por simulación haciendo importante el chequeo de los órdenes de magnitud



Figura 4.7 Localización vista general de la quebrada La Gómez en el sitio de interés

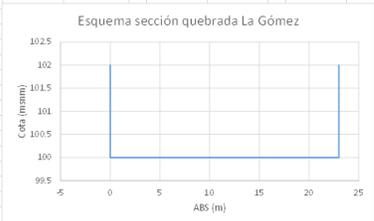
PROYECTO Estimación del caudal ambiental quebrada La Gómez.		LIDER DE LA COMISIÓN: JULIAN DAVID ROJO HERNÁNDEZ													
SECCIÓN DE AFORO Esquema sección quebrada La Gómez 		LOCALIZACIÓN Este (m)/ Lonh. (°) -73.53 Norte (m)/Lat. (°) 7.35 Estación/Sitio Cruce La Gómez Ruta 45 Corriente La Gómez Fecha 10/09/2021 Hora 10:30													
MORFOLOGÍA DE TRAMO <table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>					<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	PROPIEDADES DE TRAMO Y SECCIÓN Pendientes, So (m/m) 0.00179 Área Flujo, A (m2) 8 W Banca, Wb(m) 23 W Flujo, W (m) 20 H banca, Hb (m) 2 Prof. De Flujo, Hmax (m) 2 W Valle, Wv (m) - Caudal, Q (m3/s) 4.16 Q Banca Ilena Qb (m3/s) 46.214 Vel. Media Vm, (m/s) 0.520 Radio Hidráulico (m) 7.32 Vel. Máx, Vmax (m/s) -	
			<input checked="" type="checkbox"/>												
			<input type="checkbox"/>												
			<input type="checkbox"/>												
		MATERIAL DEL LECHO (Marque con una X) Rocas (>256 mm) Cantos (>64 mm) X Grava (>2mm) Arena Limo Arcilla Hojarasca Madera													
		OBSERVACIONES * No se tomaron muestras para granulometría con laboratorio * El material del río es uniforme y corresponde a cantos rodados. * La profundidad media del flujo fue estimada en 40 cm mientras que el ancho total del cauce es de 20 m. * La velocidad de la fuente se midió tres veces con flotador, siendo aproximadamente de 0.52 m/s * El día de la visita el flujo se encontraba en condiciones normales. * Las bancas fueron estimadas en 2,3 metros desde el fondo desde la base del cauce.													

Figura 4.8 Ficha de campo de la quebrada La Gómez en el sitio de interés

4.4 Aspectos de la aplicación del análisis hidrobiológico

se establece la metodología considerada para el análisis de las comunidades hidrobiológicas de macroinvertebrados acuáticos y algas perifíticas, en el marco de la estimación de caudal ambiental en tres tramos correspondientes a las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio – Bajo.

Las etapas metodológicas contemplaron el análisis de estructura y composición de las comunidades, resultado del monitoreo realizado en campo, de igual forma se estimaron diferentes índices ecológicos a partir del análisis e interpretación de la estructura y composición. Finalmente, con base en las modelaciones hidrológicas e hidráulicas, y los monitoreos de calidad de agua, se realizó una aproximación del índice de integridad de hábitat para los tramos de interés (Figura 4.9).

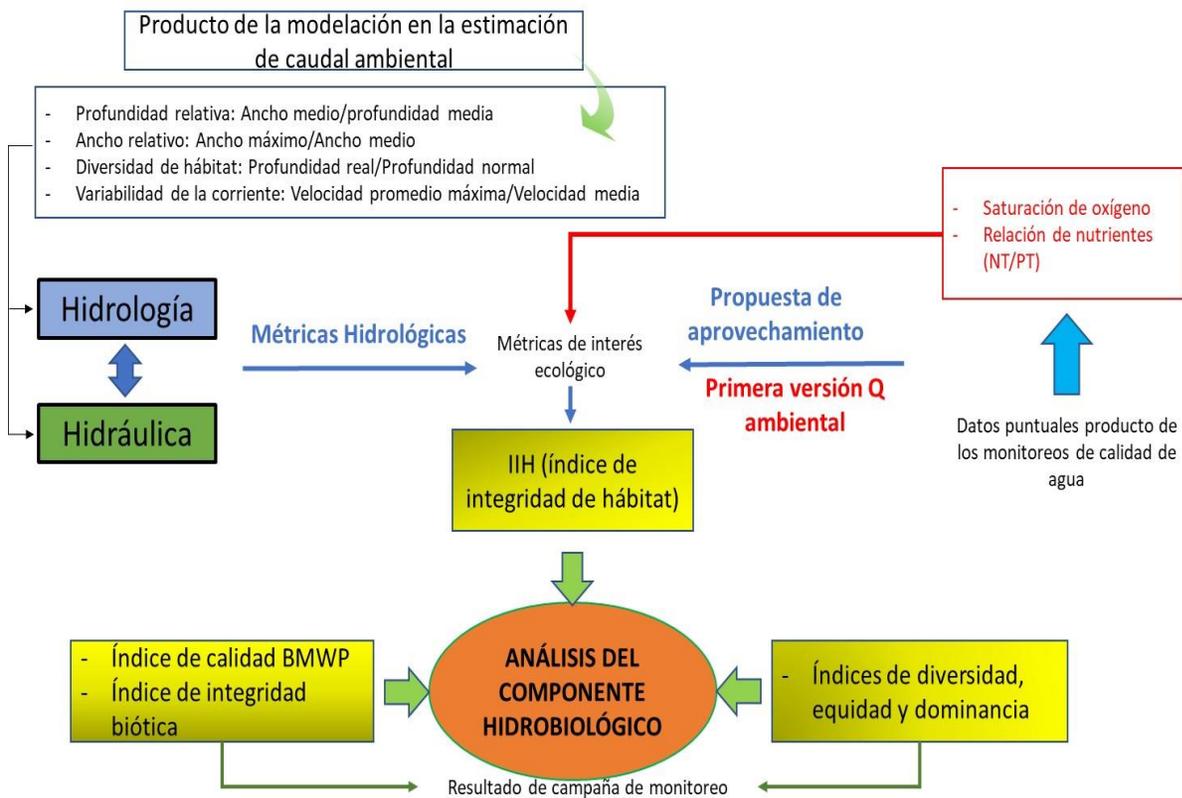


Figura 4.9 Esquema metodológico para el análisis de comunidades hidrobiológicas

4.5 Reporte del monitoreo de campo hidrobiológico

La campaña de monitoreo en el marco del acuerdo de cooperación ECOPETROL - IDEAM se llevó a cabo entre el 6 y 10 de septiembre de 2021. En dicha salida de campo se realizó el reconocimiento de cada una de las corrientes priorizadas para la estimación de caudal ambiental, río Sogamoso (Puente Sogamoso), Quebrada La Gómez y río La Colorada.

En cada uno de los tramos seleccionados, bajo los criterios antes descritos, se tomaron muestras de dos comunidades hidrobiológicas: macroinvertebrados acuáticos y algas perifíticas (Figura 4.10). En la Quebrada La Gómez fue posible realizar el muestreo de macroinvertebrados en dos tipos de hábitats (poza y rápido), mientras que en Puente Sogamoso y Río La Colorada no fue posible dadas las condiciones de la corriente y los altos caudales que presentaban los sitios de muestreo.



Puente Sogamoso



Quebrada La Gómez



Río La Colorada

Figura 4.10 Sitios de muestreo hidrobiológico

4.5.1 Clasificación taxonómica de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos

Los individuos colectados se almacenaron en 7 bolsas ziploc y se encontraban debidamente conservados en alcohol, también se colectaron muestras en frascos de plástico con algunas taxones debidamente conservados y rotulados, tal como se observa en la Figura 4.11. Las ninfas fueron extraídas de forma manual en bandejas plásticas al realizar el lavado de las muestras (Figura 4.12).

Los individuos fueron depositados en alcohol al 96% y debidamente rotulados. Para la identificación taxonómica de los géneros/morfotipos se emplearon las claves taxonómicas de Usinger (1968), Edmondson (1959), Edmunds et al. (1976), Pennak (1978), Domínguez, Hubbard, y Peters (1992), Merritt y Cummins (1996), Roldan (1996), Ross et al. (2000), Ross et al. (2002), Posada y Roldán (2003), Manzo (2005), Domínguez y Fernández (2009), Manzo y Archangelsky (2014), Gutiérrez y Dias (2015), Laython (2017), y Gutiérrez y Reinoso (2017). También se realiza consulta con algunos taxónomos expertos por grupos.



Figura 4.11 Almacenamiento de muestras.



Figura 4.12 Extracción de ninfas de los paquetes de muestras.

En la Tabla 4.3 se muestra la codificación de cada uno de los sitios de muestreo considerados en el monitoreo.

Tabla 4.3 Códigos asignados a las 6 estaciones de muestreo correspondientes a una campaña de colecta de muestras.

Código	Quebrada	Parcela	sitio
QGP1P	Qbd. La Gómez	P1	Poza
QGP2P	Qbd. La Gómez	P2	Poza
QGP1R	Qbd. La Gómez	P1	Rápido
QGP2R	Qbd. La Gómez	P2	Rápido
PS	Puente Sogamoso	P1	Orilla
RCP1O	Río la Colorada	P1	Orilla

En cada una de las 6 estaciones se utilizó la misma técnica de muestreo, es decir, en cada una de estas, las muestras fueron colectadas con una réplica de la red surber cuya área es de 900 cm². El valor de abundancia corresponde al #de individuos/900cm². Por esta razón en todos los puntos se reporta el valor con la abundancia y no es necesario hacer alguna calibración a estos valores.

4.5.2 Clasificación taxonómica de la comunidad de algas perifíticas

En primera instancia se realizó un análisis de la estructura taxonómica de la comunidad de algas perifíticas, que consistió en cuantificar numéricamente el comportamiento de niveles de clasificación taxonómica.

La estructura numérica de la comunidad de algas perifíticas se describió inicialmente por medio de la elaboración de curvas de abundancia numérica relativa por cada punto de monitoreo, con el propósito de visualizar la distribución de cada uno de los taxones en el total obtenido y de esta forma detectar tendencias de dominancia o equidad.

4.6 Métricas de interés ecológico hidrobiológico

Las métricas de interés ecológico que fueron calculadas son las que se presentan en el esquema metodológico, donde se incluyen las estimaciones de los índices de diversidad, equidad y dominancia para cada comunidad, el índice BMWP y IIB para la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, y finalmente la estimación del IIH, de acuerdo con las variables resultantes de la modelación hidrológica e hidráulica en los sitios correspondientes a los tramos del Río Sogamoso y Río La Colorada. Las variables de calidad de agua que se tuvieron en cuenta fueron saturación de oxígeno y relación de nutrientes (Nitrógeno total/Fósforo total), estas variables se consideraron

como valores puntuales, producto de los monitoreos de calidad de agua en el marco del acuerdo, y no como resultado de la modelación de calidad, ya que en este punto no se cuenta con dicha modelación.

4.7 Aplicación de la metodología IDEAM - Estudios Nacionales del Agua

Con el objetivo de estimar la OHTS disponible en las unidades de análisis de nivel subsiguiente definidas en el VMM, se requiere hallar primero el caudal ambiental. Se debe usar una metodología que pueda estimar dicho valor en varias subcuencas o unidades de nivel subsiguiente como se ha establecido para el acuerdo AC4 IDEAM-Ecopetrol. Igualmente, esos estimados sirven para realizar comparaciones con los resultados de los casos de tramos piloto de la metodología MADS-IDEAM. En consecuencia, se aplicó la metodología para determinar los caudales ambientales del IDEAM- Estudios Nacionales del agua.

Esta metodología se construyó considerando el componente hidrológico y se basa en los enfoques metodológicos de los Estudios Nacional del Agua (IDEAM, 2013). No contempla los componentes bióticos, de calidad o de demanda y uso del recurso. Considera el régimen de caudales a través de la Curva de Duración de Caudales (CDC) diaria, de la cual se extrae el valor asociado a un percentil. Con la publicación del ENA2010, se modificó el percentil seleccionado que había establecido el proyecto de Ley del Agua de 2005 (Ley 365 de 2005) (establecía el Q95%); se cambió a utilizar el percentil de Q85% si el IRH es superior a 0.7 o el percentil Q75% si el IRH está por debajo de 0.7 que corresponde a una regulación en las categorías de moderada, baja o muy baja, como puede verse en la Figura 4.13 (tomada de IDEAM (2019)).



Figura 4.13 Esquema de cálculo y categorización del IRH y del caudal ambiental. Tomado de: IDEAM (2019)

Aunque algunos investigadores y consultores calculan el caudal ambiental basado en IRH para cada mes por separado, eso no es lo que se especifica en la guía metodológica para las evaluaciones

regionales del agua (IDEAM, 2013). No obstante, se ve beneficios en ese tipo de aplicaciones porque no solo tendría en cuenta los procesos de tránsito de caudal a través de la CDC, sino también las variaciones estacionales producto de la climatología. Esa aplicación es similar a la dictada por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), para cálculo de caudales ambientales en proyectos que requieren licenciamiento ambiental. Se debe recordar que la metodología ha sido aplicada más a regiones (cuencas o subcuencas), que a tramos de cauces particulares.

Para la aplicación de la metodología, la guía metodológica expone algunas posibilidades cuando no se cuenta con observaciones diarias de caudal. Los registros diarios son de vital importancia para construir la CDC, calcular el IRH y posteriormente calcular el caudal ambiental. La guía prevé que se usen modelos lluvia escorrentía a escala diaria o mensual (IDEAM, 2013); cuando el modelo es a escala mensual se requiere de una serie histórica a escala diaria así esta se encuentre con un registro con corta duración que posteriormente se afectará con los valores mensuales encontrados por las simulaciones del modelo. Un diagrama de cómo puede aplicarse lo descrito puede verse en la Figura 4.14. Cuando el modelo es a escala diaria debe verificarse el desempeño del modelo y hacer un análisis diagnóstico de las simulaciones que incluya la comparación de las CDC observada y simulada.

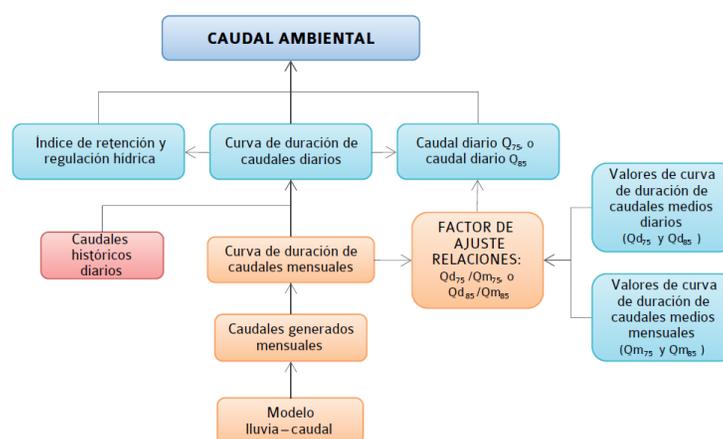


Figura 4.14 Procedimiento para la determinación del caudal ambiental. Tomado de: IDEAM (2013)

Los cálculos y resultados para el área del VMM, específicamente para cada unidad de análisis se realizan con la escorrentía producida por SWAT (también conocida como producción de agua, o Water Yield en inglés), transformada a caudal equivalente. Los desempeños del modelo para medir la representación de los hidrosistemas modelados puede consultarse en Duque Gardeazábal & Sanabria Morera (2022).

5 Resultados y análisis

Se presentan en este capítulo los resultados de la metodología IDEAM-MADS incluyendo los desarrollos hidrológicos e hidrobiológicos. Además, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología IDEAM – ENAs, basada en el valor del IRH.

5.1 Estimación de caudal ambiental sobre el río Sogamoso en el tramo de interés

5.1.1 Definición de la serie hidrológica de trabajo para el río Sogamoso

La información hidrológica disponible para el tramo del río Sogamoso corresponde a caudales medios de escala diaria y los caudales máximos, medios y mínimos de escala mensual, provenientes de la estación Limimétrica – Automática con telemetría conocida como PUENTE SOGAMOSO - AUT (24067020), operada por el IDEAM, cuya información se detalla en la Tabla 5.1. Además de la estación ya mencionada también se utiliza otra aguas arriba (la más próxima) para llenar los datos faltantes, ésta corresponde a una estación limnimétrica TABLAZO EL (24067010), operativa hasta agosto de 2014 dado que estaba localizada en lo que hoy es la cola del embalse de Hidrosogamoso.

Tabla 5.1 Estaciones hidrológicas de interés para la simulación del río Sogamoso

Código	nombre	tipo	Dpto	Municipio	Corriente	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha_inst
24067020	PUENTE SOGAMOSO - AUT	lm	Santander	pto wilches	rio Sogamoso	7.24	-73.78	90	14/08/1992
24067010	TABLAZO EL	lm	Santander	betulia	rio Sogamoso	7.04	-73.34	192	15/09/1958

Una vez identificadas las estaciones hidrológicas de interés para el análisis del tramo del río Sogamoso objeto de cálculo del caudal ambiental, los registros fueron descargados de la base de datos del IDEAM, cuyo procesamiento inicial permitió identificar la longitud disponible de las series temporales, así como el porcentaje de datos faltantes.

Los alcances técnicos de la guía metodológica sugieren utilizar series temporales con longitud de registro mayor a 15 años, igualmente se aceptarán aquellas series temporales con un porcentaje de datos faltantes inferior al 15%, lo anterior es requerido para la posterior reconstrucción y llenado de las series faltantes sin alterar las propiedades estadísticas de los registros.

Al respecto, hay que destacar que las estaciones hidrológicas de interés tienen más de 15 años de registro y menos del 15% de datos faltantes como se muestra en la Tabla 5.2, PUENTE SOGAMOSO - AUT se encuentra aún vigente, por tal motivo ambas estaciones se consideran idóneas para caracterizar el régimen hidrológico a partir de la variabilidad espacial y temporal de los caudales.

Tabla 5.2 Estaciones hidrológicas de interés para la simulación del río Sogamoso

CODIGO	NOMBRE	TIPO	FECHA_INST	FECHA_SUSP	REGISTRO (AÑOS)	% FALTANTES
24067020	PUENTE SOGAMOSO - AUT	LM	14/08/1992	-	30	5.5%
24067010	TABLAZO EL	LM	15/09/1958	28/08/2014	56	6.3%

Para llenar los datos faltantes se proponen las siguientes estrategias:

Estrategia 1: Inicialmente se acude a la reconstrucción de las curvas nivel caudal en aquellas fechas donde existan datos de niveles.

Estrategia 2: Cuando no existan datos de nivel que permitan llenar los datos faltantes de caudales se utilizará el análisis de correlación entre dos estaciones (A, y B) para estimar por regresión lineal los valores faltantes de los caudales medios, máximos y mínimos.

Estrategia 3: Si las estrategias 1 y 2 no pueden aplicar, los datos faltantes de caudales medios y mínimos podrán ser generados a partir de la agregación de los resultados del modelo lluvia escorrentía de escala diaria calibrado y validado para toda la cuenca del río Sogamoso por parte del grupo de modelación del IDEAM, los datos de caudales máximos serán llenados con el valor medio multianual de la estación.

A manera de ejemplo en la Figura 5.1 se presenta la reconstrucción de los caudales medios de PUENTE SOGAMOSO usando los datos de la estación TABLAZO EL. En general existe una gran correlación entre los datos que permite trasladar los caudales de un punto a otro hasta el año 2014.

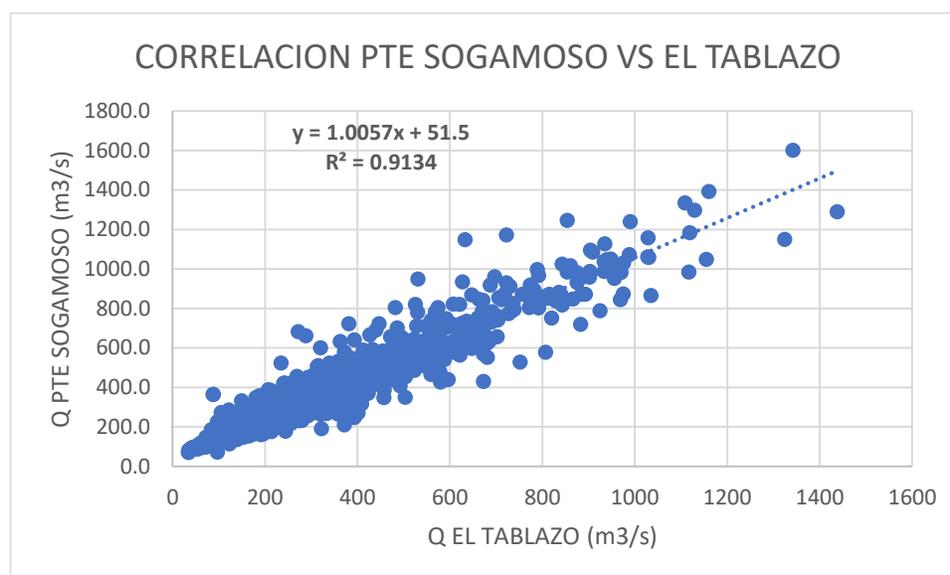


Figura 5.1 Reconstrucción de los datos faltantes del río Sogamoso estación Puente Sogamoso usándolos datos de la estación Tablazo El.

Los caudales medios diarios son llenados mediante alguna de las tres estrategias mencionadas con antelación. Para los caudales mínimos, se supone que el caudal mínimo instantáneo es muy similar al mínimo diario dado que depende netamente del flujo base y para el caso de los caudales máximos (instantáneos), el análisis de frecuencias únicamente incluirá aquellos años con información completa. Finalmente, es importante acotar el embalse de Hidrosogamoso entró en operación en agosto del año 2014, por lo que, para considerar el régimen natural, los caudales del tramo de interés solo deberán considerarse hasta el año 2014.

Se procede ahora a estudiar la homogeneidad de los registros de caudales a partir de un diagnóstico sobre la estabilidad de los principales parámetros estadísticos de los datos. La seleccionada para tal efecto corresponde a los caudales medios, máximos y mínimos de la estación PUENTE SOGAMOSO (24067020) cuya longitud de registro es de 23 años completada.

Los cambios (saltos) en la media para detectar la existencia de posibles períodos no homogéneos en las series, con niveles de confianza del 95%, serán estimados mediante la prueba T-simple (Lettenmaier, 1976a), la prueba T-modificada (Bayley & Hammersley, 1946), (Matalas & Langbein, 1962) y la prueba U de Mann-Whitney (Hollander & Wolf, 1973), los cambios en la varianza utilizando la prueba F simple (Devore, 1982), (Lettenmaier, 1976b), la prueba F modificada (Bayley & Hammersley, 1946) y la prueba de Ansari – Bradley (Hollander & Wolf, 1973), las tendencias en la media usando la prueba T de tendencias lineales, y las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Van Belle & Hughes, 1984; Yue et al., 2002; Kahya y Kalay, 2004) y los datos atípicos (outliers) mediante la prueba de puntos fuera de rango y la Prueba no paramétrica del rango normalizado (Tietjen G.L & Moore, 1972).

Para aceptar un cambio en la media o la varianza esta deberá ser confirmada por al menos dos de las tres pruebas de hipótesis propuestas, igualmente los outliers seleccionados serán aquellos que sean confirmados de manera simultánea por el test de puntos fuera de rango y el de rango normalizado. Cualquier cambio detectado será confirmado con la variabilidad climática, esto implica que solo se removerán outliers o cualquier cambio, siempre y cuando dicho cambio no coincida con un cambio importante en los ríos asociados a eventos de ENSO u otros que alteren la climatología regional.

A manera de ejemplo en la Figura 5.2 se muestra el análisis de homogeneidad para los registros de caudales medios mensuales en la estación PUENTE SOGAMOSO. En general existe un cambio significativo tanto en la media como en la varianza de los caudales medios y máximos que puede situarse entre diciembre de 2009 y mayo de 2010. Aun cuando los cambios fueron detectados por las pruebas de hipótesis, hay que considerar que la serie temporal analizada solo abarca hasta diciembre de 2014 e incluye el fuerte episodio de La Niña que abarcó los años 2010 hasta el 2012. Por lo anterior, la recomendación es dejar la serie temporal intacta, sin modificar los cambios encontrados. Los resultados finales del análisis de homogeneidad de los registros pueden consultarse en la Tabla 5.3.

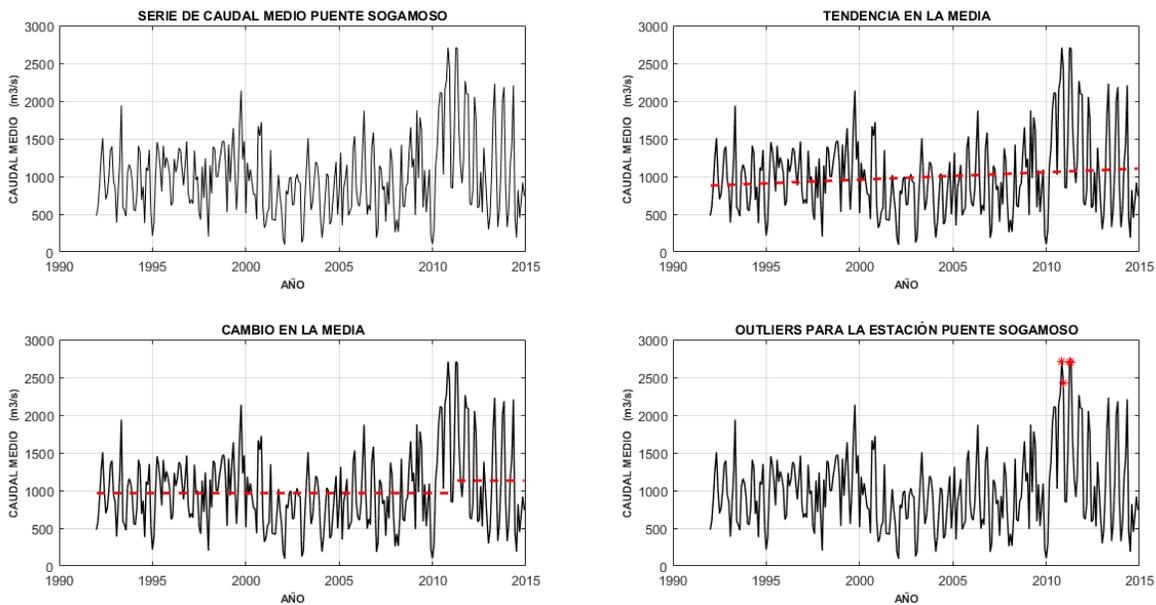


Figura 5.2 Análisis de homogeneidad caudales medios mensuales rio Sogamoso estación Puente Sogamoso.

Tabla 5.3 Resultados del análisis de homogeneidad estación Puente Sogamoso

CAUDALES DE PUENTE SOGAMOSO (24067020)								
NOMBRE	TENDENCIA		CAMBIO EN LA MEDIA			CAMBIO EN LA VARIANZA		
	T SIMPLE	MANN-KENDALL	T SIMPLE	T MODIF	MATWITNEY	F SIMPLE	F MODIF	A BRADLEY
MEDIOS	NO	NO	Abr-10	Abr-95	Abr-10	Dic-09	Dic-09	Dic-09
MINIMOS	NO	NO	May-10	May-10	Dic-09	Dic-09	NO	NO
MÁXIMOS	0.82	NO	Mar-10	May-11	Mar-10	Dic-09	Dic-09	Dic-09

Finalmente, la serie a ser utilizada corresponde a los caudales del río Sogamoso en la estación PUENTE SOGAMOSO para el periodo 1992-2014 equivalente a 23 años, cuyos datos faltantes fueron reconstruidos a partir de la estación EL TABLAZO. No han sido removidos los cambios en la media, la varianza ni los outliers por coincidir con la fuerte temporada de lluvias que azotó a Colombia durante el evento La Niña de los años 2010- 2012.

5.1.2 Caracterización del régimen de caudal del río Sogamoso en el tramo de interés

El régimen de caudales está definido por el ciclo anual de los caudales, que para el caso de la región Andina Colombiana, es bimodal. El ciclo anual cambia en función de la variabilidad climática de escala inter-anual, la cual define los periodos secos y húmedos en los tramos de estudio. El evento macro-climático de mayor para la región Andina colombiana es el sistema El Niño Oscilación del Sur (o ENSO por sus siglas en inglés). Y es por ello que las series de tiempo hidrológicas al considerar la variabilidad natural pueden ser clasificadas por condición hidrológica normal, húmeda o seca.

Siguiendo la metodología propuesta en numerales anteriores, se hará uso del Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) para clasificar los registros de caudales en función de las condiciones del ENSO. Asumiendo que las condiciones secas están dadas por los eventos de El Niño, mientras que las condiciones húmedas se atribuyen a eventos de La Niña, los registros históricos de caudales del río Sogamoso en el tramo de interés son separados según las condiciones del año analizado como se muestra en la Figura 5.3.

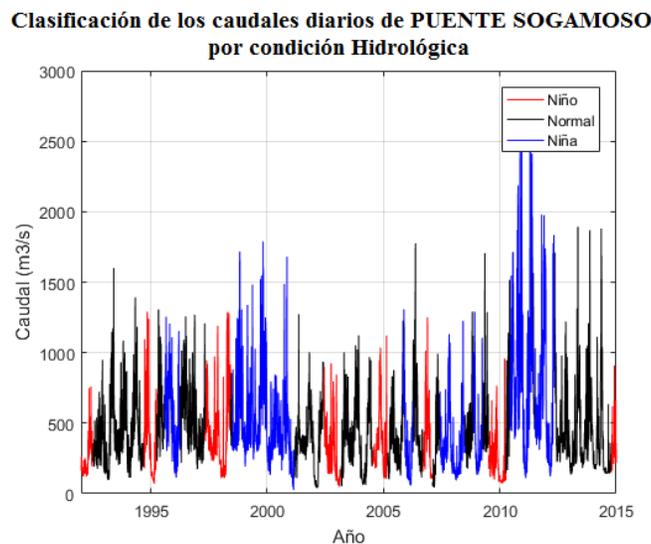


Figura 5.3 Caracterización del régimen de caudales del río Sogamoso usando el ENSO.

Una vez conformada la muestra de caudales medios diarios correspondiente a cada una de las condiciones hidrológicas, se estima para cada mes y cada condición hidrológica el valor medio de los caudales mínimos y máximos, tal como se ilustra en la Figura 5.4, en donde comparan dichas cantidades se comparan con los caudales medios multianuales. Los valores extremos (máximos y mínimos) definen el rango inicial de variación de caudales dentro del cual debe garantizarse el régimen de caudales ambientales que condicionará cualquier aprovechamiento hídrico en un sitio específico de la red de drenaje.

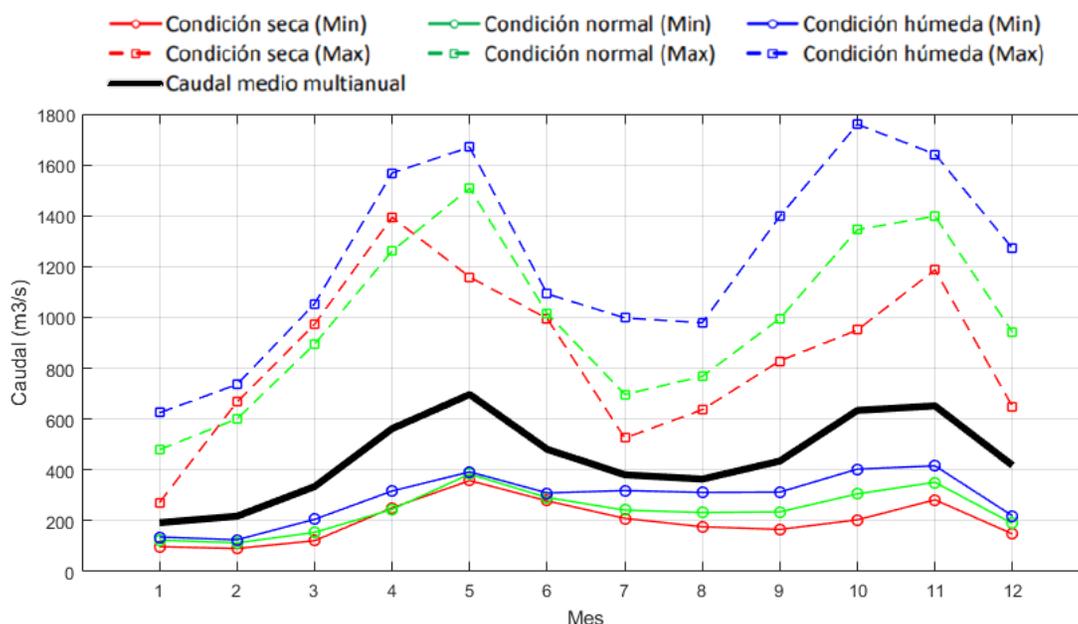


Figura 5.4 Régimen característico de los caudales del río Sogamoso en la estación Puente Sogamoso..

Finalmente, en la Tabla 5.4 se presentan los caudales característicos del régimen hidrológico del río Sogamoso en el tramo de análisis.

Tabla 5.4 Caudales característicos (m³/s) del régimen hidrológico del río Sogamoso

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO		192.5	217.9	334.5	562.5	697.0	481.2	380.9	363.8	435.0	634.4	652.0	417.9
MINIMOS	SECO	98.2	90.9	121.5	251.0	358.0	278.2	209.4	176.4	166.0	203.8	282.6	148.1
	NORMAL	123.8	113.0	154.2	244.8	383.5	291.5	241.9	232.4	235.0	305.9	351.6	189.2
	HUMEDO	136.2	125.1	205.7	317.1	392.3	309.5	318.8	311.4	312.8	403.3	416.2	219.3
MAXIMOS	SECO	271.1	667.6	973.0	1394.0	1159.0	995.0	525.4	636.9	829.2	950.7	1187.4	648.8
	NORMAL	480.1	600.8	894.4	1261.4	1508.0	1015.6	697.0	768.1	995.5	1345.3	1398.2	941.6
	HUMEDO	624.8	736.2	1053.6	1568.6	1669.3	1092.4	997.8	979.1	1398.2	1759.4	1642.4	1271.5

5.1.3 Métrica de interés ecológico para el río Sogamoso

El grupo de modelación de la subdirección de hidrología del IDEAM posee información de la batimetría del río Magdalena y su principal afluente en la región: el río Sogamoso. Existen varias secciones transversales que abarcan aproximadamente 19 km del cauce principal. El modelo existente es unidimensional y no posee levantamiento detallado de las bancas y las llanuras de inundación. No obstante, para una primera aproximación el uso de dicha información puede ser relevante. La batimetría se compone de 9 secciones transversales separadas por una distancia promedio de 3 kilómetros como se muestra en la Figura 5.5.

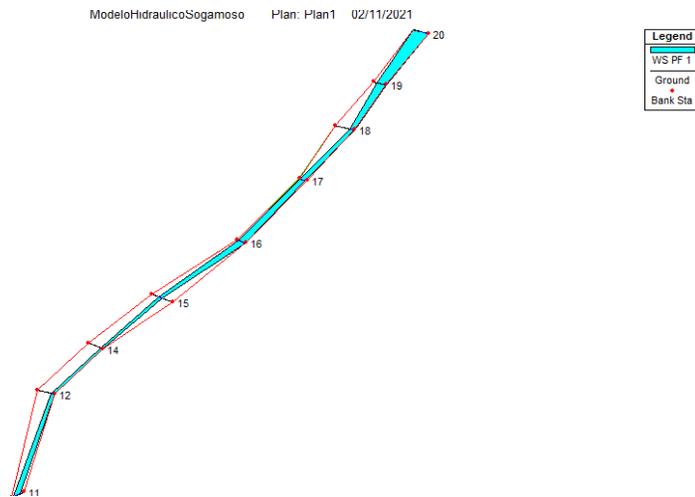


Figura 5.5 Batimetría del río Sogamoso en el tramo de interés.

El coeficiente de rugosidad fue estimado a partir de la información recopilada en campo. Para el río Sogamoso el tamaño promedio observado es de cantos rodados como se observa en Figura 5.6. Según se pudo consultar en la literatura disponible, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning a adoptar es de 0.06 (Chow, V. T., 1992).



Figura 5.6 Tamaño promedio del material del lecho en el tramo priorizado para el río Sogamoso

Como condiciones básicas de modelación se asume flujo uniforme con la pendiente de la línea de energía igual a la del fondo del canal. Adicionalmente se considera una condición de flujo mixto para analizar la respuesta de cada sección transversal con los diferentes caudales simulados. La pendiente del fondo del canal que es de 0.00034 m/m (0.034%). Para la simulación hidráulica se utiliza la plataforma HEC-RAS del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) en función de las secciones trasversales existentes y la hidrología disponible.

El caudal de conectividad longitudinal Es aquel que fluye por una corriente bajo flujo crítico y puede ser estimado por simulación hidráulica cuando se tiene batimetría de detalle al definir los tramos donde caracterizados por bajas profundidades y altas velocidades. Según la guía Metodológica, este caudal se obtiene cuando la línea de energía mínima (flujo crítico) corta el perfil de flujo. En tal sentido el ejercicio básico consiste en variar las condiciones de caudal dentro del modelo hidráulico para lograr condiciones de flujo crítico. En el caso del tramo priorizado sobre el río Sogamoso, usando el modelo hidráulico disponible, se obtiene que el caudal de conectividad longitudinal es de 20 m³/s lográndose el flujo crítico sobre la abscisa 8000m.

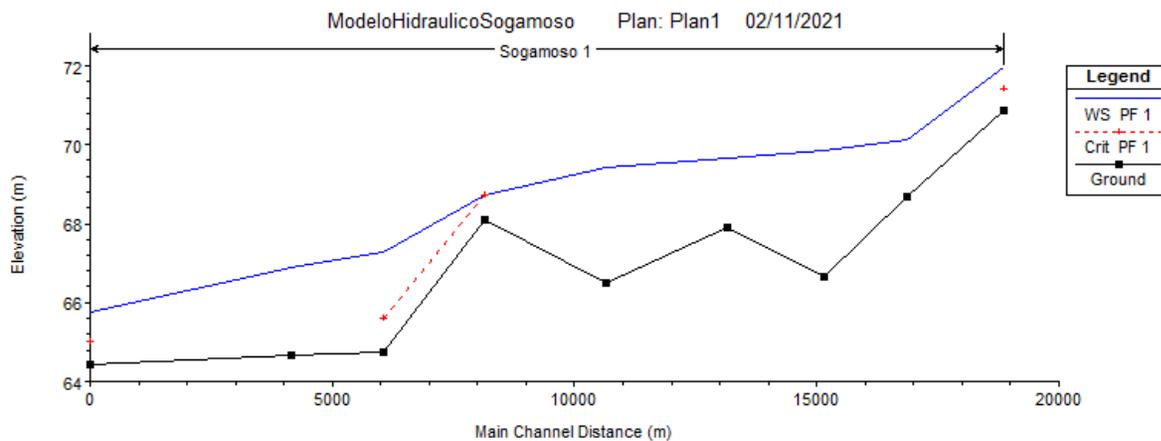


Figura 5.7 Estimación del caudal de conectividad longitudinal para el río Sogamoso

En un río como el Sogamoso, de baja pendiente, en proceso de entregar sus aguas al río Magdalena la única forma de obtener flujo crítico es disminuyendo drásticamente el caudal (dado que la pendiente es un parámetro constante). Esto teóricamente implica que el río logra sostener su conectividad aún en caso de caudales extremadamente bajos.

El caudal de banca llena fue estimado con el nivel de inundación reportado por el IDEAM en las campañas batimétricas de la estación PUENTE SOGAMOSO; este cálculo fue presentado en la

sección anterior considerando la rugosidad del canal, la profundidad del flujo en la cota de desborde, la geometría de la sección transversal y la pendiente en el tramo de interés. El caudal obtenido es de 1575.8 m³/s y se obtiene al considerar una cota de desborde de 95.81msnm.

Para determinar los eventos extremos esperados (máximos o mínimos) para cada periodo de retorno sobre la estación PUENTE SOGAMOSO se ajustan las diferentes funciones de probabilidad obtenidas a las series de valores de caudales mínimos y máximos anuales. Se realizan los cálculos para los periodos de retorno más usuales en el diseño hidrológico (2.33, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años), ajustando la información a las distribuciones más comunes en este tipo de estudios (Normal, log-Normal y Gumbel).

Para cada tiempo de retorno T_r se calcula su probabilidad de ocurrencia P como $P=1/T_r$. En el caso de eventos mínimos, interesa la probabilidad de no excedencia, por lo que $F(x)=P$; para el análisis de caudales máximos interesa conocer la probabilidad de que cierto evento sea superado. Por lo tanto, se trabaja con la probabilidad de excedencia, es decir $F(x)=1-P$. Para obtener el valor esperado del evento X para el periodo de retorno T_r se recurre a la expresión general de Ven T. Chow:

$$X = X^- + K_t \cdot S_x$$

Donde X^- es la media muestral de los caudales (o del logaritmo de los caudales en el caso de las distribuciones logarítmicas), S_x es la desviación estándar de los datos y K_t es un número adimensional que depende del tiempo de retorno y cambia según la distribución estadística que se utilice. En la Tabla 5.5 se muestran distintas expresiones que permiten estimar el factor de frecuencia K_t y el error estándar S_t para cada tipo de distribución y en la Tabla 5.6 se muestran los resultados después de aplicar las expresiones

Tabla 5.5 Resultados del análisis de homogeneidad estación Puente Sogamoso

Distribución de probabilidades	Expresiones para K_T y $S_E(T)$
Normal	$K_T = z_T$
	$S_E(T) = S_X \cdot \{ [1 + (z_T)^2/2] / N \}^{1/2}$
Eventos Extremos Tipo I, o Gumbel	$K_T = -0,45 - 0,7797 \ln \{ -\ln[F(x)] \}$
	$S_E(T) = S_X \cdot \{ [1 + 1,1396 K_T + 1,1 K_T^2] / N \}^{1/2}$
Pearson Tipo III	$K_T = z_T + (z_T^2 - 1) (g_X/6) + (1/3) (z_T^3 - 6z_T)(g_X/6)^2 - (z_T^2 - 1) (g_X/6)^3 + (z_T)(g_X/6)^4 - (1/3)(g_X/6)^5$
	$S_E(T) = S_X \cdot \{ [1 + g_X K_T + (K_T^2/2) (3 g_X^2/4 + 1) + (3 K_T)(W) (g_X + g_X^3/4) + 3 (W^2) (2 + 3 g_X^2 + 5 g_X^4/8)] / N \}^{1/2}$

Las distribuciones de probabilidad a evaluar corresponden a las fdp Normal, Log normal, Gumbel, Log Gumbel, Pearson tipo III y Log-Pearson. Para seleccionar los caudales más adecuados entre las múltiples funciones de distribución de probabilidad se utiliza la prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado. Los resultados indican que la mejor función de distribución de probabilidades es la generalizada de eventos extremos tipo I (Gumbel).

Al igual que en el caso de los caudales diarios y los caudales medios, los datos anómalos no fueron eliminados dado que coinciden con periodos asociados a fuertes lluvias provocadas por el Evento La Niña 2010-2012.

Utilizando el análisis de frecuencias y los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, se estima el caudal máximo con periodo de retorno de 15 años en 2466.2 m³/s como se muestra en la Tabla 5.6. Este caudal ha sido propuesto por la guía metodológica como el valor promedio de los caudales máximos durante eventos de La Niña.

Tabla 5.6 Estimación de los caudales máximos para el río Sogamoso estación Puente Sogamoso por análisis de frecuencias.

Tr (años)	P	F(x)	Kt	Qmax (m ³ /s)
1.5	0.67	0.33	-0.523	1505.7
2.33	0.43	0.57	0.001	1739.1
5	0.20	0.80	0.720	2058.8
10	0.10	0.90	1.305	2319.2
15	0.07	0.93	1.635	2466.2
25	0.04	0.96	2.044	2648.3
50	0.02	0.98	2.592	2892.4
100	0.01	0.99	3.137	3134.7

Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años es una métrica que ha sido definida como el valor promedio de los caudales mínimos durante un evento de El Niño. Según los resultados del análisis de frecuencias es de 53.2 m³/s.

Tabla 5.7 Estimación de los caudales mínimos para el río Sogamoso estación Puente Sogamoso por análisis de frecuencias.

Tr	P	F(x)	Kt	Qmin (m ³ /s)
1.5	0.67	0.67	0.254	99.8
2.33	0.43	0.43	-0.319	80.1
5	0.20	0.20	-0.821	62.8
10	0.10	0.10	-1.100	53.2
15	0.07	0.07	-1.227	48.9
25	0.04	0.04	-1.361	44.2
50	0.02	0.02	-1.514	39.0
100	0.01	0.01	-1.641	34.6

Como resumen de las métricas de interés ecológico tenemos:

- Caudal de conectividad longitudinal: 20 m³/s
- Caudal de banca llena: 1575.8 m³/s
- Caudal máximo con periodo de retorno de 15 años: 2466.2 m³/s
- Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años: 53.2 m³/s.

5.1.4 Eventos de interés ecológico para el régimen hidrológico natural del río Sogamoso en el tramo de Interés

Como fue descrito el numeral con la metodología, de las series de caudal medio diario de la estación PUENTE SOGAMOSO, se obtiene la caracterización de los eventos de interés ecológico caracterizados por de los siguientes indicadores: Duración T, magnitud D, e intensidad I. En este caso se elabora un análisis de las rachas (excursiones) que encuentran por encima de las métricas QB y QMax Tr=15, o por debajo de los caudales Qt-Q y QMinTr=10.

A continuación, en la Tabla 5.8 se presentan los eventos de interés ecológico cuando los caudales superan el indicador de banca llena. En total hay 39 eventos, la mayoría de ellos concentrados en los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y diciembre.

Tabla 5.8 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q >= Q_B$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.

Evento	Fecha	Duración T (días)	Magnitud D (m ³)	Intensidad I (m ³ /día)
1	26/05/1993	1	25.2	25.2
2	27/10/1998	4	367.7	91.9
3	25/10/1999	1	213.2	213.2
4	28/10/1999	1	29.2	29.2
5	30/10/1999	1	18.2	18.2
6	03/11/2000	1	106.2	106.2
7	10/05/2006	1	163.2	163.2
8	12/05/2006	1	199.2	199.2
9	04/05/2009	1	130.2	130.2
10	16/07/2010	1	128.2	128.2
11	21/07/2010	4	534.8	133.7
12	20/09/2010	1	26.2	26.2
13	28/09/2010	1	293.2	293.2
14	01/10/2010	1	70.2	70.2
15	09/10/2010	7	2702.6	386.1
16	17/11/2010	11	5126.7	466.1
17	05/12/2010	7	4380.4	625.8
18	09/12/2010	1	28.2	28.2
19	14/04/2011	3	1572.6	524.2
20	27/04/2011	12	9511.9	792.7
21	03/05/2011	1	281.2	281.2
22	19/05/2011	6	2320.2	386.7
23	21/05/2011	1	108.2	108.2
24	14/10/2011	2	458.4	229.2
25	19/10/2011	1	196.2	196.2
26	21/10/2011	1	75.2	75.2
27	19/11/2011	2	538.4	269.2
28	01/12/2011	1	37.2	37.2
29	06/12/2011	2	167.4	83.7
30	12/12/2011	1	117.2	117.2
31	16/12/2011	1	30.2	30.2
32	08/04/2012	2	161.4	80.7
33	13/04/2012	2	376.4	188.2
34	21/04/2012	1	234.2	234.2
35	23/04/2012	1	258.2	258.2
36	06/05/2012	1	134.2	134.2
37	04/05/2013	2	632.4	316.2
38	07/11/2013	1	292.2	292.2
39	05/05/2014	2	389.4	194.7

Los eventos en los cuales los caudales diarios superan el umbral del caudal máximo con periodo de retorno de 15 años solo son tres y están concentrados en los años 2010 y 2011 y no superan los dos días de duración, se pueden asociar a la fuente evento de La Niña 2010-2012 como se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q \geq Q_{MAX15}$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.

Evento	Fecha	Duración T (días)	Magnitud D (m ³)	Intensidad I (m ³ /día)
1	09/11/2010	1	88.8	88.8
2	02/12/2010	2	178.6	89.3
3	14/04/2011	1	56.8	56.8

No existen eventos de interés ecológico en los cuales los caudales del río Sogamoso se encuentren por debajo del caudal de conectividad longitudinal.

En cuanto a la existencia de caudales medios diarios por debajo del caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años, existen 10 eventos cuya principal característica es haberse presentado entre los años 2001 – 2002 y 2003 y 2007 correspondientes a Niños débiles (Centrales o Modoki). Los cuales se presentan a continuación:

Tabla 5.10 Eventos de interés ecológico en los cuales $Q \leq Q_{MIN10}$ para el río Sogamoso en el tramo de interés.

Evento	Fecha	Duración T (días)	Magnitud D (m ³)	Intensidad I (m ³ /día)
1	16/02/2001	10	130.0	13.0
2	28/01/2002	1	1.2	1.2
3	31/01/2002	1	2.2	2.2
4	17/02/2002	12	84.4	7.0
5	22/02/2002	3	7.4	2.5
6	01/03/2002	6	36.2	6.0
7	01/02/2003	1	4.0	4.0
8	10/03/2003	2	4.4	2.2
9	10/02/2007	2	0.7	0.3
10	14/02/2007	1	2.1	2.1

5.1.5 Propuesta de aprovechamiento máximo de caudales para el río Sogamoso en el tramo de interés

Una vez caracterizada la duración, la magnitud y la intensidad de los eventos de interés ecológico en condiciones naturales, es posible definir la máxima extracción de caudales para el tramo de forma tal que no exista una alteración del régimen de caudales. En tal sentido, para el caso del río

Sogamoso, se define el caudal extraído como un porcentaje del caudal medio mensual multianual de la fuente considerando los porcentajes de la Tabla 5.11 .

Tabla 5.11 Fracción de caudal aprovechable con respecto al caudal medio mensual multianual río Sogamoso en el tramo de Interés

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0.26	0.06	0.15	0.35	0.5	0.45	0.20	0.25	0.40	0.45	0.31	0.27

La comparación entre los caudales medios mensuales multianuales y las fracciones aprovechables se presenta en la Figura 5.8.

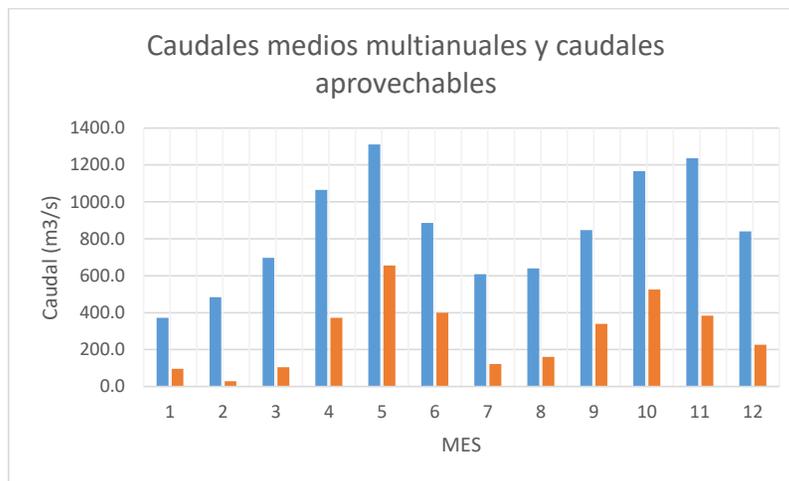


Figura 5.8 Comparación entre los caudales medios mensuales y los caudales aprovechables para el río Sogamoso en el tramo de interés.

Considerando dichos porcentajes de extracción (aprovechamiento) se construye la serie de caudales “aguas abajo” o caudal ambiental, definidos como el caudal diario observado, menos el caudal medio mensual multianual multiplicado por la fracción aprovechable, siempre y cuando el resultado de dicha resta sea mayor que el caudal mínimo promedio multianual según la condición hidrológica, en caso tal de superar dicho umbrales, los caudales ambientales deben ser iguales al caudal mínimo promedio mensual multianual para la condición hidrológica (seca, normal, o húmeda) analizada.

Sobre la serie hidrológica alterada (considerando el aprovechamiento) se calculan nuevamente los eventos de interés ecológico, en cuanto a duración, magnitud e intensidad. La idea del método es comparar los resultados obtenidos en este paso con aquellos obtenidos para la serie natural, de manera iterativa se deben modificar los porcentajes de aprovechamiento de forma tal que los

eventos de interés ecológico, antes y después de la alteración puedan considerarse estadísticamente semejantes.

Para lograr que no exista alteración al régimen de caudales, los valores medios de los eventos de interés ecológico antes y después de la alteración deben ser estadísticamente iguales. La guía propone el uso de pruebas de hipótesis no paramétricas para valorar los cambios en el valor medio de la duración, magnitud e intensidad de dichos eventos desagregados de forma mensual. Sin embargo, la misma guía prevé los inconvenientes de lidiar con muestras de datos bastantes pequeñas para efectuar tales comparaciones.

Suponiendo que las condiciones del río Sogamoso se mantendrán “Inalteradas” antes y después de la intervención, los valores de aprovechamiento permiten sostener el régimen de caudales. En la Figura 5.9 se ilustra la comparación entre la variabilidad mensual de las duraciones, magnitudes e intensidades para el caudal de Banca llena y el caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años en condiciones naturales (diagrama de cajas y bigotes) y luego del aprovechamiento (diagrama de puntos).

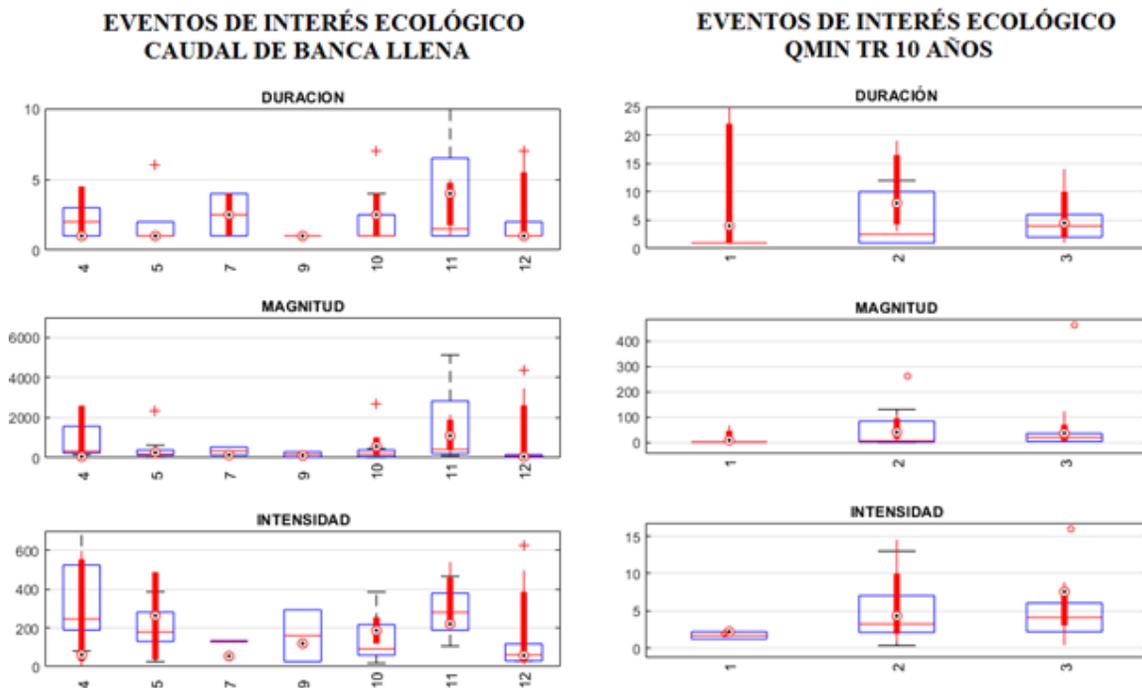


Figura 5.9 Comparación de los eventos de interés ecológico para el río Sogamoso en el tramo de interés antes y después del aprovechamiento máximo

Como se mencionó más arriba, el caudal de conectividad longitudinal es extremadamente bajo, a tal punto que no existe en el registro histórico de los caudales y por tanto no existen eventos de interés ecológico para dicho caudal. Y sobre el caudal máximo con periodo de retorno de 15 años, existen solo tres eventos ocurridos en tres meses diferentes, solo un dato para ser comparado con la serie alterada, en este último caso no existe una muestra suficiente para poder elaborar la comparación.

Los porcentajes de extracción para el río Sogamoso, permiten garantizar con un nivel de significancia del 5% que no existirá alteración en el régimen de caudales y que se conservan los valores medios de los eventos de interés ecológico usando la prueba de suma de rangos. Finalmente, en la Figura 5.10 se presenta la curva de duración que representa el régimen de caudales para condiciones naturales y alteradas.

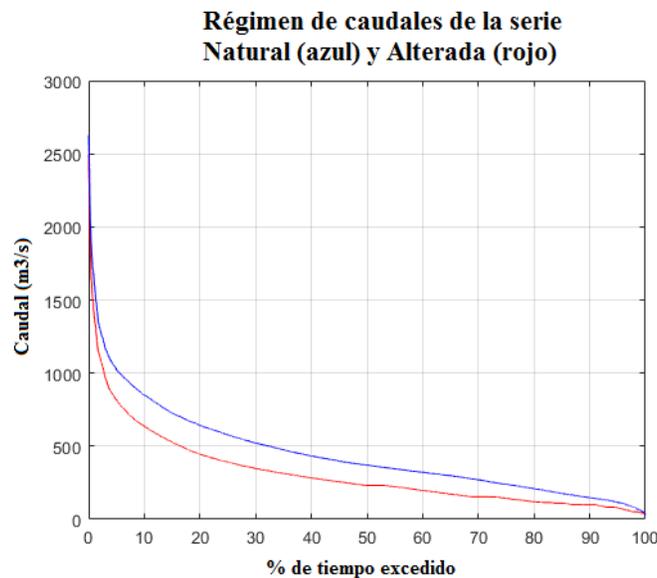


Figura 5.10 Régimen hidrológico para el río Sogamoso en el tramo de Interés antes y después del aprovechamiento máximo.

5.1.6 Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés

Una vez garantizado que no existe alteración de las métricas de interés hidrológico antes y después de la intervención, el caudal aguas abajo es considerado caudal ambiental. En la Tabla 5.12 se presenta el caudal ambiental del río Sogamoso en el tramo de estudio.

Tabla 5.12 Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés (m³/s)

Condición	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Seca	84.1	166.2	187.5	330.7	330.9	289.7	233.3	177.6	177.5	195.1	360.6	193.7
Normal	145.0	204.2	283.7	390.5	411.9	295.3	308.1	277.4	278.5	382.2	466.4	328.3
Húmeda	183.8	246.9	380.4	602.6	492.4	314.1	438.9	400.9	447.2	630.8	611.5	450.2

En la Figura 5.11 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables. Los caudales ambientales corresponden, en promedio, al 72% de los caudales medios del río Sogamoso en el tramo de Interés.

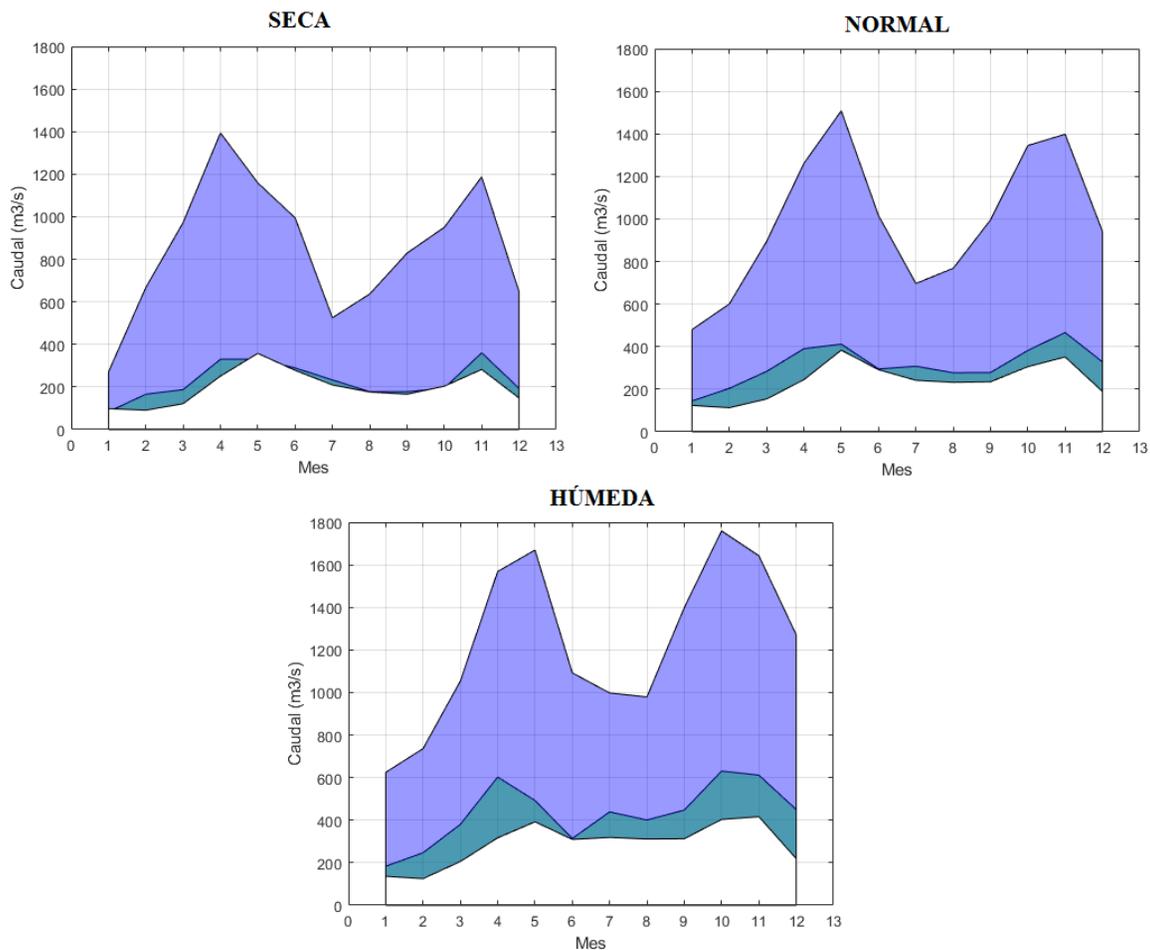


Figura 5.11 Caudales ambientales y máximos aprovechables por condición hidrológica para el río Sogamoso en el sitio de interés.

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

En tal sentido, se propone la generación intencional de algunos eventos de interés ecológico que minimizar la alteración al régimen de caudales y generen los pulsos necesarios para que los ecosistemas puedan cumplir con sus funciones biológicas de desplazamiento, desove, conexión con las ciénagas, además del transporte y arrastre de sedimentos, nutrientes

Tabla 5.13 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones húmedas

	mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Duración media	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1.0	2.0
	Duración máxima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Duración mínima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Recomendación	0 eventos 0 días			1 eventos 1 día	0 eventos 0 días						1 eventos 2 días	
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	6	3	0	2	0	2	9	3	6
	Duración media	0	0	0	3.5	2.7	0	2.5	0	1	2.1	4.7	2.2
	Duración máxima	0	0	0	12	6	0	4	0	1	7	11	7
	Duración mínima	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
	Recomendación	0 eventos 0 días			1 eventos 3 días		1 eventos 2.5 días		1 eventos 2.5 +/- 1 días				
Qmin10	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos 0 días											

Tabla 5.14 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Normales

	mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	Recomendación	0 eventos 0 días											
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0
	Duración media	0	0	0	0	1.3	0	0	0	0	0	1	0
	Duración máxima	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
	Duración mínima	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	Recomendación					1 evento 1 día						1 evento 1 día	
Qmin10	# Eventos Natural	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	1	8.3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	1	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	1	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 eventos 5 días				0 eventos 0 días							

Tabla 5.15 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Secas

	mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos 0 días											
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos 0 días											
Qmin10	# Eventos Natural	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 eventos 1 días			0 eventos 0 días								

Como fue descrito en el capítulo metodológico, en Colombia el IDEAM ha utilizado dentro de los estudios Nacionales del Agua (ENA 2010-2014) una metodología basada en el índice de retención y regulación hídrica IRH y los percentiles Q85 y Q75 de la curva de duración de caudales. Igualmente, hace algunos años, La Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la Agencia Nacional de Licencias Ambientales, desarrollaron una metodología cuyo enfoque hidrológico se base en el cálculo del indicador 7Q10 y El percentil Q95. En ambos casos la metodología considera

variabilidad climática y por tanto los caudales característicos (Q75, Q85 y Q95) son estimados para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda) en tal sentido sus resultados son comparables desde el punto de vista espacial y temporal.

Como se mencionó con antelación, el método de caudal ambiental desarrollado por el MADS – IDEAM con el soporte de la Universidad Nacional, arroja caudales ambientales equivalentes al 72% del caudal medio del río (en promedio), mientras el método ANLA-UNAL se acerca al 40% y el método del IDEAM se considera intermedio con un 52%. Los cálculos demuestran que la metodología aplicada al río Bogotá es muy restrictiva bajo la hipótesis de no alteración del régimen de flujo.

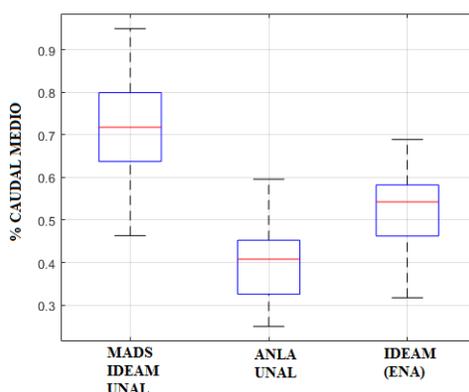


Figura 5.12 Comparación de los caudales ambientales del río Sogamoso en el sitio de interés con otras metodologías aplicadas en la gestión del recurso hídrico en Colombia.

5.2 Estimación de caudal ambiental sobre el río La Colorada en el tramo de interés

5.2.1 Definición de la serie hidrológica de trabajo para el río La colorada en el tramo de interés

La información hidrológica disponible para el tramo del río La Colorada corresponde a caudales medios de escala diaria y los caudales máximos, medios y mínimos de escala mensual, provenientes de la estación Limnimétrica – Automática con telemetría conocida como AYACUCHO - AUT (23147040), operada por el IDEAM, cuya información se detalla en la Tabla 5.16

Tabla 5.16 Estación hidrológica de interés para el río La Colorada

CODIGO	NOMBRE	TIPO	DEPTO	MUNICIPIO	CORRIENTE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA_INST
23147040	AYACUCHO - AUT	LM	SANTANDER	SIMACOTA	RIO LA COLORADA	6.86	-73.77	101	14/10/1992

Los registros fueron igualmente descargados de la base de datos del IDEAM, cuyo procesamiento inicial permitió identificar la longitud disponible de la serie temporal, así como el porcentaje de datos faltantes. Al respecto la serie posee más de 15 años de registro y menos del 15% de datos faltantes, AYACUCHO - AUT se encuentra aún vigente, por tal motivo dicha estación se considera idónea para adelantar el cálculo de los caudales ambientales como se muestra en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17 Datos faltantes de la serie hidrológica de interés para el río La Colorada

CODIGO	NOMBRE	TIPO	FECHA_INST	FECHA_SUSP	REGISTRO (AÑOS)	% FALTANTES
23147040	AYACUCHO - AUT	LM	14/10/1992	-	30	7.8%

Para llenar los datos faltantes se proponen como estrategia el uso de la serie hidrológica simulada por el Modelo desarrollado en el marco del proyecto para estimar la oferta hídrica a escala diaria. La homogeneidad de los registros de caudales se analiza a partir de un diagnóstico sobre la estabilidad de los principales parámetros estadísticos de los datos. Se selecciona todo el registro histórico de AYACUCHO. Se revisan los posibles saltos en la media, varianzas, tendencias y datos anómalos con las metodologías ya descritas más arriba.

En Figura 5.13 se muestra el análisis de homogeneidad para los registros de caudales medios mensuales en la estación AYACUCHO, al igual que en la Tabla 5.18.

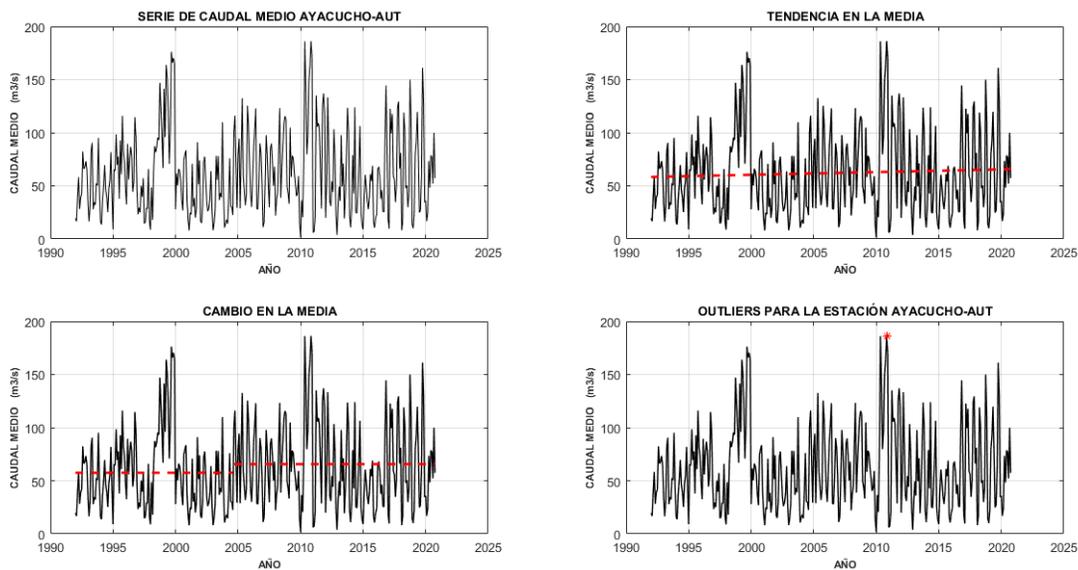


Figura 5.13 Análisis de homogeneidad para los caudales medios mensuales del río La Colorada en la estación AYACUCHO.

Los caudales medios no poseen tendencia en la media, existe un salto en la media en febrero de 1995, y un cambio en la varianza confirmado en Julio de 1998. Los caudales mínimos poseen una tendencia de $-0.027 \text{ m}^3/\text{mes}$, y un cambio en la varianza en enero del año 2000. Finalmente, los caudales máximos poseen una tendencia creciente $0.55 \text{ m}^3/\text{mes}$, un cambio en la media confirmada en abril de 2010 y cambio en la varianza en enero de 2010.

Tabla 5.18 Resultados del análisis de homogeneidad río La Colorada, estación AYACUCHO

CAUDALES DE PUENTE AYACUCHO (23147040)								
	TENDENCIA		CAMBIO EN LA MEDIA			CAMBIO EN LA VARIANZA		
NOMBRE	T SIMPLE	MANN-KENDALL	T SIMPLE	T MODIF	MATWITNEY	F SIMPLE	F MODIF	A BRADLEY
MEDIOS	NO	NO	Feb-95	Sep-04	Feb-95	Jul-98	Jul-98	Abr-95
MINIMOS	-0.027	-0.027	Oct-07	Ago-99	Dic-06	Ene-00	Ene-00	Ene-00
MÁXIMOS	0.549	0.549	Abr-10	Abr-10	Abr-10	Oct-96	Ene-10	Ene-10

La serie a ser utilizada corresponde a los caudales del río La Colorada o en la estación AYACUCHO para el periodo 1992-2020 equivalente a 28 años, cuyos datos faltantes fueron reconstruidos a partir de modelación hidrológica. No han sido removidos los cambios en la media, la varianza ni los outliers por coincidir con la fuerte temporada de lluvias que azotó a Colombia durante el evento La Niña de los años 2010- 2012.

5.2.2 Caracterización del régimen de caudales del río La colorada en el tramo de interés

Usando nuevamente el Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) para clasificar los registros de caudales en función de las condiciones del ENSO. Asumiendo que las condiciones secas están dadas por los eventos de El Niño, mientras que las condiciones húmedas se atribuyen a eventos de La Niña, los registros históricos de caudales del río La Colorada en el tramo de interés son separados según las condiciones del año analizado como se muestra en la Figura 5.14.

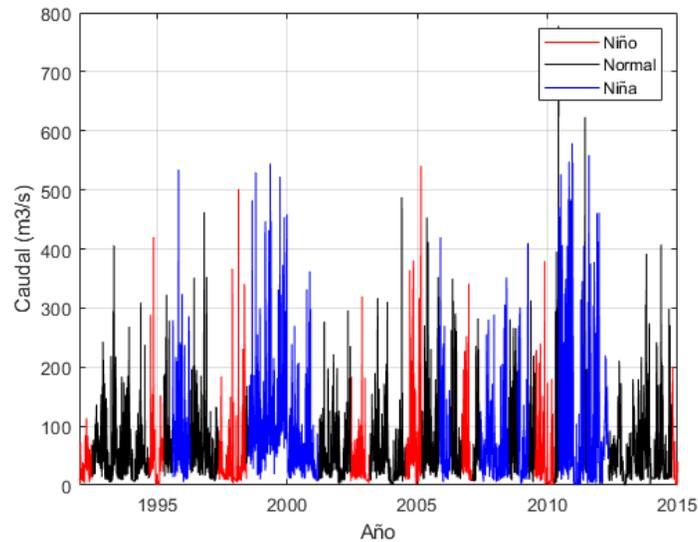


Figura 5.14 Caracterización del régimen de caudales del río La Colorada usando el ENSO.

Una vez conformada la muestra de caudales medios diarios correspondiente a cada una de las condiciones hidrológicas, se estima para cada mes y cada condición hidrológica el valor medio de los caudales mínimos y máximos, tal como se ilustra en la Figura 5.15, en donde comparan dichas cantidades se comparan con los caudales medios multianuales. Los valores extremos (máximos y mínimos) definen el rango inicial de variación de caudales dentro del cual debe garantizarse el régimen de caudales ambientales que condicionará cualquier aprovechamiento hídrico en un sitio específico de la red de drenaje, dichos valores también se encuentran en la Tabla 5.19.

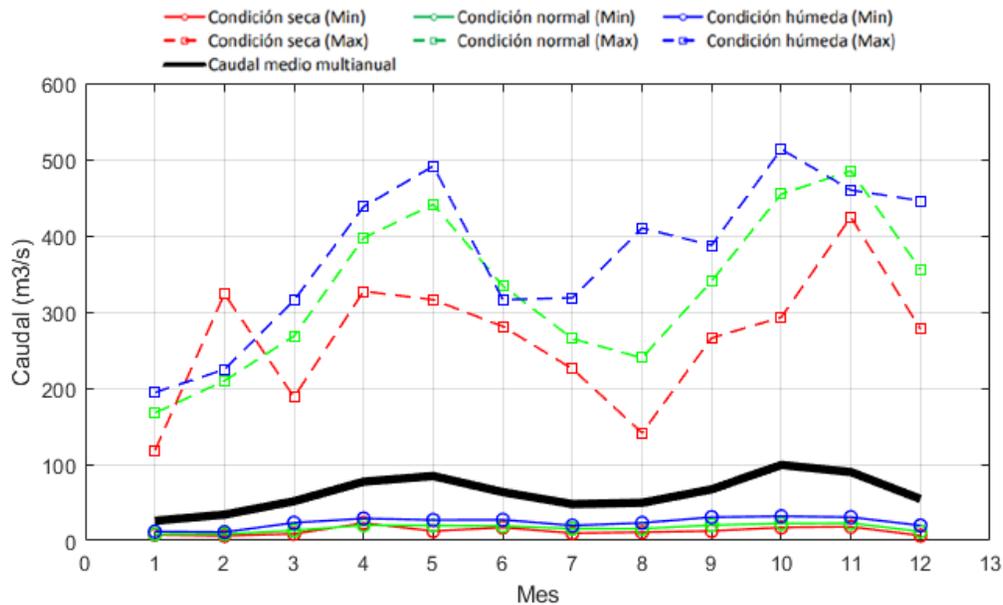


Figura 5.15 Régimen característico de los caudales del río La Colorada

Tabla 5.19 Caudales característicos del río La Colorada, estación AYACUCHO

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO		25.9	32.7	47.2	79.2	95.6	67.4	49.8	47.6	66.5	103.6	98.5	64.3
	SECO	7.4	6.2	8.8	23.0	12.5	17.2	9.7	11.0	12.6	17.3	18.1	6.6
	NORMAL	8.4	8.4	13.2	20.1	19.8	19.1	15.7	15.6	20.2	22.4	22.9	11.9
	HUMEDO	11.8	11.1	23.4	29.0	27.0	27.3	19.8	23.2	30.7	31.9	30.7	19.8
MAXIMOS	SECO	117.8	323.7	188.2	327.0	315.9	280.9	225.2	141.2	265.7	292.9	424.4	277.5
	NORMAL	167.4	209.5	268.3	397.0	441.0	334.1	264.9	239.6	340.4	454.6	485.0	355.6
	HUMEDO	194.2	224.5	315.1	437.9	491.3	316.0	318.4	409.9	387.3	513.4	459.7	445.8

5.2.3 Métricas de interés ecológico para el río La colorada en el tramo de interés

No existe batimetría del río La Colorada, sin embargo se hará uso de la sección transversal existente, levantada por el IDEAM, y se replicarán sus valores aguas arriba y aguas abajo del sitio de interés considerando la pendiente media del tramo (0.00027), como se muestra en la Figura 5.16.

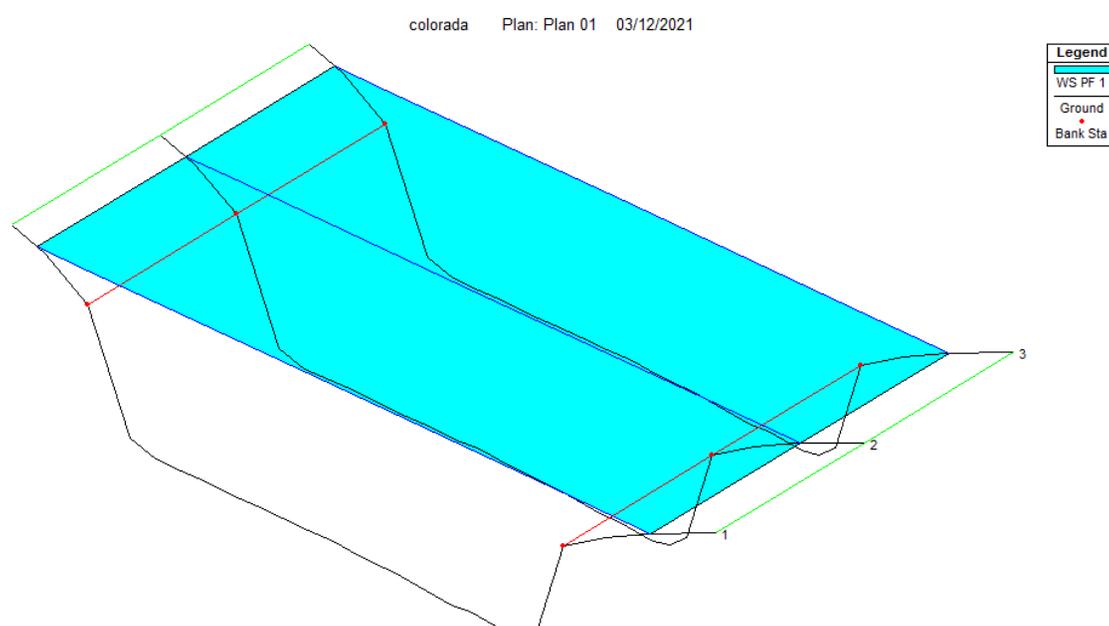


Figura 5.16 Secciones transversales levantadas para el río La Colorada en el tramo de interés.

El coeficiente de rugosidad fue estimado a partir de la información recopilada en campo. Para el río La Colorada el tamaño promedio observado es de cantos. Según se pudo consultar en la literatura disponible, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning a adoptar es de 0.080 (Chow, V. T., 1992).

Como condiciones básicas de modelación se asume flujo uniforme con la pendiente de la línea de energía igual a la del fondo del canal. Adicionalmente se considera una condición de flujo mixto para analizar la respuesta de cada sección transversal con los diferentes caudales simulados. La pendiente del fondo del canal que es de 0.00027 m/m (0.027%). Para la simulación hidráulica se utiliza la plataforma HEC-RAS del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) en función de las secciones trasversales existentes y la hidrología disponible.

El caudal de conectividad longitudinal es aquel que fluye por una corriente bajo flujo crítico y puede ser estimado por simulación hidráulica cuando se tiene batimetría de detalle al definir los tramos donde caracterizados por bajas profundidades y altas velocidades. Según la guía Metodológica, este caudal se obtiene cuando la línea de energía mínima (flujo crítico) corta el perfil de flujo. En tal sentido el ejercicio básico consiste en variar las condiciones de caudal dentro del modelo hidráulico para lograr condiciones de flujo crítico.

En el caso del tramo priorizado sobre el río La Colorada, usando el modelo hidráulico disponible, se obtiene que el caudal de conectividad longitudinal es de 0.23 m³/s lográndose el flujo crítico en el tramo. No obstante, dicho caudal es muy bajo, además la batimetría es ineficiente para el cálculo de dicho parámetro.

Nuevamente, en ríos de baja pendiente la única forma de obtener flujo crítico es disminuyendo drásticamente el caudal (dado que la pendiente es un parámetro constante). Esto teóricamente implica que el río logra sostener su conectividad aún en caso de caudales extremadamente bajos.

El caudal de banca llena fue estimado con el nivel de inundación reportado por el IDEAM en las campañas batimétricas de la estación AYACUCHO; este cálculo fue presentado en la sección sobre los datos de campo considerando la rugosidad del canal, la profundidad del flujo en la cota de desborde, la geometría de la sección transversal y la pendiente en el tramo de interés. El caudal obtenido es de 365.8 m³/s y se obtiene al considerar una cota de desborde de 88.67 msnm.

Para determinar los eventos extremos esperados (máximos o mínimos) para cada periodo de retorno sobre la estación AYACUCHO se ajustan las diferentes funciones de probabilidad obtenidas a las series de valores de caudales mínimos y máximos anuales. Se realizan los cálculos para los periodos de retorno más usuales en el diseño hidrológico (2.33, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años), ajustando la información a las distribuciones más comunes en este tipo de estudios (Normal, log-Normal y

Gumbel). Los resultados indican que la mejor función de distribución de probabilidades es la generalizada de eventos extremos tipo I (Gumbel). Al igual que en el caso de los caudales diarios y los caudales medios, los datos anómalos no fueron eliminados dado que coinciden con periodos asociados a fuertes lluvias provocadas por el Evento La Niña 2010-2012.

Utilizando el análisis de frecuencias y los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, se estima el caudal máximo con periodo de retorno de 15 años en 826.4 m³/s. Este caudal ha sido propuesto por la guía metodológica como el valor promedio de los caudales máximos durante eventos de La Niña, los resultados detallados de dicho análisis se presentan en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20 Estimación de los caudales máximos para el río La Colorada –Estación Ayacucho.

Tr (años)	P	F(x)	Kt	Qmax (m ³ /s)
1.5	0.67	0.33	-0.523	500.7
2.33	0.43	0.57	0.001	579.8
5	0.20	0.80	0.720	688.3
10	0.10	0.90	1.305	776.6
15	0.07	0.93	1.635	826.4
25	0.04	0.96	2.044	888.1
50	0.02	0.98	2.592	970.9
100	0.01	0.99	3.137	1053.1

Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años es una métrica que ha sido definida como el valor promedio de los caudales mínimos durante un evento de El Niño. Según los resultados del análisis de frecuencias de la Tabla 5.21 es de 1.60 m³/s.

Tabla 5.21 Estimación de los caudales mínimos para el río La Colorada –Estación Ayacucho.

Tr	P	F(x)	Kt	Qmin (m ³ /s)
1.5	0.67	0.67	0.254	6.66
2.33	0.43	0.43	-0.319	4.52
5	0.20	0.20	-0.821	2.64
10	0.10	0.10	-1.100	1.60
15	0.07	0.07	-1.227	1.13
25	0.04	0.04	-1.361	0.63
50	0.02	0.02	-1.514	0.06

100	0.01	0.01	-1.641	0.00
-----	------	------	--------	------

Como resumen de las métricas de interés ecológico tenemos:

- Caudal de conectividad longitudinal: -
- Caudal de banca llena: 365.8 m³/s
- Caudal máximo con periodo de retorno de 15 años: 826.4 m³/s
- Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años: 1.60 m³/s.

5.2.4 *Eventos del régimen hidrológico natural para el río La Colorada en el tramo de interés y propuesta máxima de aprovechamiento*

Para el río La Colorada en la estación AYACUCHO se estiman también los indicadores: Duración T, magnitud D, e intensidad I. En este caso se elabora un análisis de las rachas (excursiones) que encuentran por encima de las métricas QB y QMax Tr=15, o por debajo de los caudales Qt-Q y QMinTr=10. Existen 50 eventos en los cuales el caudal del río La Colorada supera Banca Llena. Así mismo existen 21 eventos donde los caudales diarios están por debajo del caudal mínimo para el periodo de retorno de 10 años.

Una vez caracterizada la duración, la magnitud y la intensidad de los eventos de interés ecológico en condiciones naturales, se define la máxima extracción de caudales del río la Colorada para el tramo de forma tal que no exista una alteración del régimen de caudales como se muestra en la Tabla 5.22:

Tabla 5.22 fracción del caudal aprovechable con respecto del caudal medio mensual multianual.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0.15	0.01	0.32	0.41	0.52	0.42	0.31	0.43	0.48	0.53	0.58	0.18

Considerando dichos porcentajes de extracción (aprovechamiento) se construye la serie de caudales “aguas abajo” o caudal ambiental, definidos como el caudal diario observado, menos el caudal medios mensual multianual multiplicado por la fracción aprovechable, siempre y cuando el resultado de dicha resta sea mayor que el caudal mínimo promedio multianual según la condición hidrológica, en caso tal de superar dicho umbrales, los caudales ambientales deben ser iguales al caudal mínimo promedio mensual multianual para la condición hidrológica (seca, normal, o húmeda) analizada.

Sobre la serie hidrológica alterada (considerando el aprovechamiento) se calculan nuevamente los eventos de interés ecológico, en cuanto a duración, magnitud e intensidad. Los valores de

aprovechamiento permiten sostener el régimen de caudales. En las siguientes Figuras se ilustra la comparación entre la variabilidad mensual de las duraciones, magnitudes e intensidades para el caudal de Banca llena y el caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años en condiciones naturales (diagrama de cajas y bigotes) y luego del aprovechamiento (diagrama de puntos).

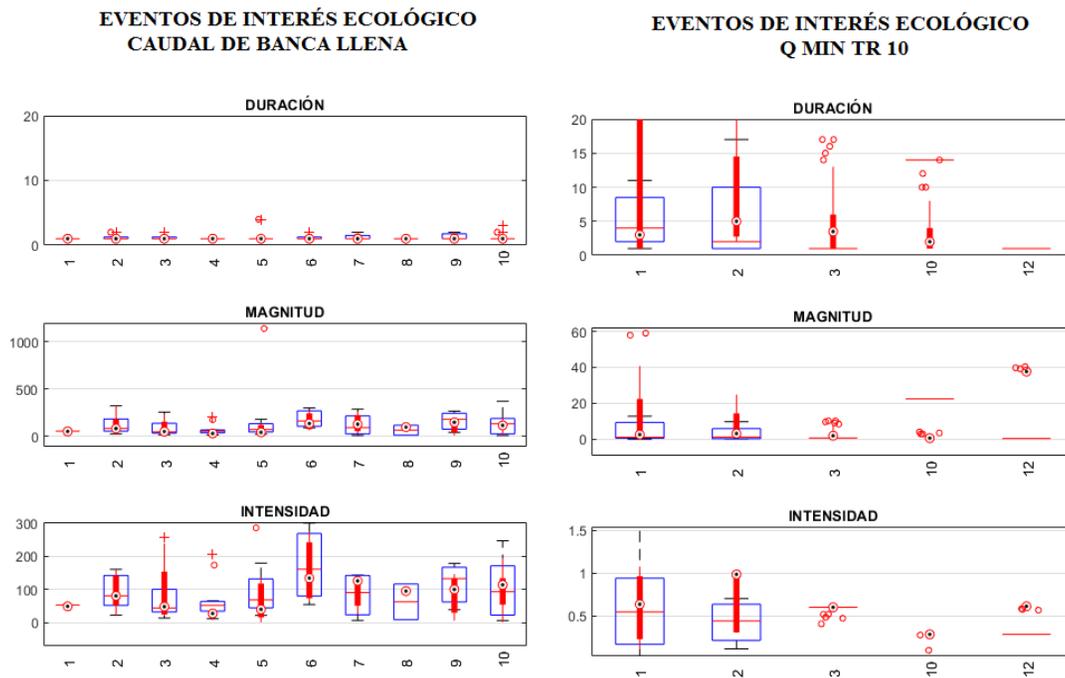


Figura 5.17 Eventos de interés ecológico para la quebrada La Colorada en el tramo de interés

Los porcentajes de extracción para el río La Colorada permiten garantizar con un nivel de significancia del 5% que no existirá alteración en el régimen de caudales y que se conservan los valores medios de los eventos de interés ecológico usando la prueba de suma de rangos. Finalmente, en la Figura 5.18 se presenta la curva de duración que representa el régimen de caudales para condiciones naturales y alteradas.

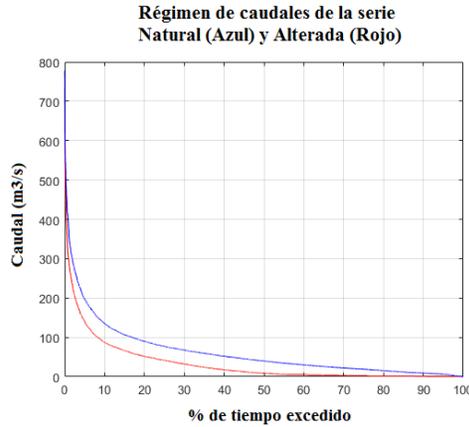


Figura 5.18 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado.

5.2.5 Caudal ambiental para el río La Colorada

Una vez garantizado que no existe alteración de las métricas de interés hidrológico antes y después de la intervención, el caudal aguas abajo es considerado caudal ambiental. En la Tabla 5.23 se presenta el caudal ambiental del río La Colorada en el tramo de estudio

Tabla 5.23 Caudales ambientales para el río La Colorada en el tramo de interés (m³/s)

Condición	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Seca	14.8	24.6	24.5	33.8	22.4	24.2	22.1	17.6	30.8	29.1	25.31	18.31
Normal	22.0	34.6	39.5	49.5	47.4	38.9	34.2	32.9	43.4	53.9	43.19	28.33
Húmeda	28.9	46.3	58.9	76.2	69.9	55.6	53.1	61.0	66.7	76.4	61.73	41.32

En la Figura 5.19 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica para el río La Colorada en la estación Ayacucho. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

Los caudales ambientales corresponden, en promedio, al 63 % de los caudales medios del río La Colorada en el tramo de Interés.

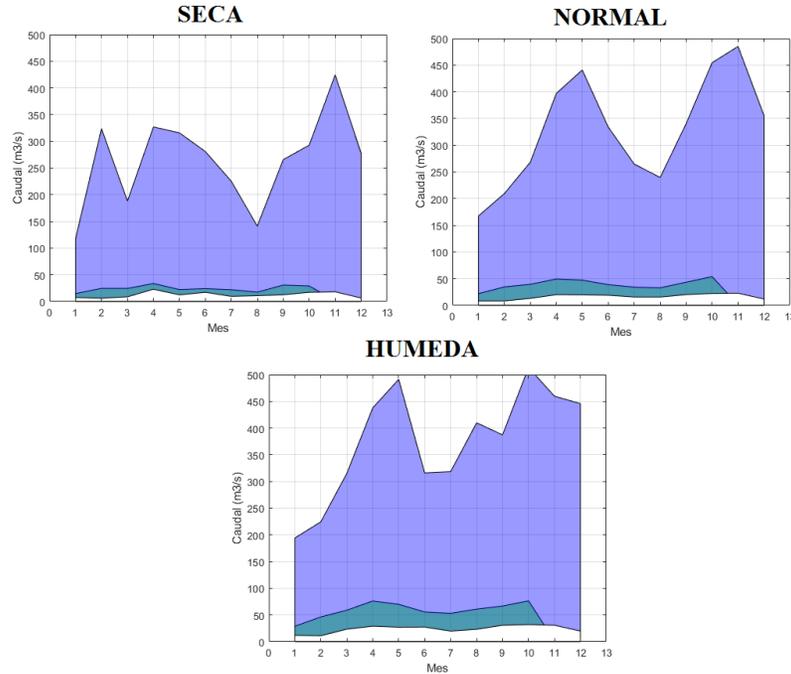


Figura 5.19 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado.

También se definen los condicionamientos para minimizar la alteración del régimen de caudales a continuación

Tabla 5.24 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones húmedas

	mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Duración media	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1.0	2.0
	Duración máxima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Duración mínima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Recomendación	0 eventos 0 días			1 eventos 1 día	0 eventos 0 días					1 eventos 2 días		
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	12	113	0	0	0	7	9	5	2
	Duración media	0	0	0	2	2.8	0	0	0	2.3	2.8	3.1	2.3
	Duración máxima	0	0	0	8	7	0	0	0	12	8	11	8
	Duración mínima	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
	Recomendación	0 eventos 0 días			1 eventos 3 días	0 eventos 0 días			1 eventos 2.5 +/- 1 días				
Qmin10	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recomendación	0 eventos 0 días												

Tabla 5.25 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones Normales

mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre		
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Recomendación	0 eventos 0 días												
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	7	0	
	Duración media	0	0	0	0	2.3	0	0	0	0	0	1	0	
	Duración máxima	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	
	Duración mínima	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	
	Recomendación						1 evento 2 día							1 evento 1 día
Qmin10	# Eventos Natural	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración media	1	8.3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración máxima	1	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración mínima	1	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Recomendación	1 eventos 5 días				0 eventos 0 días								

Tabla 5.26 Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones Secas

mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
Q Tr 15	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Recomendación	0 eventos 0 días											
QLL	# Eventos Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Recomendación	0 eventos 0 días											
Qmin10	# Eventos Natural	0	7	16	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración media	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración máxima	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Duración mínima	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Recomendación	1 eventos 2 días				0 eventos 0 días							

Como se mencionó con antelación, el método de caudal ambiental desarrollado por el MADS – IDEAM con el soporte de la Universidad Nacional, arroja caudales ambientales equivalentes al 63% del caudal medio del río (en promedio), mientras el método ANLA-UNAL se acerca al 42% y el método del IDEAM se considera intermedio con un 54%. Los cálculos demuestran que la metodología aplicada al río Bogotá es muy restrictiva bajo la hipótesis de no alteración del régimen de flujo.

5.3 Estimación de caudal ambiental sobre la quebrada La Gómez

5.3.1 Definición de la serie hidrológica de trabajo para la quebrada La Gómez en el tramo de interés

El grupo de modelación del IDEAM mediante el presente convenio desarrolló un modelo lluvia-escorrentía de escala diaria sobre las subzonas hidrográficas de los ríos Opón, Sogamoso y Lebrija. En particular para la cuenca del río Lebrija, el modelo permite estimar las series de caudales medios diarios desde 1982 hasta 2019 utilizando las estaciones de precipitación y caudales existentes a lo largo de la red de drenaje, siendo la cuenca de la quebrada La Gómez uno de los afluentes simulados. Más detalles de la modelación en Duque Gardezabal & Sanabria Morera (2022).

Por ser datos extraídos de una modelación, cuyas premisas de cálculo se basan en la estacionariedad de los parámetros, se asume que las series simuladas por el modelo son homogéneas, y que evidentemente no tendrán datos faltantes.

Los caudales medios mensuales se extraen al agregar el conjunto de datos, los caudales mínimos se asumirán iguales los caudales mínimos diarios, mientras que los caudales máximos instantáneos, por suposición (aunque es muy deficiente) se asumirán a partir de los caudales máximos diarios para cada año.

5.3.2 Caracterización del régimen de caudales para la quebrada La Gómez en el tramo de interés

Usando nuevamente el Índice Oceánico del Niño (ONI por sus siglas en inglés) se clasifican los caudales simulados de la quebrada la Gómez como se muestra en la Figura 5.20.

Clasificación de los caudales diarios de la quebrada La Gómez por condición hidrológica

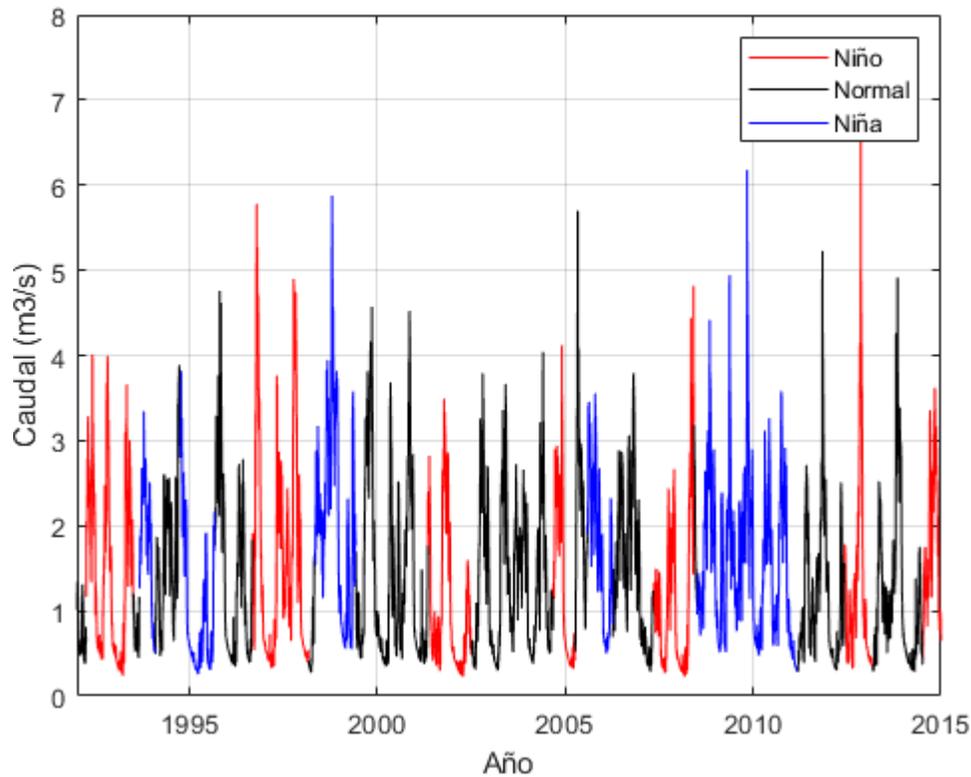


Figura 5.20 Caracterización del régimen de caudales del río La Colorada usando el ENSO.

Una vez conformada la muestra de caudales medios diarios correspondiente a cada una de las condiciones hidrológicas, se estima para cada mes y cada condición hidrológica el valor medio de los caudales mínimos y máximos, tal como se ilustra en la Figura 5.21, en donde comparan dichas cantidades y se comparan con los caudales medios multianuales. Los valores extremos (máximos y mínimos) definen el rango inicial de variación de caudales dentro del cual debe garantizarse el régimen de caudales ambientales que condicionará cualquier aprovechamiento hídrico en un sitio específico de la red de drenaje, dichos valores también se encuentran en la Tabla 5.27.

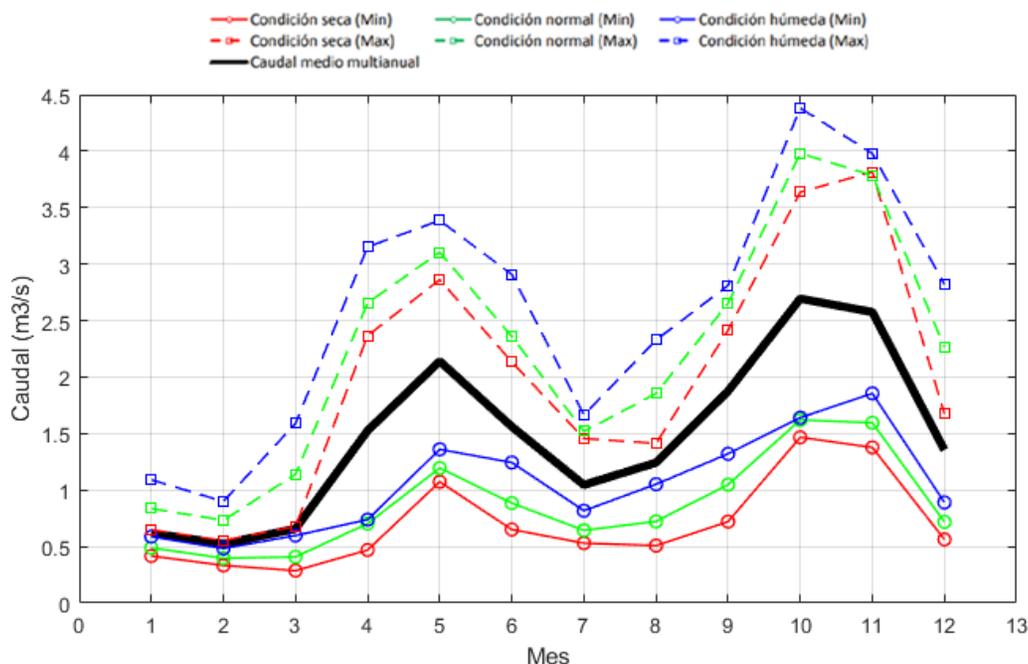


Figura 5.21 Régimen característico de los caudales de la quebrada la Gómez
 Tabla 5.27 Caudales característicos la quebrada La Gómez

AÑO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO		0.62	0.52	0.66	1.53	2.14	1.56	1.05	1.24	1.88	2.69	2.58	1.35
MINIMOS	SECO	0.42	0.33	0.29	0.47	1.07	0.65	0.53	0.51	0.72	1.47	1.38	0.56
	NORMAL	0.49	0.40	0.41	0.70	1.19	0.88	0.64	0.72	1.05	1.62	1.60	0.72
	HUMEDO	0.59	0.48	0.60	0.74	1.36	1.24	0.82	1.05	1.32	1.64	1.86	0.89
MAXIMOS	SECO	0.65	0.55	0.68	2.37	2.86	2.13	1.46	1.41	2.42	3.64	3.82	1.67
	NORMAL	0.84	0.73	1.14	2.66	3.10	2.36	1.52	1.85	2.65	3.98	3.79	2.27
	HUMEDO	1.09	0.90	1.59	3.15	3.39	2.91	1.66	2.33	2.81	4.38	3.98	2.82

5.3.3 Métricas de interés ecológico para la quebrada La Gómez en el tramo de interés

No existe batimetría de la quebrada la Gómez ni ensayos de trazadores, por tanto, no se puede estimar el caudal de conectividad longitudinal.

Algo bastante curioso de la metodología de estimación de caudales ambientales aplicada al río Bogotá es la combinación de escalas temporales. Por ejemplo, en cuencas pequeñas, los caudales máximos poseen valores muy altos y tiempos de concentración que normalmente duran menos de 24 horas; de hecho, los caudales máximos son instantáneos, por ello el caudal de banca llena y cualquier otro máximo estimado por otras metodologías no será observado en los registros históricos diarios.

Dicho esto, el caudal de banca llena será asumido como el valor promedio de los caudales máximos diarios anuales, es decir, $4.58 \text{ m}^3/\text{s}$ y, usando la función de distribución de probabilidades generalizada de eventos extremos, considerando la desviación estándar de dicho conjunto de datos ($1.02 \text{ m}^3/\text{s}$) el caudal máximo con periodo de retorno de 15 años será de $6.13 \text{ m}^3/\text{s}$. los caudales mínimos son estimados usando la fdp Gumbel considerando una media de $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ y desviación estándar de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como resumen de las métricas de interés ecológico tenemos:

- Caudal de conectividad longitudinal: -no puede estimarse
- Caudal de banca llena: $4.58 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal máximo con periodo de retorno de 15 años: $6.13 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años: $0.2355 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.3.4 *Eventos del régimen hidrológico natural para la quebrada La Gómez en el tramo de interés y propuesta de máximo aprovechamiento*

Para la quebrada La Gómez igualmente se estiman los indicadores: Duración T, magnitud D, e intensidad I. En este caso se elabora un análisis de las rachas (excursiones) que encuentran por encima de las métricas QB y QMax Tr=15, o por debajo de los caudales Qt-Q y QMinTr=10. Una vez caracterizada la duración, la magnitud y la intensidad de los eventos de interés ecológico en condiciones naturales, se define la máxima extracción de caudales de la quebrada La Gómez para el tramo de forma tal que no exista una alteración del régimen de caudales como se muestra en la Tabla 5.28:

Tabla 5.28 Fracción del caudal aprovechable con respecto del caudal medio mensual multianual.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0.4	0.28	0.36	0.45	0.52	0.42	0.31	0.33	0.38	0.4	0.32	0.18

Considerando dichos porcentajes de extracción (aprovechamiento) se construye la serie de caudales “aguas abajo” o caudal ambiental, definidos como el caudal diario observado, menos el caudal medios mensual multianual multiplicado por la fracción aprovechable, siempre y cuando el resultado de dicha resta sea mayor que el caudal mínimo promedio multianual según la condición hidrológica, en caso tal de superar dicho umbrales, los caudales ambientales deben ser iguales al

caudal mínimo promedio mensual multianual para la condición hidrológica (seca, normal, o húmeda) analizada.

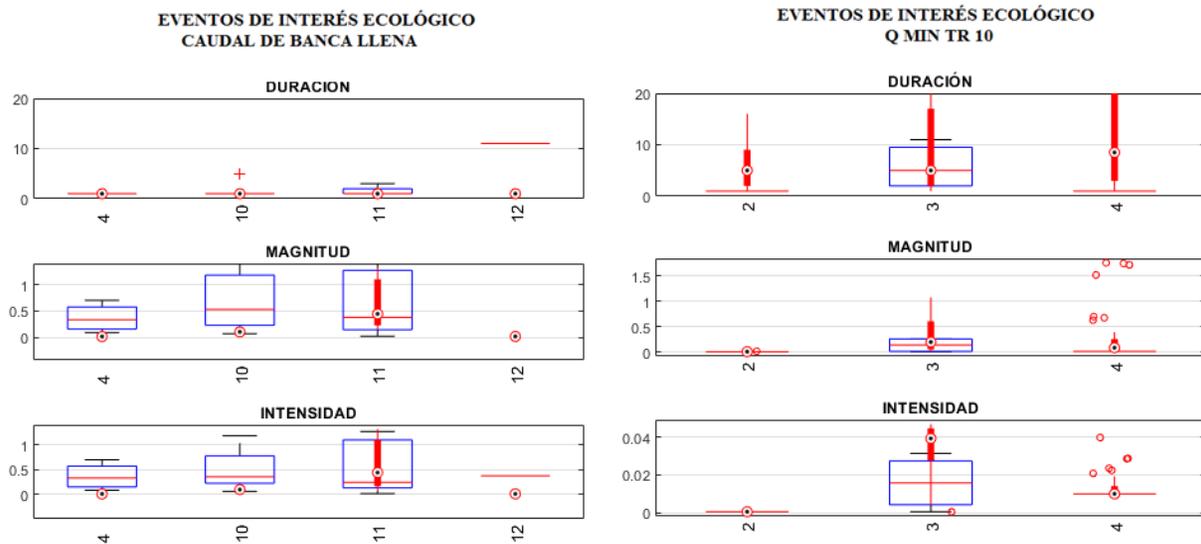


Figura 5.22 Eventos de interés ecológico para la quebrada La Gómez en el tramo de interés

Los porcentajes de extracción para la quebrada La Gómez permiten garantizar con un nivel de significancia del 5% que no existirá alteración en el régimen de caudales y que se conservan los valores medios de los eventos de interés ecológico usando la prueba de suma de rangos. Finalmente, en la Figura 5.23 se presenta la curva de duración que representa el régimen de caudales para condiciones naturales y alteradas.

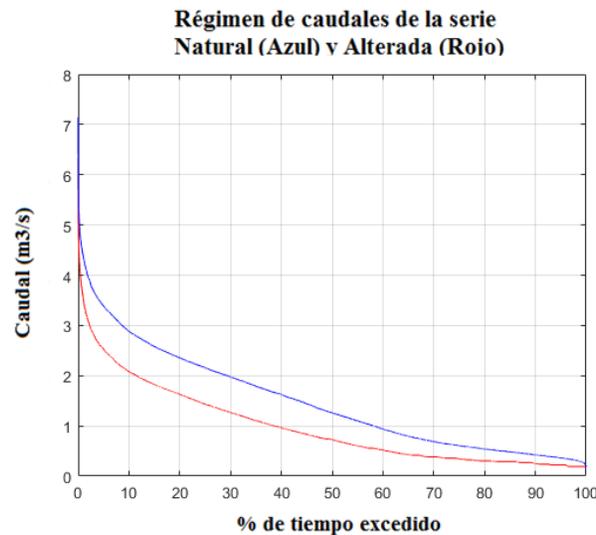


Figura 5.23 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado.

5.3.5 Caudal ambiental para la quebrada La Gómez

Una vez garantizado que no existe alteración de las métricas de interés hidrológico antes y después de la intervención, el caudal aguas abajo es considerado caudal ambiental. En la Tabla 5.29 se presenta el caudal ambiental del río La Colorada en el tramo de estudio

Tabla 5.29 Caudal ambiental para la quebrada La Gómez (m³/s)

Condición	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Seca	0.31	0.28	0.24	0.79	0.94	0.86	0.68	0.64	0.89	1.57	1.63	0.70
Normal	0.40	0.39	0.46	0.97	1.13	0.99	0.76	0.89	1.20	1.66	1.78	1.13
Húmeda	0.53	0.49	0.78	1.25	1.28	1.33	0.94	1.30	1.45	1.78	2.01	1.54

En la Figura 5.24 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica para el río La Colorada en la estación Ayacucho. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

Los caudales ambientales corresponden, en promedio, al 69 % de los caudales medios de la quebrada La Gómez en el tramo de Interés.

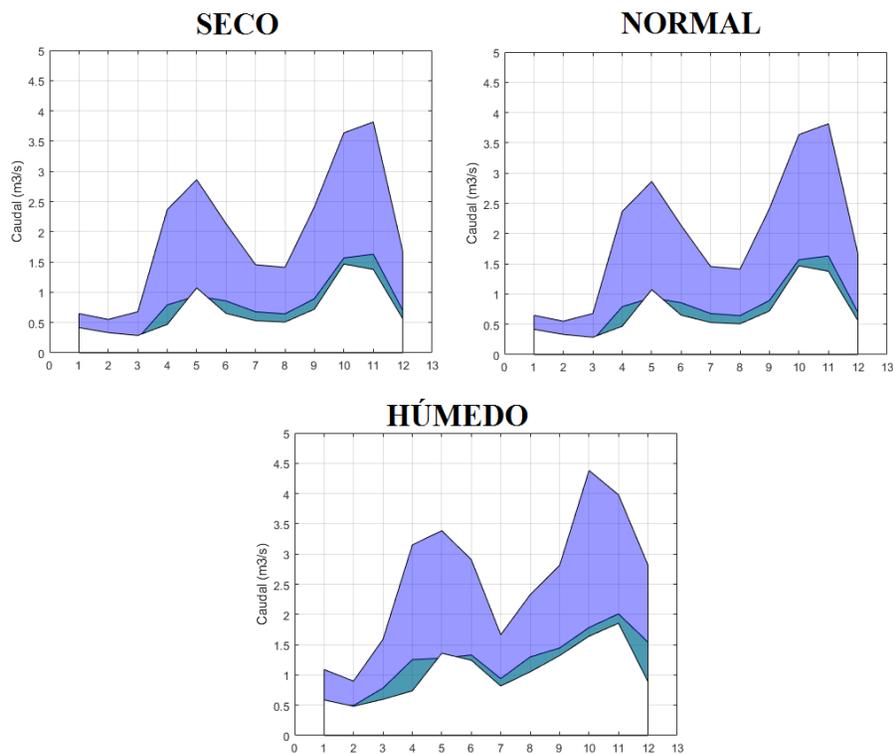


Figura 5.24 Régimen de caudales antes y después de aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado.

Como se mencionó con antelación, el método de caudal ambiental desarrollado por el MADS – IDEAM con el soporte de la Universidad Nacional, arroja caudales ambientales equivalentes al 63% del caudal medio del río (en promedio), mientras el método ANLA-UNAL se acerca al 38.3% y el método del IDEAM se considera intermedio con un 52.4%. Los cálculos demuestran que la metodología aplicada al río Bogotá es muy restrictiva bajo la hipótesis de no alteración del régimen de flujo.

5.4 Línea base hidrobiológica. Campaña de monitoreo

Esta información se debe considerar para validar o modificar los valores de caudal ambiental definidos en las secciones hidrológicas y de calidad del agua. Aunque un paso intermedio en la metodología para determinar el caudal ambiental es considerar la calidad del agua (como se resalta en el capítulo de conclusiones 6.1), se expone aquí la línea base hidrobiológica para los tres casos de estudio piloto.

5.4.1 Macroinvertebrados acuáticos

COMPOSICIÓN Y DENSIDAD DE TAXONES

En la Tabla 5.30 se presenta el listado de los taxones de macroinvertebrados encontrados en la campaña de muestreo en las 6 estaciones, en la cual fueron encontrados 39 morfotipos, estos morfotipos pertenecen a 4 phyls de los cuales el grupo más representativo fue Arthropoda (Insecta).

Tabla 5.30 Listado taxonómico de macroinvertebrados bénticos identificados en las 6 estaciones durante la campaña de muestreo

Phylum	Clase	Orden	Familia	Taxa
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Chironominae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Tanypodinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Orthocladinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Psychodidae	Clognia albipunctatus
Arthropoda	Insecta	Diptera	Muscidae	Muscinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Simuliidae	Simulium sp.

Arthropoda	Insecta	Diptera	Tipulidae	Tipula sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Calamacerotidae	Phylloicus sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydropsychidae	Smicridea sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Odontoceridae	Marilia sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Leptoceridae	Nectopsyche sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydroptilidae	Hydroptila sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydropsychidae	Leptonema sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Glossosomatidae	Mortoniella sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Ptilodactylidae	Anchytarsus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Microcylloepus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilidae
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Xenelmis sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Staphylinidae	Staphylinidae
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Dermestidae	Dermestidae
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Phanocerus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Cylloepus
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Veliidae	Rhagovelia sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Gerridae	Trepobates sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Notonectidae	Martarega sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Mesoveliidae	Mesoveloidea
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Naucoridae	Pelocoris sp.
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Leptohiphidae	Leptohiphes sp.
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Leptophlebiidae	Thraulodes sp.

Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Baetidae	Baetodes sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Libellulidae	Dythemis sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Libellulidae	Brechmorhoga sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Gomphidae	Phyllogomphoides sp.
Arthropoda	Insecta	Lepidoptera	Crambidae	Crambidae
Annelida	Oligochaeta	Haplotaxida	Naididae	Nais sp.
Annelida	Hirudinea	Glossiphoniiformes	Glossiphoniidae	Dacnobdella sp.
Platuhelminthes	Turbellaria	Tricladida	Planariidae	Dugesia sp.
Mollusca	Gastropoda	Neotaenioglossa	Cochliopidae	Cochliopa sp.
Mollusca	Gastropoda	Basommatophora	Ancylidae	Ancylidae sp.

Se colectan en total 39 taxones pertenecientes a 4 phyls y 12 familias. El orden que representa mayor diversidad de organismos fue Coleóptera (8 morfotipos), seguido de díptera (7 morfotipos) y trichoptera (7 morfotipos). Al observar el perfil porcentual general de abundancias y el perfil de abundancias totales que contiene la información de toda la campaña de muestreo (Figura 5.25 y Figura 5.26) se observa que la distribución de los morfotipos pertenecientes a Chironominae, Leptonema sp, Rhagovelia sp y Leptohyphes sp, presentan las mayores abundancias respectivamente. Aunque existe una buena representación o nivel de ocurrencia de varias especies, existen claras tendencias al registro de varios morfotipos con mayor frecuencia y abundancia con respecto a otros, esto demuestra que la diversidad general del sistema esta sopesada en morfotipos que son de baja frecuencia o accidentales y que la comunidad se encuentra dominada por un bajo número de identidades.

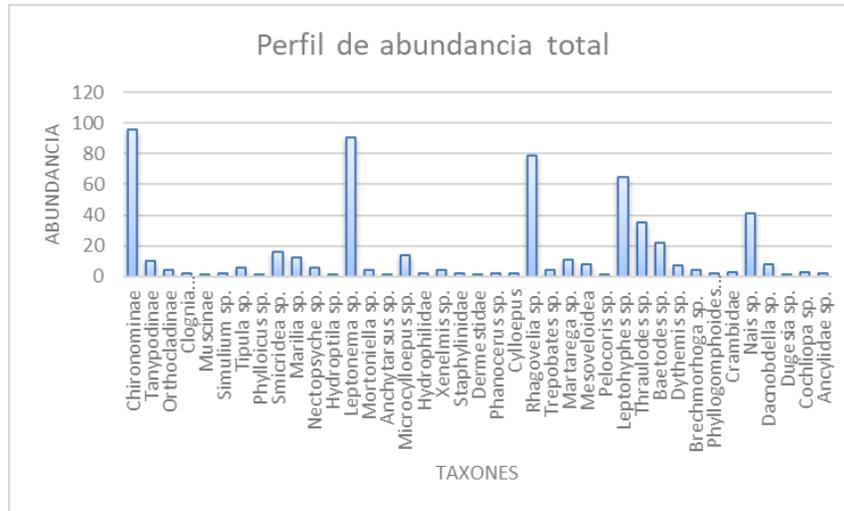


Figura 5.25 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados béticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R, QGP2R, PS, RCP1O

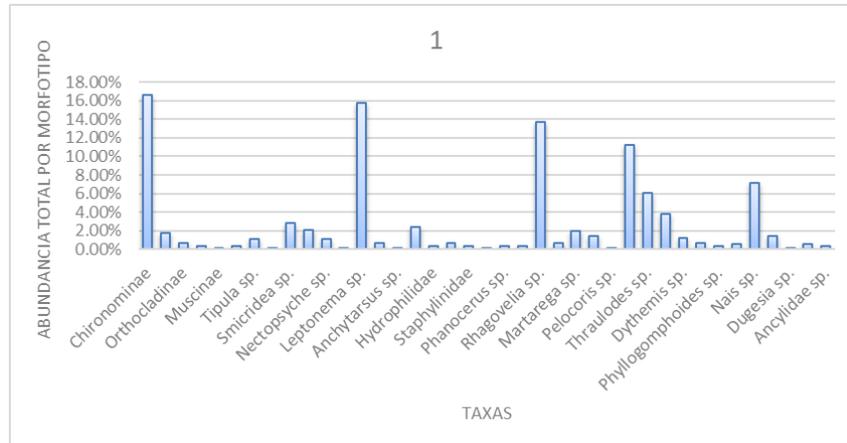


Figura 5.26 Perfil porcentual del total de la abundancia de los macroinvertebrados béticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R, QGP2R, PS, RCP1O.

PERFIL PARA CADA SITIO DE MUESTREO

Quebrada La Gómez

La quebrada la Gómez se divide en 4 estaciones de muestreo, donde se seleccionaron dos puntos en zonas de poza y dos puntos en zonas de rápido. En términos generales, este muestreo refleja adecuadamente la comunidad de macroinvertebrados ya que se consideran diferentes tipos de hábitats lo cual concuerda con la información citada en la introducción donde se puede concluir que los macroinvertebrados acuáticos tienen diferentes preferencias de hábitats, por esta razón es

importante analizar la mayor cantidad de ambientes posibles para que el muestreo represente de forma correcta toda la comunidad.

En la quebrada La Gómez se colecta la mayor cantidad de taxones, representados por 27 taxas, divididos en 3 phylos, donde la mayoría pertenecen al phylo Arthropoda (insectos). En la , al observar el perfil general de abundancias que contiene la información de las 4 estacione, se observa que la distribución de los morfotipos pertenecientes a Chironominae, Leptonema sp, Leptohyphes sp y Thraulodes sp.

Chironominae es una subfamilia de la familia Chironomidae, estos organismos son tolerantes a altas concentraciones de materia orgánica (esto se refleja en la puntuación que recibe la familia en el BMWP (Tabla 3.5), sin embargo, son muy comunes y se encuentran muy asociados a sistemas con poco movimiento como las pozas, razón por la cual pueden ser tan abundantes en este transecto (se analizan dos puntos de pozas, sería interesante conocer las pozas, si tienen buena acumulación de materia orgánica, es un factor importante que influye en la presencia de Chironomidae).

Por otro lado, Leptonema sp., género de la familia Hydropsychidae y Leptohyphes sp., género de la familia Leptohyphidae están asociados a aguas de buena calidad, estos organismos no son muy tolerantes a la contaminación (puntuación en el BMWP de 7) y suelen encontrarse en lugares o zonas con corriente adheridos al sustrato (zonas de rápidos). Thraulodes sp., perteneciente a la familia Leptophlebiidae es el organismo que representa la menor tolerancia a la carga orgánica o a la contaminación en esta estación, por esta razón recibe una puntuación de 9 en el índice BMWP, esté género se encuentra asociado a aguas limpias, con buen oxígeno y en zonas con corriente, viven adheridos al sustrato, principalmente rocas.

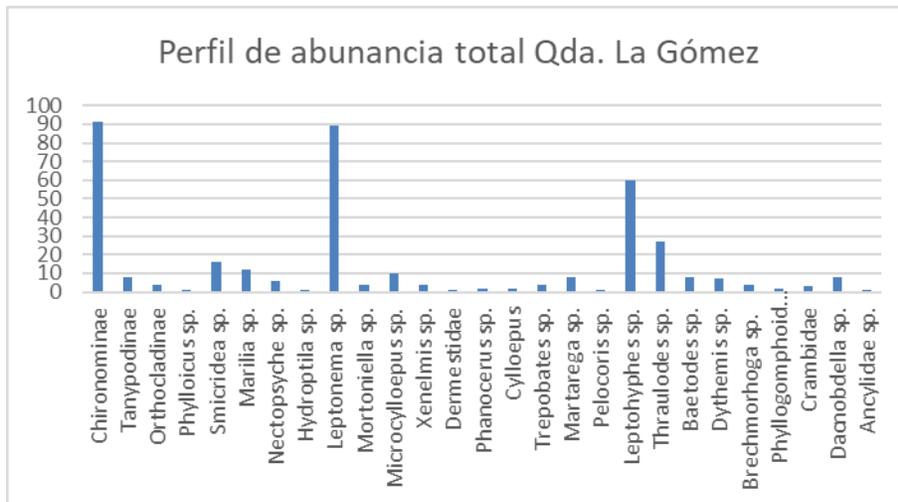


Figura 5.27 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en las estaciones QGP1P, QGP2P, QGP1R Y QGP2R

Puente Sogamoso

En la Figura 5.28, al observar el perfil general de abundancias, se observa que la distribución de los morfotipos pertenecientes a Nais sp y Tipula sp, son los más abundantes respectivamente, esto demuestra que la diversidad general del sistema esta sopesada en morfotipos que son de baja frecuencia o accidentales y que la comunidad se encuentra dominada por un bajo número de identidades. Tanto Tipula sp como Nais sp están asociado a ambientes con alta carga de materia orgánica, es decir, ambos son taxones resistentes a la contaminación y son poco sensibles, en el índice BMWP la familia Tipulidae se le asigna una puntuación de 3.

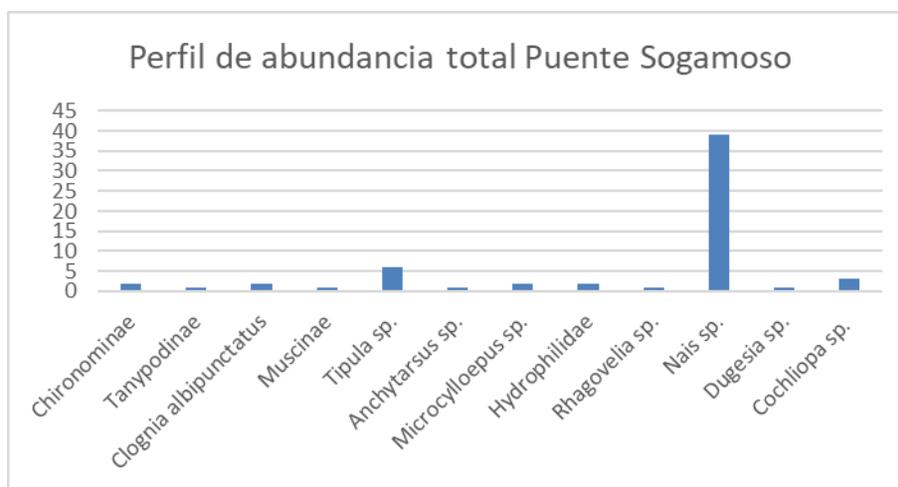


Figura 5.28 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en la estación Puente Sogamoso

En términos generales, esta muestra contenía gran cantidad de residuos sólidos o desechos plásticos, tal como se observa en la Figura 5.29. Esta carga contaminante tiene influencias sobre la comunidad de macroinvertebrados y limita la distribución de estos debido a los rangos de tolerancias que poseen los diferentes taxones. En esta estación se colectaron en total 12 taxones distribuidos en 4 phyls, donde el mayor número de taxones pertenecen al phylo Annelida, esto se debe al estado en el que se encuentra el tramo seleccionado.



Figura 5.29 Restos de desechos inorgánicos (restos plásticos) encontrados en las dos muestras de la estación Puente Sogamoso.

Río La Colorada

Esta estación solo estaba conformada por un punto de muestreo, correspondiente a una zona de ORILLA, sin embargo, se encuentran 14 taxones pertenecientes a 3 phyls, representados en su mayoría por el phylo Arthropoda (insectos).

Es importante resaltar que tal como se observa en la Figura 5.30, los organismos más abundantes fueron Rhagovelia sp. y Baetodes sp. Rhagovelia es un Hemíptera del grupo de los “patinadores” ya que se encuentran caminando sobre la superficie del agua, esto gracias a la tensión superficial. El hecho de que haya tensión superficial es un primer indicio de que la corriente no tienen tensoactivos o jabones, ya que estos eliminan dicha tensión en el agua. Este taxon pertenece a la familia Veliidae y no son tolerantes a la carga orgánica o a la contaminación, esto se observa en la puntuación que recibe la familia en el índice BMWP (8). Baetodes sp pertenece a la familia Batidae, son ephemeropteras que viven asociados a los sustratos, se encuentran en zonas con buen oxígeno y tienen poca tolerancia o resistencia a la contaminación, por esta razón su puntuación es de 7 en el BMWP.

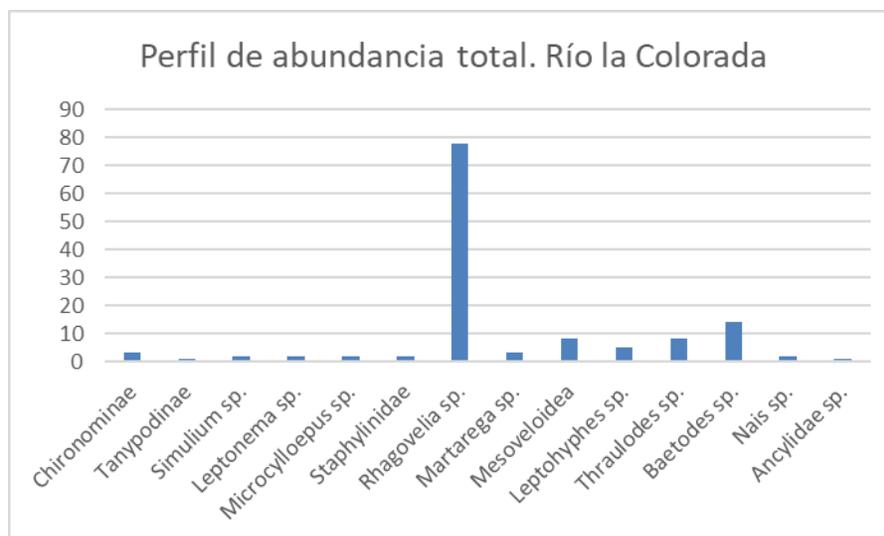


Figura 5.30 Perfil del total de la abundancia de los macroinvertebrados bénticos registrados en la campaña de muestreo en la estación Río La Colorada, P1, Orilla (RCP10)

ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE ORGANISMOS POR CADA ESTACIÓN DE MUESTREO

En la Tabla 5.31 se puede observar que las estaciones donde se presenta mayor abundancia de organismos al igual que la mayor diversidad de géneros son QGP1R y QGP2R, ambas zonas corresponden a rápidos. Adicionalmente, al observar la distribución de las diferentes familias en cada uno de los sitios (Figura 5.31) se podría decir que las afiliaciones taxonómicas acompañantes corresponden a familias tolerantes a la contaminación orgánica en el caso de Chironomidae, ya que presentan una buena adaptación a cambios en la velocidad y el caudal de la corriente y se encuentran en zonas de pozas con altas cargas de materia orgánica. Por otro lado, se resaltan los organismos Leptonema, Rhagovelia, Leptohyphes y Nais por ser los más abundantes en algunas de las estaciones.

Tabla 5.31 Registro cuantitativo de la densidad de macroinvertebrados bénticos por unidad de área en las 6 estaciones monitoreadas durante la campaña

Morfotipo	Estaciones de muestreo					
	QGP1P	QGP2P	QGP1R	QGP2R	PS	RCP10
Chironominae	15	44	12	20	2	3
Tanypodinae	1	5	0	2	1	1
Orthocladinae	2	2	0	0	0	0
Clognia albipunctatus	0	0	0	0	2	0

Muscinae	0	0	0	0	1	0
Simulium sp.	0	0	0	0	0	2
Tipula sp.	0	0	0	0	6	0
Phylloicus sp.	0	1	0	0	0	0
Smicridea sp.	0	1	10	5	0	0
Marilia sp.	6	0	5	1	0	0
Nectopsyche sp.	2	0	2	2	0	0
Hydroptila sp.	0	0	1	0	0	0
Leptonema sp.	0	0	36	53	0	2
Mortoniella sp.	0	0	4	0	0	0
Anchytarsus sp.	0	0	0	0	1	0
Microcylloepus sp.	0	0	0	10	2	2
Hydrophilidae	0	0	0	0	2	0
Xenelmis sp.	1	0	1	2	0	0
Staphylinidae	0	0	0	0	0	2
Dermestidae	0	0	1	0	0	0
Phanocerus sp.	0	0	0	2	0	0
Cylloepus	0	0	0	2	0	0
Rhagovelia sp.	0	0	0	0	1	78
Trepobates sp.	1	0	0	3	0	0
Martarega sp.	8	0	0	0	0	3
Mesoveloidea	0	0	0	0	0	8
Pelocoris sp.	0	0	1	0	0	0
Leptohyphes sp.	1	1	30	28	0	5
Thraulodes sp.	3	0	12	12	0	8
Baetodes sp.	0	0	4	4	0	14
Dythemis sp.	0	0	7	0	0	0

Brechmorhoga sp.	0	0	0	4	0	0
Phyllogomphoides sp.	0	0	2	0	0	0
Crambidae	0	0	1	2	0	0
Nais sp.	0	0	0	0	39	2
Dacnabdella sp.	8	0	0	0	0	0
Dugesia sp.	0	0	0	0	1	0
Cochliopa sp.	0	0	0	0	3	0
Ancylidae sp.	1	0	0	0	0	1
ABUNDANCIA TOTAL	49	54	129	152	61	131
# DE TAXA	12	6	16	16	12	14

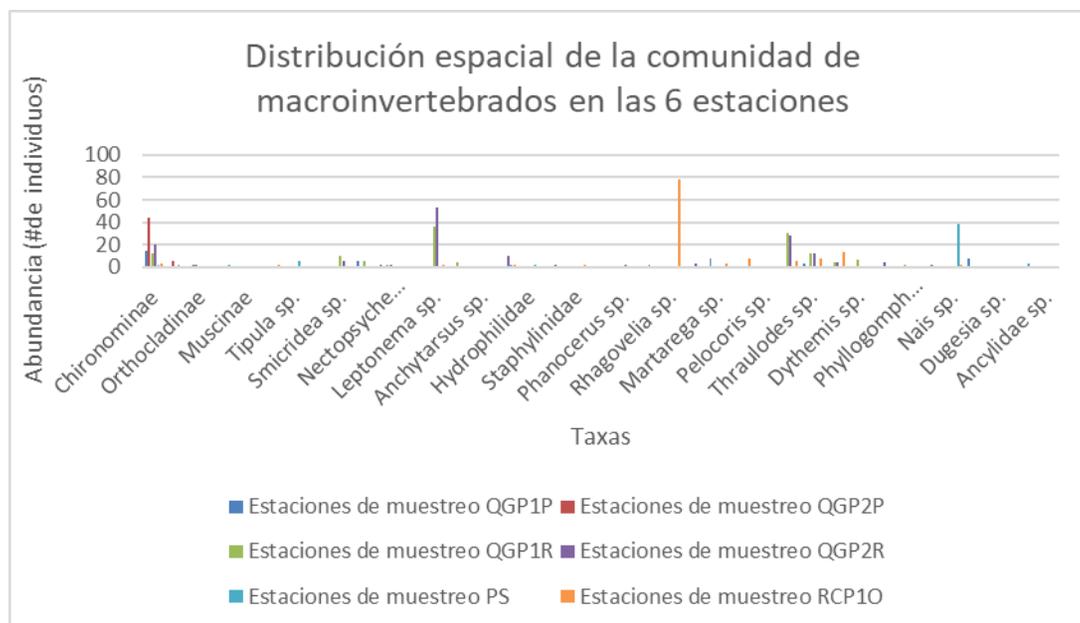


Figura 5.31 Distribución espacial de los morfotipos de macroinvertebrados bénticos en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo

Se registraron 39 morfotipos entre las 6 estaciones a través de la metodología cuantitativa, el género de ocurrencia común en la mayoría de las estaciones corresponde a organismos de hábito bentónico donde resaltan los ephemeropteras en los rápidos y Leptonema, también son organismos asociados con la presencia de materia orgánica, se resalta la presencia de Rhagovelia, organismos asociados a buena calidad en la estación de muestreo RCP10. En la quebrada la Gómez se cuenta con información muy completa donde la mayor diversidad está asociada a las zonas de rápidos (QGP1R

y QGP2R). La estación de muestreo PS presenta las menores abundancias y los taxones representativos están asociados a mala calidad (Figura 5.32).

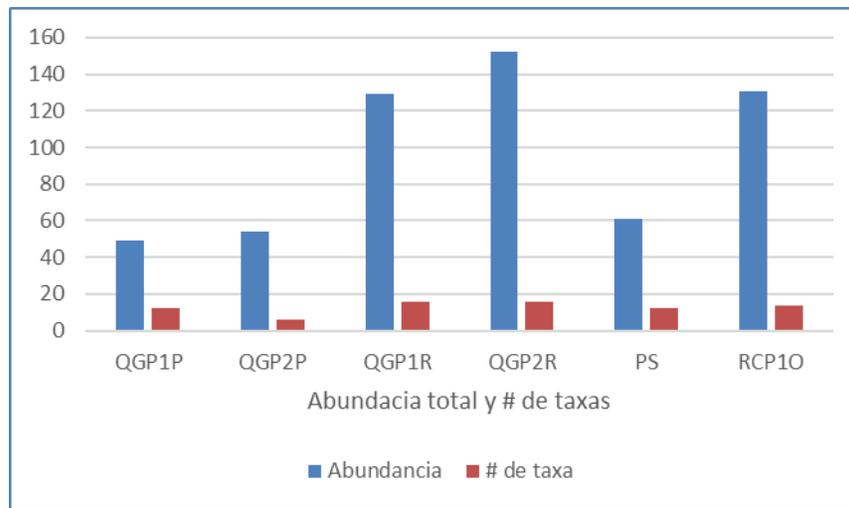


Figura 5.32 Densidad Total de organismos (este valor corresponde al total de organismos colectados por género en cada estación) y Número de morfotipos de macroinvertebrados bénticos (# de géneros diferentes) en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo

5.4.2 Algas Perifíticas

COMPOSICIÓN Y DENSIDAD DE TAXONES

En la Tabla 5.32 se presenta el listado de los taxa de algas perifíticas encontrados en las 6 estaciones de muestreo. Fueron determinados 23 morfotipos, los organismos encontrados pertenecen 4 divisiones algales: Cyanobacteria o cianobacterias, Chlorophyta o algas verdes, Charophyta y un mayor número de representantes correspondiente adjudicados a la división Bacillariophyceae o “Diatomeas”.

Tabla 5.32 Listado de algas perifíticas identificadas

DIVISION	CLASE	ORDEN	FAMILIA	GENERO
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Hantzschia</i> sp.
				<i>Nitzschia</i> sp
				<i>Nitzschia</i> sp1.

				<i>Nitzschia</i> sp2.
		Cymbellales	Cymbellaceae	<i>Cymbella</i> sp.
			Gomphonemataceae	<i>Gomphonema</i> sp.
		Desmidiales	Desmidiaceae	<i>Staurastrum</i> sp.
		Melosirales	Melosiraceae	<i>Melosira</i> sp
		Naviculales	Amphipleuraceae	<i>Amphipleura</i> sp.
				<i>Frustulia</i> sp.
			Pleurosigmataceae	<i>Gyrosigma</i> sp
			Naviculaceae	<i>Navicula</i> sp.
			Pinnulariaceae	<i>Pinnularia</i> sp.
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Oscillatoria</i> sp.
				<i>Oscillatoria</i> sp1.
				<i>Oscillatoria</i> sp2.
Chlorophyta	Zygnematophyceae	Sphaeropleales	Hydrodictyaceae	<i>Pediastrum</i> sp.
	Chlorophyceae			<i>Pediastrum</i> sp1.
				<i>Pediastrum</i> sp2.
			Scenedesmaceae	<i>Scenedesmus</i> sp.
		Surirellales	Surirellaceae	<i>Surirella</i> sp.
Charophyta	Conjugatophyceae	Zygnematales	Desmidiaceae	<i>Cosmarium</i> sp.
	Conjugatophyceae		Zygnemataceae	<i>Spirogyra</i> sp.

Al observar el perfil porcentual general de abundancias de la campaña de muestreo (Figura 5.33) se identifica una importante presencia de la diatomea *Navicula* sp. y la clorofícea *Scenedesmus* sp. A pesar de encontrarse una buena representación o nivel de ocurrencia de varias especies, existen claras tendencias de presencia de algunos morfotipos con mayor frecuencia y abundancia con respecto a otros, esto demuestra que la diversidad general del sistema está sopesada en morfotipos

que son de baja frecuencia o accidentales y que la comunidad genera rasgos de dominio por un bajo número de identidades.

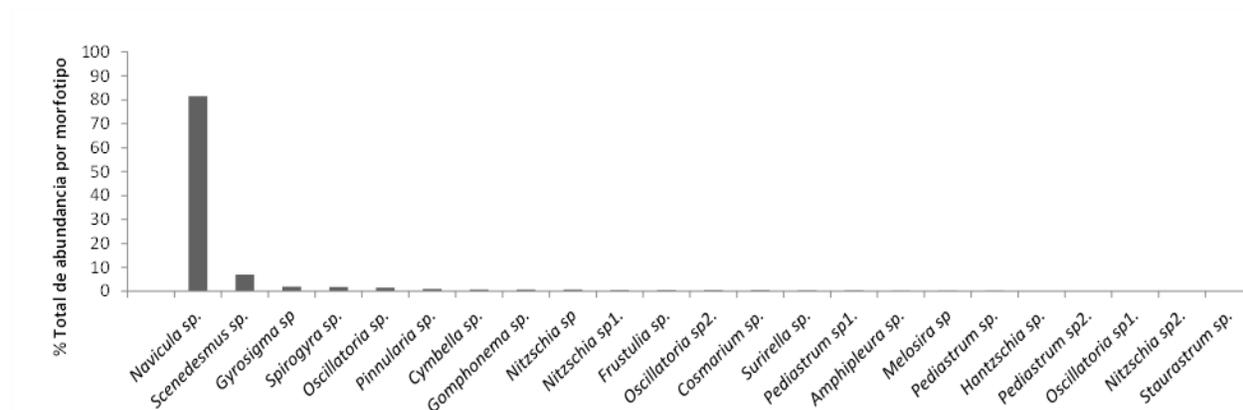


Figura 5.33 Perfil porcentual del total de la abundancia de las algas perifíticas encontradas en las seis estaciones

La mayoría los morfotipos registrados son representantes de diatomeas unicelulares, como los organismos pertenecientes a las familias Naviculaceae, Bacillariaceae y Cymbellaceae. Estos morfotipos son frecuentes en la mayoría de las comunidades de algas perifíticas y se encuentran adaptados a corrientes que presenten variaciones en el caudal y velocidad de la corriente influenciados por las precipitaciones, al pertenecer a la división Bacillariophyta (Ramírez, 2000). Como se mencionó anteriormente, el género Scenedesmus sp. fue relevante; algunas especies de este género pueden permanecer en sistemas acuáticos con alto contenido mineral, así como en aguas contaminadas (Ramírez, 2000).

A continuación, se presentan las tabulaciones de los resultados obtenidos en las 6 estaciones monitoreadas (Tabla 5.33), adicionalmente, en la Figura 5.34 se encuentra el perfil de las abundancias por género. En este perfil se puede visualizar que las diatomeas como Navicula sp. así como el género Scenedesmus sp. se confirman como representativos.

Tabla 5.33 Registro cuantitativo de la densidad de algas perifíticas por unidad de área (Org/cm²)

MORFOTIPO	QGP1P	QGP2P	QGP1R	QGP2R	PS	RCP1O
sp.		7	12	11		
<i>Amphipleura Cosmarium sp.</i>	14	4	6	62		
<i>Cymbella sp.</i>	5	49	30	41	5	11

<i>Frustulia</i> sp.	19	63	12			
<i>Gomphonema</i> sp.			62	78		
<i>Gyrosigma</i> sp	57		158	160		
<i>Hantzschia</i> sp.		11	12			
<i>Melosira</i> sp	5	11	6	5		3
<i>Navicula</i> sp.	1154	612	8292	4214	475	910
<i>Nitzschia</i> sp	10		79		43	3
<i>Nitzschia</i> sp1.			25	72		
<i>Nitzschia</i> sp2.			3	5		
<i>Oscillatoria</i> sp.		172		33	80	
<i>Oscillatoria</i> sp1.			12			
<i>Oscillatoria</i> sp2.			37	57		
<i>Pediastrum</i> sp.	19				5	3
<i>Pediastrum</i> sp1.	41	7	3			
<i>Pediastrum</i> sp2.	10	4				
<i>Pinnularia</i> sp.	10		128	21	21	
<i>Scenedesmus</i> sp.	242	56	6	1018	5	3
<i>Spirogyra</i> sp.		206		93		34
<i>Staurastrum</i> sp.				5		
<i>Surirella</i> sp.			25	43		
Total densidad	1586	1200	8908	5919	635	966
Número de organismos	12	12	18	16	7	7

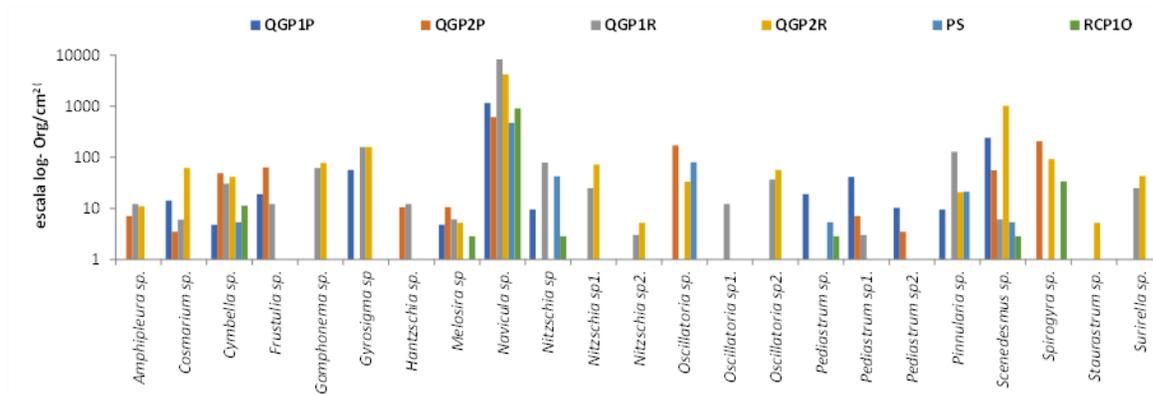


Figura 5.34 Distribución espacial de los morfotipos de algas perifíticas registrados en las 6 estaciones

Al respecto del perfil de composición obtenido se podría complementar que las diatomeas son referenciadas en la literatura como propias de aguas corrientes y como un grupo oportunista que prospera en ambientes inestables y con altas concentraciones de fósforo, este grupo posee rangos de tolerancia amplios a la contaminación ambiental (Ramírez y Viña, 1998). Específicamente la familia Naviculaceae como el género *Navicula* sp., posee una generación relativamente rápida, lo que favorece su constante adaptación al estrés ambiental (Branco, 1986). Con una presencia elevada de organismos de la familia Naviculaceae puede suponerse que en las estaciones de monitoreo suceden diferentes disturbios, como el cambio de nivel y/o caudal, situación a la cual organismos de menor tamaño tienden a responder más rápidamente siendo los más tolerantes a los cambios en la turbulencia o las variaciones de caudal.

El género *Scenedesmus* sp., también de especial importancia se encuentra comúnmente en aguas dulces y salobres, particularmente en condiciones que se consideran ricas en nutrientes (An et al. 1999). Pueden crecer en aguas altamente contaminadas y generalmente se usan como indicadores de contaminación (Phinyo et al., 2017). Su aparición se podría asociar a los hábitats de poza, en donde su nivel de organización está más adaptado, puesto que es un alga de hábitos planctónicos, otros géneros como *Cosmarium* sp., clorofícea también de hábito planctónico, demuestran que cuando un ambiente como la quebrada La Gómez contiene hábitats hidráulicos diferentes propicia la diversidad de hábitos de crecimiento o niveles de organización de la comunidad.

En general, los aspectos ecológicos de los organismos encontrados se relacionan con altas tasas de generación dependiendo de la concentración de nutrientes y la luz disponible, por lo que pueden registrarse aglomeraciones perifíticas densas de acuerdo con el rango de velocidades del agua, adaptándose a cambios periódicos de éste (Branco, 1986).

La composición del perifiton en un momento y ambiente dados depende de las características del sustrato: tipo, rugosidad, estado trófico circundante y obviamente disponibilidad, ya que su colonización se desarrolla adherida a un sustrato (Ramírez y Roldan, 2008). De acuerdo con los resultados obtenidos, en las estaciones de monitoreo existe variedad en la disponibilidad de sustratos heterogéneos, lo que permite una mayor colonización en algunos lugares con respecto a otros.

Al analizar el perfil total de densidades y número de taxa por estación (Figura 5.35) se observa que las densidades y riquezas numéricas fueron mayores en los ambientes lóticos QGP1R: Quebrada la Gómez, p1, rápido y QGP2R: Quebrada la Gómez, p2, rápido, mientras en las estaciones PS: puente Sogamoso y RCP10: Río la Colorada, p1, Orilla se registraron los menores valores en ambos parámetros.

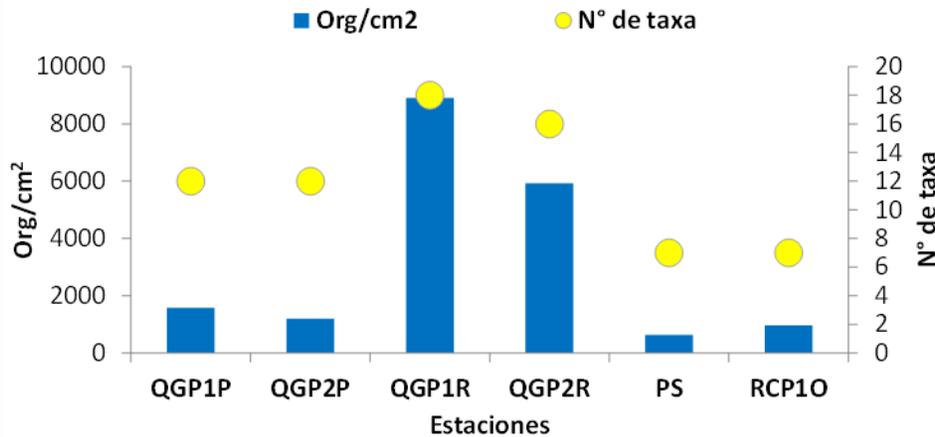


Figura 5.35 Densidad Total (Org/cm²) y Número de morfotipos de algas perifíticas en las 6 estaciones

Estas diferencias al igual que las observadas en la composición se deben al tipo de comunidad que representan las algas perifíticas, propias de ambientes lóticos, adaptadas a las corrientes, por esta razón los ambientes hidráulicos más dinámicos y condiciones ambientales favorecieron unas mayores densidades y riquezas, en este caso las estaciones con ambientes lóticos definidos y condicionamientos como disponibilidad de sustratos, luz y probablemente una buena calidad del agua (QGP1R, QGP2R). Las estaciones con ambientes lóticos y alta turbidez o baja calidad del agua no propiciarán la colonización de algas perifíticas, tal como al parecer sucedió en PS y RCP10.

5.5 Índices ecológicos

5.5.1 Índices Macroinvertebrados acuáticos

INDICES DE DIVERSIDAD, EQUIDAD Y DOMINANCIA

En la Tabla 5.34 se pueden observar los valores hallados para cada uno de los índices de diversidad, dominancia y equidad, los índices aplicados son: 1) Índice de Shannon-Weaver (H'). 2) Índice de Simpson (D). y 3) Índice de Equidad de Pielou (J'). El índice de Shannon-Weaver (H') se califica según el valor obtenido, los rangos de análisis son: de 0,5 a 2 se considera baja diversidad, de 2 a 3 normal y de 3 a 5 alta diversidad. En términos generales, las estaciones con mayor diversidad según el índice de Shannon (H') son QGP1R, QGP2R, QGP1P respectivamente y la estación con menor diversidad son QGP2P y PS respectivamente.

Tabla 5.34 Resultados de los índices de diversidad, equidad y dominancia para cada una de las estaciones de muestreo

Index	QGP1P	QGP2P	QGP1R	QGP2R	PS	RCP10
Shannon H' Log Base 2,	2,041	0,731	2,153	2,082	1,447	1,58
Shannon J'	0,821	0,408	0,776	0,751	0,582	0,599
Simpsons Diversity (D)	0,154	0,669	0,156	0,182	0,417	0,372

Para interpretar el índice de Simpson (D) es necesario tener presente que el valor estará entre 0 y 1, mientras esté más cercano a cero se asocia a una mayor biodiversidad y mientras esté más cercano a 1 se asume que hay baja biodiversidad. Por otro lado, el índice de Equidad de Pielou (J') mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Los rangos de valores en este índice van de 0 a 1 donde valores cercanos a 1 corresponden a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes y valores cercanos a 0 señalan la ausencia de uniformidad.

La estación con menor diversidad corresponde a la estación QGP2P, seguida de la estación PS, mientras los mayores valores fueron registrados en QGP1R y QGP2R como se mencionó en el registro con las mayores riquezas de taxas, a su vez estas estaciones registraron las mayores equidades.

ÍNDICE BMWP

La información derivada del análisis de calidad según el índice BMWP (Tabla 5.35) arrojó un puntaje que osciló entre 26-86, estos valores corresponden a la clasificación de aguas desde “aguas

ligeramente contaminadas”, “aguas muy contaminadas” y “aguas contaminadas”. La mayoría de los sitios fueron clasificados como “aguas ligeramente contaminadas” y desde este punto de vista la calidad del agua está comprometida desde un nivel moderado a crítico.

Tabla 5.35 Resultados del índice BMWP registrado en las 6 estaciones durante la campaña de monitoreo. Los códigos de las estaciones corresponden se encuentran definidos en la metodología

Muestreo	Estación	índice BMWP/Col				
		Valor	Clase	Calidad	Significado	Color
1	QGP1P	66	II	"Aceptable"	Aguas ligeramente contaminadas	
	QGP2P	26	IV	"Crítica"	Aguas muy contaminadas	
	QGP1R	86	II	"Aceptable"	Aguas ligeramente contaminadas	
	QGP2R	70	II	"Aceptable"	Aguas ligeramente contaminadas	
	PS	48	III	"Dudosa"	Aguas contaminadas	
	RCP10	78	II	"Aceptable"	Aguas ligeramente contaminadas	

Clase	Calidad	BMWP/Col	Significado	Color
I	Buena	>100	Aguas muy limpias a limpias	
II	Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	
III	Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	
IV	Crítica	16-35	Aguas muy contaminadas	
V	Muy crítica	< 16	Aguas fuertemente contaminadas.	

Es necesario analizar en profundidad las condiciones en particular de la estación QGP2P ya que en esta la puntuación para el BMWP fue de 26 “Crítica” esto puede darse por diferentes razones incluyendo la toma de muestras. Se observa un comportamiento algo raro ya que las otras 3 estaciones en la misma quebrada (La Gómez) dan como resultado en el BMWP una calidad “Aceptable”.

ÍNDICE DE IBB

De acuerdo con los resultados encontrados para la campaña de monitoreo, tenemos que la composición taxonómica está distribuida en cuatro phylas, cinco clases, doce órdenes y 31 familias. En el phylum Artropoda se encuentran 26 familias que corresponden al 83,87% de la riqueza total. El orden mejor representado es Trichoptera con 6 familias, seguido de los órdenes díptera, coleoptera y hemiptera con 5 familias cada uno. Se colectaron e identificaron 576 taxones, siendo los sitios QGP2R, RCP10 y QGP1R los que registraron mayores abundancias con el 26,38%, 22,74% y 22,39% respectivamente de la abundancia total, la estación que representa la menor abundancia de taxones es QGP1P con el 8,51%. De las 31 familias representadas sólo 1 se encuentra

en todos los sitios de muestreo, hay dos familias pertenecientes al orden Ephemeroptera que se encuentran en todos los sitios menos en PS (Puente Sogamoso). Las familias más abundantes pertenecen a la clase insecta donde: Chironomidae 16,66%, Hydropsychidae 15,79%, Veliidae 13,71% y Leptohyphidae 11,28% (Tabla 5.36).

Tabla 5.36 Composición taxonómica de macroinvertebrados acuáticos para la campaña de muestreo septiembre 2021

Phylum	Clase	Orden	Familia	Taxa
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Chironominae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Tanypodinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	Orthocladinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Psychodidae	Clognia albipunctatus
Arthropoda	Insecta	Diptera	Muscidae	Muscinae
Arthropoda	Insecta	Diptera	Simuliidae	Simulium sp.
Arthropoda	Insecta	Diptera	Tipulidae	Tipula sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Calamacerotidae	Phylloicus sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydropsychidae	Smicridea sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Odontoceridae	Marilia sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Leptoceridae	Nectopsyche sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydroptilidae	Hydroptila sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Hydropsychidae	Leptonema sp.
Arthropoda	Insecta	Trichoptera	Glossosomatidae	Mortoniella sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Ptilodactylidae	Anchytarsus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Microcylloepus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Hydrophilidae	Hydrophilidae
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Xenelmis sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Staphylinidae	Staphylinidae

Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Dermestidae	Dermestidae
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Phanocerus sp.
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Elmidae	Cylloepus
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Veliidae	Rhagovelia sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Gerridae	Trepobates sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Notonectidae	Martarega sp.
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Mesoveliidae	Mesoveloidea
Arthropoda	Insecta	Hemiptera	Naucoridae	Pelocoris sp.
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Leptohyphidae	Leptohyphes sp.
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Leptophlebiidae	Thraulodes sp.
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Baetidae	Baetodes sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Libellulidae	Dythemis sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Libellulidae	Brechmorhoga sp.
Arthropoda	Insecta	Odonata	Gomphidae	Phyllogomphoides sp.
Arthropoda	Insecta	Lepidoptera	Crambidae	Crambidae
Annelida	Oligochaeta	Haplotaxida	Naididae	Nais sp.
Annelida	Hirudinea	Glossiphoniiformes	Glossiphoniidae	Dacnobia sp.
Platuhelminthes	Turbellaria	Tricladida	Planariidae	Dugesia sp.
Mollusca	Gastropoda	Neotaenioglossa	Cochliopidae	Cochliopa sp.
Mollusca	Gastropoda	Basommatophora	Ancylidae	Ancylidae sp.

Con base en la información anterior, se hallaron los valores para cada una de variables de respuesta al ambiente (VRA) en cada uno de los sitios, lo cuales se muestran en la Tabla 5.37. Mientras que la Tabla 5.38, muestra las categorías de las VRA de acuerdo los valores hallados, al igual que el cálculo del IIBMA.

Tabla 5.37 Valores de las variables para cada sitio de muestreo

Sitio	RT	REPT	RII	#TI	TM	#TF
QGP1P	12	4	1	2	6,60	7
QGP2P	6	3	0	1	6,50	4
QGP1R	16	8	1	7	5,73	10
QGP2R	16	6	1	4	6,36	8
PS	12	0	1	3	4,36	7
RCP10	14	4	2	5	6,00	7

Riqueza de taxa (RT), Riqueza de Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (REPT), riqueza de insectos intolerantes (RII), número de taxa intolerantes (#TI), tolerancia media (TM), número de taxa fijos (#TF).

Tabla 5.38 Valores de las categorías de VRA e IIBMA para cada sitio de muestreo

Sitio	RT	REPT	RII	#TI	TM	#TF	IIBMA	Categoría IIBBMA
QGP1P	1	1	1	1	1	1	6	Pobre
QGP2P	1	1	1	1	1	1	6	Pobre
QGP1R	1	1	1	1	1	2	7	Pobre
QGP2R	1	1	1	1	1	1	6	Pobre
PS	1	1	1	1	4	1	9	Pobre
RCP10	1	1	1	1	1	1	6	Pobre

El IIBMA establece que los sitios de muestreo corresponden a la categoría **Pobre**, lo que revela que los sitios se encuentran muy degradados. Esto podría indicar que la comunidad de Macroinvertebrados Acuáticos no es sostenible, se han perdido la mayoría o todos los procesos necesarios para el mantenimiento de los flujos energéticos en el sistema. La composición está dominada por organismos muy tolerantes y algunos tolerantes, pero la totalidad de los taxa muy intolerantes e intolerantes se ha perdido. La organización trófica se encuentra reducida a organismos depredadores, recolectores y colectores. Estos sitios no son aptos para la conservación de la diversidad biológica. Se asocia a la condición pobre de la Calidad Ambiental, pero se ha

observado que existen sitios con condición subóptima y marginal que pueden tener integridad pobre, pero esto ocurre cuando existen descargas de aguas residuales que modifican la calidad del agua a las categorías de agua contaminada a inaceptable valorado con el índice de Calidad del Agua.

5.5.2 Índices Algas Perifíticas

ÍNDICES DE DIVERSIDAD

En la Figura 5.36 se encuentran los resultados de los índices de diversidad, dominancia y equidad. Con respecto al índice de Diversidad (H') los valores fueron bajos (promedio de 0,87); el índice de Equidad (J') presentó valores bajos (promedios de 0,36), en modo lógico el índice de Dominancia (D) presentó valores intermedios o más altos que la equidad (promedio de 0,62).

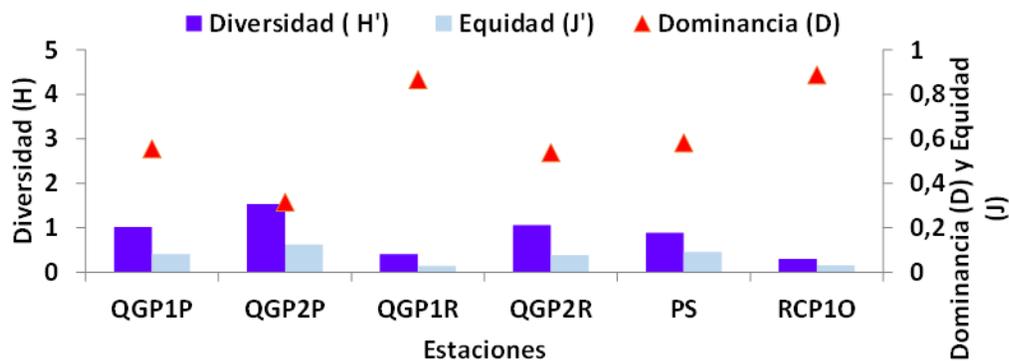


Figura 5.36 Índices de diversidad de Shanon (H'), equidad de Pielou (J') y dominancia de Simpson (D) registrados en las 6 estaciones

La estación RCP10: Río la Colorada, p1, Orilla presentó la menor diversidad (0,29), registrando además lo más altos valores de dominancia (0,89), posiblemente atribuido a la elevada presencia del género *Navicula* sp. con respecto a los otros taxa. Lo anterior puede indicar que esta estación al igual que PS: puente Sogamoso, presenta un escenario menos apropiado para el establecimiento y colonización de las algas perifíticas, por lo cual es probable que existan efectos asociados con la adecuación física, química y contaminante que afecten las condiciones ecológicas de este sitio o a la dinámica misma del sistema acuático.

Las estaciones con mayor equidad o baja predominancia por parte de un género particular sugieren que las condiciones ambientales favorecen una mejor colonización de diferentes niveles de

organización celular, lo cual indica que los recursos ambientales tales como disponibilidad de luz, nutrientes, sustratos y rangos de caudal y velocidad de la corriente son propicios para el desarrollo de las algas perifíticas. Las estaciones con mayores equidades correspondieron a QGP1P y QGP2P, las estaciones ubicadas en las pozas.

5.6 Índices de integridad de hábitat (IIH)

La Tabla 5.39 y la Tabla 5.40 muestran los resultados obtenidos de las modelaciones hidrológicas e hidráulicas para Río Sogamoso y Río La Colorada. Estos resultados presentan las variables estimadas para el cálculo de las métricas requeridas en el Índice de Integridad del Hábitat (IIH). Dichas variables se fijan de manera mensual y para tres escenarios (seco, normal y húmedo), en los cuales se realizó la estimación del caudal ambiental.

Tabla 5.39 Variables requeridas para el cálculo de las métricas de interés ecológico del Río Sogamoso

AÑO	MES	Q (m ³ /s)	V _{media} (m/s)	V _{max} (m/s)	Y _{media} (m)	Ancho medio (m)	Ancho máximo (m)
SECO	1	84,15	0,3311	0,45	3,13	229,600	1732
SECO	2	166,16	0,3856	0,46	3,79	302,286	1732
SECO	3	187,54	0,4022	0,49	3,92	306,159	1732
SECO	4	330,67	0,5033	0,64	4,59	309,237	1732
SECO	5	330,93	0,5033	0,64	4,59	309,237	1732
SECO	6	289,68	0,4778	0,6	4,41	306,271	1732
SECO	7	233,34	0,4356	0,54	4,15	306,211	1732
SECO	8	177,56	0,3933	0,48	3,86	304,042	1732
SECO	9	177,45	0,3933	0,48	3,85	303,944	1732
SECO	10	195,06	0,4078	0,5	3,96	306,168	1732
SECO	11	360,64	0,5222	0,67	4,72	309,263	1732
SECO	12	193,75	0,4067	0,5	3,95	306,167	1732
NORMAL	1	145,02	0,37	0,44	3,66	295,390	1732
NORMAL	2	204,25	0,4144	0,51	4	306,178	1732
NORMAL	3	283,67	0,4744	0,6	4,38	306,264	1732
NORMAL	4	390,51	0,5367	0,69	4,84	309,290	1732
NORMAL	5	411,86	0,5489	0,71	4,92	309,307	1732
NORMAL	6	295,32	0,4811	0,61	4,44	306,278	1732
NORMAL	7	308,06	0,4889	0,62	4,5	309,216	1732
NORMAL	8	277,45	0,4689	0,59	4,35	306,258	1732
NORMAL	9	278,5	0,4689	0,59	4,36	306,259	1732
NORMAL	10	382,23	0,5344	0,69	4,8	309,281	1732
NORMAL	11	466,4	0,5789	0,76	5,12	309,351	1732
NORMAL	12	328,33	0,5022	0,64	4,58	309,233	1732
HÚMEDO	1	183,78	0,3989	0,49	3,9	306,152	1732

HÚMEDO	2	246,86	0,4478	0,56	4,21	306,228	1732
HÚMEDO	3	380,39	0,5322	0,68	4,79	309,280	1732
HÚMEDO	4	602,63	0,6444	0,86	5,59	309,449	1732
HÚMEDO	5	492,41	0,5922	0,78	5,21	309,371	1732
HÚMEDO	6	314,08	0,4911	0,62	4,52	309,221	1732
HÚMEDO	7	438,86	0,5633	0,73	5,02	309,329	1732
HÚMEDO	8	400,86	0,5433	0,7	4,87	309,299	1732
HÚMEDO	9	447,23	0,5678	0,74	5,05	309,338	1732
HÚMEDO	10	630,77	0,6567	0,88	5,68	311,986	1732
HÚMEDO	11	611,51	0,6467	0,86	5,62	311,974	1732
HÚMEDO	12	450,15	0,5711	0,74	5,06	309,339	1732

Tabla 5.40 Variables requeridas para el cálculo de las métricas de interés ecológico del Río La Colorada

AÑO	MES	Q (m ³ /s)	V _{media} (m/s)	V _{max} (m/s)	Y _{media} (m)	Ancho medio (m)	Ancho máximo (m)
SECO	1	14,8	0,24	0,36	1,7	49,11	88,31
SECO	2	17,6	0,25	0,37	1,84	49,32	88,31
SECO	3	18,31	0,26	0,38	1,88	49,37	88,31
SECO	4	22	0,28	0,4	2,05	49,62	88,31
SECO	5	22,1	0,28	0,4	2,05	49,63	88,31
SECO	6	22,4	0,28	0,4	2,07	49,65	88,31
SECO	7	24,2	0,29	0,41	2,15	49,77	88,31
SECO	8	24,5	0,29	0,41	2,16	49,79	88,31
SECO	9	24,6	0,29	0,41	2,16	49,79	88,31
SECO	10	25,31	0,29	0,41	2,20	49,84	88,31
SECO	11	28,33	0,30	0,42	2,32	50,02	88,31
SECO	12	28,9	0,31	0,43	2,34	50,06	88,31
NORMAL	1	29,1	0,31	0,43	2,35	50,07	88,31
NORMAL	2	30,8	0,31	0,43	2,42	50,17	88,31
NORMAL	3	32,9	0,32	0,44	2,5	50,29	88,31
NORMAL	4	33,8	0,33	0,45	2,54	50,34	88,31
NORMAL	5	34,2	0,33	0,45	2,55	50,36	88,31
NORMAL	6	34,6	0,33	0,45	2,57	50,39	88,31
NORMAL	7	38,9	0,34	0,46	2,73	50,62	88,31
NORMAL	8	39,5	0,34	0,46	2,75	50,65	88,31
NORMAL	9	41,32	0,35	0,47	2,81	50,75	88,31
NORMAL	10	43,19	0,36	0,48	2,88	50,84	88,31
NORMAL	11	43,4	0,36	0,48	2,89	50,85	88,31
NORMAL	12	46,3	0,37	0,49	2,99	51,00	88,31
HÚMEDO	1	47,4	0,37	0,49	3,02	51,05	88,31
HÚMEDO	2	49,5	0,37	0,49	3,09	51,16	88,31
HÚMEDO	3	53,1	0,38	0,50	3,21	51,33	88,31
HÚMEDO	4	53,9	0,39	0,51	3,23	51,37	88,31

HÚMEDO	5	55,6	0,39	0,51	3,29	51,45	88,31
HÚMEDO	6	58,9	0,40	0,52	3,39	51,60	88,31
HÚMEDO	7	61,00	0,40	0,52	3,45	51,69	88,31
HÚMEDO	8	61,73	0,41	0,53	3,47	51,72	88,31
HÚMEDO	9	66,7	0,42	0,54	3,62	51,94	88,31
HÚMEDO	10	69,9	0,43	0,55	3,71	52,08	88,31
HÚMEDO	11	76,2	0,44	0,56	3,89	52,34	88,31
HÚMEDO	12	76,4	0,44	0,56	3,9	52,35	88,31

Posterior a la estimación de las variables hidrológicas e hidráulicas, se procedió al cálculo de las métricas que se deben incorporar en el IIH para los ríos Sogamoso (Tabla 5.41) y La Colorada (Tabla 5.42).

Tabla 5.41 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) del Río Sogamoso

AÑO	MES	Profundidad relativa (PR)	Ancho relativo (AR)	Diversidad de hábitats (DH)	Variabilidad de la corriente (VC)
SECO	1	73,35	7,54	1	1,36
SECO	2	79,76	5,73	1	1,19
SECO	3	78,10	5,66	1	1,22
SECO	4	67,37	5,60	1	1,27
SECO	5	67,37	5,60	1	1,27
SECO	6	69,45	5,66	1	1,26
SECO	7	73,79	5,66	1	1,24
SECO	8	78,77	5,70	1	1,22
SECO	9	78,95	5,70	1	1,22
SECO	10	77,32	5,66	1	1,23
SECO	11	65,52	5,60	1	1,28
SECO	12	77,51	5,66	1	1,23
NORMAL	1	80,71	5,86	1	1,19
NORMAL	2	76,54	5,66	1	1,23
NORMAL	3	69,92	5,66	1	1,26
NORMAL	4	63,90	5,60	1	1,29
NORMAL	5	62,87	5,60	1	1,29
NORMAL	6	68,98	5,65	1	1,27
NORMAL	7	68,71	5,60	1	1,27
NORMAL	8	70,40	5,66	1	1,26
NORMAL	9	70,24	5,66	1	1,26
NORMAL	10	64,43	5,60	1	1,29
NORMAL	11	60,42	5,60	1	1,31
NORMAL	12	67,52	5,60	1	1,27
HÚMEDO	1	78,50	5,66	1	1,23
HÚMEDO	2	72,74	5,66	1	1,25
HÚMEDO	3	64,57	5,60	1	1,28

HÚMEDO	4	55,36	5,60	1	1,33
HÚMEDO	5	59,38	5,60	1	1,32
HÚMEDO	6	68,41	5,60	1	1,26
HÚMEDO	7	61,62	5,60	1	1,30
HÚMEDO	8	63,51	5,60	1	1,29
HÚMEDO	9	61,26	5,60	1	1,30
HÚMEDO	10	54,93	5,55	1	1,34
HÚMEDO	11	55,51	5,55	1	1,33
HÚMEDO	12	61,13	5,60	1	1,30

Tabla 5.42 Métricas seleccionadas para la construcción del Índice de Integridad del Hábitat (IIH) del Río La Colorada

AÑO	MES	Profundidad relativa (PR)	Ancho relativo (AR)	Diversidad de hábitats (DH)	Variabilidad de la corriente (VC)
SECO	1	28,89	1,80	1	1,50
SECO	2	26,80	1,79	1	1,48
SECO	3	26,26	1,79	1	1,46
SECO	4	24,20	1,78	1	1,43
SECO	5	24,21	1,78	1	1,43
SECO	6	23,99	1,78	1	1,43
SECO	7	23,15	1,77	1	1,41
SECO	8	23,05	1,77	1	1,41
SECO	9	23,05	1,77	1	1,41
SECO	10	22,65	1,77	1	1,41
SECO	11	21,56	1,77	1	1,40
SECO	12	21,39	1,76	1	1,39
NORMAL	1	21,31	1,76	1	1,39
NORMAL	2	20,73	1,76	1	1,39
NORMAL	3	20,12	1,76	1	1,38
NORMAL	4	19,82	1,75	1	1,36
NORMAL	5	19,75	1,75	1	1,36
NORMAL	6	19,61	1,75	1	1,36
NORMAL	7	18,54	1,74	1	1,35
NORMAL	8	18,42	1,74	1	1,35
NORMAL	9	18,06	1,74	1	1,34
NORMAL	10	17,65	1,74	1	1,33
NORMAL	11	17,60	1,74	1	1,33
NORMAL	12	17,06	1,73	1	1,32
HÚMEDO	1	16,90	1,73	1	1,32
HÚMEDO	2	16,56	1,73	1	1,32
HÚMEDO	3	15,99	1,72	1	1,32
HÚMEDO	4	15,90	1,72	1	1,31
HÚMEDO	5	15,64	1,72	1	1,31
HÚMEDO	6	15,22	1,71	1	1,30

HÚMEDO	7	14,98	1,71	1	1,30
HÚMEDO	8	14,90	1,71	1	1,29
HÚMEDO	9	14,35	1,70	1	1,29
HÚMEDO	10	14,04	1,70	1	1,28
HÚMEDO	11	13,46	1,69	1	1,27
HÚMEDO	12	13,42	1,69	1	1,27

La metodología para el cálculo del índice de integridad de hábitat requiere al igual que las métricas procedentes de las modelaciones de los componentes hidrológico e hidráulico, la incorporación de variables de calidad como saturación de oxígeno, relación de nutrientes y demanda béntica, las cuales deben ser producto de la modelación de calidad. Debido a que no se contaba con una modelación de calidad en los tramos seleccionados para la estimación del caudal ambiental, se procedió a emplear los datos de saturación de oxígeno y relación de nutrientes resultado de los monitoreos de calidad en el marco del acuerdo (Tabla 5.43).

Tabla 5.43 Variables de calidad de agua. Resultado de las campañas de monitoreo de calidad en el marco del acuerdo de cooperación ECOPETROL - IDEAM

Variable	Estadístico	Río Sogamoso	Río La Colorada
Saturación de Oxígeno (%)	Media	65,2	59,8
	DE	21,6	28,0
	CV (%)	33,1	46,8
Nitrógeno total (mg/L)	Media	0,9	1,0
	DE	0,6	0,7
	CV (%)	70,7	70,7
Fósforo total (mg/L)	Media	0,0	0,1
	DE	0,0	0,0
	CV (%)	20,2	27,9
Relación NT:PT		21,7	13,6

Por lo anterior, a continuación, se presenta una aproximación al cálculo del IIH para los ríos Sogamoso y la Colorada (Tabla 5.44). Los valores de IIH para el Río Sogamoso reflejan en todos los casos condiciones de **Moderada integridad de hábitat**, lo cual se asocia con que las condiciones del hábitat aseguran un aceptable funcionamiento de los ecosistemas. Mientras que, para el Río La Colorada el IIH refleja una **Baja integridad de hábitat**, donde las condiciones del hábitat son poco apropiadas para el desarrollo de los organismos.

Tabla 5.44 Índice de integridad de hábitat (aproximado) para los ríos Sogamoso y La Colorada

AÑO	MES	IIH _{aproximado} Río Sogamoso	IIH _{aproximado} Río La Colorada
SECO	1	0,58	0,42

SECO	2	0,58	0,42
SECO	3	0,58	0,42
SECO	4	0,58	0,42
SECO	5	0,58	0,42
SECO	6	0,58	0,42
SECO	7	0,58	0,42
SECO	8	0,58	0,42
SECO	9	0,58	0,42
SECO	10	0,58	0,42
SECO	11	0,58	0,42
SECO	12	0,58	0,42
NORMAL	1	0,58	0,42
NORMAL	2	0,58	0,42
NORMAL	3	0,58	0,42
NORMAL	4	0,58	0,42
NORMAL	5	0,58	0,42
NORMAL	6	0,58	0,42
NORMAL	7	0,58	0,42
NORMAL	8	0,58	0,42
NORMAL	9	0,58	0,42
NORMAL	10	0,58	0,42
NORMAL	11	0,58	0,42
NORMAL	12	0,58	0,42
HÚMEDO	1	0,58	0,42
HÚMEDO	2	0,58	0,42
HÚMEDO	3	0,58	0,42
HÚMEDO	4	0,58	0,42
HÚMEDO	5	0,58	0,42
HÚMEDO	6	0,58	0,42
HÚMEDO	7	0,58	0,42
HÚMEDO	8	0,58	0,42
HÚMEDO	9	0,58	0,42
HÚMEDO	10	0,58	0,42
HÚMEDO	11	0,58	0,42
HÚMEDO	12	0,58	0,42

Para la Quebrada La Gómez no fue posible realizar una aproximación del IIH debido a la falta de información disponible tanto de la modelación hidráulica como de calidad.

5.7 Estimación del caudal ambiental en unidades de análisis mediante metodología IDEAM - ENAs

Para realizar la estimación de la OHTS disponible en el VMM se requiere estimar el caudal ambiental en las unidades de nivel subsiguiente. Por esta razón se reportan aquí los resultados de la aplicación de la metodología como fue descrito en la sección 4.7.

Como puede verse en la Figura 5.37, el caudal ambiental determinado varía dependiendo del tamaño de la unidad de análisis, en año normal. Esto se debe a que depende del caudal equivalente que a su vez depende del área analizada. Sin embargo, se evidencia que la zona del río Opón los valores son un poco mayores para áreas similares. Los valores exactos para cada unidad pueden verse en la Tabla 5.45.

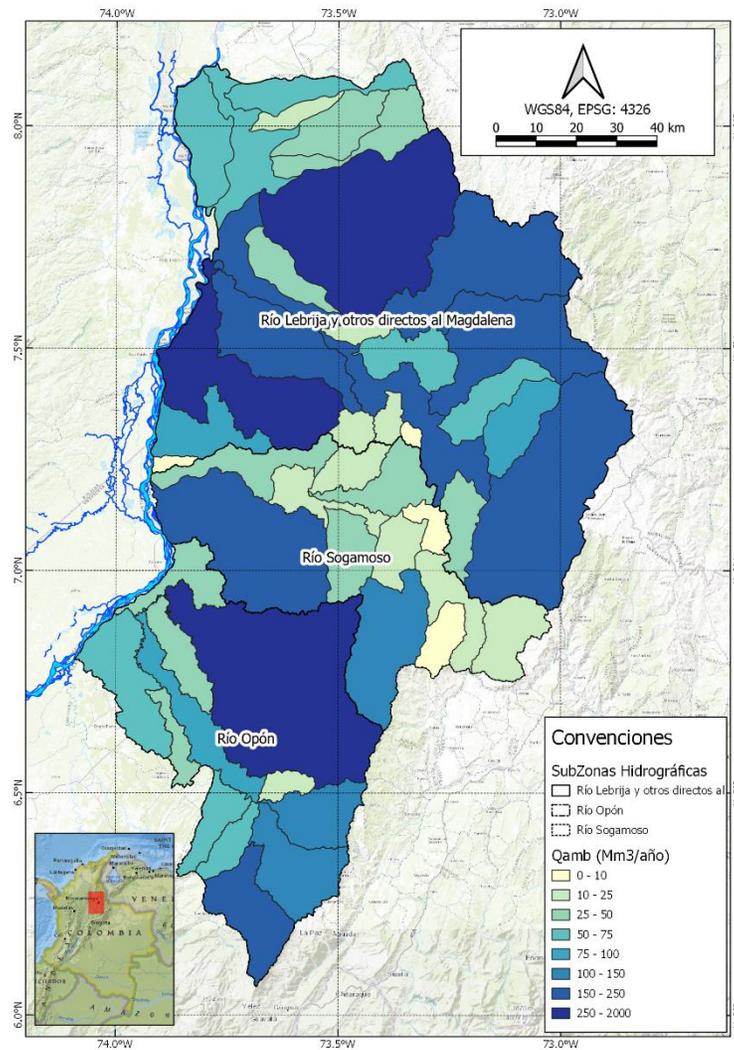


Figura 5.37 Caudal ambiental por metodología IDEAM-ENAs para año normal

De manera similar se hallaron los valores estimados para el caudal ambiental de año seco, que pueden verse en la Figura 5.38. Se observa que en algunas zonas hay una reducción sustancial del volumen necesario para conservar las funciones de los ecosistemas. Los valores para cada unidad de análisis también pueden verse en la Tabla 5.45.

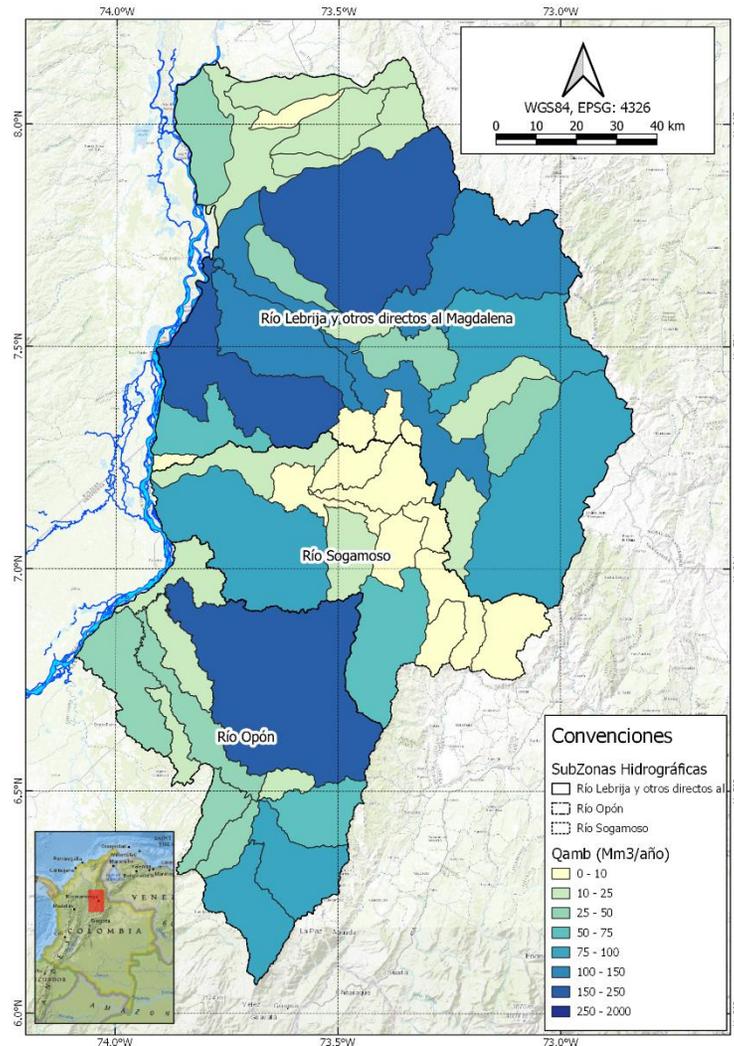


Figura 5.38 Caudal ambiental por metodología IDEAM-ENAs para año seco

Tabla 5.45 Valores del caudal ambiental para cada unidad de análisis de nivel subsiguiente en el VMM

Und. Análisis	Qamb (Mm ³ /año)	Qamb (m ³ /s)	Qamb año seco (Mm ³ /año)	Qamb año seco (m ³ /s)
240501	33.850	1.07	16.910	0.54
240502	172.705	5.48	91.538	2.90
240503	35.463	1.12	17.671	0.56
240504	114.142	3.62	64.540	2.05
240505	8.269	0.26	1.983	0.06

240506	20.219	0.64	8.336	0.26
240507	14.412	0.46	4.643	0.15
240508	8.618	0.27	2.876	0.09
240509	30.151	0.96	9.719	0.31
240510	20.219	0.64	8.464	0.27
240511	21.221	0.67	9.554	0.30
240512	22.911	0.73	9.897	0.31
231901	215.164	6.82	111.131	3.52
231902	21.290	0.68	9.562	0.30
231903	6.135	0.19	2.329	0.07
231904	69.758	2.21	28.269	0.90
231905	234.459	7.43	106.917	3.39
231906	21.331	0.68	10.715	0.34
231907	43.733	1.39	25.019	0.79
231908	177.322	5.62	106.130	3.37
231909	295.708	9.38	187.444	5.94
231910	13.176	0.42	3.921	0.12
231911	97.338	3.09	62.555	1.98
231912	6.870	0.22	3.970	0.13
231913	353.051	11.20	176.439	5.59
231914	44.986	1.43	18.452	0.59
231915	42.017	1.33	14.860	0.47
231916	16.669	0.53	6.292	0.20
231917	52.874	1.68	21.051	0.67
231918	52.633	1.67	25.673	0.81
231919	54.234	1.72	24.591	0.78
231920	81.105	2.57	33.240	1.05
231921	58.175	1.84	19.747	0.63
231922	31.570	1.00	14.441	0.46
231923	213.527	6.77	95.533	3.03
231924	190.825	6.05	81.526	2.59
231401	29.477	0.93	17.425	0.55
231402	73.272	2.32	40.607	1.29
231403	25.271	0.80	13.643	0.43
231404	76.862	2.44	44.392	1.41
231405	69.376	2.20	43.163	1.37
231406	52.427	1.66	32.656	1.04
231407	150.977	4.79	95.872	3.04
231408	148.644	4.71	89.054	2.82
231409	104.111	3.30	60.126	1.91
231410	413.318	13.11	236.026	7.48
231411	41.368	1.31	22.810	0.72
231412	17.182	0.54	10.120	0.32

Con respecto a la a la metodología del IDEAM-Estudios Nacionales del agua, se debe aclarar que esa estimación en **unidades de análisis de nivel subsiguiente** *no puede tomarse para tramos específicos de cuerpos de agua dentro de la región*, y que corresponde a la estimación de un volumen anual que requieren los ecosistemas dentro del polígono analizado.

6 Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se resumen los resultados de las caracterizaciones realizadas para la definición del caudal ambiental. Asimismo, se resalta la importancia de la información adicional necesaria para poder completar la aplicación de la metodología IDEAM-MADS para determinar el caudal ambiental en tramos de corrientes. Posteriormente se concluye sobre las ventajas, complejidades y limitaciones de la metodología. Además, se dan consejos para su posible futura aplicación.

6.1 Requerimientos de información adicional para mejorar la estimación del caudal ambiental en los tramos priorizados

Una vez identificada la disponibilidad de información para la aplicación completa de la metodología de caudal ambiental, se ha observado que las principales limitantes se encuentran en la componente de calidad del agua y la modelación hidráulica. En ambos casos se requiere el desarrollo de un modelo siendo necesario un proceso que incluye el levantamiento de campo, laboratorios físico químicos, y protocolos de modelación.

A manera de resumen, se puede destacar que el río Sogamoso posee información hidrológica suficiente, no obstante falta un modelo de calidad de aguas y mejor información batimétrica. En el primer caso, se resalta el caso de del afloramiento del pozo Lizama 158 que afectó según reportes la calidad del río Sogamoso, la alta relevancia mediática del caso demuestra la importancia de contar con un modelo de calidad del agua para el tramo en estudio que incluya escenarios de riesgos para manejo de vertimientos. Caso parecido pudiera considerarse en el río La Colorada dentro del tramo de interés, siendo en este caso igual de importante contar con un modelo hidráulico para el tramo considerando múltiples secciones transversales. Los requerimientos de información adicional para la caracterización hidrobiológica de los tramos serán abordados por su respectivo profesional.

Sobre la calidad del agua, en Colombia existe una estructura ligada a la gestión Integral de los Recursos Hídricos que desde el MADS y el IDEAM lideran con la expedición de múltiples guías y resoluciones. En particular se cuenta con la “GUÍA NACIONAL DE MODELACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO PARA AGUAS SUPERFICIALES CONTINENTALES” del año 2018, el “*PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA*” del *Centro Nacional de Modelación* del IDEAM, además de la última versión de la “GUÍA PARA EL ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO CONTINENTAL SUPERFICIAL” del 2018. Los conceptos asociados

a ambos documentos son retomados de forma resumida en la estimación del caudal ambiental. Los Planes de Ordenamiento de Recurso Hídrico son un instrumento de planificación cuyo énfasis se ubica en las relaciones oferta-demanda-calidad, es por ellos que sus criterios son plenamente aplicables al caso de la modelación de calidad para caudales ambientales. En cuanto a la modelación hidráulica de los tramos de interés en el presente documento tendrá un alcance semejante al de la práctica común en ingeniería.

En términos generales, el presente numeral tiene por objeto detallar las actividades que deberán ser adelantadas en una fase posterior del presente convenio para el perfeccionamiento de los cálculos del caudal ambiental ya efectuados con un mayor detalle en las métricas de interés ecológico vinculando los conflictos en el uso del agua bajo la evaluación de los servicios eco-sistémicos, los usos del agua y los objetivos de calidad.

6.1.1 Requerimientos de información adicional para el desarrollo de modelos de calidad del agua en los tres tramos priorizados

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y ECOPETROL firmaron el acuerdo de cooperación AC No. 4 3034153 de 2020 con objeto “Actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad de agua superficial del Valle Medio del Magdalena – VMM” bajo el Convenio Marco No. 52112957 cuyo objeto es “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para el intercambio de conocimiento científico e información, y el desarrollo de productos y servicios que contribuyan al cumplimiento de las funciones, objetivos e intereses de las partes”, suscrito por ECOPETROL y el IDEAM el 22 de enero de 2014 y con un plazo de diez (10) años, esto es hasta el 22 de enero de 2024. El alcance 2.2.1. Tiene por objeto: “realizar monitoreos de referencia de cantidad y calidad de agua superficial de los ríos Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo y tramo del río Magdalena, el cual se complementa con el alcance 2.2.2. El cual busca “Interpretar datos y analizar los resultados de los monitoreos hidrológicos y de calidad de aguas superficiales”. En ambos casos, los alcances propuestos no implican el desarrollo de modelos de calidad del agua en tramos o sectores de interés, y mucho menos plantean el que dicha modelación debe estar enfocada a la estimación de escenarios para el cálculo del caudal ambiental.

Teniendo en cuenta la guía metodológica anteriormente mencionada y los requerimientos de información para aplicar completamente la metodología de caudal ambiental, se ponen a

consideración los siguientes elementos necesarios para incorporar la componente de calidad del agua.

- 1) Investigación preliminar: Implica todos los aspectos asociados a la revisión y análisis de información existente, incluyendo:
 - Recopilación de los instrumentos de planificación, administración, evaluación y seguimiento del recurso hídrico existente que incluyan el tramo objeto de análisis para el caudal ambiental: esto implica extraer de dicha información, de manera preliminar, datos relacionados con: Localización y caracterización de sitios de vertimiento al cuerpo de agua, incluyendo cargas puntuales y difusas, censo de usuarios, cobertura y usos de la tierra.
 - Verificación de la red de calidad existente: analizar si dentro del tramo de interés existen estaciones de calidad del agua asociados a la Red Nacional o regional administrada por la Autoridad Ambiental Competente.
 - Reconocimiento en campo que implica la identificación de posibles sitios para el monitoreo de la calidad del agua que sirvan para calibrar el modelo, identificar captaciones, tributarios y principales vertimientos, llevar registro fotográfico.
- 2) Información de vertimientos: caracterización de los caudales vertidos con sus propiedades físico-químicas, ya sean formales o informales, así como reales o potenciales (aquellos que podrían ocurrir). Todas las autoridades ambientales llevan un registro histórico con la caracterización de vertimientos puntuales (efluentes directos a fuentes receptoras) sobre los cuerpos de agua. Con miras a integrar los efectos de dichos vertimientos para el objeto del análisis, es necesario revisar e identificar los siguientes atributos:
 - Identificador del usuario (código, expediente, nombre, etc.)
 - Georreferenciación del sitio de vertimiento, la cual debe guardar correspondencia con la red de drenaje del área de estudio.
 - Ciclo diurno del caudal vertido a la fuente receptora.
 - Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas vertidas de acuerdo con las variables sugeridas en la guía PORH.
- 3) Información de calidad del agua: se refiere básicamente a las propiedades asimilativas del cuerpo de agua objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental en el tramo de estudio considerando:
 - Variabilidad estacional: Se refiere a la variabilidad temporal de la calidad en el cuerpo de agua, como respuesta a la variabilidad media mensual de caudales, la cual, a su vez, depende de la localización geográfica de un determinado tramo de estudio, depende de las condiciones aguas arriba de cada tramo, y en particular para el río Sogamoso, del efecto del embalse.

- Variabilidad temporal: fluctuación en el tiempo de los contaminantes incidentes, y aquellas fuentes tributarias que representen aportes significativos de carga contaminante, las cuales pueden representarse en forma agregada como una condición de frontera que recoja sus impactos acumulativos. A diferencia de la caracterización estacional, ésta propende por capturar las fluctuaciones de carga contaminante debidas a los aportes de vertimientos puntuales en el cuerpo de agua.
 - Propiedades asimilativas del tramo: En este punto, los esfuerzos deben encaminarse hacia la caracterización de los mecanismos de asimilación (transporte advectivo y dispersivo, transformación físico-química y biológica, velocidades de sedimentación) a escala de tramo, y en la forma en que éstos varían con el caudal transportado. Las propiedades dispersivas de cada tramo pueden ser inferidas a partir de ensayos con trazadores. Por otro lado, las tasas de transformación físico-química y biológica y las velocidades de sedimentación de sustancias de interés ambiental, pueden estimarse con mayor facilidad en tramos de corriente en los que efectivamente existan aportes significativos de carga contaminante, como aquellos ubicados aguas abajo de cascascos urbanos o aguas abajo de descargas puntuales de aguas residuales.
 - Conjunto de variables fisicoquímicas objeto de análisis: teniendo como base las variables fisicoquímicas propuestas en la tabla 2 de la Guía PORH. Siendo de especial interés para los tramos de estudio el análisis de hidrocarburos, además de los parámetros sugeridos para el monitoreo de sedimentos de fondo en cuerpos de agua lénticos (tabla 3 guía PORH), en especial la demanda béntica.
- 4) Planeación y ejecución del programa de monitoreo: Una vez son seleccionadas las variables objeto de interés, se deberán planificar como mínimo dos campañas para la toma de parámetros fisicoquímicos, una en condiciones de aguas bajas y otra en condiciones normales, efectuando las mediciones en campo de los parámetros previamente seleccionados. Se recomienda seguir los pasos de la guía PORH en su numeral 3.2.2.2 sobre Diseño y ejecución del plan de monitoreo. Lo anterior implica la toma de muestras integradas en los cuerpos de agua sobre las estaciones de monitoreo predefinidas, los sitios de captación para consumo humano y doméstico, además de la caracterización de los vertimientos. En todo caso se busca: una caracterización física e hidrodinámica del cuerpo de agua a modelar, un análisis cuantitativo y cualitativo de las cargas contaminantes, información de la calidad del agua del cuerpo receptor que obedezca a los procesos de calidad a simular con el fin de identificar variables críticas y su distribución espaciotemporal en el cuerpo de agua, sumado a la información base para calibrar el modelo y datos suficientes que permitan estimar de manera preliminar los parámetros del modelo.

Como segundo componente se debe recolectar la información referente a la calidad del agua del cuerpo de agua receptor y de las fuentes de carga contaminante (en términos físicos, químicos y biológicos y microbiológicos). Entre estos se pueden citar a manera de ejemplo el monitoreo de parámetros sujetos a modelarse en diferentes escalas espaciotemporales, estudios de oxígeno disuelto a escala diaria, determinación de la demanda de oxígeno de los sedimentos (SOD, por sus siglas en inglés) en campo y ensayos de DBO a escalas de tiempo largas del cuerpo de agua y las principales fuentes de carga contaminante.

Para la caracterización detallada de los vertimientos, se debe tener en cuenta lo siguiente: la medición de caudales debe ser como mínimo de 8 horas para las descargas de los sistemas de alcantarillado. Se debe hacer la toma de muestras compuestas proporcionales al caudal, para un periodo de tiempo representativo de la actividad que lo produce. Los vertimientos se deben seleccionar de acuerdo con su nivel de impacto sobre el cuerpo de agua, o con deficiencias de información, entre otros.

- 5) Calibración y validación del modelo de calidad del agua: esta actividad consiste en la implementación, calibración y validación de un modelo de calidad del agua, a escala de tramo, que incluya el cuerpo de agua objeto de aplicación de la metodología de caudal ambiental. La idea es contar con un modelo predictivo que represente adecuadamente la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua ante diferentes condiciones hidrológicas y de carga contaminante. En este caso se deja libre al modelador que de acuerdo con su experiencia proponga la mejor herramienta de simulación; no obstante, debe cumplir con los requerimientos de la Guía para la modelación de la calidad del agua del año 2018 en cuanto a protocolos rigurosos de modelación sobre cada tramo priorizado.

La construcción del modelo parte de la conceptualización del mismo, dividiendo los tramos en segmentos, analizando los posibles cambios en los balances de masa (ingreso de tributarios), y contaminantes (vertimientos). Siempre buscando sostener los usos del agua existentes o definidos por la autoridad ambiental mediante una modelación enfocada hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad. Básicamente serán los usos del agua existente, junto con los objetivos de calidad los que definirán los parámetros mínimos necesarios a simular bajo los escenarios de caudal ambiental, considerando las principales afectaciones.

- 6) Simulación de escenarios críticos: en este paso se debe verificar si para diferentes condiciones críticas, no emergen problemáticas asociadas con la disponibilidad de agua o la calidad del agua en el área de estudio. Asimismo, este análisis apunta hacia la identificación de los condicionamientos que deben incluirse en los instrumentos de administración y planificación del recurso hídrico.

Los escenarios críticos para la determinación del caudal ambiental corresponden a los caudales mínimos en periodo seco y normal de la serie alterada (o serie de caudal ambiental). Considerando las máximas cargas contaminantes bajo un supuesto de demanda hídrica alta. Para cada escenario se deben obtener los perfiles de calidad del agua a lo largo del tramo y determinar los conflictos por calidad que emergen ante el posible incumplimiento de los objetivos de calidad fijados.

6.1.2 Requerimientos de información adicional para el desarrollo de modelos hidráulicos sobre la quebrada La Gómez y el río La Colorada

Otro de los componentes importantes para la estimación de los caudales ambientales es el modelo hidráulico, el cual permite estimar a escala de tramo varias métricas hidrológicas y morfométrico necesarias para la evaluación de la alteración del régimen hidrológico. El primero es el caudal de banca llena, y el segundo es el caudal de conectividad longitudinal. El primero se define como aquel que maximiza la potencial hidráulica específica y el segundo corresponde al generador de

energía mínima (flujo crítico) a lo largo de los tramos de interés. A continuación, se presenta el alcance para el levantamiento y creación de un modelo hidráulico en aquellas corrientes con déficit de información:

LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE DETALLE

La información se levantará en los tramos priorizados para la aplicación de la metodología de caudal ambiental. En estos tramos la información topográfica deberá ser de detalle con una precisión en la vertical de 10 cm o mayor. Se utilizará tecnología LIDAR a lo largo de todas las corrientes priorizadas para el presente estudio, atendiendo lo definido en otros términos de referencia creados dentro del convenio.

En el cauce, se hará un levantamiento mediante secciones transversales con una separación de 50 m. En los casos que se presenten cambios en la configuración geomorfológica de los cauces (curvas, caídas, etc.), se realizará una sección transversal de detalle. Por otra parte, se hará un levantamiento en detalle de las estructuras hidráulicas (pilas, estribos y losas de puentes, pontones, muros, diques, gaviones, alcantarillas, entre otros). Se deben identificar, espesores de losas, vigas y geometría en general de las obras, las cuales deben de quedar plasmadas en los planos presentados.

DELIMITACIÓN DE CAUCE PERMANENTE

A partir del análisis geomorfológico, el tipo de corriente y la información disponible, complementado con el análisis hidrológico correspondiente al área de inundación generado por una creciente de caudales máximos con un período de retorno de 2.33 años, se definirá el cauce permanente para las corrientes objeto del estudio, ajustado a partir de la geomorfología. En particular se propone el análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la evolución de los cauces durante los últimos 30 años.

CAMPAÑAS DE CAMPO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Se realizará una campaña de campo en los tramos de interés cuyo objeto será el de determinar los niveles de banca llena, y se tomarán muestras para determinar la composición del lecho y los coeficientes de rugosidad, para el caso de la quebrada la Gómez se sugiere el método de conteo de

rocas de Boltzman. Como los tramos cuentan con información histórica de aforos para la calibración de las curvas nivel caudal, se recomienda elaborar varios aforos en los sitios de monitoreo que sirvan posteriormente al proceso de calibración hidráulica.

MODELACIÓN HIDRÁULICA

La elección del modelo hidráulico se deja a criterio del experto, no obstante, es una práctica común en el país el uso del HEC-RAS o HEC-GEO RAS por su facilidad y posible aplicación en otros ámbitos.

Se debe efectuar el montaje del modelo hidráulico bajo condiciones de flujo uniforme o flujo gradualmente variado y/o flujo no permanente según corresponda en la plataforma seleccionada en función de las secciones transversales obtenidas a partir del levantamiento topográfico.

Se calibran parámetros efectivos en el tramo como la pendiente longitudinal efectiva del fondo del canal, y el coeficiente de rugosidad de Manning utilizando el método de Cowan basado en mediciones de campo del perfil del cauce, las observaciones de campo, el caudal aforado, y los diámetros característicos del material del lecho, los niveles de banca llena y el estudio hidrológico.

DEFINICIÓN DE MÉTRICAS DE INTERÉS ECOLÓGICO

Caudal de banca llena: Deberá ser determinado mediante el modelo hidráulico calibrado, corresponde al caudal máximo para el cual el perímetro mojado cambia de manera sustancial a lo largo del tramo, donde se maximiza la potencia específica o donde se encuentra un mínimo local en la relación ancho-profundidad.

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

Caudal de conectividad longitudinal: simulado a partir del modelo hidráulico, corresponde al caudal mínimo que lleva al río bajo condiciones de flujo crítico o de mínima energía a lo largo del cauce.

6.1.3 Costos aproximados para complementar el cálculo por tramos

Los costos aproximados de la componente hidráulica se pueden discriminar de la siguiente forma:

- Topobatimetría río la Colorada \$273 462 000
- Topobatimetría La Gómez: \$129 472 000
- Profesional en simulación hidráulica 5 meses: \$43 050 000
- Requerimiento de visitas de campo (incluye aforos y transporte): \$12 300 000
- *Costo total componente hidráulica: \$458 254 000.*

Los costos aproximados de la componente de calidad del agua se pueden discriminar así:

- Profesional en modelación de calidad del agua 5 meses: \$43 050 000
- Profesional en levantamiento de usuarios del recurso hídrico 5 meses: \$43 050 000
- Costos de muestras de laboratorio para calibración de modelo de calidad del agua.: \$223 000 000
- (Incluye caracterización de vertimientos, hidrocarburos, demanda béntica, físico químicos y sedimentos a lo largo de la una red de monitoreo que posea como mínimo 7 puntos en cada río)
- *Costo total calidad del agua: \$310 000 000*

6.2 Conclusiones desde la hidrología

La metodología empleada para el cálculo del caudal ambiental en los tramos priorizados se basa en la desarrollada por el MADS-IDEAM en asocio con la Universidad Nacional sede Medellín, cuya versión final es del 2018 y fue aplicada al río Bogotá.

Esta metodología es de tipo holístico, por lo que considera múltiples factores, entre ellos la hidrología, la hidráulica, la calidad del agua y la hidrobiología, posteriormente el proceso de adopción del caudal ambiental implica su incorporación dentro de la gestión al interior de la cuenca, su interacción con los usuarios y las demandas actuales y proyectadas.

Considerando las limitaciones de información existentes, en el presente documento se han presentado los resultados de la aplicación de la metodología en tres tramos pilotos haciendo énfasis en la componente hidrológica (donde existen datos suficientes) e hidráulica (con ciertas limitaciones). Asimismo, se han presentado los resultados de la parte hidrobiológica.

Bajo las consideraciones anteriores es importante resaltar que la metodología abordada arroja resultados que, aunque preliminares, *sirven de referencia para posteriores aplicaciones*.

Por las hipótesis de la metodología MADS-IDEAM, los caudales arrojados son sustancialmente mayores en comparación con otras técnicas aplicadas por IDEAM y ANLA en ejercicios de gestión integral del recurso hídrico. En ningún caso, considerando los tres pilotos, el caudal ambiental estuvo por debajo del 60% del caudal medio *lo que convierte la metodología MADS-IDEAM en la más restrictiva aplicada hasta ahora*.

Con respecto a la a la metodología del IDEAM-Estudios Nacionales del agua, se debe aclarar que *esa estimación en unidades de análisis de nivel subsiguiente no puede tomarse para tramos específicos de cuerpos de agua dentro de la región*, y que corresponde a la estimación de un volumen anual que requieren los ecosistemas allí analizados.

Vale la pena detallar algunas limitaciones conceptuales que tiene la metodología MADS-IDEAM aquí implementada a fin de explicar el porqué de los resultados tan restrictivos de caudales ambientales:

- La metodología se basa en la hipótesis de que los eventos de interés ecológico antes y después del aprovechamiento deben conservarse. Esto se logra usando pruebas estadísticas no paramétricas sobre conjuntos de eventos que deben ser reclasificados de forma mensual, las muestras de datos para tal comparación se vuelven muy pequeñas y por tanto las pruebas no paramétricas pierden sensibilidad.
- La metodología se basa en las “métricas de interés ecológico” cuya selección a lo largo de la guía no es muy clara. Los Caudales Q_{max} 15 y Q_{min} 10 no poseen un sustento bibliográfico claro y parecen más criterios subjetivos. El caudal de conectividad longitudinal requiere de información de campo no disponible, y cuando se usan únicamente aproximaciones hidráulicas, puede dar lugar a que el valor obtenido no sea relevante. La metodología además mezcla escalas temporales, (eventos, diaria, mensual) lo que no ayuda en el proceso de selección de las métricas. Por ejemplo, fuentes pequeñas como la quebrada la Gómez puede tener caudales de banca llena y caudales máximos muy altos; sin embargo, estos no duran más de 24 horas y por tanto el valor máximo del evento difiere mucho del valor máximo reportado diario, así pues, los eventos extremos como banca llena o Q_{max} 15 no se capturan en las series de caudales medios diarios cuando las cuencas son pequeñas.

La metodología MADS-IDEAM parece redundar cuando propone unos “condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen” cuando la hipótesis fundamental para definir el aprovechamiento es justamente garantizar que no existirá alteración, en particular para los eventos de interés ecológico que se quieren volver a reproducir.

La metodología podría mejorarse si el enfoque buscara la máxima alteración del régimen garantizando la mínima afectación de los servicios ecosistémicos (algo así como la metodología IHA); sin embargo, la metodología MADS-IDEAM parte del hecho de no alterar estadísticamente las métricas de interés ecológico.

Finalmente hay que resaltar que la metodología es costosa, a parte de los recursos invertidos en la actualidad deberán destinarse a futuro más de 500 millones para lograr su aplicación completa. Quizás estos costos podrían reducirse si con la ayuda de la Autoridad Ambiental Competente se declaran las fuentes priorizadas en ordenamiento (como ya lo tiene La Gómez) y se avanza paralelamente en la topo-batimetría de las fuentes.

Al parecer para su aplicación completa se requiere de bastante información. La guía da unas pautas para regionalizar, pero no es claro el paso de la especificidad del tramo a la generalidad de la cuenca sin considerar todas las variables.

6.3 Conclusiones desde la hidrobiología

El análisis de las comunidades hidrobiológicas permitió obtener un análisis base del estado del ecosistema en cada uno de los tramos seleccionados en el estudio. A través del análisis integral de la composición, estructura e indicadores ecológicos se logró obtener una aproximación de la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos y algas perifíticas a las condiciones ambientales. Tal es el caso de la Quebrada La Gómez la cual reflejó en términos generales condiciones adecuadas para el establecimiento de las comunidades bioindicadoras, presentando los mayores valores de diversidad taxonómica y una clasificación aceptable de calidad (según el BMWP). Mientras que los ríos Sogamoso y La Colorada reflejaron condiciones que limitan el desarrollo adecuado de comunidades como los macroinvertebrados acuático y algas perifíticas, dados los bajos valores de diversidad y calidad que demostraron.

Para los tramos seleccionados el índice de integridad biótico demuestra condiciones no adecuadas para el establecimiento y funcionamiento de las comunidades hidrobiológicas dado que clasificó a todas las estaciones de muestreo como “*Pobres*” en IIB. Esto requiere un seguimiento continuo que permita establecer la respuesta de los organismos a la variabilidad ambiental, ya que este índice fue producto de un solo monitoreo.

La aproximación del índice de integridad de hábitat (IIH) mostró, para la estimación del caudal ambiental, en todos los escenarios y meses un comportamiento de integridad moderada del hábitat

en el Río Sogamoso y Baja integridad de hábitat para el Río La Colorada, lo cual en general es consecuente con los resultados obtenidos en los índices ecológicos y el análisis de la composición y estructura de las comunidades.

Es importante tener en cuenta que los resultados de composición, estructura e índices ecológicos son producto de un único muestreo, lo cual, por supuesto no es representativo de la dinámica ecológica del sistema, *por lo que se requiere un esfuerzo de muestreo aún mayor que provea información lo suficientemente robusta* con respecto al análisis de la calidad ambiental para las comunidades que habitan los ecosistemas estudiados.

Se recomienda mantener un monitoreo espacial y temporal continuo de las comunidades hidrobiológicas de macroinvertebrados y algas perifíticas, que permitan generar mejores estimaciones de la respuesta de los organismos a los cambios ambientales de los ecosistemas.

De igual forma, es necesario ampliar el análisis hidrobiológico a otras comunidades como la vegetación riparia y peces, de forma que se pueda obtener un análisis más profundo de la dinámica y funcionalidad del ecosistema en relación con los cambios de caudal que se pueden presentar en escenarios futuros.

Es fundamental considerar dentro de los análisis de las comunidades y en la evaluación de impactos en el contexto de la estimación del caudal ambiental, la función ecosistémica a través de la determinación de rasgos funcionales, es decir un análisis de diversidad multidimensional donde se haga énfasis en el estudio de la diversidad funcional.

7 Referencias

- Abbaspour, K. (2019). *SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. Zürich, Suiza: 2w2e institute.
- Aguilera, G. 2012. Caudal ecológico: definiciones, metodologías, aplicación en la zona andina. *Acta zoológica lilloana* 56 (1-2): 15–30.
- An SS, Friedl T, Hegewald E. 1999. Phylogenetic relationships of Scenedesmus and Scenedesmus-like coccoid green algae as inferred from ITS-2 rDNA sequence comparisons. *Plant Biol* 1: 418-428.
- Allan JD. 1995. *Stream Ecology*. Structure and function of running waters. Chapman & Hall. University of Michigan. U.S.A.
- Amblart C, Couture P y Bourdier G.1990. Effects of pulp and paper mill effluent on the structure and metabolism of periphytic algae in experimental streams. *Aquat. Toxicol.* 18:137-162.
- Arias, P., Garraud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., . . . van Oveelen, P. (2021). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Frontiers in earth science*, 505467.
- Armitage, P. D., D. Moss y M.T. Furse. 1983, The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running water sites. *Water Res*, 17: 33-347.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *SWAT input/output documentation*. Austin: Texas Water Resources Institute.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., . . . Jha, M. (2012). Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1491-1508.
- Baez-Villanueva, O., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., . . . Thinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 111606.

Bartram, J., & Ballance, R. (1996). *Water Quality Monitoring: A practical Guide to the Design of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. Londres: Chapman Hill.

Beck, H., Van Dijk, A., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D., Martens, B., & de Roo, A. (30 de 1 de 2017). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589-615.

Beven, K. (2012). *Rainfall runoff modelling: the primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Bold HC & Wynne MJ. 1985. *Introduction to the algae, structure and reproduction*. Prentice-Hall. New Jersey.

Bourrelly P. 1966. *Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique*. Tome **I**: Les Algues Vertes. Éditions N. Boubée y Cie. 511 S., Paris.

_____ 1968. *Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique*. Tome **II**: Les Algues jaunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées. Éditions N. Boubée y Cie. 438 S., Paris.

_____ 1985. *Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique*. Tome **III**: Les Algues bleues et rouges. Les Euglénoides, Peridinie et Cryptomonadines.- Réimpr. rev. augm., 606 S., (Boubée) Paris.

Branco SM. 1986. *Hidrobiología Aplicada a la Ingeniería Sanitaria*. Convenio CETESB ASCETESB. Sao Paulo-Brasil.

Centro Nacional de Modelación - IDEAM. (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e Hidráulica*. Bogotá D.C.: IDEAM.

Centro Nacional de Modelación Hidrometeorológica - IDEAM. (2020). *ACTIVIDADES PROPUESTAS PARA EL CONVENIO ESPECÍFICO ENTRE EL IDEAM Y LA ANH FASE I PARA LA ELABORACIÓN DE INSTRUMENTO PILOTO DE REGIONALIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA E HIDROLÓGICA EN EL ÁREA DEL PUTUMAYO*. Bogotá D.C.: IDEAM.

Chavez, M. E. y Santamaría, M. (eds). (2006). Informe sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia. 2 tomos.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Dent CL. 1999. The effects of ecosystem configuration on nutrient dynamics in a sonoran desert stream ecosystem. Arizona State University.

Domínguez, E., Hubbard, M. & Peters, W. (1992). Clave para Ninfas y Adultos de las Familias y Géneros de Ephemeroptera (Insecta) Sudamericanos. *Biología Acuática* 16, 1-39.

Domínguez, E. & Fernández, H. (Eds.). (2009). *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos. Sistemática y Biología* (1.a ed.). Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.

Duque Gardeazábal, N. (2021). *Metodología para la modelación de oferta hídrica de la subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena*. Bogotá D.C.: IDEAM.

Duque-Gardeazábal, N. (2019). Estimación de campos de precipitación en cuencas hidrográficas colombianas con escasez de datos, combinando datos teledetectados y estaciones en tierra, usando funciones de kernel. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Duque-Gardeazabal, N., Zamora, D., & Rodríguez, E. (2018). Analysis of the Kernel Bandwidth Influence in the Double Smoothing Merging Algorithm to Improve Rainfall Fields in Poorly Gauged Basins. *13th International Conference on Hydroinformatics*, 635-626.

Edmondson, E. W. (Ed.). (1959). *Fresh Water Biology* (2.a ed.). Wellington. Estados Unidos: John Wiley and Sons.

Edmunds, G. F., Jensen, S. L. & Berner, L. (1976). *The Mayflies of North and Central America*. Amsterdam, Países Bajos: Amsterdam University Press.

Ettl H, Gerloff J, Heynig H □ Mollenhauer D. (Hrsg.). 1985. Süßwasserflora von Mitteleuropa.-bisher 1 Bände, (G. Fischer) Stuttgart. Begründet von A. Pascher.

_____.1985. Band 1 Chrysophyceae und Haptophyceae.

_____.1997. Band 2/1 Bacillariophyceae (Naviculaceae).

- _____.1997. Band 2/2 Bacillariophyceae (Epithemiaceae, Bacillariaceae, Surirellaceae).
- _____.1991. Band 2/3 Bacillariophyceae (Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae).
- _____.1991. Band 2/4 Bacillariophyceae (Achnanthaceae. Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Gesamtliteraturverzeichnis für Teil 1-4).
- _____.1990. Band 6 Dinophyceae (Dinoflagellida).
- _____.1983. Band 9 Chlorophyta I (Phytomonadina).
- _____.1988. Band 10 Chlorophyta II (Tetrasporales, Chlorococcales, Gloeodendrales).
- _____. 1985. Band 14 Chlorophyta VI (Oedogoniophyceae: Oedogoniales).
- _____. 1984. Band 16 Chlorophyta VIII (Conjugatophyceae I: Zygnemales).
- Flotemersch, J. E., Leibowitz, S. G., Hill, R. A., Stoddard, J. L., Thoms, M. C., y Tharme, R. E. (2015). A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. *River Research and Applications*.
- Formulación POMCA afluentes directos al Río Lebrija medio (MI), plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica. Fase de diagnóstico. Documento general, Vol. I. Caracterización básica y del sistema físico-biótico. 2015.
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 226-240.
- Frissell CA, Liss WJ, Warren CE & Hurley MD. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environ. Manage*, 10:199-214.
- Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D., & Husak, G. (2015). A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth System Science Data*, 275-287.
- García Echeverri, C. (2021). *Creación de campos de precipitación con RFmerge*. Bogotá D.C.: Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Gibson, G. R., Barbour, M. T., Stribling, J. B., Gerritsen, J., & Karr, J. R. (1996). Biological criteria: Technical guidance for streams and small rivers. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, EPA 822-B-96-001.

- Griffith MB, Hill BH, Herlihy AT & Kaufmann PR. 2002. Multivariate analyses of periphyton assemblages in relation to environmental gradients in Colorado rocky mountain streams. *J. Phycol.* 38: 83-95.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 80-91.
- Gutiérrez, Y. & Dias, L. G. (2015). Ephemeroptera (Insecta) de Caldas - Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Papéis Avulsos de Zoologia (São Paulo)*, 55(2), 13-46.
- Gutiérrez, C. & Reinoso Flórez, G. (2017). Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana*, 11(1 y 2), 23-32.
- Guttman, N. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 311-322.
- Hansson LA. 1990. Quantifying the impact of periphytic algae on nutrient availability for phytoplankton. *Freshwat. Biol.* 24, 265-273.
- Hawkims CP, Norris RH, et al. 2000. Evaluation of the use of landscape classifications for the prediction of freshwater biota: synthesis and recomendations. *J.N. Am. Benthol. Soc.* 19: 541-56.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 96-99.
- Hogue, C. L. y Bedoya, I. (1989). "The net-winged midge fauna (Diptera: Blephariceridae) of Antioquia department, Colombia". *Los Angeles country Mus. Contrib. Sci.* 413: 1-57.
- Huber –Pestalozzi G (Hrsg.) (1938 ff): *Das Phytoplankton des Süßwassers.*-In: THIENEMANN, A., ELSTER, H.-J. Y OHLE, W. (Hrsg.): *Die Binnengewässer*, bisher 16 Teile, (Schweizerbart) Stuttgart.
- _____ (1938): *Band XVI, Teil 1. Allgemeiner Teil Blaualgen. Bakterien. Pilze.* 341 S.

- _____ (1976): Band XVI, Teil 2, 1. Hälfte. Chrysophyceen. Farblose Flagellaten. Heterokonten. 2. Unveränderter Nachdruck. 365 S.
- _____ (1955): Band XVI, Teil 4. Euglenophyceen. 606 S. und CXIV, Taf.
- _____ (1961): Band XVI, Teil 5. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Volvocales. 774 S. CLVIII, Taf.
- _____ (1983): Band XVI, Teil 7, 1. Hälfte. Von J. Komárek und B. Fott. Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung: Chlorococcales. 1044 S.
- Hurlbert, S. H. (ed). (1981). “Aquatic biota of tropical South America”. San Diego, California. San Diego state university.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua - ERA*. Bogotá D.C.: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.
- Illies, J. (1961). “Gebirgsbäche in Europa and Südamerika-ein limnologischer Vergleich”. Verh. Internat. Verein. Limnol. 14: 517-523.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *IEEE International Conference on Neural Network*, (págs. 1942-1948).
- Laython M. (2017). Los Coleópteros Acuáticos (Coleoptera: Insecta) en Colombia, Distribución y Taxonomía (tesis inédita de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Li, M., & Shao, Q. (2010). An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data. *Journal of hydrology*, 51-64.
- Longo, M., Zarnora, H., Guisande, C., Ramírez, J. J. (2010). Dinámica de la comunidad de macroinvertebrados en la quebrada Potrerillos (Colombia): Respuesta a los cambios estacionales de caudal. *Limnetica*, 29(2): 195-210.
- López López, P., Immerzeel, W., Rodríguez, E., Sterk, G., & Schellekens, J. (2018). Spatial downscaling of satellite-based precipitation and its impact on discharge simulations in the Magdalena River basin in Colombia Impact of high spatial resolution precipitation on streamflow simulations. *Frontiers in Earth Science*, 68.

- Maass, J. M. Balvanera, P. Castillo, A. Daily, G. C. Mooney, H. A. Ehrlich, P. Quesada, M. Miranda, A. Jaramillo, V.J. García-Oliva, F. Martínez-Yrizar, A. Cotler, H. López-Blanco, J. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, A. Tinoco, C. Ceballos, G. Barraza, L. Avala, R. Sarukhán, J. (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the pacific coast of Mexico. *Ecology and society* 10: 1-17.
- Portillo-Quintero, C. A. Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forest in the Americas. *Biological conservation* 143: 144 -155.
- Manzo, V. (2005). Key to the South America genera of Elmidae (Insecta: Coleoptera) with distributional data. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 40(3), 201-208.
- Manzo, V. & Archangelsky, M. (2014). Coleoptera: Elmidae. Pp: 33-46. En: Roig-Juñent, S., L. E. Claps y J. J. Morrone (Eds.). *Biodiversidad de Artrópodos Argentinos. Volumen 3.* Sociedad Entomológica Argentina Ediciones, Buenos Aires, Argentina.
- Masseret E, Amblard C, y Bourdier G. 1998. Changes in the structure and metabolic activities of periphyton communities in a stream receiving treated sewage from a waste stabilization pond. *Wat. Res.* Vol. 32, N° 8, pp 2299-2314.
- Martens, B., Miralles, D., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R., Fernández-Prieto, D., . . . and Verhoest, N. (2017). GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10: 1903–1925.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (págs. 179-184). Anaheim, California: American Meteorological Society, Boston.
- Merritt, R. W. & Cummins, K. W. (1996). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America* (3.a ed.). Zaltbommel, Países Bajos: Van Haren Publishing.
- MinAmbiente & ANLA. (2013). *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental.* Ministerio de medio ambiente. Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2014. *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico.* Bogotá, D.C.: Colombia.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2018. Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial. Bogotá, D.C.: Colombia.
- MinAmbiente & IDEAM. (2019). Metodología para la estimación del caudal ambiental en el río bogotá. Ministerio de medio ambiente. Colombia.
- Montoya, J. J., Duque Gardeazábal, N., Sanabria Morera, C. A., Onofre, C., Pareda, G., & Jimenez Gonzales, C. F. (2021). *Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas del Valle Medio del Magdalena*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Moriassi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 885-900.
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69-88.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Collage Station, Texas: Texas A&M University.
- Nerini, D., Zulkafli, Z., Wang, L.-P., Buytaert, W., Lavado, W., & Guyot, J.-L. (2015). A comparative analysis of TRMM-rain gauge data merging techniques at the daily time scale for distributed rainfall-runoff modelling applications. *Journal of Hydrometeorology*, 2153-2168.
- Nieser, N. (1970). “Gerridae of Surinam and the Amazon, with additional records of other Neotropical species”. *Stud. Fauna Suriname and other Guyanas*. 12(47): 94-138.
- Odusanya, A. E., Schulz, K., Biao, E. I., Degan, B. A., & Mehdi-Schulz, B. (2021). Evaluating the performance of streamflow simulated by an eco-hydrological model calibrated and validated with global land surface actual evapotranspiration from remote sensing at a catchment scale in West Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 100893.
- OMM. (2012). *Índice Normalizado de Precipitación. Guía de usuario*. Ginebra, Suiza: OMM.

O' Neill RV, Elwood JW y Hildebrand SG. 1979. Theoretical implications of spatial heterogeneity in stream ecosystems. In innis , G.S. y O' Neill RV (Eds) . System analysis of ecosystems. International Co-operative Publishing House, Fairland Maryland, pp. 79-101.

Pennak, R. W. (1978). Fresh-Water Invertebrates of the United States. 2nd Edition, Jhon Wiley Sons, New York.

Pérez, M. R. M., Arreola, E. P. M., Madrigal, P. R., Ortiz, M. M., Piñón, F. M., Ramírez, A., Ulises, M. V. M., & Torres, G. U. (2006). Análisis comparativo del índice de integridad biótica con base en las asociaciones de macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA) con el índice biológico global normalizado (IBGN) en arroyos y ríos del centro de México. *Entomología Mexicana*, 5, 375-380.

Perla Alonso-Eguális, Mora, J.M. Campbel. B & Springer, M. (Eds). 2014. Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. IMTA México.

Phinyo, K., Pekkoh, J., & Peerapornpisal, Y. (2017). Distribution and ecological habitat of Scenedesmus and related genera in some freshwater resources of Northern and North-Eastern Thailand. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(3), 1092-1099.

Piñón Flores, MA., Pérez Munguía, RM., Torres García, U., Pineda López, R. (2014). Integridad biótica de la microcuenca del Río Chiquito, Morelia, Michoacán, México, basada en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. *Rev. Biol. Trop.* Vol. 62 (Supl. 2): 221-231.

Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Presteggaard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. (1997) The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47: 769-784.

Posada-García, J. & Roldán-Pérez, G. (2003). Clave Ilustrada y Diversidad de las Larvas de Trichoptera en el Nor-occidente de Colombia. *Caldasia*, 25(1), 169-192. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/39407>

Poveda, G., Waylen, P., & Pulwarty, R. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Journal of Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 3-27.

Prescott GW, Bicudo CE □ Vinyard WC .1982. A Synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermae Section 4. University of Nebraska Press. Lincoln and London. p. 241.

Ramírez JJ. 2000. Fitoplancton de agua dulce: aspectos ecológicos, taxonómicos y sanitarios. Edit. Universidad de Antioquia. Medellín.

Ríos-Touma, B. & Ramírez, A. (2019). Multiple Stressors in the Neotropical Region: Environmental Impacts in Biodiversity Hotspots. En Sabater, S., Eloisei, A. & Ludwig, R. (Eds), Multiple Stressors in River Ecosystems (pp. 205-220). Netherlands, Amsterdam: Elsevier.

Rodríguez, E., Sánchez, I., Duque, N., Arboleda, P., Vega, C., Zamora, D., . . . Burke, S. (2020). Combined Use of Local and Global Hydro Meteorological Data with Hydrological Models for Water Resources Management in the Magdalena - Cauca Macro Basin – Colombia. *Water Resources Management*, 2179-2199. doi:10.1007/s11269-019-02236-5

Rodríguez-Olarte, D., Barrios, M., Caputo, L., Fierro, P., Jiménez-Prado, P., Navarro, E., ... Villamarín, C. (2020). Criterios para la evaluación de estresores y parámetros en la estimación del estado ecológico de ríos en Suramérica. Serie Publicaciones Especiales. Museo de Ciencias Naturales. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela. 68 pp.

Roldán, G. (1988). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia, Bogotá, Fondo FEN- Colombia, Editorial Presencia Ltda.

Roldán, G. (1999). “Los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua”. Rev. Acad. Col. Cien. Exac. Fis. Nat. 23 (88): 375-387.

Roldán G, Ruiz E. 2001. Development of Limnology in Colombia. Wetzel. R.G and Gopal B (Ed). Limnology in Developing Counties 3: 69 – 119.

Roldán G.A. 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: propuesta para el uso del método BMWP/Col..Editorial Universidad de Antioquia. Medellín

Roldán, G. Ramírez, J. J. (2008). 2ª. ed. Fundamentos de limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat., 40(155), 254-274. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>

- Ross, A., Arnett Jr. & Thomas, MC (Eds.). (2000). *Escarabajos americanos: Archostemata, Myxophaga, Adephaga, Polyphaga: Staphyliniformia*. (Vol. 1). CRC Press.
- Ross, A., Arnett, R. H., Thomas, M. C., Skelley, P. E. & Frank, J. H. (Eds.). (2002). *American Beetles, Volume II: Polyphaga: Scarabaeoidea through Curculionoidea* (Vol. 2). CRC press.
- Sabater, S, Elozegi, A, Ludwig, R. (Eds). (2019). *Multiple Stressors in River Ecosystems. Status, Impacts and Prospects for the Future*. Netherlands, Amsterdam: Elsevier.
- Sanabria Morera, A. C. (2021). *Metodología para la modelación de la oferta hídrica de las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Sanabria Morera, C. A., & Duque Gardeazábal, N. (2021). *Resultados de la revisión y análisis de las iniciativas de modelación de agua superficial y de sedimentos (Inspiragua, Hydrobid, insumos ENA y modelos de balance DWB, WEAP, etc.)*. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Sioli, H. (1964). “General features of the limnology of Amazonias”. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15: 1053-1058.
- Skogen, M. D., Ji, R., Akimova, A., Daewel, U., Hansen, C., & Hjollo, S. (2021). Disclosing the truth: Are models better than observations? *Marine Ecology Progress Series*, 7-13.
- Uehlinger V .1964. “Étude Estatistique des Méthodes de denombrement planctonique”.*Archives des sciences.*17 (2) :121-223.
- Usinger, R. (Ed.). (1968). *Insectos acuáticos de California: con claves para los géneros norteamericanos y las especies de California* (3.a ed.). Los Angeles, California: University of California Press.
- Viviane C, Raoul H y Pompeo M. 2000. Seasonal variation of biomass and productivity of the periphytic community on artificial substrata in the Jurimirim Reservoir (Sao Paulo, Brazil).*Hydrobiologia.* 434: 35-40.
- Vrije universiteit Amsterdam, Ghent university, ESA. (Febrero de 2020). Global Land Evaporation Amsterdam Model. Obtenido de Publications: <https://www.gleam.eu/#publications>
- Wetzel GR. 1979. *Methods and measurements of periphyton communities*. American Society for testing and materials. Philadelphia.PA.

Wetzel GR. 1983. Periphyton of Freshwater Ecosystems. Dr. W. Junk Publishers, The Hague/Boston.

Wetzel GR y Likens GE. 1990. Limnological analysis. Springer- Verlag. New York.

Zamora G, Sarra H. 2001. Calidad biológica de los ecosistemas lóticos afectados por aguas residuales de rallanderías de yuca, mediante la utilización de sus macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores, comparando además de la aplicación de los índices de Shannon- Weaver y BMWP. Unicauca Ciencia 6 (2001).

Zuñiga de Cardoso M.C, Rojas A.M, Caicedo G. 1997. Indicadores ambientales de calidad de agua en la cuenca dla Quebrada Cauca. En: Bioindicadores ambientales de la calidad del agua. Universidad del Valle, Cali.