



El ambiente
es de todos

Minambiente



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

COMPORTAMIENTO HISTÓRICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS SUBZONAS HIDROGRÁFICAS DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA

GRUPO DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA

GRUPO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA

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

Acuerdo de Cooperación ECOPETROL – IDEAM – AC No. 4 (3034153)

PRODUCTO 4

Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas del Valle Medio del Magdalena



	Versión	Nombre	Cargo	Fecha
Autor(es)	1.0	Consuelo Onofre Gabriela Pareda Cesar Fernando Jimenez Gonzalez Nicolas Duque Camilo Sanabria	Contratistas IDEAM	15/12/2021
Revisó		Juan José Montoya, Ana Karina Camillo	Líder Técnico Acuerdo AC 04, Lider evaluación hidrológica Acuerdo AC 04	29/12/2021
Aprobó		Nelson Omar Vargas	Subdirector de Hidrología	30/12/2021



Tabla de Contenidos

1.	Introducción	20
1.1	Marco conceptual. El ciclo hidrológico	22
1.2	Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua	24
1.3	Marco institucional y normativo.....	26
1.3.1.	Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.	26
1.3.2.	Instrumentos nacionales y regionales para la evaluación del agua.	26
1.4	Área de estudio.	28
1.4.1.	Subzona hidrográfica del río Opón	29
1.4.2.	Subzona hidrográfica del río Sogamoso	31
1.4.3.	Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena	32
1.5	Unidades de análisis, escalas y resoluciones.	33
2.	Evaluación de la oferta hídrica.....	36
2.1.	Aspectos conceptuales	36
2.2.	Aspectos metodológicos	38
2.2.1.	Definición de objetivos de modelación.....	39
2.2.2.	Revisión de datos e información disponible	40
2.2.3.	Definición de las escalas características	45
2.2.4.	Análisis de calidad de los datos e información	46
2.2.5.	Construcción del modelo conceptual	52

2.2.6.	Selección del modelo a emplear.....	58
2.2.7.	Selección de criterios de desempeño	64
2.2.8.	Análisis de sensibilidad.....	66
2.3.	Resultados de la modelación hidrológica	69
2.3.1.	Ajuste de parámetros y calibración, validación	69
2.3.2.	Desempeño del modelo, validación y evaluación diagnóstica de las simulaciones.....	87
2.3.3.	Evaluación de la incertidumbre.....	117
2.4.	Posibles escenarios de caudal a 5 y 10 años	122
2.4.1.	Subzona hidrográfica del río Lebrija	123
2.4.2.	Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso	125
3.	Evaluación de la demanda del agua en el Valle Medio del Magdalena	130
3.1.	Objetivos y alcances de la evaluación de la demanda de agua.....	130
3.2.	Aspectos conceptuales	130
3.3.	Aspectos metodológicos	134
3.3.1.	Métodos de análisis.....	134
3.3.2.	Fuentes de información disponible para la evaluación de la demanda del agua.....	144
3.4.	Resultados de la demanda sectorial del agua.....	147
3.4.1.	Sector agrícola.....	147
3.4.2.	Sector pecuario.....	152
3.4.3.	Sacrificio de ganado.....	155

3.4.4.	Sector piscícola	156
3.4.5.	Sector industrial	156
3.4.6.	Sector energético.....	157
3.4.7.	Sector minero.....	159
3.4.8.	Sector hidrocarburos	161
3.4.9.	Sector doméstico.....	164
3.4.10.	Sector servicios	165
3.4.11.	Sector construcción	165
3.5.	Resultados de la evaluación de la demanda de agua por subzona hidrográfica	166
4.	Evaluación de la calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena.....	178
4.1.	Objetivos y alcances de la evaluación de la calidad de agua.....	179
4.2.	Aspectos conceptuales	180
4.3.	Aspectos metodológicos	187
4.4.	Análisis de la información para la evaluación de la calidad del agua	207
4.5.	Resultados de la alteración potencial de la calidad del agua	213
4.6.	Resultados de la evaluación de las condiciones de la calidad del agua.....	221
4.7.	Análisis integrado (Evaluación Presión – Estado).....	238
4.8.	Conclusiones generales.....	248
4.9.	Propuesta de medidas generales con respecto a las necesidades de monitoreo de la calidad del agua a nivel regional y nacional en las áreas de estudio del VMM	258

5.	Indicadores hídricos	268
5.1.	Oferta Hídrica Total Superficial	268
5.1.1	Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija.....	268
5.1.2.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Opón.....	275
5.1.3.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Sogamoso.....	281
5.2.	Índice de regulación hídrica e índice de aridez	288
5.2.2.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija.....	289
5.2.2.	Resultados en las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso	292
5.3.	Caudal ambiental	295
5.4.	Índice de uso del agua (IUA).....	298
6.	Bibliografía.....	312

Lista de figuras

Figura 1.1. Esquema general del acuerdo AC 04 entre el IDEAM y ECOPETROL	22
Figura 1.2. Esquema del ciclo hidrológico (UNESCO, 2006)	23
Figura 1.3. Procesos del ciclo hidrológico (García, SP)	24
Figura 1.4. Sistema de indicadores hídricos para el ENA 2018 (IDEAM, 2019).	25
Figura 1.5 Localización del área de interés y área de influencia en los componentes de oferta, demanda y calidad.	29
Figura 1.6 Localización Subzona Hidrográfica del río Opón	30
Figura 1.7 Localización Subzona Hidrográfica del río Sogamoso.....	32
Figura 1.8 Localización y subdivisión de la SZH del río Lebrija	33
Figura 1.9. Cubrimiento de cuencas con POMCA y cuencas sin POMCA.	35
Figura 2.1 Esquema procesos en ciclo hidrológico. Fuente:Chow (1965).....	37
Figura 2.2 Conceptualización sistema socio-eco-hidrológico. Fuente: adaptado de Falkenmark & Rockström (2004).....	38
Figura 2.3 Esquema de un modelo hidrológico. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)	38
Figura 2.4 Etapas de la modelación hidrológica. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)	39
Figura 2.5 Celdas y dominio de interpolación	41
Figura 2.6 Elevación a partir del DEM SRTM	43
Figura 2.7 Coberturas del suelo en clasificación CLC para el periodo 2000-2002.....	44
Figura 2.8 Escalas características de los procesos hidrológicos. Fuente: Tomado de Rojas, J (2011).	46
Figura 2.9 Posición de las estaciones de caudal en la SZH del río Lebrija.....	48

Figura 2.10 Localización de estaciones hidrométricas de interés	50
Figura 2.11 Localización de estaciones precipitación BD DHIME asegurada	52
Figura 2.12 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Opón	54
Figura 2.13 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Sogamoso	56
Figura 2.14 Modelo conceptual específico para la SZH del río Lebrija.	57
Figura 2.15 Pasos metodológicos para la modelación hidrológica	59
Figura 2.16. Representación de procesos del ciclo hidrológico en SWAT	61
Figura 2.17. Representación de procesos en la fase de tránsito en SWAT. Tomado de Neitsch, et al.	62
Figura 2.18. Esquema básico del modelo GR4J.....	63
Figura 2.19 Cambios en las hidrógrafas en la estación San Rafael debido a las variaciones en el parámetro SOL_K	67
Figura 2.20 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Penman-Monteith para la ETp (parámetros sin modificar)	72
Figura 2.21 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Hargreaves para la ETp (parámetros sin modificar)	72
Figura 2.22 Desempeño de las simulaciones respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Hargreaves para ETp.....	73
Figura 2.23 Desempeño de las simulaciones respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Penman-Monteith para ETp.....	74
Figura 2.24 Hidrógrafa simulada con el ajuste de parámetros semi-manual en la estación San Rafael	75
Figura 2.25 Dotty plots de la modificación automática de parámetros con el algoritmo PSO para cada bloque de calibración	78
Figura 2.26 Aplicación factores de ajuste de parámetros.....	79
Figura 2.27 Parámetros usados en la calibración del SWAT	80

Figura 2.28 Diagramas de dispersión en análisis de sensibilidad	82
Figura 2.29 Hidrógrafas observadas y simuladas en las estaciones analizadas	84
Figura 2.30 Dotty plots de la calibración con PSO	87
Figura 2.31 Desempeño de los caudales a escala mensual.....	90
Figura 2.32 Desempeño de los caudales a escala diaria.....	93
Figura 2.33 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Majadas a escala diaria.....	94
Figura 2.34 CDC diarios para la estación Majadas en el periodo posterior a 2001	94
Figura 2.35 Comparación de las precipitaciones estimadas en la cuenca aferente a la estación Majadas	95
Figura 2.36 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación La Esperanza a escala diaria.....	96
Figura 2.37 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Palogordo a escala diaria.....	97
Figura 2.38 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Angosturas a escala mensual.....	98
Figura 2.39 CDC diarios para la estación Angosturas en el periodo previo a 2001	98
Figura 2.40 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Puente Sardinias a escala diaria..	99
Figura 2.41 CDC diarios para la estación Puente Sardinias en el periodo posterior a 2001	99
Figura 2.42 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas a las subcuencas drenantes a la estación Puente Sardinias	100
<i>Figura 2.43 Comparación de la precipitación estimada en la cuenca aferente a la estación Puente Sardinias.....</i>	<i>100</i>
Figura 2.44 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala mensual.	101
Figura 2.45 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala diaria	102
Figura 2.46 CDC diarios para la estación Café Madrid en el periodo posterior a 2001	102
Figura 2.47 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación San Rafael a escala diaria.....	103
Figura 2.48 Scatter plot de los caudales simulados y observados mensuales para la estación San Rafael posteriores al año 2001	103

Figura 2.49 Hidrógrafas en la estación 23147020.....	108
Figura 2.50 CDQ en la estación 23147020	108
Figura 2.51 Hidrógrafas en la estación 23147040.....	110
Figura 2.52 CDQ en la estación 23147040	110
Figura 2.53 Hidrógrafas en la estación 24067010.....	111
Figura 2.54 CDQ en la estación 24067010	112
Figura 2.55 Hidrógrafas en la estación 24057050.....	113
Figura 2.56 CDQ en la estación 24057050	114
Figura 2.57 Hidrógrafas en la estación 24067020.....	115
Figura 2.58 CDQ en la estación 24067020	116
Figura 2.59 Esquematización del enfoque del SUFI-2. Tomado de: Karim C. Abbaspour, (2015)	118
Figura 2.60 Detalle de las bandas de confianza del 95% para la estación San Rafael.....	119
Figura 2.61 95PPU para la estación PTE FERROCARRIL.....	122
Figura 2.62 Media móvil de 5 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija	124
Figura 2.63 Series de caudales para el periodo más húmedo y seco de 5 años.....	124
Figura 2.64 Media móvil de 10 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija	125
Figura 2.65 Media móvil de caudal simulado en ventanas de 5 años	126
Figura 2.66 Hidrógrafas escenarios húmedo y seco de 5 años.....	127
Figura 2.67 Media móvil de las series de caudal en ventana de 10 años	128
Figura 2.68 Hidrógrafas para escenarios de 10 años.....	129
Figura 3.1 Conceptos de demanda (Fuente: IDEAM, 2015).....	132
Figura 3.2. El riego (I_i) y las pérdidas $DP_i + RO_i$ en el balance de agua del suelo. Fuente: Elaboración propia con base en (FAO, 2006).	141

Figura 3.3. Distribución porcentual de la demanda anual del agua en las subzonas hidrográficas del área de interés e influencia para el año 2019.....	167
Figura 3.4.. Demanda hídrica para el sector agrícola por unidades de análisis.....	169
Figura 3.5. Demanda hídrica para el sector pecuario por unidades de análisis.....	170
Figura 3.6.. Demanda hídrica para el sector industrial por unidades de análisis	171
Figura 3.7.. Demanda hídrica para el sector energético por unidades de análisis.....	172
Figura 3.8.. Demanda hídrica para el sector minero por unidades de análisis	173
Figura 3.9. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos por unidades de análisis	174
Figura 3.10. Demanda hídrica para el sector doméstico por unidades de análisis	175
Figura 3.11. Demanda hídrica para el sector servicios por unidades de análisis	176
Figura 3.12. Demanda hídrica total sectorial por unidades de análisis	177
Figura 4.1. Esquema sintético del modelo conceptual para la evaluación de la calidad de agua en el VMM.....	184
Figura 4.2. Esquema metodológico para la evaluación de la calidad de agua en el VMM	189
Figura 4.3. Análisis integrado basado en enfoque análisis flujo de agua - materiales para la evaluación de la calidad de agua en el VMM.	207
Figura 4.4. Porcentaje de cargas vertidas por unidad de análisis.....	216
Figura 4.5. Cargas vertidas en las áreas de estudio	217
Figura 4.6. IACAL año normal en áreas de estudio (2021)	218
Figura 4.7. IACAL año seco en áreas de estudio (2021)	219
Figura 4.9. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Opón	224
Figura 4.10. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Opón durante la etapa de línea base en época normal.....	225
Figura 4.11. Resultados del ICA – 6 variables den corriente principal río Opón durante la etapa de seguimiento	227

Figura 4.12. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Sogamoso.....	228
Figura 4.13. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Sogamoso durante la etapa de línea base en época normal.....	229
Figura 4.14. Resultados del ICA – 6 variables en las zonas de influencia del río Sogamoso durante la etapa de seguimiento	231
Figura 4.15. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Lebrija.....	232
Figura 4.16. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Lebrija durante la etapa de línea base en época normal.....	233
Figura 4.17. ICA – 6 variables cuenca del río Lebrija durante la etapa de seguimiento.....	235
Figura 4.18. Resultados del ICA – 6 variables en tramo río Magdalena durante la etapa de seguimiento	237
Figura 5.1 Caudal anual multianual en los canales simulados para la SZH del río Lebrija.....	269
Figura 5.2 Variación intraanual de los caudales para el canal del río Lebrija que desemboca directamente al río Magdalena	270
Figura 5.3 Variabilidad de los caudales simulados clasificados por mes para la desembocadura del río de Oro en la SZH del río Lebrija	271
Figura 5.4 Escorrentía simulada en las subcuencas de la SZH del río Lebrija	272
Figura 5.5 Oferta hídrica superficial anual simulada en las unidades de nivel subsiguiente	272
Figura 5.6 Variación intraanual mensual multianual para la unidad del río de Oro en la SZH del río Lebrija	273
Figura 5.7 Variación espacial de la escorrentía mensual multianual en milímetros	274
Figura 5.8 Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de la Quebrada La Gómez en la SZH del río Lebrija	275
Figura 5.9 Caudal anual multianual en los cauces de la SZH del río Opón.....	276
Figura 5.10 Variabilidad interanual de los caudales del río Opón	278
Figura 5.11 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis	279

Figura 5.12 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca del río La Colorada	281
Figura 5.13 Caudales anuales multianuales en los cauces de la SZH del río SOGAMOSO	283
Figura 5.14 Variabilidad interanual de los caudales del río Sogamoso	285
Figura 5.15 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis río Sogamoso ..	286
Figura 5.16 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca 2405-07	288
Figura 5.17 CDC diaria de los caudales simulados en la desembocadura del río Cachirí en el río Lebrija	289
Figura 5.18 Índice de Regulación Hídrica en los canales simulados en la SZH del río Lebrija ..	290
Figura 5.19 Índice de aridez en las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija....	291
Figura 5.20 Curvas de duración de caudal en tramos de ríos Opón y Sogamoso	292
Figura 5.21 Comportamiento espacial del IRH en las SZHs de Interés.....	294
Figura 5.22 Índice de Aridez en las cuencas de nivel subsiguiente de las SZH de interés	295
Figura 5.23 Caudal ambiental por la metodología IDEAM-ENAs para año normal y año seco .	296
Figura 5.24 Demanda total en las unidades de análisis para el año de referencia (2019) (en millones de metros cúbicos / año).....	309
Figura 5.25 Oferta total en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).	309
Figura 5.26 Caudal ambiental en las unidades de análisis (en m ³ /s).g.....	310
Figura 5.27 Demanda de los ecosistemas (Qamb) en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).	310
Figura 5.28 Oferta disponible en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).	311
Figura 5.29 Índice de uso del agua (IUA) en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).....	311

Lista de tablas

Tabla 2.1 Estaciones de caudal con series disponibles en la subzona hidrográfica del río Lebrija	47
Tabla 2.2 Estaciones escogidas para ser asimiladas en la modelación hidrológica en la SZH del río Lebrija	48
Tabla 2.3 Estaciones hidrológicas en la zona de interés	49
Tabla 2.4 Tipo de ajuste realizado a los parámetros	66
Tabla 2.5 Análisis de sensibilidad local de parámetros para toda la SZH	67
Tabla 2.6 Valores del estadístico t-Student para la sensibilidad de parámetros.....	68
Tabla 2.7 Métricas de las simulaciones sin modificar parámetros en la SZH del río Lebrija.....	71
Tabla 2.8 Métricas de desempeño en las estaciones usadas para el ajuste de parámetros	74
Tabla 2.9 Configuración de las simulaciones automáticas con el algoritmo PSO en cada bloque de subcuencas.....	76
Tabla 2.10 Valores de los parámetros fijados para cada bloque de calibración en la SZH del río Lebrija	77
Tabla 2.11 Parámetros para la calibración de los modelos	80
Tabla 2.12 Métricas iniciales proceso de calibración.....	83
Tabla 2.13 Simulaciones planteadas para la calibración.....	84
Tabla 2.14 Valores de los parámetros ajustados	85
Tabla 2.15 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de calibración	88
Tabla 2.16 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de validación	88
Tabla 2.17 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de calibración	91

Tabla 2.18 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de validación	91
Tabla 2.19 Métricas periodo de calibración diarias	104
Tabla 2.20 Métricas calibración mensuales	105
Tabla 2.21 Métricas validación a escala diaria.....	105
Tabla 2.22 Métricas validación mensuales.....	106
Tabla 2.23 Métricas de incertidumbre de las simulaciones de caudal en la SZH del río Lebrija	120
Tabla 2.24 Resultados evaluación de la incertidumbre SUFI-2.....	121
Tabla 2.25 Estadísticos descriptivos escenarios de caudal	129
Tabla 3.1 Síntesis de las metodologías de cálculo del uso de agua en los sectores económicos .	134
Tabla 3.2 Eficiencias asignadas al tipo de riego de los sistemas de riego en Colombia.	142
Tabla 3.3 Fuentes de información disponible	144
Tabla 3.4. Módulos de uso de agua para la postcosecha de la palma y café.....	147
Tabla 3.5. Uso de agua en procesamiento de palma	148
Tabla 3.6. Cultivos permanentes presentes en el área de estudio.....	149
Tabla 3.7. Cultivos transitorios presentes en el área de estudio.....	150
Tabla 3.8. Uso de agua en agricultura por subzonas hidrográficas.....	150
Tabla 3.9. Uso de agua por cultivo permanente, transitorio y pastos	151
Tabla 3.10. Inventario ganadero en el área de estudio y participación en el inventario nacional por ganadería del año 2019.....	152
Tabla 3.11. Criterios de distribución del inventario y Factores de uso de agua para el sector pecuario	152
Tabla 3.12. Resumen de uso de agua en actividad pecuaria	155
Tabla 3.13. Uso de agua en sacrificio de ganado	156
Tabla 3.14. Uso de agua en Piscicultura	156

Tabla 3.15. Agua Turbinada en Sogamoso (hidroeléctrica) y Volumen útil diario en Topocoro (Embalse) 2019	157
Tabla 3.16. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas presentes en el área de estudio.....	158
Tabla 3.17. Uso de agua en Térmicas	158
Tabla 3.18. Otros embalses en el área de estudio.....	159
Tabla 3.19. Módulos de uso de agua para los minerales considerados en el estudio.....	160
Tabla 3.20. Uso de agua en la actividad minera.....	160
Tabla 3.21. Módulos de uso de agua para estimar la demanda por extracción de hidrocarburos	161
Tabla 3.22. Uso de agua por municipio para la explotación de hidrocarburos por parte de Ecopetrol	162
Tabla 3.23. Información de producción de hidrocarburos y uso de agua de acuerdo con ANH en pozos no operados por Ecopetrol	163
Tabla 3.24. Uso de agua total en el sector de hidrocarburos por municipio	163
Tabla 3.25. Uso de agua para el sector doméstica.....	164
Tabla 3.26. Uso de Agua Comercial y Servicios	165
Tabla 3.27.. Uso del agua a nivel de subzona hidrográfica.....	166
Tabla 3.28. Uso de agua en los sectores económicos presentes en el Valle Medio del Magdalena	167
Tabla 4.1. Variables y ponderaciones para la estimación del ICA de cinco, seis y siete variables	190
Tabla 4.2. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.....	191
Tabla 4.3. Categorización IACAL	192
Tabla 4.4. Factores de vertimiento para algunos sectores y actividades presentes en las áreas de estudio	198
Tabla 4.5. Criterios de calidad por usos del recurso para variables más representativas.....	199

Tabla 4.6. Umbrales para la evaluación de la calidad del agua.....	201
Tabla 4.7. Criterios adoptados para establecer valores de excedencia para umbrales para la evaluación de la calidad del agua	202
Tabla 4.8. Notas técnicas sobre la selección de umbrales para la evaluación de la calidad del agua	203
Tabla 4.9. Valores de percentiles asumidos para determinación de umbrales históricos para la evaluación de la calidad del agua	204
Tabla 4.10. Unidades de análisis (UA) para las subzonas hidrográficas Opón, Sogamoso y Lebrija	209
Tabla 4.11. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua río Opón	211
Tabla 4.12. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua zonas de influencia y cuenca río Sogamoso	211
Tabla 4.13. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua río Lebrija	212
Tabla 4.14. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua	212
Tabla 4.15. Usos del agua – demanda hídrica en las zonas de estudio	214
Tabla 4.16. Cargas puntuales vertidas por las tres (3) subzonas hidrográficas.....	216
Tabla 4.17. IACAL por SZH estudiada.....	220
Tabla 4.18. Síntesis de los resultados del ICA y variables complementaria monitoreadas	221
Tabla 4.19. Resultados del ICA en corriente principal del río Opón en época normal (línea base)	226
Tabla 4.20. Resultados del ICA en corriente principal del río Sogamoso en época normal (Línea Base).....	230

Tabla 4.21. Resultados del ICA en corriente principal del río Lebrija época normal Línea Base	234
Tabla 4.22. Red hídrica y puntos de monitoreo tramo del río Magdalena	235
Tabla 4.23. Resultados del ICA en tramo del río Magdalena (Línea Base).....	236
Tabla 4.24. Relación IACAL – ICA áreas de estudio	238
Tabla 4.25. Identificación puntos críticos para el monitoreo en el VMM	262
Tabla 5.1 Caudales anuales multianuales en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija.....	269
Tabla 5.2 Valores de oferta hídrica para las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija	273
Tabla 5.3 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Opón	277
Tabla 5.4 Oferta hídrica (escorrentía y Volumen) anual multianual en unidades espaciales de análisis.....	280
Tabla 5.5 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Sogamoso ...	283
Tabla 5.6 Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades de análisis Sogamoso.	286
Tabla 5.7 Índice de Regulación Hídrica en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija	290
Tabla 5.8 Clasificación IRH de los ENA	293
Tabla 5.9 IRH en cauces principales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón	293
Tabla 5.10 Valores del caudal ambiental en cada una de las unidades de análisis de nivel subsiguiente.....	297
Tabla 5.11. Interpretación del índice de uso del agua. ENA 2014.....	298
Tabla 5.12. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año medio.....	301
Tabla 5.13. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año seco.....	305

1. Introducción

La evaluación y conocimiento de los recursos hídricos tanto superficiales, como subterráneos, es un proceso continuo y sistemático, necesario para una adecuada gestión integral de los recursos hídricos y la toma de decisiones. Estas actividades se encuentran consagradas en la normatividad colombiana, asignando responsabilidades a nivel nacional, al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, mientras que, a nivel regional, le compete a las Autoridades Ambientales.

Esta evaluación debe regirse por métodos y técnicas estandarizados y adecuados, que permitan conocer en determinada región, la oferta, demanda y la calidad del agua. Buscando esa estandarización, nacen las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA), como un proceso de evaluación del agua en las regiones, a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. Se pretende que se constituya en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que la integran. Se busca que se genere información en forma sistemática y que facilite la articulación de los Sistemas de Información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales. En el año 2013, el IDEAM publicó el documento titulado “Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua-ERA”, donde se presentan los elementos conceptuales necesarios para abordar la estimación y análisis de la oferta, demanda, calidad y el riesgo del agua en la región, en coherencia con lo abordado en el del Estudio Nacional del Agua. A partir de estos conceptos y procedimientos, las Autoridades Ambientales deben continuamente realizar la Evaluación del Agua, teniendo en cuenta los factores naturales y antrópicos regionales en el área de su jurisdicción y soportados en un monitoreo adecuado.

Una de estas áreas corresponde a la llamada región del Valle Medio del Magdalena, donde confluyen la totalidad del departamento de Santander y parte de Antioquia, Bolívar y Boyacá. Es una región que alberga importantes recursos hídricos, tanto superficiales, como subterráneos, que se utilizan para abastecimiento humano, agricultura, ganadería, actividades industriales y de producción de hidrocarburos, por lo tanto, es pertinente la evaluación integral del recurso hídrico, para su adecuado manejo.

En este contexto de generación de conocimiento, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y ECOPETROL firmaron el acuerdo de cooperación AC No. 4 3034153 2020, con objeto de “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 Otrosí No. 1 del acuerdo de cooperación AC No. 4 contiene el documento técnico – Anexo 1 que define, entre otros, los productos a entregar y los contenidos de estos productos y se plantean cuatro objetivos específicos:

1. Monitoreo, pronóstico y generación de alertas hidrometeorológicas y de calidad de agua superficial en el Valle Medio del Magdalena – VMM.
2. Determinación del estado del recurso hídrico superficial en el Valle Medio del Magdalena – VMM.
3. Fortalecimiento de la capacidad técnica de la Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS en el monitoreo del recurso hídrico superficial.
4. Diseño e implementación del plan de divulgación y comunicaciones de monitoreo, pronóstico y alertas hidrometeorológicas y de calidad de agua superficial del VMM.

La Figura 1.1 muestra el esquema general del acuerdo AC 04 en la que se relacionan los cuatro objetivos con los ejes principales del acuerdo: monitoreo; modelación, estimación y análisis; fortalecimiento institucional; y divulgación y comunicaciones. Se observa que lo plasmado en este documento se basa en el monitoreo y la modelación, estimación y análisis.

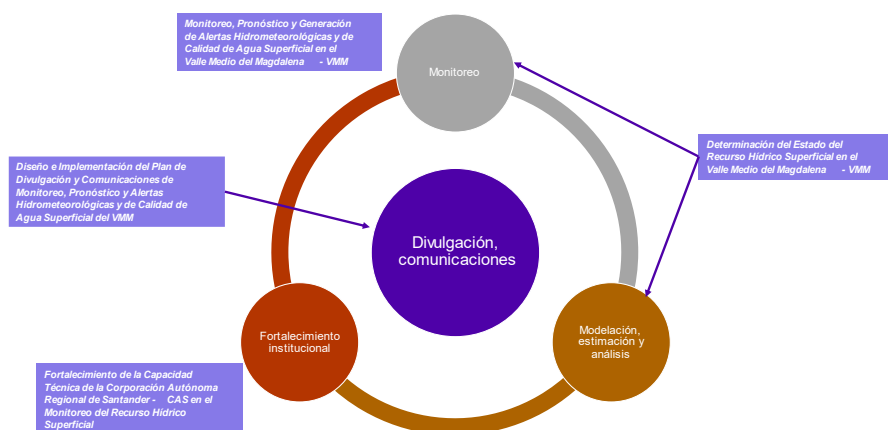


Figura 1.1. Esquema general del acuerdo AC 04 entre el IDEAM y ECOPETROL

Este documento se construye con el objeto de establecer el comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas del Valle Medio del Magdalena, el cual se enmarca entre los contenidos entregables pactados para el producto 4 del AC 04. Este documento presenta el resumen conceptual y metodológico, los resultados y análisis de los componentes temáticos que definen el estado del recurso hídrico: oferta, demanda y calidad. Está apoyado en otros documentos que presentan de forma detallada y extensa cada componente temático y los cuales se anexan.

El documento se estructura en seis capítulos, incluyendo la introducción y la bibliografía. El segundo capítulo trata de la oferta hídrica; el tercer capítulo presenta la estimación de la demanda hídrica sectorial; el cuarto capítulo trata sobre la calidad del agua; en el quinto capítulo se presentan los indicadores hídricos y de presión del recurso hídrico.

1.1 Marco conceptual. El ciclo hidrológico

La evaluación de la oferta, demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena está soportada en un marco general basado en los flujos y posibles conexiones de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico se define como la “sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación” (OMM, 2012) (Figura 1.2). Se constituye como un modelo básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos. Las principales variables naturales

de los procesos del ciclo hidrológico son: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. Las actividades humanas (localización de asentamientos humanos, industria, ganadería, agricultura, entre otros) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo y a través de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (UNESCO, 2006).

El análisis de los aspectos cuantitativos y cualitativos de los componentes del ciclo hidrológico en su expresión regional, como es el caso del Valle Medio del Magdalena, presupone un conocimiento e información de cada una de esas variables que participan en los flujos del ciclo hidrológico y de las actividades que pueden estar presionando el recurso hídrico (IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua-ERA, 2013) ((Figura 1.3).

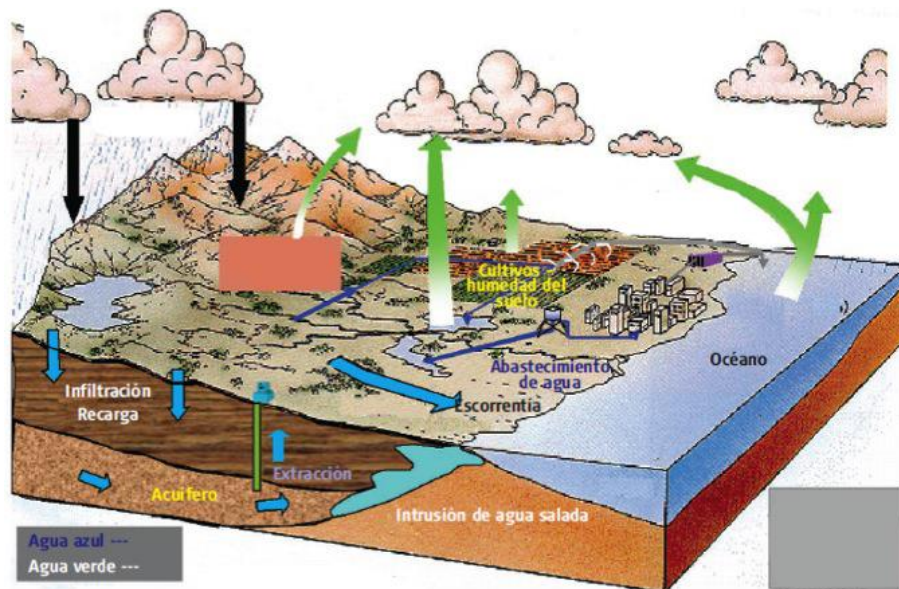


Figura 1.2. Esquema del ciclo hidrológico (UNESCO, 2006)

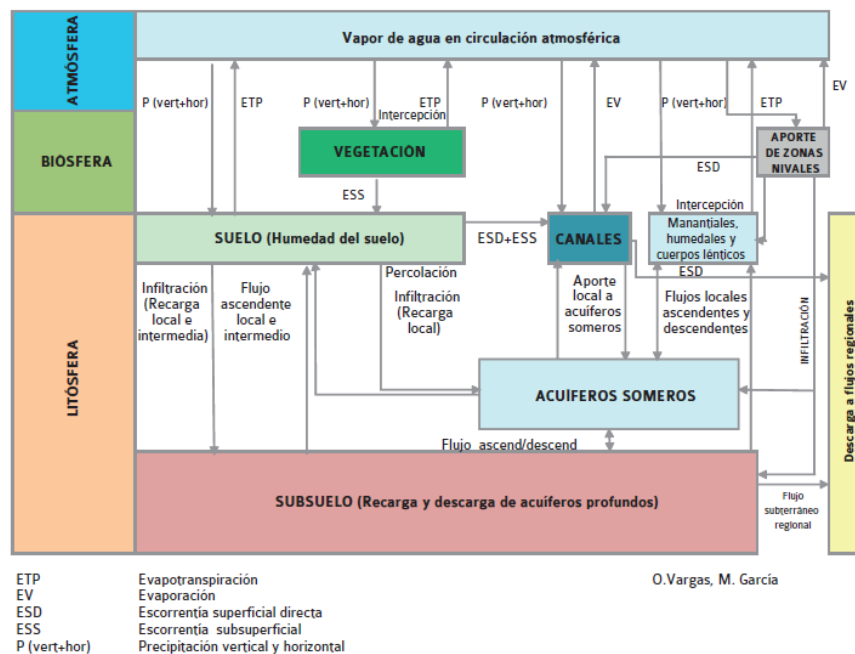


Figura 1.3. Procesos del ciclo hidrológico (García, SP)

1.2 Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua

El proceso metodológico para la evaluación de la oferta, demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena toma como referente los Estudios Nacionales del Agua 2010, 2018 y los lineamientos conceptuales y metodológicos de las Evaluaciones Regionales del Agua.

El Estudio Nacional del Agua, publicado por el IDEAM, se constituye en un instrumento técnico de consulta nacional, donde se consigna la información relacionada con la oferta, demanda, calidad del agua superficial, además aborda la temática de sedimentos y sintetiza el conocimiento e información que se tiene del agua subterránea en el país. La información es presentada a escala nacional, por medio de salidas gráficas y de un sistema de indicadores integrados relacionados con la oferta (índice de aridez, índice de retención y regulación hídrica, índice de sequía y precipitación, índice de rendimiento medio de sedimentos), calidad (índice de calidad del agua, índice de alteración potencial de la calidad del agua), uso del agua (índice de uso del agua superficial, índice de presión hídrica al ecosistema, índice de agua no retornada a la cuenca).

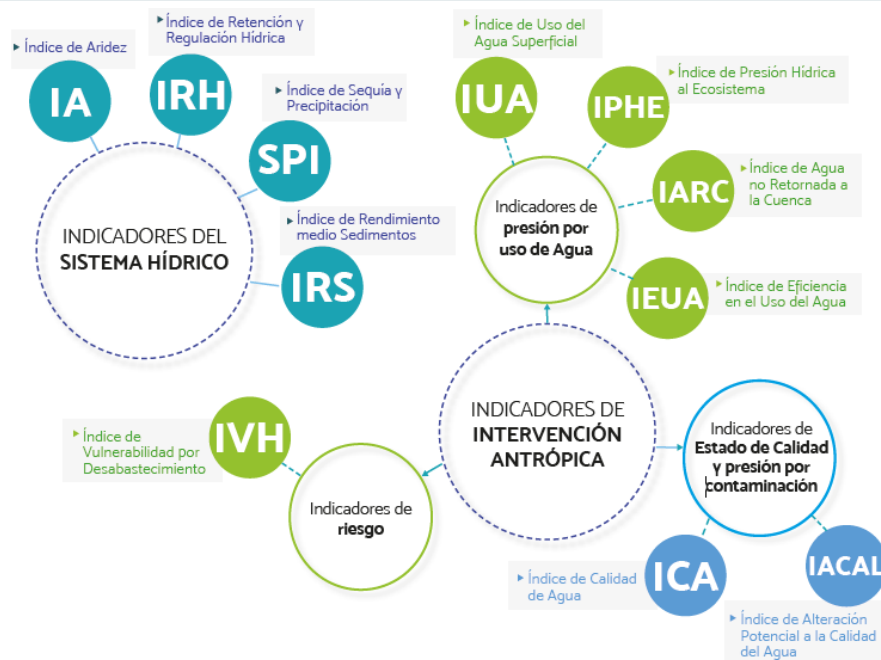


Figura 1.4. Sistema de indicadores hídricos para el ENA 2018 (IDEAM, 2019).

La Evaluación Regional del Agua (ERA) es un proceso de evaluación del agua en las regiones, a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. Se pretende que se constituya en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que la integran. Se busca que se genere información en forma sistemática y que facilite la articulación de los Sistemas de Información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales (IDEAM, 2013). Es un procedimiento técnico de evaluación y conocimiento que debe ser fortalecido en el Valle Medio del Magdalena, con el fin de contar con información técnica.

La ERA retoma los indicadores presentados en el estudio nacional del agua y presenta un marco metodológico para su estimación y para la estimación de la oferta, demanda, calidad del agua superficial y subterránea en la región, el cual se referenciará en los capítulos de evaluación de la demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena.

Con respecto al acuerdo AC 04, en los capítulos relativos a los componentes temáticos (oferta, demanda y calidad) se resumen los aspectos metodológicos y en los documentos de cada componente se detalla en profundidad las metodologías desarrolladas.

1.3 Marco institucional y normativo.

1.3.1. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) busca consolidar acciones y estrategias que garanticen el uso y sostenibilidad del recurso hídrico en el país. Para esto se basa en el concepto de gestión integral del recurso hídrico (GIRH), definido por la Global Water Partnership – GWP como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2000).

Bajo este nuevo paradigma, se elaboró un diagnóstico del estado y la gestión del recurso hídrico en Colombia, el cual, sirvió de base para la formulación de los objetivos, principios, estrategias, líneas de acción generales y metas nacionales que se presentan en el documento de la PNGIRH y su Plan Hídrico Nacional (MAVDT, 2010).

La Política Nacional para la GIRH tiene un horizonte de 12 años (hasta el 2022), tiene como objetivo general garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente. Los objetivos específicos están orientados a mejorar el conocimiento y gestión de la oferta, demanda, calidad y riesgo del agua, así como a fortalecer la capacidad de las instituciones y consolidar la gobernabilidad para la gestión integral del recurso hídrico (MAVDT, 2010).

1.3.2. Instrumentos nacionales y regionales para la evaluación del agua.

Los instrumentos consultados para recopilar información para la evaluación regional de la oferta, demanda y calidad del agua pueden ser técnicos, de planificación, de administración (comando y control), económicos, metodológicos o procedimentales.

1.3.2.1. Instrumentos técnicos

Los instrumentos técnicos permiten materializar la conceptualización técnica de la evaluación regional del agua y su implementación a través de programas, guías metodológicas, protocolos, herramientas de captura de información, normas técnicas, documentos de apoyo, entre otros

(IDEAM, 2013). Para efectos de la evaluación de la demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena se destacan los siguientes:

- *Programa nacional de monitoreo del recurso hídrico:* el Programa Nacional de Monitoreo adelantado por el IDEAM, busca la integralidad y complementariedad en el monitoreo de las principales variables de seguimiento del estado en cantidad y calidad del agua. El Programa tiene como referente básico los avances del IDEAM en materia de operación de la red básica y los protocolos para el seguimiento y monitoreo del agua. A partir de este programa, se recopilará la información para la evaluación de la calidad del agua.
- *Registro de usuarios del recurso hídrico:* un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, estandarizando la información básica requerida para el otorgamiento de los mismos en las autoridades ambientales. Este instrumento aplica para la recopilación de información, tanto para la evaluación de la demanda, como de la calidad del agua.
- *Normas técnicas:* Las normas técnicas para la GIRH soportan la regulación, el control ambiental y la administración del agua. Básicamente el marco de aplicación responde a la reglamentación nacional sobre la destinación del recurso y al soporte técnico que respalda el índice de calidad del agua (ICA) y el índice de alteración de la calidad del agua (IACAL). Cabe resaltar, que lo normado en el Decreto 1076/15 sobre uso y aprovechamiento del agua y en la Resolución 631/15 sobre límites permisibles, se constituirá en el fundamento de los análisis pertinentes.

1.3.2.2. Instrumentos de planificación

Los principales instrumentos que resaltan a escala regional, corresponden a los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), reglamentación de vertimientos y el establecimiento de objetivos de calidad, que incluyen, información de base y evaluaciones realizadas en su momento en relación con las estimaciones de presión y del estado de la calidad del agua; también dichos aspectos se ven reflejados, en un instrumento particular aplicado a los usuarios municipales como es el plan de saneamiento y manejo de vertimientos municipales-PSMV.

1.3.2.3. Instrumentos económicos

El instrumento económico para la evaluación de la calidad del agua a nivel regional y que apunta a apoyar la regulación del uso y condiciones de calidad del agua es la tasa retributiva, consignada en la Ley 99 de 1993, artículo 42, definiéndola como aquella que deben pagar los usuarios por el

efecto nocivo causado sobre los recursos naturales, cuando son usados para la disposición de residuos, determinando que los parámetros básicos para el cobro serían la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

1.4 Área de estudio.

El área de estudio corresponde a una porción del Valle Medio del río Magdalena (VMM) delimitado por subzonas hidrográficas que configuran un área de interés y unas áreas de influencia que difieren según los componentes temáticos analizados. El área de interés corresponde a las subzonas hidrográficas del río Opón, río Lebrija medio-bajo y otros directos al Magdalena y río Sogamoso. El área de influencia comprende las subzonas hidrográficas de los ríos Carare, Fonce, Suárez y Chicamocha, teniendo en cuenta el aporte oferta y calidad que éstas pueden tener sobre las subzonas hidrográficas del área de interés, como resultado de procesos naturales y antrópicos (Figura 1.5). La zona comprende 44.441 km², abarcando 218 municipios en los departamentos de César, Santander, Boyacá, Norte de Santander, Bolívar, Antioquia, Casanare y Arauca, Cundinamarca.

Para la evaluación de la demanda hídrica, se consideran las subzonas hidrográficas de Directos al Magdalena (Brazo Morales) y río Cimitarra y otros directos al Magdalena como área de influencia. A continuación, se describe brevemente las subzonas hidrográficas correspondientes al área de interés.

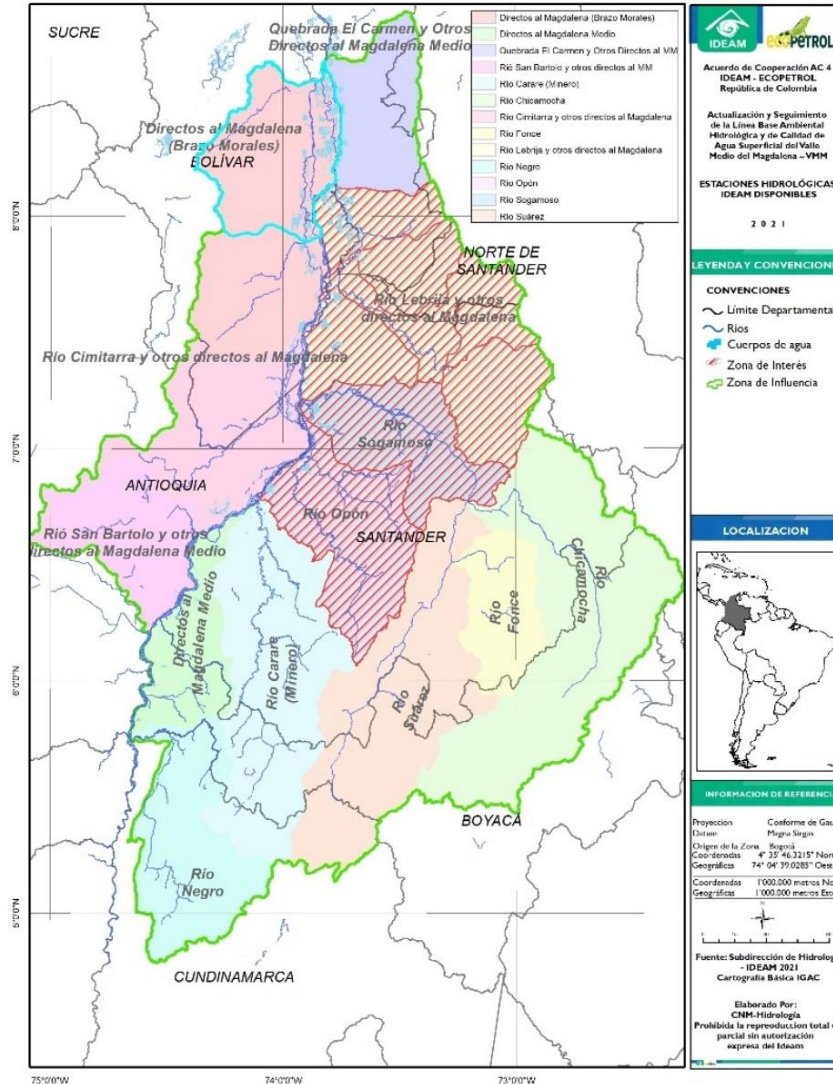


Figura 1.5 Localización del área de interés y área de influencia en los componentes de oferta, demanda y calidad.

1.4.1. Subzona hidrográfica del río Opón

La SZH del río Opón en el Valle Medio del Magdalena se localiza en el centro – occidente del departamento de Santander limita al norte con la SZH del río Sogamoso, al oriente con la SZH del río Suarez, al sur con la SZH del río Carare y al occidente con el río Magdalena. Esta SZH se extiende a lo largo de 19 municipios del departamento de Santander (parcialmente) con una extensión total de aproximadamente 4,318.46 km² equivalente al 14% del área total del departamento, la localización de la SZH se presenta en la Figura 1.6. Dentro de sus principales corrientes se encuentran los ríos: Quitará, Verde, Blanco, Cascajales, La Colorada, Oponcito; todos ellos afluentes al río Opón.

Dentro del área de la SZH se encuentran contenidas las cabeceras de los municipios de Barrancabermeja, El Carmen y Santa Helena del Opón. Adicionalmente, en la parte baja de la cuenca se localizan la ciénaga de Chucurí y la ciénaga del Opón, entre otras.

La SZH del río Opón cuenta con dos grandes fuentes hídricas superficiales: el río Opón y el río La Colorada. En la zona baja, cerca de la zona de confluencia con el río Magdalena, estas fuentes hídricas se unen en presencia de un complejo de ciénagas para finalmente desembocar al río Magdalena.

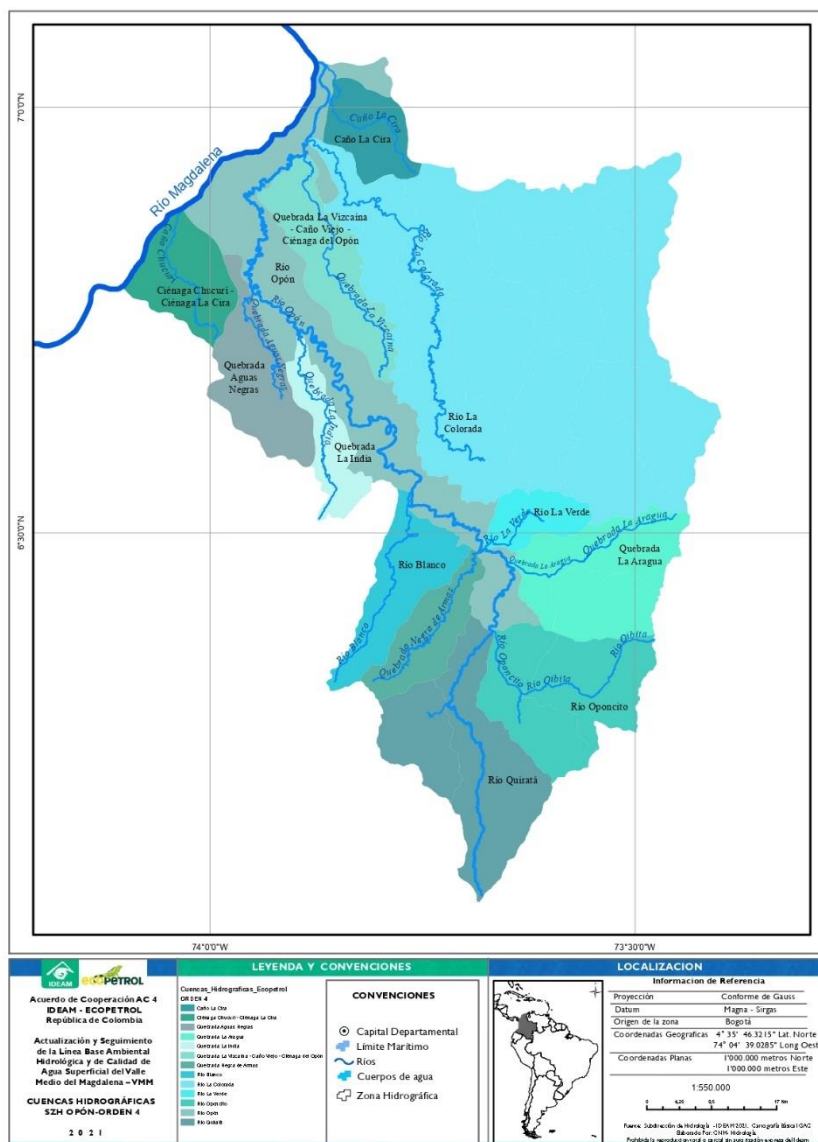


Figura 1.6 Localización Subzona Hidrográfica del río Opón

1.4.2. Subzona hidrográfica del río Sogamoso

La SZH del río Sogamoso hace parte de la Zona Hidrográfica del río Sogamoso y corresponde a la parte baja de esta, iniciando desde la confluencia de los ríos Suarez y Chicamocha, hasta la descarga del río Sogamoso en el río Magdalena. Esta subzona hidrográfica se localiza noroccidente del departamento de Santander, limitando al sur con la SZH del río Opón, al norte con la SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena, al occidente limita con el río Magdalena y por el occidente recibe las aguas de las SZH de los ríos Chicamocha y Suarez.

La SZH del río Sogamoso se extiende a lo largo de 13 municipios, todos ellos del departamento de Santander, con un área de drenaje total de aproximadamente 3,408.44 km² la cual equivale al 11.2% del área total del departamento. Dentro del área de esta SZH se encuentran contenidas las cabeceras municipales de los municipios de Zapatoca, San Vicente de Chucurí, Betulia y una fracción de la cabecera municipal de Barrancabermeja (ver Figura 1.7). Adicionalmente, al interior de la SZH se localizan las ciénagas de San Silvestre, El Llanito, Zarzal, entre otras.

Algunas de las principales afluencias del río Sogamoso corresponden a: aguas arriba los ríos Suarez y Chicamocha, el río Chucurí, la quebrada La Putana, el río Sucio y el caño San Silvestre. Cabe resaltar que entre los años 2010 y 2014 se construyó sobre el río Sogamoso, en la parte media de la SZH, el embalse de Topocoro para la generación de energía eléctrica por parte de la empresa ISAGEN SA. Esto hace que desde el punto de vista hidrológico se realice un análisis natural de las condiciones de la cuenca (antes de la construcción de la presa) hasta el año 2009 y posterior al año 2015 un periodo de caudales controlado por la operación del embalse.

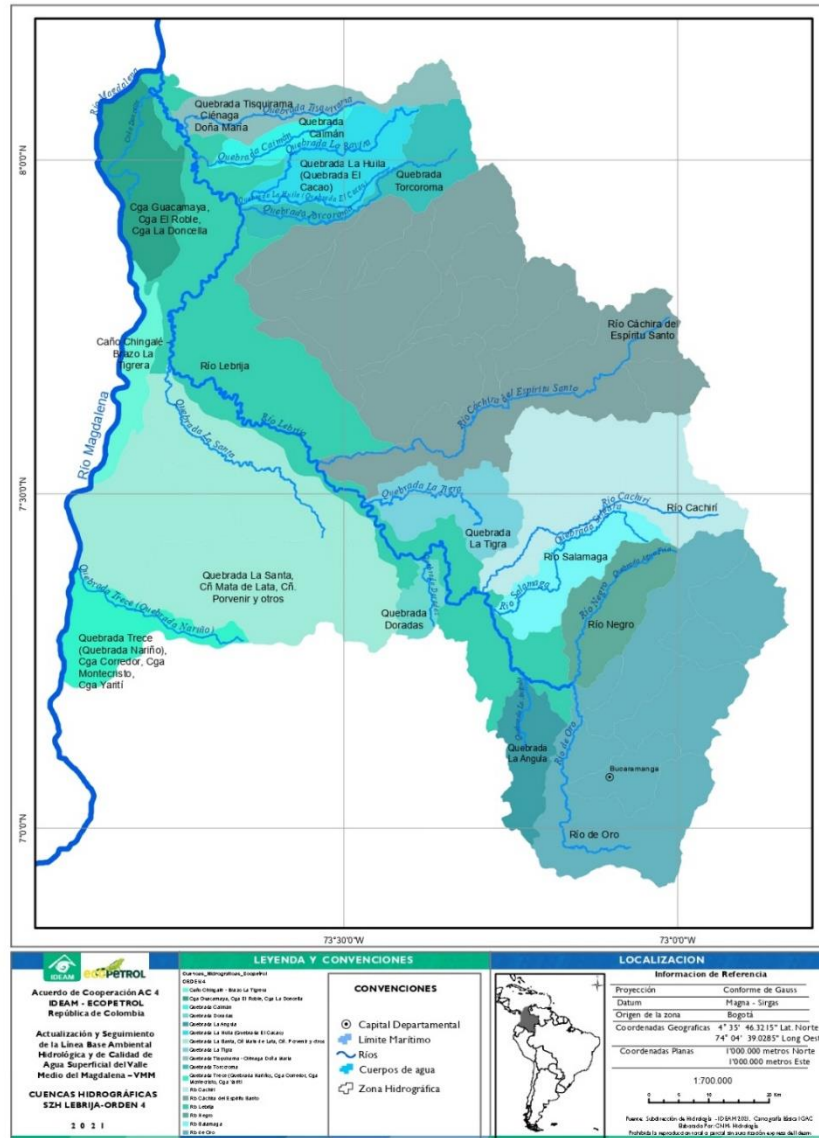


Figura 1.8 Localización y subdivisión de la SZH del río Lebrija

1.5 Unidades de análisis, escalas y resoluciones.

Cada componente analizado utiliza diferentes escalas, resoluciones y unidades de análisis, las cuales se explican en los documentos detallados. Estas escalas y unidades de análisis dependen de la información disponible y de los análisis efectuados, ya sea en ejercicios de modelación como en ejercicios de estimación de variables.

Las unidades espaciales de análisis y presentación de resultados corresponden a un nivel de agregación subsiguiente a las subzonas hidrográficas. Se usan para la generación de indicadores de sistemas hídricos y de presión por el uso de agua definidos en el ENA 2018 (ver la Figura 1.4). En

general, se trata de cuencas hidrográficas conectadas topológicamente por una red de drenaje y en algunos casos se definen según criterios de gestión del recurso hídrico. Para el estudio se usaron unidades espaciales de análisis construidas según los siguientes criterios:

- **Criterios de gestión del recurso hídrico.** En cuencas que cuentan con Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y que contaban con una delimitación de unidades de análisis, se usan estas unidades. Esta delimitación sigue lo establecido en el decreto 1640 de 2012 y en la guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS, haciendo uso de las curvas de nivel contenidas en la base cartográfica (1:25,000), el DEM utilizado para el desarrollo del POMCA e imágenes satelitales disponibles. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta los intereses y competencias de las Corporaciones Autónomas Regionales, se opta por utilizar la delimitación de nivel subsiguiente elaborada por la CAS para los POMCAS mencionados, de modo que los productos aquí generados se ajusten espacialmente con los productos generados por la CAS.
- **Criterios fisiográficos e hidrológicos.** En cuencas que no tienen POMCAS, se usaron unidades de análisis definidas por el IDEAM considerando criterios fisiográficos y conexiones hidrológicas en redes de drenaje. Para la delimitación de las cuencas de nivel subsiguiente a SZH se tuvo en cuenta características como las redes de drenaje de la cartografía IGAC a escala 1:25,000 y 1:100,000; y modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) con resolución de 30 metros; la revisión de imágenes satelitales para verificación del trazado actual de las corrientes; entre otras fuentes de información.

La Figura 1.9 muestra las cuencas con cubrimiento de POMCAS (en verde) y en las que se usaron las unidades de análisis definidas en los POMCA.

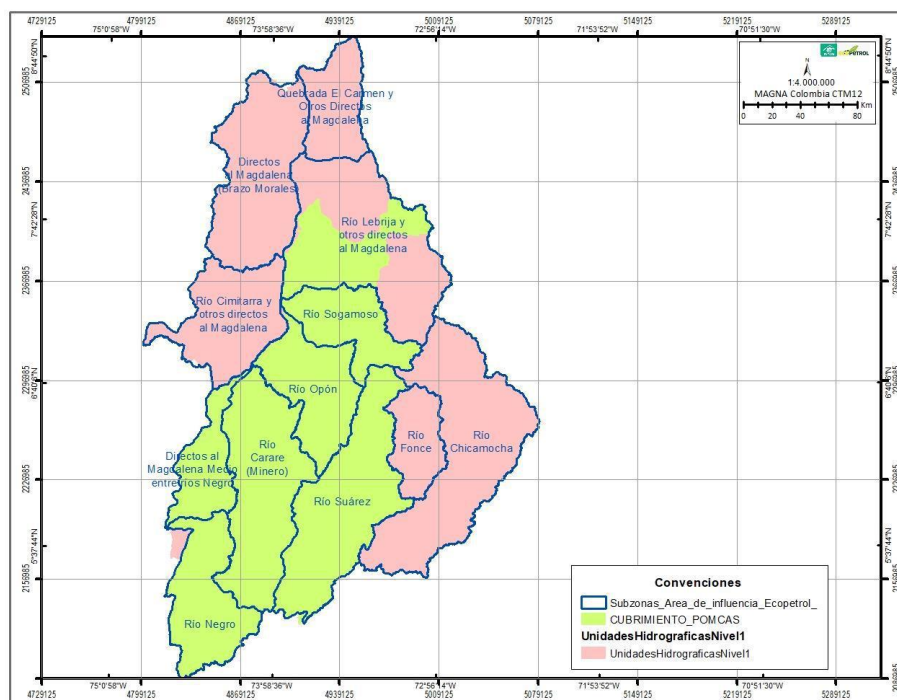


Figura 1.9. Cubrimiento de cuencas con POMCA y cuencas sin POMCA.

Las escalas y resoluciones espaciales presentan diferencias según el componente temático y la información disponible, las cuales se reseñan en los documentos detallados. La modelación hidrológica tendiente a la estimación de indicadores hídricos se efectúa a escala diaria, aunque en algunos análisis estadísticos se agregan valores a escala mensual y en la presentación de resultados y análisis se agregan resultados a escala anual en promedios multianuales. La estimación de la demanda hídrica sectorial se efectúa a escala anual, teniendo como referencia el año 2019, a excepción de la demanda agrícola, la cual se estima y analiza de forma mensual con promedios mensuales multianuales de variables climáticas para de esta forma considerar la variabilidad mensual de la demanda agrícola.

El proyecto usa el sistema de coordenadas CTM-12 (Resolución 529 del año 2020 expedida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC).

2. Evaluación de la oferta hídrica

En este capítulo se presenta un resumen de los aspectos conceptuales y metodológicos tendientes a la estimación de la oferta hídrica superficial y presenta los resultados obtenidos y los análisis efectuados. Lo consignado en este capítulo está basado en los siguientes documentos, que detallan en extenso los conceptos y métodos utilizados:

- Metodología para la modelación de oferta hídrica de la subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena.
- Documento con los resultados de la modelación hidrológica de oferta hídrica superficial para la subzona del río Lebrija.
- Metodología para la modelación de la oferta hídrica de las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso.
- Resultados de la modelación hidrológica de la oferta hídrica superficial total para las SZHs de los ríos Opón y Sogamoso.
- Informe final sobre la refinación de los modelos hidrológicos para oferta hídrica en el Valle Medio del Magdalena

2.1. Aspectos conceptuales

La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) se define cómo el volumen de agua por cantidad de tiempo que escurre por la superficie en un espacio definido. Es el agua que integra los sistemas de drenaje superficial, representado en el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora, y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lénticos (IDEAM, 2013). Para determinar la OHTS se definen unidades de análisis, que en el caso del acuerdo AC 04 corresponden a un nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas (ver numeral 1.5) y una resolución temporal anual. La OHTS está determinada por el ciclo hidrológico en cada unidad de análisis, por lo tanto, es el ciclo hidrológico y su distribución espacio – temporal la que define los aspectos conceptuales de la OHTS.

El ciclo hidrológico se entiende como la continua circulación del agua en sus diferentes estados (sólido, líquido y gaseoso) a través de la hidrósfera. Considera nueve procesos físicos de interés, que permiten la aproximación al entendimiento del ciclo, estos son: evapotranspiración,

condensación, precipitación, interceptación, infiltración, percolación, escurrimiento superficial y los almacenamientos (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1982).

En la Figura 2.1 se ilustran los procesos del ciclo hidrológico y sus interacciones en el medio natural. Debe resaltarse que el movimiento del agua durante las diferentes fases del ciclo es desordenado e impredecible tanto espacial como temporalmente.

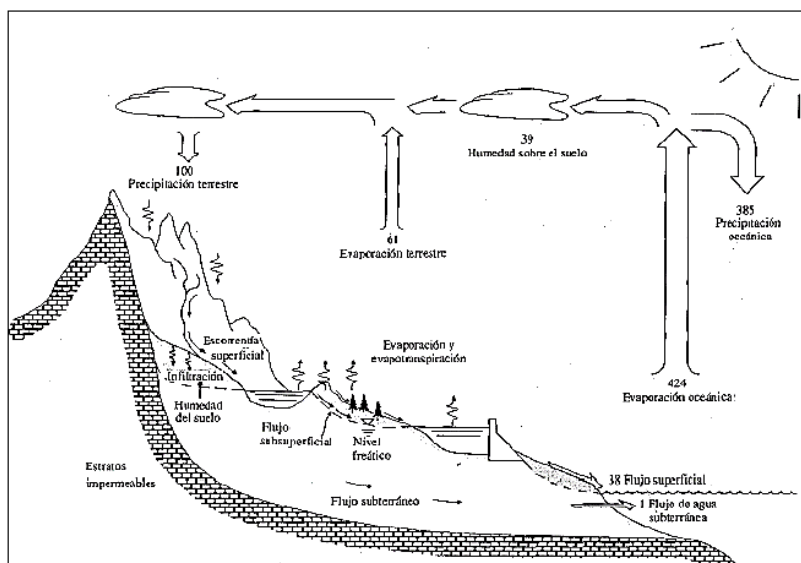


Figura 2.1 Esquema procesos en ciclo hidrológico. Fuente:Chow (1965)

Existen otros elementos de carácter no físico que pueden llegar a tener influencia sobre el ciclo hidrológico como lo son la influencia antrópica, sustancias químicas en la atmosfera, cambios en la biota, entre otros. Las extracciones del recurso hídrico realizadas por el hombre para actividades como la irrigación, generación de energía y el mismo consumo humano, alteran significativamente el ciclo hidrológico con incidencia final sobre el régimen de caudales en una determinada región. Por consiguiente, se hace necesaria la inclusión de estos elementos en las conceptualizaciones previas a la construcción de modelos. Sin embargo, debido a la falta de información específica sobre vertimientos y extracciones en la mayoría de las corrientes, se torna compleja su implementación. (Di Baldassarre, Brandimarte, & Beven, 2016). En la Figura 2.2 se representan estas interacciones en lo que se consideraría una conceptualización del sistema socio-eco-hidrológico.

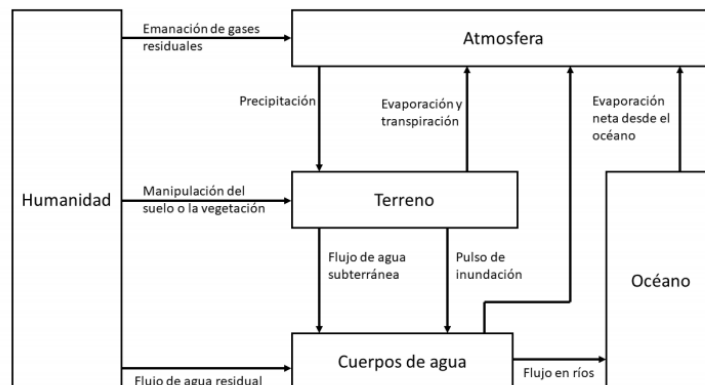


Figura 2.2 Conceptualización sistema socio-eco-hidrológico. Fuente: adaptado de Falkenmark & Rockström (2004).

2.2. Aspectos metodológicos

Para determinar la OHTS se requiere entonces de aplicar un *modelo* que permita representar el ciclo hidrológico o el sistema socio-eco-hidrológico. Para simular la distribución espacio – temporal del ciclo hidrológico se recurre a la modelación hidrológica, la cual consiste en una serie de pasos estrechamente asociados al método científico. El modelo hidrológico es la hipótesis de trabajo que luego de un proceso de calibración y validación según datos e información (observación), se valida o se rechaza. En este contexto, la cuenca hidrográfica es entendida como un sistema. La cuenca presenta entradas (precipitación) y salidas (caudal) y en su interior se presentan almacenamientos y transformaciones con diferentes escalas espaciales y temporales (Figura 2.3). Si el modelo simula de forma adecuada las salidas (caudales observados), se acepta el modelo como válido y se usa para la estimación o simulación.

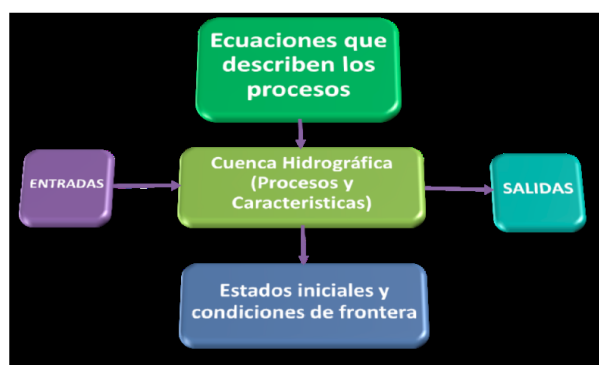


Figura 2.3 Esquema de un modelo hidrológico. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)

La Figura 2.4 muestra las etapas metodológicas que se han seguido. A continuación, se resumen cada uno de los pasos, recalcando que la metodología detallada se encuentra en los documentos anexos.



Figura 2.4 Etapas de la modelación hidrológica. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)

Se debe aclarar que se realizaron dos ejercicios de modelación durante el segundo semestre de 2021 y el primer semestre de 2022. Con base en los primeros modelos, *se refinaron* las entradas de los mismo durante el año 2022 para mejorar el desempeño alcanzado hasta ese momento. **La refinación** consistió principalmente en el cambio del producto de precipitación (explicado más adelante), y en la recalibración de los modelos; otros detalles se dan en Duque Gardeazábal (2022).

2.2.1. Definición de objetivos de modelación

En el caso del acuerdo AC 04, el objetivo de la modelación hidrológica es estimar la oferta hídrica total superficial (escorrentía / volumen) y caudales (m^3/s) a resolución temporal mensual y diaria

en puntos no instrumentados, para unidades espaciales de nivel subsiguiente a subzona hidrográfica en la zona de interés de Ecopetrol en el Valle Medio del Magdalena.

2.2.2. Revisión de datos e información disponible

La revisión de datos e información disponible comprendió dos grupos de variables:

- Variables de entrada y salida del modelo. Se trata de series temporales históricas de variables hidroclimáticas tomadas en estaciones de la red básica del IDEAM o de técnicas de teledetección y re-análisis. Entre ellas se encuentran el caudal, la precipitación, y aquellas variables que influyen sobre la evapotranspiración (temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento). Las series de tiempo de temperatura y precipitación fueron distribuidas espacialmente de tal forma que el modelo se alimentó de mapas distribuidos a escala diaria.
- Información fisiográfica: Se trata de mapas que sirven para la estimación de propiedades físicas de la cuenca las cuales constituyen los parámetros del modelo. En esta información se tiene la topografía, las coberturas de la tierra, los suelos y la geología.

2.2.2.1. Variables hidroclimáticas

Se consideran las variables climáticas con posibilidad de usarse en modelación hidrológica. De tal forma se compilaron y analizaron las variables: caudales, precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación o brillo solar y velocidad del viento.

Una vez revisada las series de tiempo disponibles en estaciones de la red básica del IDEAM, y considerando el análisis de calidad de datos, se decide no considerar series temporales de variables climáticas requeridas para el cálculo de la evapotranspiración (ET) tales como velocidad del viento, radiación o brillo solar y humedad relativa. La alternativa adoptada para la estimación de la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración fue usar la formulación de Penman-Monteith y recurrir a datos de reanálisis meteorológicos específicamente al CFSR de la NOAA (Saha, y otros, 2010)(lo anterior se decidió con base en experimentos realizados con otras formulaciones para la ET). Una descripción más detallada de que es un reanálisis se puede encontrar en Baatz y otros (2021). Las series de tiempo de precipitación y temperatura, tomadas en estaciones de la red básica del IDEAM, se deben espacializar en celdas regulares de tal forma que las entradas al modelo consideren la variabilidad espacial.

La localización exacta de los centros celdas puede verse en Figura 2.5. La malla tiene una resolución de 1 km por 1 km (19266 celdas), que garantiza una discretización suficiente para que pueda ser intersectada de manera acorde con subcuencas o con los procesos hidrológicos que ocurren en el terreno; además, esta resolución garantiza que la estimación climatológica no tenga grandes variaciones al interior de cada celda.

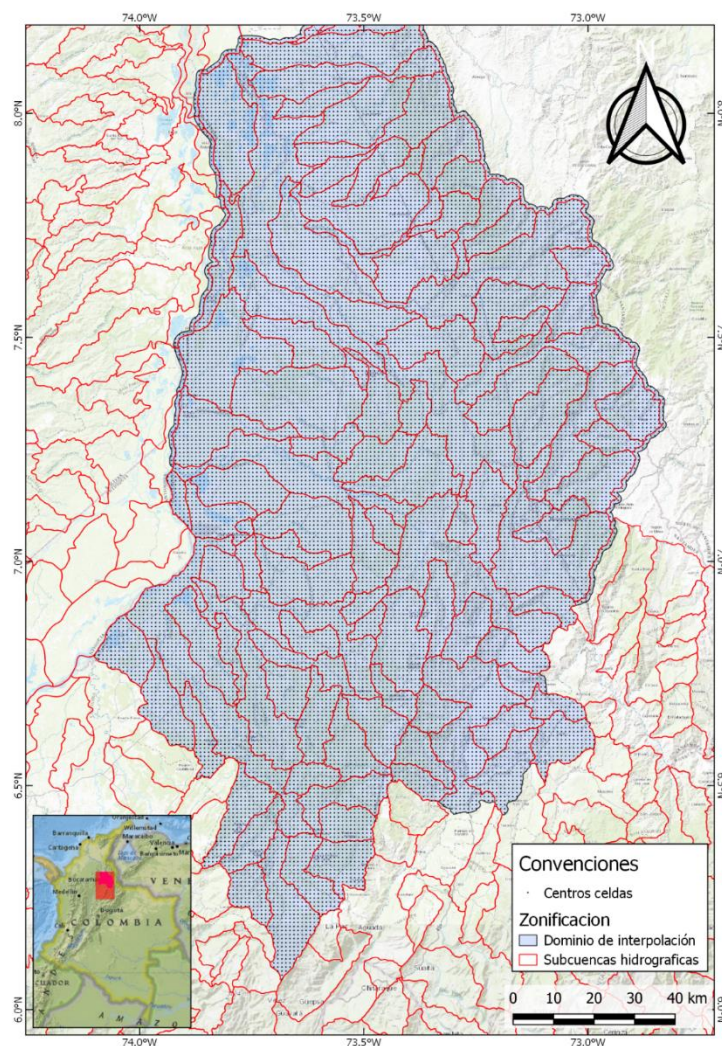


Figura 2.5 Celdas y dominio de interpolación

La distribución espacial de la precipitación se estimó inicialmente con el método IDW pero después en la refinación se cambió al método de mezcla de datos satelitales y estaciones en tierra RFMEP (Baez-Villanueva, y otros, 2020); se usaron los datos de CHIRPS y las estaciones pluviométricas disponibles (García Echeverri, 2021) (Duque Gardeazábal, 2022). La temperatura se distribuye

espacialmente a partir de una regresión de esta en función de la altura con el uso de IDW para la interpolación de los residuales y estimando el error por el método de validación cruzada.

2.2.2.2. Información fisiográfica

Las características del terreno influyen sobre la posibilidad de que la precipitación termine infiltrándose o generando escorrentía superficial. Para definir esas características se detalla en esta sección las fuentes de información fisiográfica que están disponibles para la zona de estudio y que se consideraran para incluirlas en la modelación. Con esto se identifican los fenómenos hidrológicos predominantes y se plantea el modelo conceptual específico de la región.

Topografía

La topografía puede ser eficientemente representada a través de los modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés); por esto, se constituyen en un insumo elemental para la realización de estudios hidrológicos pues a través de estos es posible realizar la caracterización fisiográfica de las cuencas e identificar posibles factores que influyen en la generación de la escorrentía. Para las SZH de interés se cuenta con cubrimiento de los siguientes DEM:

- DEM NASA SRTM con resolución de 30 metros.
- DEM HydroSHEDS con resolución de 90 metros corregido para su uso en hidrología.
- DEM ALOS PALSAR con resolución de 12.5 metros.
- DEM ASTER GDEM V3 con resolución de 30 metros

La versión 3 del ASTER GDEM agregó “stereo-pairs” adicionales mejorando la cobertura y reduciendo la aparición de “artifacts”. El algoritmo de producción refinado proporciona una resolución espacial mejorada con mayor precisión horizontal y vertical. Con base en lo anterior se consideró trabajar con este DEM como insumo para delimitación hidrográfica y derivar las variables topográficas dependientes del DEM (por ejemplo, la pendiente) para la modelación hidrológica requerida. En la Figura 2.6 se presenta el DEM de 30 metros en conjunto con la hidrografía de la zona de interés.

Además de los modelos de elevación digital, en la zona de interés se cuenta con cubrimiento total de la cartografía 1:100,000 del IGAC y cubrimiento parcial de la cartografía 1:25,000 también del IGAC. Este insumo es importante puesto que la información hidrográfica que contiene permite la

estudios de suelos departamentales que en muchos casos tienen mediciones de las propiedades físico-químicas de cada capa de los perfiles de suelos. Existen estudios de suelos más detallados, pero solo para lugares específicos del país. La información que se encuentra en los estudios de suelos a veces corresponde exactamente a la requerida por la conceptualización matemática de los modelos hidrológicos; no obstante, a veces se requieren hacer reclasificación de la información contenida en los estudios de suelos para encontrar los datos requeridos para la modelación. Existen metodologías acordes para realizar estos procedimientos (Saxton & Rawls, 2006), y en consecuencia no es una limitante para el desarrollo de los ejercicios de modelación.

2.2.3. Definición de las escalas características

Se conoce como escala característica de un proceso a la duración y extensión determinada con la que los procesos físicos en hidrología ocurren en el medio natural. Adicional a la escala característica de los procesos existen la escala en la que los procesos son medidos u observados (por el hombre) y la escala a la que estos procesos son simulados matemáticamente por un modelador (Bloschl & Sivapalan, 2006).

Los procesos hidrológicos suceden en un vasto rango de escalas temporales y espaciales pues estos pueden ocurrir desde minutos hasta años y en escalas desde locales hasta regionales. La Figura 2.8 basada en mediciones y consideraciones heurísticas, muestra la relación entre la escala espacial y temporal de la mayoría de los procesos hidrológicos. Allí se puede evidenciar como procesos superficiales como la escorrentía por exceso de saturación o por baja infiltración ocurren en menos de un día, mientras que los procesos subsuperficiales que ocurren en las capas de suelo pueden tomar de meses a años.

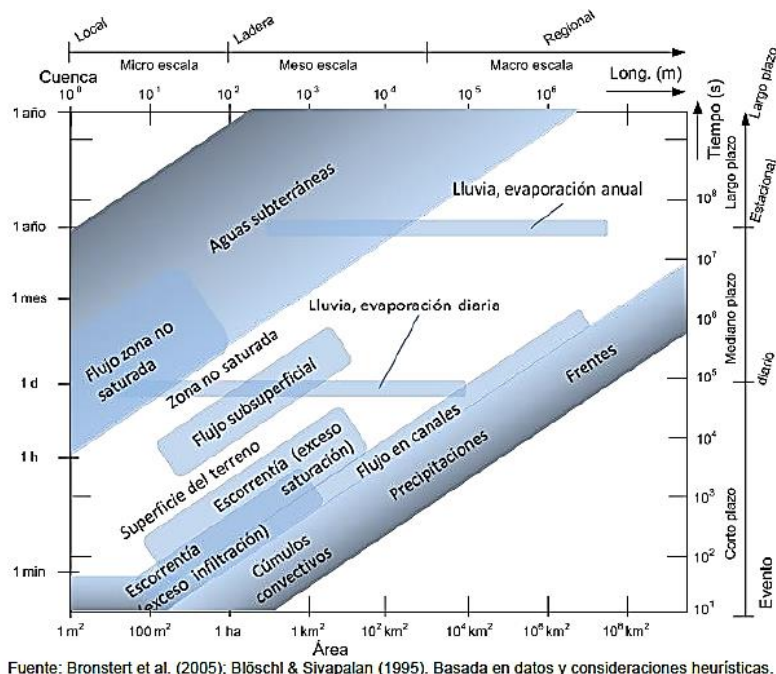


Figura 2.8 Escalas características de los procesos hidrológicos. Fuente: Tomado de Rojas, J (2011).

Varias son las condiciones que determinan los mecanismos por los que se genera la escorrentía superficial, las más determinantes son la fisiografía (pendiente del terreno), la cobertura y las características climáticas de la región. En el trópico, existen condiciones climáticas como el doble paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Poveda et al., 2006) y el ENSO que hacen que se presenten gran cantidad de lluvias, lo que genera que en periodos específicos del año los suelos se encuentren saturados o cerca a la saturación facilitando la ocurrencia de los procesos de escorrentía superficial por saturación y la escorrentía subsuperficial producto del drenaje del agua almacenada en el suelo. Estos dos procesos como se aprecia en la Figura 2.8 ocurren en la escala temporal diaria o subdiaria. Por lo que con aplicativos de modelación a escala diaria se puede tener en cuenta estos fenómenos y una representación acertada de los mismos.

Particularmente para la modelación hidrológica en la zona de estudio, en los cuales es necesario simular los procesos de escorrentía superficial por saturación y la escorrentía subsuperficial y considerando los objetivos de la modelación (estimación de la oferta) se hace necesario considerar una escala temporal diaria.

2.2.4. Análisis de calidad de los datos e información

Además de efectuar un análisis de calidad de los datos e información, se efectuaron algunos procesos tendientes a la espacialización de variables climáticas y fisiográficas los cuales se detallan

en los documentos anexos de estimación de oferta. A continuación, se reseñan las estaciones disponibles y utilizadas en la modelación de las variables precipitación y caudal, siendo las variables más importantes para la modelación.

En la Tabla 2.1 se listan las estaciones con datos disponibles de caudal en la subzona hidrográfica del río Lebrija.

Tabla 2.1 Estaciones de caudal con series disponibles en la subzona hidrográfica del río Lebrija

Código	Nombre	Corriente	% Faltantes [1980-2019]	Cantidad Datos (años)	Pruebas	
					t	F
23187040	Chocoa la [23187040]	Quebrada Stos Gutierrez	60.8	19.3	0.45	0.00
23187060	Vijagual [23187060]	Magdalena	100.0	3.8	0.08	0.56
23187110	Coquera la [23187110]	Magdalena	96.0	3.9	0.03	0.42
23187140	Establo el [23187140]	Canal Principal	61.0	16.9	0.06	0.00
23187240	Tamarindo [23187240]	Canal D1	71.1	11.6	0.37	0.91
23187250	Porvenir [23187250]	Canal D1	65.9	13.6	0.78	0.27
23187280	Sitio nuevo [23187280]	Magdalena	15.5	34.7	0.32	0.34
23187290	Retirada la [23187290]	Canal Principal	62.6	14.9	0.00	0.01
23187300	Topacio el [23187300]	Canal Principal	62.9	14.8	0.87	0.02
23197030	Urbina la [23197030]	Lebrija	100.0	5.4	0.20	0.01
23197090	San Alberto [23197090]	Magdalena	100.0	0.9	0.54	0.21
23197100	Carrizal puente tona [23197100]	Quebrada Tona	95.4	7.5	0.03	0.00
23197130	Puente sardinas - aut [23197130]	Santa Cruz	8.6	47.5	0.00	0.00
23197270	Puente panega [23197270]	Vetas	33.2	35.4	0.68	0.01
23197280	Pradera [23197280]	Quebrada Guaduas	88.1	4.8	0.71	0.45
23197290	Cafe madrid [23197290]	Lebrija	24.6	41.1	0.00	0.00
23197320	Espino el [23197320]	Surata	100.0	8.5	0.09	0.02
23197360	Veinte de julio [23197360]	Cachira	78.0	14.1	0.00	0.35
23197370	San Rafael [23197370]	Lebrija	9.1	47.1	0.64	0.22
23197400	Angosturas [23197400]	Lebrija	63.9	21.2	0.02	0.00
23197410	Hoyo el [23197410]	San Alberto	18.1	36.9	0.02	0.33
23197460	Esperanza la [23197460]	Frio	42.1	24.8	0.69	0.42
23197680	Colombia [23197680]	Surata	84.5	6.2	0.98	0.88
23197690	Palogordo - aut [23197690]	De Oro	66.4	13.5	0.01	0.00
23197700	Majadas - aut [23197700]	Surata	57.2	17.1	0.23	0.06

23207040	San Pablo Rio Magdalena - Aut [23207040]	Magdalena	68.2	14.9	0.79	0.04
----------	--	-----------	------	------	------	------

En la SZH del río Lebrija se descartaron 11 estaciones por no pasar las pruebas de homogeneidad o por no contar con suficiente cantidad de datos en el periodo 1980-2019. Las estaciones consolidadas para su uso en la SZH del río Lebrija se listan en la Tabla 2.2 y su ubicación puede verse en la Figura 2.9.

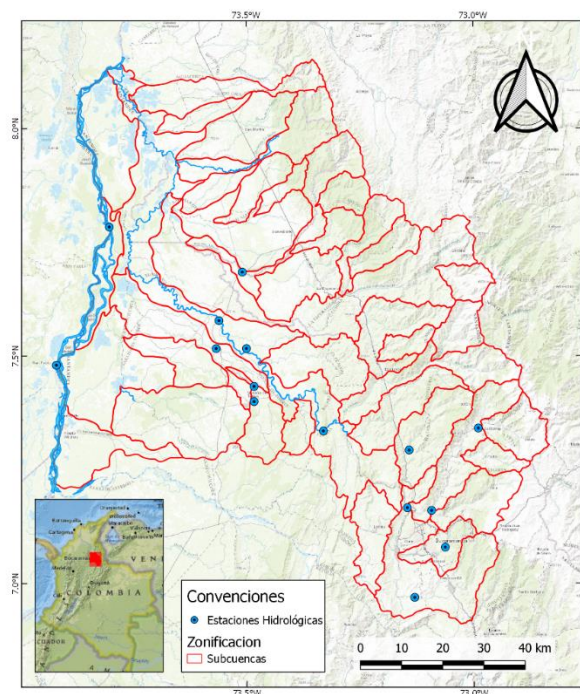


Figura 2.9 Posición de las estaciones de caudal en la SZH del río Lebrija

Tabla 2.2 Estaciones escogidas para ser asimiladas en la modelación hidrológica en la SZH del río Lebrija

Código	Nombre	Corriente	Área de drenaje [km ²]	% Faltantes [1980-2019]	Cantidad Datos (años)
23187040	CHOCOA LA	Quebrada Stos Gutierrez	100.7	60.8	19.3
23187140	ESTABLO EL	Canal Principal	135.2	61	16.9
23187240	TAMARINDO	Canal D1	48.5	71.1	11.6
23187280	SITIO NUEVO	Magdalena	118650.8	15.5	34.7
23187300	TOPACIO EL	Canal Principal	-	62.9	14.8
23197130	PUENTE SARDINAS - AUT	Santa Cruz	124.8	8.6	47.5
23197270	PUENTE PANEGA	Vetas	159.6	33.2	35.4
23197290	CAFE MADRID	Lebrija	1267.5	24.6	41.1
23197370	SAN RAFAEL	Lebrija	3483.5	9.1	47.1

23197400	ANGOSTURAS	Lebrija	2891.3	63.9	21.2
23197410	HOYO EL	San Alberto	654.8	18.1	36.9
23197460	ESPERANZA LA	Frio	40.5	42.1	24.8
23197690	PALOGORDO – AUT	De Oro	224.5	66.4	13.5
23197700	MAJADAS - AUT	Surata	473.8	57.2	17.1
23207040	SAN PABLO RIO MAGDALENA - AUT	Magdalena	118043.7	68.2	14.9

La totalidad de las estaciones hidrológicas con registros de caudal en las subzonas del río Chicamocha, Fonce, Opón; Sogamoso y Suarez, útiles para la caracterización hidrológica de los cuerpos de agua se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Estaciones hidrológicas en la zona de interés

SZH	Código	Nombre	Estado	Categoría	Tecnología	Corriente
Río Chicamocha	24037360	El Jordán	Activa	Limnimétrica	Convencional	Chicamocha
Río Fonce	24027010	San Gil	Activa	Limnimétrica	Convencional	Fonce
Río Opón	23147040	Ayacucho - Aut	Activa	Limnimétrica	Automática con Telemetría	La Colorada
	23147020	Puente Ferrocarril	Activa	Limnigráfica	Convencional	Opón
Río Sogamoso	24067020	Puente Sogamoso - Aut	Activa	Limnimétrica	Automática con Telemetría	Sogamoso
	24067010	Tablazo El	Suspendida	Limnigráfica	Convencional	Sogamoso
	24057050	Puente Comuna	Suspendida			Chucurí
Río Suarez	24017640	La Ceiba - Aut	Activa	Limnigráfica	Automática con Telemetría	Suarez

En la Figura 2.10 se presenta la localización de las estaciones hidrológicas seleccionadas para la caracterización y modelación hidrológica en las subzonas del río Chicamocha, Fonce, Opón; Sogamoso y Suarez.

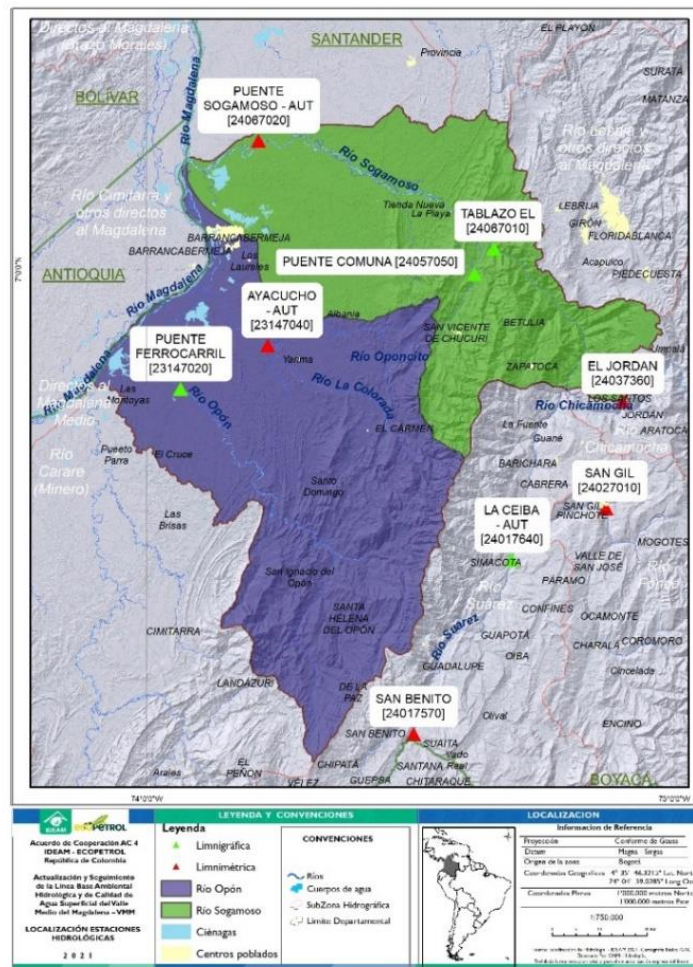


Figura 2.10 Localización de estaciones hidrométricas de interés

En la Figura 2.10 se puede apreciar la baja densidad de estaciones en las SZH de los ríos Sogamoso y Opón, las estaciones suspendidas sobre el río Sogamoso se usaron para caracterizar el régimen natural de caudales previa a la construcción del embalse de la hidroeléctrica del río Sogamoso en el año 2014. Cabe resaltar que las estaciones hidrológicas de los ríos Fonce, Suarez y Chicamocha se contemplaron, pues son útiles para la determinación de los flujos de entrada a la SZH del río Sogamoso en la cual se proyecta estimar la oferta hídrica superficial.

En cuanto a las series de precipitación, la subdirección de meteorología del IDEAM consolidó la base datos “DHIME ASEGURADA” (Téllez Guío, 2020), la cual consiste en series de tiempo de precipitación de múltiples estaciones con cobertura nacional. Estas series de precipitación fueron sometidas a un análisis de calidad el cual consistió en tres etapas: Análisis de datos anómalos usando pruebas de rango fijo, pruebas de rango variable, pruebas de consistencia entre variables y

pruebas de continuidad temporal; la segunda etapa consistió en la homogenización de las series mediante el uso del paquete CLIMATOL; En la tercera etapa las series fueron complementadas para los periodos homogéneos aplicando la metodología del inverso de la distancia ponderado (IDW).

En la revisión de las series de precipitación contenidas en la base de datos (BD) se identificó que en las etapas dos y tres de la metodología usada para la construcción de la BD, se generaron múltiples datos por día en una misma estación, esto según los periodos homogéneos en las series o por cambios en la tecnología de los sensores de medición. Esta condición no es deseable desde el punto de vista de modelación hidrológica. Por ende, se decidió utilizar las series de datos resultado de la primera etapa del análisis de calidad de la información, estos datos corresponden a los validados como correctos posterior al análisis de datos anómalos.

Bajo las condiciones anteriormente descritas, para la totalidad de la zona de interés (SZH río Sogamoso, río Opón y río Lebrija) se contó con 127 estaciones. Se resalta que el periodo elegido para el análisis de las variables hidroclimatológicas fue el comprendido entre 1980 y 2019, puesto que los registros posteriores al año 1980 son los que presentan menor cantidad de datos faltantes a resolución temporal diaria. La localización de las estaciones es presentada en la Figura 2.11. Se recuerda que estas series de estaciones pluviométricas se combinaron con los datos satelitales de CHIRPS (Funk y otros, 2015) usando el algoritmo RFMEP (Baez-Villanueva, 2020) para crear un mejor producto de precipitación a usar en los *modelos refinados*.

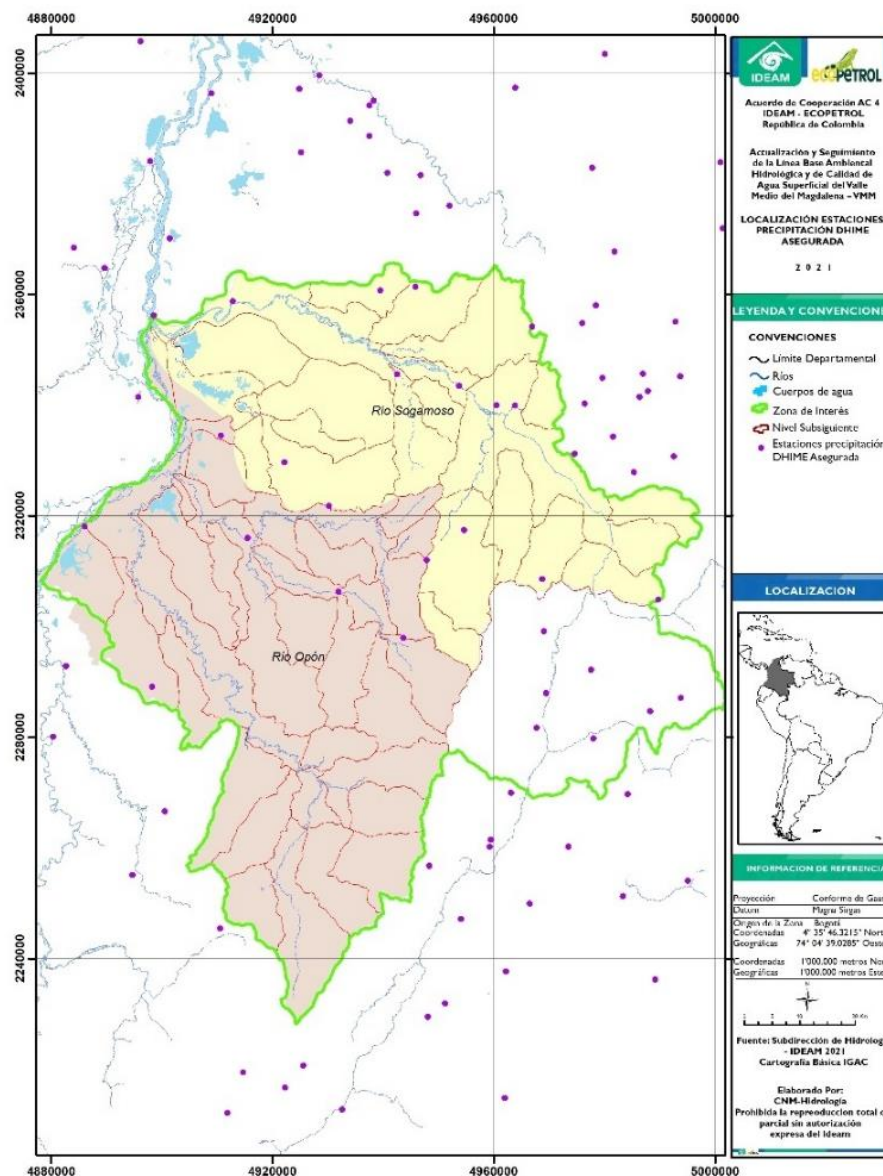


Figura 2.11 Localización de estaciones precipitación BD DHIME asegurada

2.2.5. Construcción del modelo conceptual

A partir del objetivo de la modelación, los datos y la información disponible para cada una de las SZH en estudio se construyó las conceptualizaciones de los modelos de estimación de la oferta hídrica en las SZH de los ríos Lebrija, Opón y Sogamoso. A continuación, se detalla los criterios generales y específicos a contemplar en la etapa de la selección del modelo para cumplir con el objetivo de la modelación.

Debido a que se espera estimar la oferta hídrica diaria el modelo a seleccionar debe contemplar a lo menos los siguientes procesos físicos:



1. Flujo superficial por baja infiltración
2. Flujo superficial por saturación
3. Flujo subsuperficial de tormenta
4. Flujo en canales (transito)
5. Precipitación
6. Evapotranspiración
7. Flujo no saturado.

Por otra parte, con base en el análisis de las coberturas de la tierra y las unidades agrologicas de suelos, el modelo a seleccionar debe ser de carácter semidistribuido o distribuido, esto debido a que se observó una significativa heterogeneidad y discontinuidad de estas características, lo que es determinante en el modelamiento de procesos hidrológicos. Adicionalmente, se requería obtener resultados en distintos puntos al interior de las SZH, lo que implica contemplar la variación espacial de los fenómenos en la estructura del modelo.

La posibilidad de regionalizar y agrupar comportamientos hidrológicos también fue importante en la escogencia del aplicativo, puesto que la conformación de unidades de respuesta hidrológica ayuda a que los requerimientos y gastos computacionales se disminuyan significativamente, esto sin perder los patrones espaciales de las variables analizadas.

Finalmente, la zona de estudio se encuentra en el trópico lo que impone unas condiciones climatológicas diferentes a las de otras regiones del planeta, por lo que es necesario que el aplicativo haya sido implementado de manera satisfactoria en regiones con condiciones similares a las de la zona de interés.

2.2.5.1 Criterios específicos SZH río Opón

Como condiciones iniciales en la SZH del río Opón se considera las 13 cuencas de nivel subsiguiente establecidas y los puntos de fuga asociados a cada una de ellas para la extracción de información de esorrentía y caudal.

Existen dos estaciones hidrométricas al interior de la SZH en las cuales se calibra el modelo, por lo que el aplicativo seleccionada debe permitir la calibración con caudales simultánea o escalonadamente en más de una estación. Los puntos para la calibración son:

1. Sobre el río Opón la estación limnigráfica Puente Ferrocarril con código 23147020 con periodo de registro diario 1980 – 2020.

2. Sobre el río La Colorada la estación limnimétrica Ayacucho – Aut con código 23147040 con registros de caudal para el periodo 1992 – 2020.

Al no coincidir los periodos de registro en las estaciones de calibración el aplicativo a seleccionar debe permitir la asignación independiente de los periodos de calibración y validación para cada cuenca.

Por otra parte, es probable que existan cuencas de nivel subsiguiente que no sea posible calibrar con las estaciones existentes, por lo que es recomendable que el modelo permita la asignación de parámetros a subzonas no instrumentadas con base en los resultados de las subzonas que si pueden ser calibradas. En la Figura 2.12 se presenta la topología construida para la SZH del río Opón.

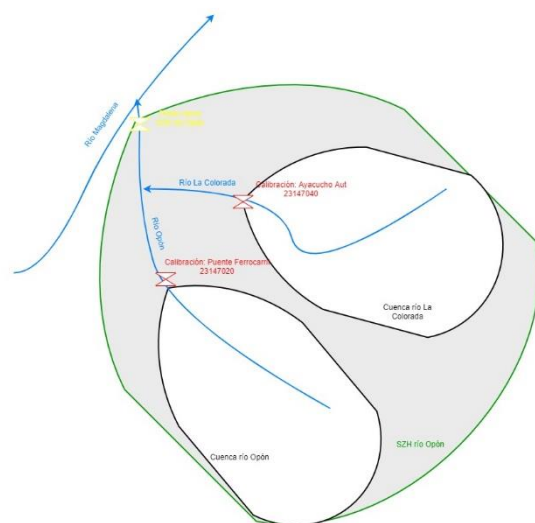


Figura 2.12 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Opón

El punto de cierre de la modelación se establece aguas abajo de la confluencia de los ríos La Colorada y el río Opón y aguas arriba de la desembocadura en el río Magdalena de modo que sea posible cuantificar la oferta hídrica superficial en la totalidad de la SZH.

En la Figura 2.12 se presenta la síntesis de los elementos a contemplar para el modelamiento de la oferta hídrica superficial en la SZH del río Opón. La zona sombreada corresponde a las cuencas de nivel subsiguiente que no es posible calibrar.

2.2.5.2. Criterios específicos SZH río Sogamoso

La SZH del río Sogamoso presenta unas particularidades que deben ser contempladas para la correcta estimación de la oferta hídrica superficial. La primera de ellas es que es una SZH establecida aguas abajo de la confluencia de los ríos Suarez y Chicamocha, por lo que las afluencias de estos ríos deben ser considerados como condiciones de entrada a la SZH en estudio. En lo que respecta al río Chicamocha, existe una estación hidrométrica muy cerca de la entrada de la SZH, lo que facilita su utilización para establecer la primera condición de entrada al modelo.

En el caso del río Suarez, la estación más cercana a la entrada de la SZH del río Sogamoso se encuentra a unos 50 kilómetros, por lo que se hace necesaria la delimitación de la cuenca comprendida entre la estación y la entrada a la SZH en estudio. Esta particularidad hace que también se deba contemplar las afluencias del río Fonce tributario del río Suarez, por lo que el aplicativo de modelación a seleccionar debe permitir la inclusión de múltiples condiciones de entrada.

Las condiciones de entrada aguas arriba de la SZH del Río Sogamoso corresponden a las series de caudales registradas en las siguientes estaciones:

1. Sobre el río Chicamocha la estación limnimétrica EL JORDAN con código 24037360 y registro para el periodo 1980 – 2020.
2. Sobre el río Suarez la estación LA CEIBA – AUT con código 24017640, con registro para el periodo 1980 – 2020.
3. Sobre el río Fonce, la estación SAN GIL con código 24027010 y registro para el periodo 1980 – 2020.

Otra particularidad de la SZH del río Sogamoso es la construcción del embalse de la hidroeléctrica del río Sogamoso para el año 2014, por lo que posterior a este año en la parte baja de la cuenca se tiene un régimen de flujo alterado por la operación del embalse. Con base en lo anteriormente descrito se propone como periodo para la calibración del modelo el comprendido entre 1980 y 2014. Posterior a el año 2014 se plantea complementar la serie “naturalizada de caudales” hasta el año 2020, bajo el supuesto de la invarianza de los parámetros estimados en el periodo de calibración. Las estaciones hidrométricas disponibles para la calibración de las cuencas de nivel subsiguiente son:

1. La estación limnimétrica PUENTE SOGAMOSO con código 24067020 localizada en la parte baja de la SZH con un periodo de registro comprendido entre los años 1992 y 2020.

2. La estación limnigráfica EL TABLAZO con código 24067010 que estuvo localizada en la zona inundada por el embalse de la hidroeléctrica, con registros en el periodo 1980 - 2010.
3. La estación limnigráfica PUENTE COMUNA con código 24057050 localizada sobre el río Chucurí la cual también fue inundada por el embalse, con registros en el periodo 1980 - 2010.

Con base en la variación de los periodos de registro de caudales es deseable que el aplicativo seleccionado permita la inclusión de los diferentes periodos.

En la Figura 2.13 se presenta el diagrama topológico de la SZH del río Sogamoso que incluye los aspectos desarrollados en el presente capítulo.

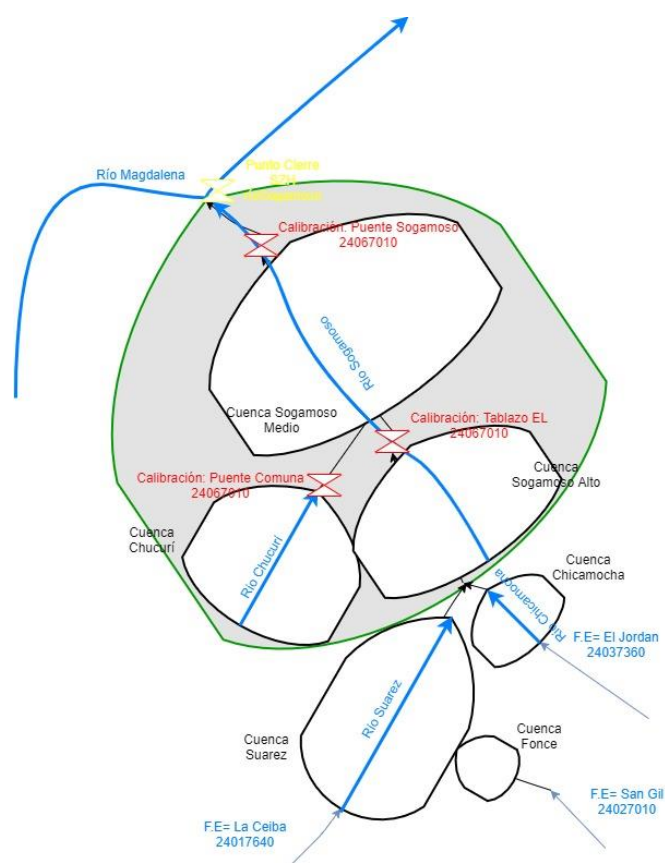


Figura 2.13 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Sogamoso

2.2.5.3 Modelo específico para la SZH del río Lebrija

Se resalta para la SZH del río Lebrija que se debe considerar dos principales diferencias en el comportamiento hidrológico, a parte de las conexiones topológicas de direcciones de flujo. La

- Río Negro [231902], en la parte alta
- Río Salamaga [231905] completo
- La quebrada Santos [23190902]
- La quebrada Doradas [231907]
- Río Cachirí [231906] completo, incluyendo el río Romerito [23190602], la quebrada La Negra [2319060302] y el río Playón [23190603]
- La quebrada La Tigra [231908], en la parte alta
- La zona media y alta del río Río Cáchira del Espíritu Santo [231910] incluyendo el río Carcasí [2319100302], la quebrada La Carrera [23191002] y la parte alta del río San Pablo [23191003]
- La parte alta del río San Alberto [23191004], incluyendo la quebrada Playoncito [2319100402]
- La parte alta de la quebrada Torcoroma [231911]

Por otra parte, las subcuencas que tiene alta presencia de zonas inundables, que se encuentran al noroccidente y occidente principalmente, son:

- Caño Peruetano y la ciénaga de Paredes [23190903]
- Brazo La Tigera (del río Magdalena) [231916]
- La parte baja de la quebrada La Santa [231909]
- La parte norte del Río Lebrija [231903]
- La Ciénaga Guacamaya, el Roble y La Doncella [231917]
- La parte baja de la quebrada La Tisquirima [231914]

La modelación tiene como puntos de cierre todo afluente que desemboque en el río Magdalena y que se encuentre al interior de la SZH del río Lebrija.

2.2.6. Selección del modelo a emplear

Se propone la implementación de dos modelos hidrológicos con distintos alcances e hipótesis. Se propone un modelo hidrológico distribuido conocido como SWAT (Soil & Water Assessment Tool) desarrollado por la Universidad de Texas (TAMU) en los Estados Unidos (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011) y el modelo hidrológico conceptual agregado GR4J desarrollado en cuencas de Francia, (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003).

Para la implementación de los modelos hidrológicos SWAT y GR4J se aplican las fases metodológicas mostradas en la Figura 2.15. En la primera fase se realiza el alistamiento de la información requerida (climatología, cobertura, tipos de suelo, red de drenaje, etc.). En una segunda fase se desarrolla la implementación de la herramienta SWAT (en la interfaz con ArcGIS) y el código desarrollado para GR4J. En la tercera fase se incluyen procesos de calibración y validación de resultados de acuerdo con el comportamiento conjunto de métricas de desempeño. Se agregó una cuarta fase de refinación que comprende casi el desarrollo de las tres fases anteriores con otros insumos de precipitación y recalibración de parámetros.

Finalmente existe una etapa de modelación y postproceso que requiere el análisis de validación y sensibilidad paramétrica. Esta fase final puede conllevar la reformulación de las condiciones iniciales planteadas para cada modelo, así como la redefinición de rangos operativos de cada parámetro y procesos de recalibración (incluidos en la fase cuatro por ejemplo). A continuación, se describen de manera resumida los modelos hidrológicos a implementar. Solo se reportan los resultados de los ejercicios con la herramienta SWAT debido a que alcanzó mejores desempeños.

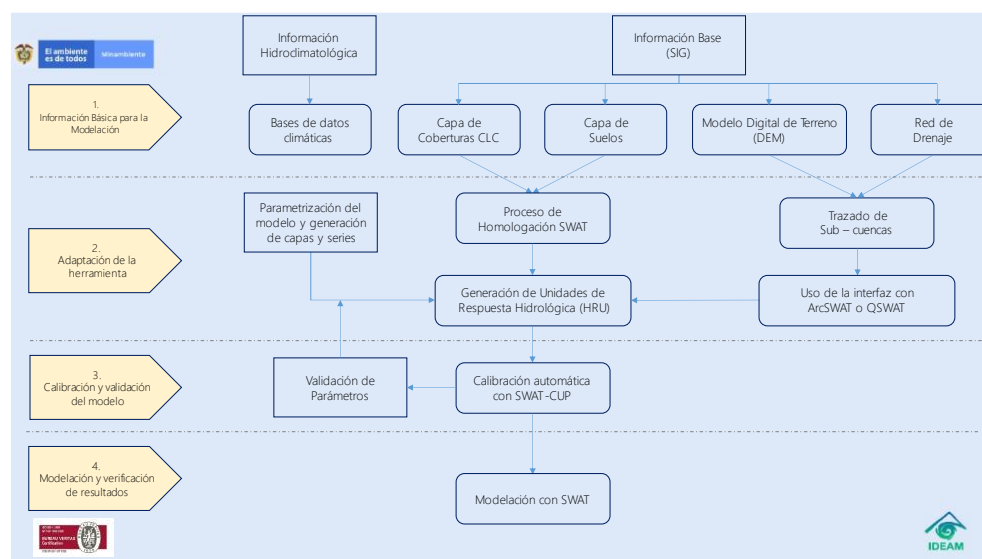


Figura 2.15 Pasos metodológicos para la modelación hidrológica

Herramienta SWAT

El modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool) es una herramienta hidrológica para análisis de cuencas desarrollada originalmente por el Servicio Agrícola de Investigación (ARS) para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y

producción de sustancias químicas utilizadas en la agricultura en cuencas grandes y con una complejidad de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

SWAT es un modelo de simulación continua (largo plazo) que no está estructurado para un análisis de eventos. SWAT requiere información básica del clima a escala diaria (precipitación, evapotranspiración), propiedades físicas y químicas de suelos, topografía (red de drenaje), cobertura vegetal y prácticas de manejo de la tierra en cada una de las cuencas que se requiera simular. Los procesos físicos asociados con el movimiento de agua, sedimentos y nutrientes son modelados de forma semi-distribuida por la herramienta.

Para propósitos de simulación hidrológica, la cuenca hidrográfica se divide en subcuencas. Este enfoque es muy útil cuando hay diversas áreas de la misma cuenca que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos heterogéneos que impactan directamente en la generación de escorrentía. La información de entrada para cada subcuenca es agrupada en las siguientes categorías: clima, unidades de respuesta hidrológica (HRU), humedales y zonas de almacenamiento, aguas subterráneas, canal principal de drenaje y red de drenaje, (Arnold, y otros, SWAT: model use, calibration and validation, 2012).

El principio fundamental de modelación en SWAT se basa en la definición de HRU, las cuales son áreas de tierra dentro de la subcuenca que corresponden a combinaciones de cobertura de tierra, suelo y pendiente de la cuenca. La simulación hidrológica de la cuenca suele dividirse en dos fases: La fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de tránsito, (Arnold, y otros, SWAT: model use, calibration and validation, 2012).

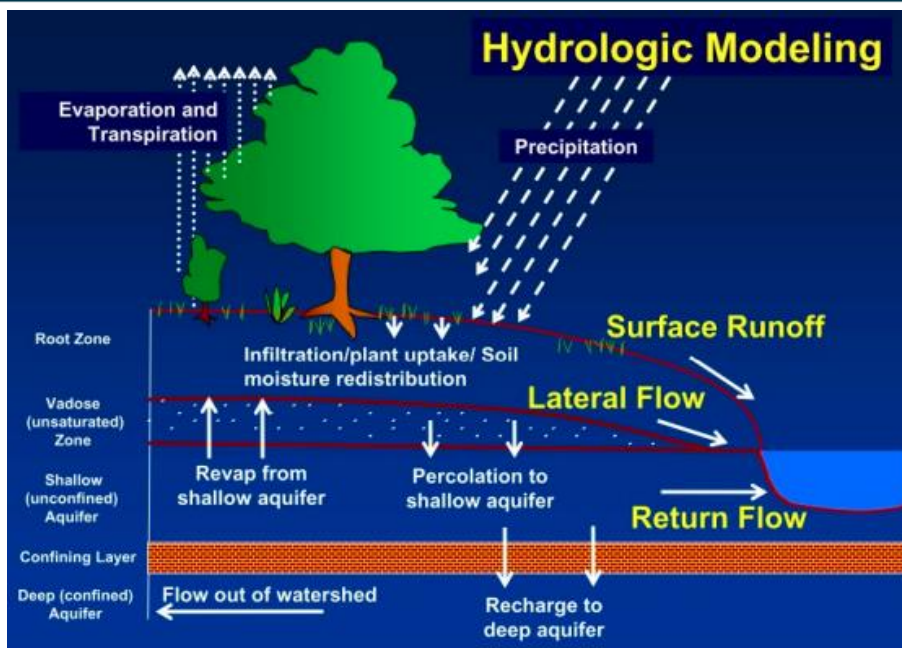


Figura 2.16. Representación de procesos del ciclo hidrológico en SWAT

La fase terrestre (Figura 2.16) controla la cantidad de agua, sedimentos, cargas nutritivas y de pesticidas que ingresan al canal principal de drenaje en cada una de las subcuencas. La fase de tránsito define el movimiento de agua y demás a través de la red de drenaje de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de entrega.

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación de conservación de masa tomando como base el almacenamiento de agua en el suelo (Ecuación 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum (R - Q_s - E_a - W - Q_g) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial en el primer día de simulación, t es el intervalo de tiempo del modelo (días), R es la cantidad de precipitación, Q_s es la escorrentía superficial generada, E_a es la cantidad de evapotranspiración real, W es la cantidad de agua que percola en el perfil de suelo y Q_g es la cantidad de flujo de agua que retorna a la cuenca por día, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en evapotranspiración debida a las distintas condiciones de suelo y cobertura. Las escorrentías son pronosticadas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto aumenta la certeza

de dar una mejor descripción física al balance de agua, (Douglas-Mankin, Srinivasan, & Arnold, 2010).

En el modelo SWAT, cuando la precipitación cae puede ser interceptada por el dosel de la vegetación o caer directamente sobre el suelo. El agua en el suelo se infiltra en el perfil del suelo o puede escurrir directamente sobre el terreno. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia los canales de drenaje y puede contribuir en el corto plazo a la generación de escorrentía en toda la cuenca. El agua en el suelo puede ser contenida y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar hacia zonas más profundas que alimenten el contenido de agua subterránea, (Figura 2.16).

La fase en enrutamiento en el canal principal se divide en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas agrícolas. Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión del mismo canal (Figura 2.16). Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal por uso (doméstico, agrícola, hidroeléctrico, etc.). El flujo puede ser suplementado directamente por la lluvia sobre el canal o adicionado de aguas que descargan sobre él. El flujo es dirigido por el canal mediante métodos de almacenamiento o enrutamiento según Muskingum, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

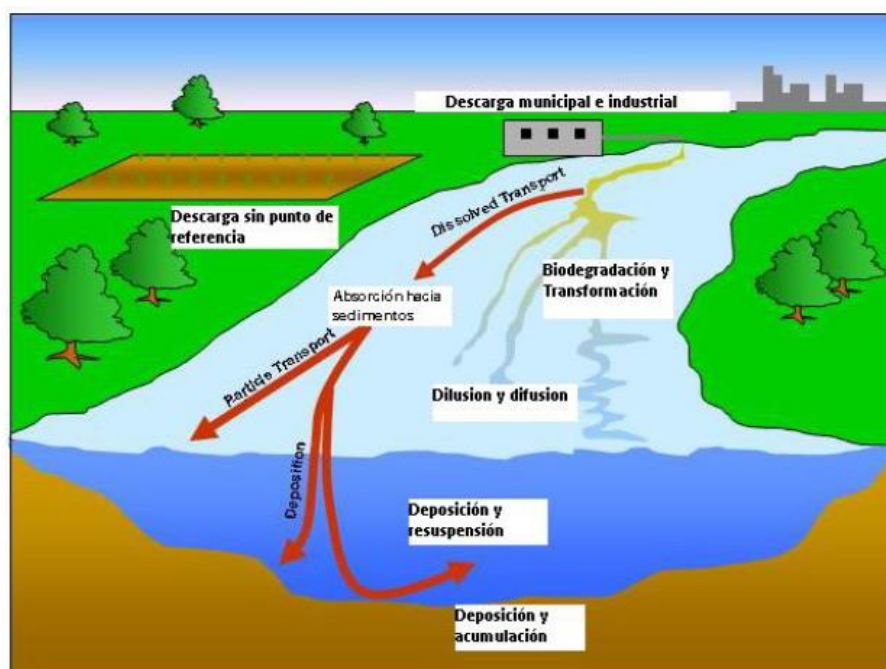


Figura 2.17. Representación de procesos en la fase de tránsito en SWAT. Tomado de Neitsch, et al.

Modelo GR4J

El modelo GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de 4 parámetros y resolución diaria (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003), (Figura 2.18). En el modelo, la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente. La precipitación es estimada según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial. La evapotranspiración potencial puede ser un valor promedio diario de largo plazo. Todas las cantidades (entradas, salidas, variables internas) están expresadas en unidades de longitud (mm), por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario.

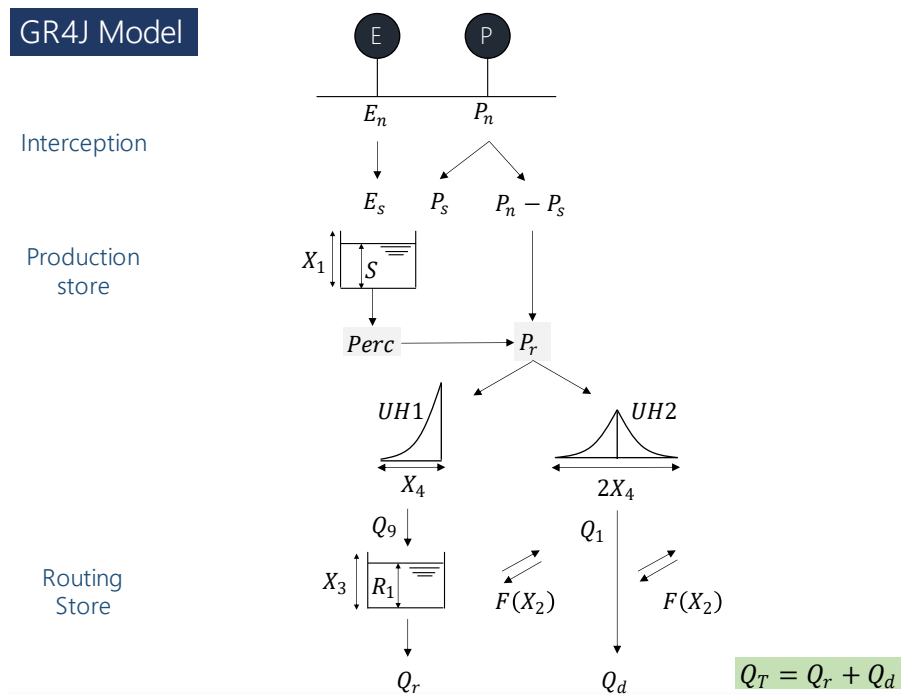


Figura 2.18. Esquema básico del modelo GR4J

El modelo parte del conocimiento de la cantidad de lluvia y la estimación de la evapotranspiración potencial las cuales se consideran como las entradas del modelo. Luego de ello, el modelo estima una interceptación por medio de relaciones algebraicas simples para luego llegar al primer tanque de almacenamiento que representa el contenido de humedad en el suelo. Desde este tanque se presenta el proceso de percolación y aporte directo a la escorrentía que permite, mediante la implementación de aplicación de hidrogramas unitarios $UH1$ y $UH2$, la obtención de una fracción del caudal total.

El modelo presenta un tanque de enrutamiento con un almacenamiento determinado por el parámetro X3. Los otros parámetros del modelo corresponden a X1 (capacidad de almacenamiento de agua en el suelo), X2 como un parámetro de intercambio entre el flujo subsuperficial y la escorrentía y X4 como la amplitud de los hidrogramas unitarios. La descripción de las ecuaciones que definen los flujos puede ser consultada en las referencias citadas, (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003)

2.2.7. Selección de criterios de desempeño

Para evaluar la capacidad del modelo de representar adecuadamente los flujos y almacenamientos hidrológicos se comparan numérica y gráficamente las simulaciones y las observaciones. Se consideraron la disponibilidad de observaciones recopiladas y se estableció que la evaluación se realizaría mediante la comparación de datos de caudal.

Evaluación numérica del ajuste de parámetros

Para facilitar y evaluar de forma objetiva el resultado de la modificación de los valores de los factores de calibración de parámetros, se define una métrica que compare los caudales simulados con los observados. La métrica escogida es el coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), debido a que les da importancia a tres componentes hidrológicos y no solo se enfoca en la diferencia entre valores simulados y observados como lo hacen otras métricas (p. Ej. El RMSE o el NSE, que han sido criticados por subestimar la varianza de las observaciones y enfocarse en los picos de caudal (Beck, y otros, 2017)). Los tres componentes que son agrupados en el KGE son:

- La correlación temporal entre las dos series a través del coeficiente de correlación (r)
- El sesgo entre las simulaciones y las observaciones ($\beta = \mu_s/\mu_o$)
- La variabilidad relativa de las simulaciones y observaciones ($\alpha = \sigma_s/\sigma_o$)

La métrica KGE es estandarizada y su valor optimo es 1:

$$KGE = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}, \beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

Donde,

r : Coeficiente de correlación de Pearson, entre la variable simulada y observada.

σ_{sim} : desviación estándar de la variable simulada.

σ_{obs} : desviación estándar de la variable observada.

μ_{sim} : media de la variable simulada.

μ_{obs} : media de la variable observada.

Esto convierte al KGE en una métrica multiobjetivo que puede ser evaluada más en detalle en la fase de validación, mejorando así el entendimiento general del desempeño del modelo y la correspondencia de los valores de los parámetros con ciertas firmas hidrológicas. Igualmente, el KGE es una métrica estandarizada y por tanto no es susceptible a ser influida por las unidades usadas en las variables comparadas.

Evaluación del desempeño general de las simulaciones

El desempeño general se evalúa tanto con métodos gráficos como con estadísticas cuantitativas o métricas, siguiendo los consejos propuestos por Moriasi, y otros (2007). Esto también se denomina por algunos autores como evaluación diagnóstica de los modelos (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009). Se analiza la correspondencia entre simulaciones y observaciones a diferentes escalas temporales (diaria y mensual predominantemente), y la correspondencia entre el porcentaje de la probabilidad de excedencia mediante la curva de duración de caudales (esta última para evaluar su posterior influencia en los Índices de Regulación Hídrica (IRH) calculados con las simulaciones en la SZH). Dentro de las métricas recomendadas (Moriasi, Gitau, Pai, & Daggupati, 2015), y seleccionadas se encuentran:

- El sesgo porcentual o P.Bias, por indicar la tendencia promedio a sobre estimar o subestimar las simulaciones, y que es otra representación de la componente β en el KGE.
- El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), por determinar la magnitud relativa entre el “ruido” y la “información” entre las simulaciones y observaciones.
- El RMSE, por dar un valor del error en las unidades en las que se está midiendo la variable.
- El coeficiente de determinación (R^2), que también se relaciona con la correlación temporal entre las simulaciones y observaciones, es decir, con el coeficiente de correlación presente en el KGE.

2.2.8. Análisis de sensibilidad

Los parámetros ensayados en el análisis de sensibilidad fueron los controladores de los flujos de agua, que en la zona de estudio corresponde a los acuíferos superficiales y los flujos en los canales. Estos se identificaron a través de una revisión de literatura asociada a la herramienta SWAT. La forma de variación de los parámetros se puede ver en la Tabla 2.4, donde se resalta que muchos de los parámetros de los acuíferos superficiales o que controlan el flujo base se les asigna un valor directamente porque en la herramienta no se le ingresan valores predefinidos con base en fisiografía.

Tabla 2.4 Tipo de ajuste realizado a los parámetros

Parámetro	Proceso hidrológico	Tipo de variación	Observación
CN2	Escorrentía superficial	Relativa	Se enfoca en reducir los picos y aumentar la infiltración
SOL_AWC	Escorrentía superficial	Relativa	Aumenta o reduce la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo
SOL_K	Escorrentía superficial	Relativa	Aumenta o reduce la capacidad del suelo para dejar fluir el agua hacia otras capas y hacia los canales
SURFACE_LAG	Escorrentía superficial	Relativa	Retrasa la ocurrencia de los picos de escorrentía
OV_N	Escorrentía superficial	Relativa	Retrasa la ocurrencia de los picos de escorrentía
ALPHA_BF	Flujo base	Valor	Controla la pendiente de la curva de recesión, es decir, la velocidad con la que se libera el flujo desde el acuífero
GWREVAP	Flujo base	Valor	Coefficiente que controla el retorno por flujo capilar
GWDELAY	Flujo base	Valor	Retraso de tiempo en el flujo subterráneo
GWQMN	Flujo base	Relativa	Umbral que debe superar el agua almacenada en los acuíferos superficiales para que ocurra flujo base
REVAPMIN	Flujo base	Relativa	Umbral que debe superar el agua almacenada en los acuíferos superficiales para que ocurra el flujo capilar
RCHRGDP	Flujo base	Valor	Porcentaje de agua que pasa de la última capa de suelo al acuífero profundo
CH_N	Flujo base	Valor	Retraso en el tiempo de ocurrencia y disminución de los picos de caudal
CH_K	Flujo base	Valor	Permite la infiltración de agua desde el canal hacia los acuíferos superficiales

Se planteo realizar una evaluación de la sensibilidad paramétrica simple. Esto se realizó mediante la técnica de la variación de un parámetro a la vez y observar los cambios en las hidrógrafas en los puntos establecidos para evaluación en la cuenca.

Igualmente, se realizó la evaluación de la significancia de los coeficientes de una regresión multilínea entre los parámetros y la función objetivo escogida ($KGE = a + \sum b_i \cdot \beta_i$, con β_i los parámetros del modelo hidrológico y a y b_i los coeficientes de la regresión). Mediante la comparación de la estadística t con el valor de la distribución t -Student, se puede determinar qué tan sensible es un parámetro y el correspondiente p -valor de esa sensibilidad. Este tipo de sensibilidad la denominan de carácter global porque permite evaluar los efectos de todos los parámetros a la vez (Abbaspour K. , 2019). Sin embargo, debido a la dificultad de realizar muchas simulaciones previas al procedimiento de calibración, se debió implementar la misma metodología que con la variación de un parámetro a la vez (20 simulaciones en paralelo de solo un parámetro). Con esto se convirtió el método en uno de sensibilidad local, pero con la posibilidad de determinar numéricamente y no solo visualmente si el desempeño del modelo es sensible a cambios en el parámetro.

Evaluación uno a la vez

A través del software SWAT-CUP, se realizaron las 20 simulaciones y las gráficas de las hidrógrafas correspondientes a la variación de cada parámetro. A manera de ejemplo se muestra en la Figura 2.19 el resultado de la variación del parámetro SOL_K en toda la cuenca.

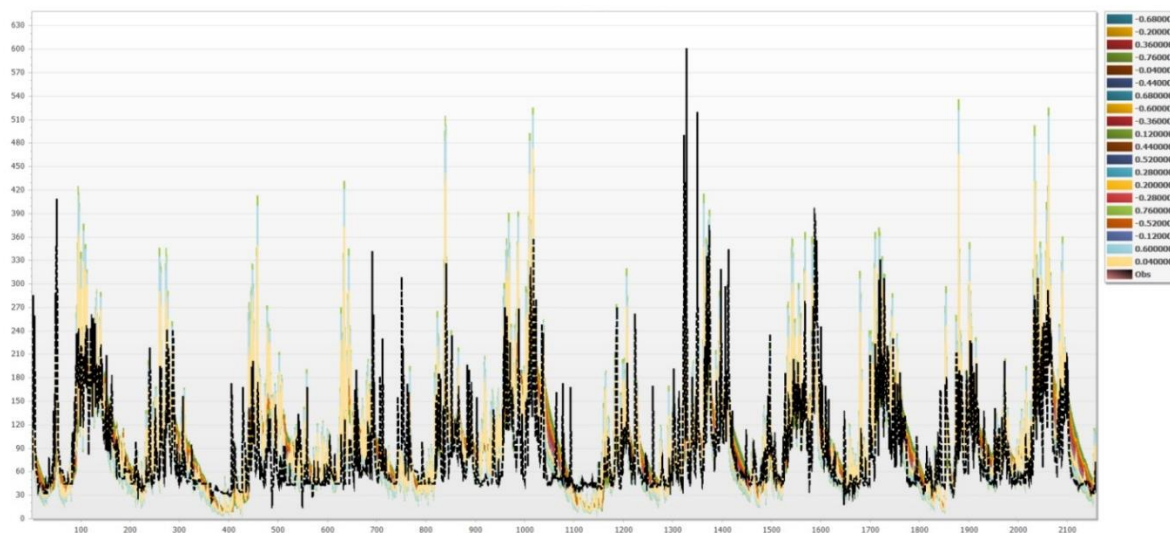


Figura 2.19 Cambios en las hidrógrafas en la estación San Rafael debido a las variaciones en el parámetro SOL_K

A partir del análisis de las figuras se puede sacar las conclusiones sobre los demás parámetros que se consignan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Análisis de sensibilidad local de parámetros para toda la SZH

Parámetro	Proceso hidrológico	Sensibilidad local	Observación
CN2	Escorrentía superficial	Alta	Su modificación cambia radicalmente el valor de los picos de caudal y del valor de los periodos de recesión
SOL_AWC	Escorrentía superficial	Media	Al realizar un aumento del parámetro, se reducen los picos y la curva de recesión se alarga
SOL_K	Escorrentía superficial	Alta	Al realizar una reducción del parámetro, se reducen los picos y la curva de recesión se alarga
SURFACE_LAG	Escorrentía superficial	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
OV_N	Escorrentía superficial	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
ALPHA_BF	Flujo base	Media para la curva de recesión	Su aumento genera que la curva de recesión sea menos pronunciada
GWREVAP	Flujo base	Media para la curva de recesión	Su cambio incrementa o disminuye la pendiente de la curva de recesión
GWDELAY	Flujo base	Alta para la curva de recesión	Su aumento genera que la curva de recesión sea menos empinada y que no llega a valores tan bajos
GWQMN	Flujo base	Media para la curva de recesión	Incrementa o disminuye los valores de caudal en los periodos de estiaje
REVAPMIN	Flujo base	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
RCHRGDP	Flujo base	Media para la curva de recesión	Aumenta o disminuye los valores del caudal en los periodos de estiaje
CH_N	Flujo base	Media para los picos de caudal	Disminuye un poco los valores de los picos de caudal
CH_K	Flujo base	Alta	Además de disminuir los picos de caudal en gran medida (incluso puede desaparecerlos), aumenta el valor del caudal en los periodos de estiaje volviendo la hidrógrafa

Sensibilidad con t-Student

Igualmente se obtuvieron los valores de sensibilidad con el estadístico t-Student que se resume en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores del estadístico t-Student para la sensibilidad de parámetros

Parámetro	t-stat	p-valor
CN2	-10.26	6.01E-09
SOL_AWC	0.785	0.44
SOL_K	-60.85	2.70E-22
SURFACE_	0.77	0.45
OV_N	29.67	9.70E-17
ALPHA_BF	-6.17	7.96E-06

Parámetro	t-stat	p-valor
GWREVAP	78.31	2.93E-24
GWDELAY	-7.27	9.30E-07
GWQMN	29.5	1.07E-16
REVAPMIN	-3.5	2.50E-03
RCHRGDP	18.1	5.50E-13
CH_N	80.6	1.74E-24
CH_K	10.61	3.50E-09

De los anteriores valores y del análisis de sensibilidad local, se descarta entonces realizar calibración de los parámetros SURFACE_LAG, OV_N y REVAPMIN debido a que no reflejan un cambio sustancioso en los desempeños del modelo.

2.3. Resultados de la modelación hidrológica

En este numeral se presentan los resultados del modelo en las subzonas hidrográficas. Inicialmente se presentan los procesos de ajuste de parámetros, calibración y validación, posteriormente se muestran los indicadores de desempeño del modelo y se efectúa una evaluación diagnóstica de las simulaciones. Por último, se evalúan las incertidumbres del modelo.

2.3.1. Ajuste de parámetros y calibración, validación

El proceso de calibración, mediante el cual se ajusta los parámetros para el modelo implementado en una cuenca, suele ser el más demandante en tiempo y recursos tanto de conocimiento como en computación. Su complejidad dependerá del número de parámetros que posea el modelo y del rango en el cual cada uno de ellos pueda tomar valores. El proceso de calibración posee 3 elementos principales los cuales son: La información de entrada, la función objetivo y el algoritmo de calibración. En primer lugar, las variables de entrada deben revisarse tanto en su cantidad como en la calidad de la información. En segundo lugar, la función objetivo y las métricas de desempeño a través de las cuales se evaluará la respuesta del modelo con el conjunto de parámetros seleccionados. Y por último el algoritmo de calibración mediante el cual se buscará en el espacio de respuesta de la función objetivo seleccionada, el conjunto de parámetros que minimice el error de la simulación.

La mayoría de los procesos de calibración consisten en la comparación de los resultados de múltiples simulaciones con las observaciones de la respuesta de la cuenca. Los valores de los parámetros son ajustados entre las diferentes simulaciones, ya sea manualmente o mediante la implementación de algún algoritmo de calibración, hasta que se obtiene un error aceptable en la

simulación. En esta sección se presentan los ensayos realizados para ajustar los parámetros del modelo y así lograr un mejor desempeño.

2.3.1.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

Se comienza con la descripción de las calibraciones semi-manuales para identificar la zona donde el modelo presenta un buen desempeño para cada uno de los bloques planteados. Posteriormente se describe las simulaciones automáticas que se realizaron para ajustar los parámetros del modelo. En cualquiera de los dos métodos de calibración, siempre se siguió la secuencia de bloques que se indica a continuación:

1. Bloque 1 de subcuencas de alta montaña
2. Bloque 1P de las subcuencas que drenan a la estación Pte Sardinias
3. Bloque 3 de subcuencas que drenan hacia la estación Café Madrid [23197290]
4. Bloque 4 de subcuencas que drena hacia la estación San Rafael [23197370]
5. Bloque 2 de subcuencas que drenan hacia estaciones en la planicie
6. Bloque 5 de subcuencas que drenan hacia la estación El Hoyo [23197410]

Este orden escalonado garantiza que se calibren primero las subcuencas en la parte alta y que drenan hacia la parte baja. En la calibración de cada bloque se calculó la función objetivo solamente con los caudales observados en las estaciones pertenecientes a ese bloque.

Ajustes semi-manuales

Para encontrar la zona del espacio parametral donde se producen los mejores desempeños, se realizaron calibraciones semi-manuales. El muestreo de los valores de los parámetros se realizó con la técnica de Latin Hypercube que estiman la respuesta del modelo en todo el rango parametral definido.

Para la modificación del valor de los parámetros, la definición de su valor y el cambio hacia otro parámetro, se siguieron los siguientes criterios:

- Se realizan 10 simulaciones de un parámetro en un rango parametral establecido, encontrando así el probable valor que mejora el desempeño. Se fija el valor encontrado y se cambia de parámetro.
- Se realizan 10 simulaciones en paralelo con los demás parámetros seleccionados.

- Se evalúa la interacción de dos parámetros con 20 simulaciones en paralelo, modificando los límites del espacio de búsqueda para los dos parámetros en la zona cercana al valor que se ha asignado previamente.
 - Se cambian los valores de los dos parámetros por aquellos que hayan conseguido un mejor desempeño de manera conjunta
 - Se cambia la combinación de los parámetros intentando mejorar el desempeño
- Se detiene el ajuste de un conjunto de parámetro cuando se observa que el cambio de sus valores no genera un cambio significativo en la función objetivo y se cambia de bloque de subcuencas.

Análisis de las simulaciones semi-manuales

Se realizaron dos actividades de calibración semi-manual diferenciadas por la formulación usada para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). La primera se realizó utilizando la formulación de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) y la segunda la formulación de Penman-Monteith (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Los dos caminos de calibración se realizaron porque se encontró una influencia en la métrica del sesgo porcentual entre las simulaciones y las observaciones al variar la formulación de la ETP.

Las diferencias entre los dos métodos se analizan a través de la Tabla 2.7 y de la Figura 2.20 y Figura 2.21. Se puede ver en esta últimas que usando la formulación de Hargreaves se tienen menores caudales producto de una mayor evapotranspiración en la zona, lo cual también se refleja en los valores consignados en la tabla donde las simulaciones usando Hargreaves producen más subestimaciones en toda la cuenca dificultando así la calibración de los demás parámetros. Igualmente se resalta de la tabla que el cambio de método no produce cambios significativos en la concordancia temporal entre las simulaciones y las observaciones (esto representado a través del cálculo del coeficiente de determinación). Esto indica que tampoco hay un cambio en la varianza de los caudales simulados, indicando así que el efecto del cambio del método de evapotranspiración solo impacta en la sobrestimación o subestimación de los caudales.

Tabla 2.7 Métricas de las simulaciones sin modificar parámetros en la SZH del río Lebrija

Método	Penman-Monteith	Hargreaves	Penman-Monteith	Hargreaves
Estación\ Métrica	% Sesgo		R ²	
El Hoyo	-5.8	-46.5	0.23	0.23
San Rafael	11.5	-35.5	0.34	0.37
Puente Sardinas	-31.6	-61.8	0.25	0.26
Puente Panega	41.1	1.1	0.31	0.31
La Chocóa	-36.5	-55.9	0.11	0.1
Tamarindo	120.2	75.5	0.11	0.1
Café Madrid	70.9	2.6	0.23	0.24
Majadas	45.5	-5.9	0.42	0.41
La Esperanza	25.2	-22.1	0.12	0.15
El Hoyo	-5.8	-46.5	0.23	0.23
San Rafael	11.5	-35.5	0.34	0.37
Puente Sardinas	-31.6	-61.8	0.25	0.26

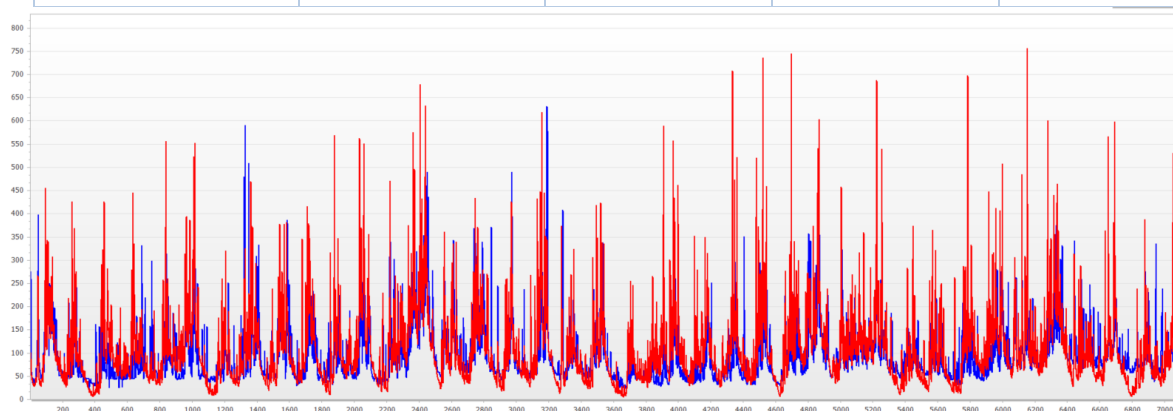


Figura 2.20 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Penman-Monteith para la ETp (parámetros sin modificar)

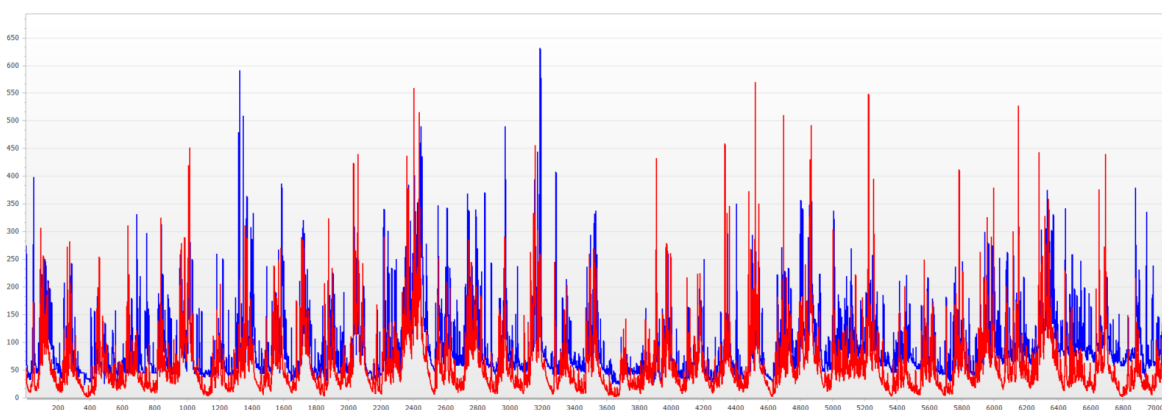


Figura 2.21 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Hargreaves para la ETp (parámetros sin modificar)

Inicialmente se intentó modificar los parámetros utilizando la configuración del modelo que utiliza la formulación de Hargreaves a pesar de lo encontrado anteriormente. Los resultados de los parámetros evaluados se pueden ver en la Figura 2.22, donde se puede ver que se pudo mejorar un poco los desempeños en los bloques 1 y 3 (asociado a la estación Café Madrid). Sin embargo, los desempeños en los bloques 4 y 5 de las estaciones San Rafael y El Hoyo respectivamente, no superaron el desempeño obtenido con la configuración de Penman-Monteith sin realizar modificaciones a los parámetros.

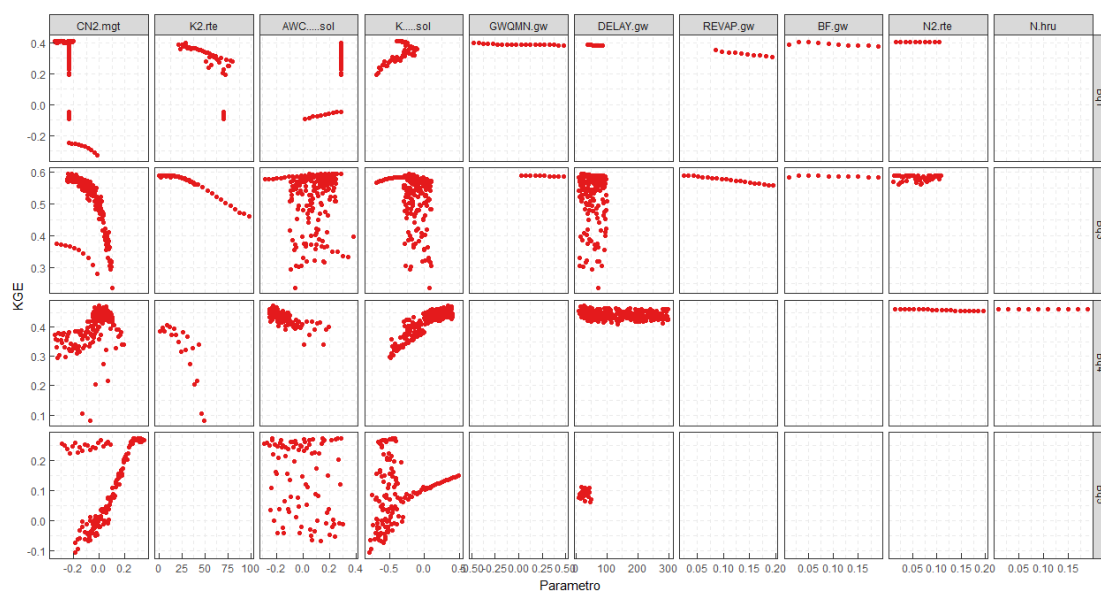


Figura 2.22 Desempeño de las simulaciones respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Hargreaves para ETP

La modificación de los valores paramétricos, pero usando la formulación de ETP de Penman-Monteith se puede ver en la Figura 2.23. Se logró modificar los parámetros en los bloques 1 y 3 de manera que alcanzaron un desempeño similar al obtenido con la formulación de Hargreaves. Por el contrario, en los bloques 4 y 5 se alcanzó un desempeño sustancialmente superior que con la formulación de Hargreaves. Se resalta que, al comparar los resultados iniciales de las simulaciones sin calibrar con las obtenidas al final, se tiene un gran aumento del desempeño en el bloque 3 asociado a la estación Café Madrid.

De las simulaciones realizadas se tiene como resultado un mejor desempeño en términos del KGE utilizando la formulación del Penman-Monteith. Esto es muy claro en los bloques 4 y 5 donde los

valores son superiores en 50%. Para los bloques 1 y 3 se registró un desempeño muy similar al alcanzado con la formulación de Hargreaves.

Al finalizar las simulaciones semi-manuales se obtuvieron las métricas de desempeño a escala diaria reportadas en la *Tabla 2.8*, que tienen un desempeño general en términos del KGE de 0.42. Se debe resaltar que en general las simulaciones no tienen un sesgo superior al 15 % a excepción de tres estaciones.

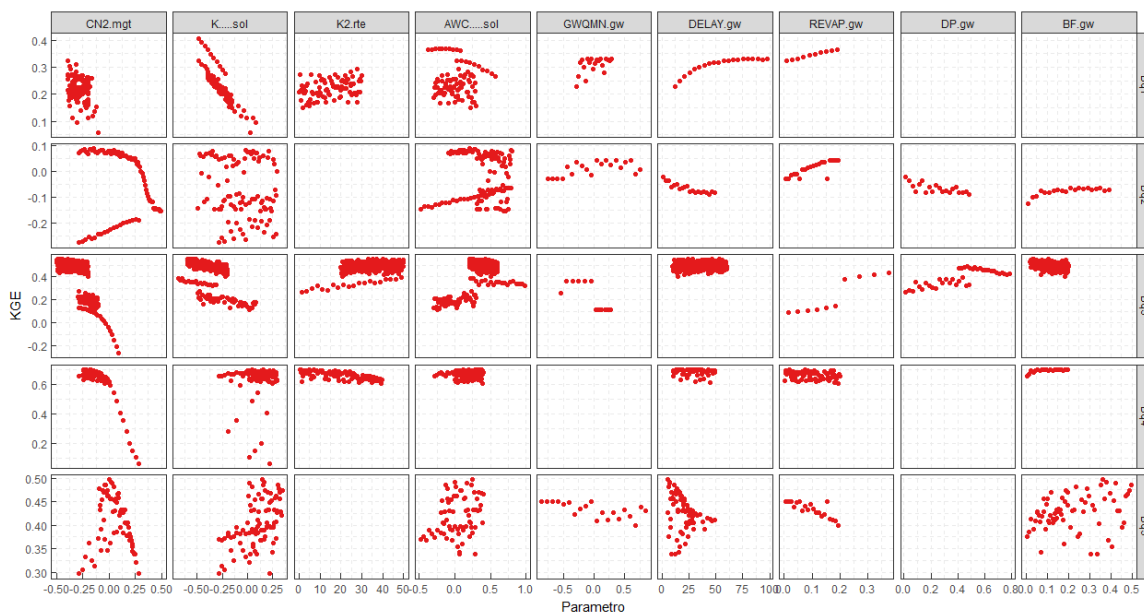


Figura 2.23 Desempeño de las simulaciones respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Penman-Monteith para ET_p

En la *Figura 2.24* se puede ver la correspondencia temporal para la estación San Rafael, donde queda claro que, aunque se siguen las tendencias de las temporadas, la simulación diaria no alcanza a representar todos los picos de caudal. Se observa incluso que hay días en los que se observó un pico, pero la simulación no tuvo ninguna perturbación; esto se debe a faltantes de lluvia que no fueron registrados por las estaciones pluviométricas posiblemente porque llovió en una región donde no hay monitoreo y la interpolación no fue capaz de suplir esas falencias (Arnold, y otros, *Swat: Model Use, Calibration, and Validation*, 2012).

Tabla 2.8 Métricas de desempeño en las estaciones usadas para el ajuste de parámetros

Estación	R ²	NS	RMSE (m ³ /s)	PBIAS	KGE	StdDev_sim(S) tdDev_obs)
El Hoyo [23197410]	0.28	0.19	18.71	6.5	0.5	17.13(20.68)
San Rafael [23197370]	0.5	0.46	45.83	1.4	0.7	57.21(62.10)
Puente Sardinas [23197130]	0.37	-0.1	2.90	40.8	0.28	1.57(2.81)
Puente Panega [23197270]	0.41	0	1.61	-9	0.54	2.04(1.61)
La Chocoa [23187040]	0.22	0.09	7.21	49.2	0.09	3.40(7.54)
Tamarindo [23187240]	0.17	-0.5	2.28	-68.1	0.09	2.17(1.89)
Café Madrid [23197290]	0.38	0.05	9.00	-22	0.56	9.84(9.22)
Majadas [23197700]	0.66	0.44	3.10	-11.9	0.68	5.12(4.15)
La Esperanza [23197460]	0.21	-0.6	0.65	-4.7	0.34	0.69(0.51)

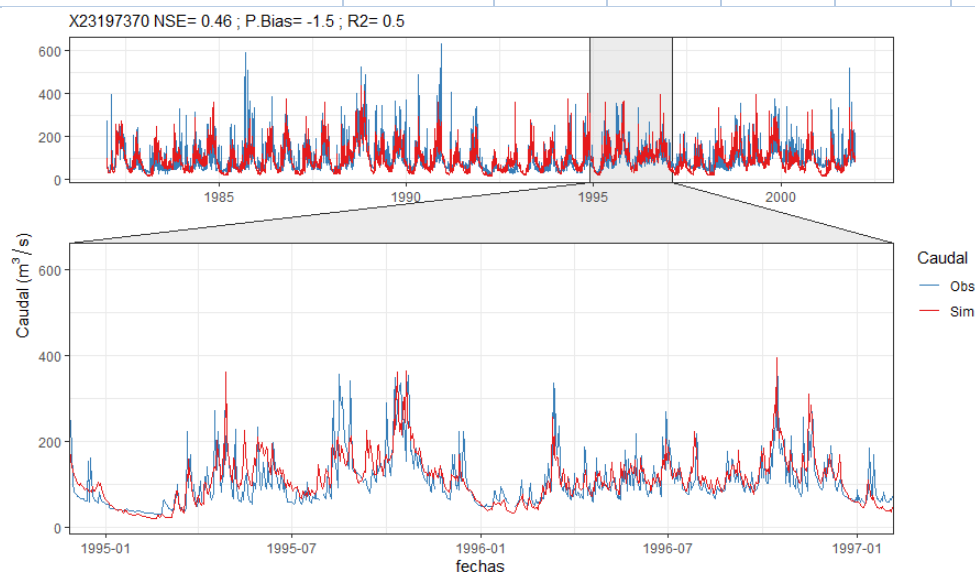


Figura 2.24 Hidrógrafa simulada con el ajuste de parámetros semi-manual en la estación San Rafael

Ajustes automáticos

Se utilizó el algoritmo PSO para refinar los valores de los parámetros y de desempeño encontrados en las búsquedas semi-manuales (Kennedy & Eberhart, 1995). Este algoritmo inicialmente requiere definir un número de partículas a muestrear. Muestra de forma aleatoria dentro del rango parametral definido y asigna una velocidad o tasa de cambio de las partículas. La velocidad de cada partícula es actualizada en cada iteración; la iteración está compuesta por la evaluación del valor de la función objetivo para todas las partículas. La actualización y direccionamiento de la velocidad de las partículas tiene en cuenta el desempeño global de todo el conjunto de partículas, guiando así la búsqueda hacia las mejores respuestas o la mejor partícula. Generalmente se define como criterio

de parada para el algoritmo, un cambio porcentual menor al 5% en el valor de la función de desempeño entre una iteración y otra.

Sin embargo, debido a que el objetivo de utilizar este algoritmo es refinar los valores de los parámetros encontrados en la calibración manual, entonces se definió un número de simulaciones límite a evaluar como criterio de parada. Igualmente, el algoritmo se usó con los **modelos refinados** para encontrar un mejor desempeño usando las nuevas entradas. En ambas fases se usó el factor de ajuste relativo de parámetros que se explicará más adelante (Francés, Vélez, & Vélez, 2007).

Para cumplir el objetivo de refinación, se definieron un número de simulaciones por iteración y un total de 25 iteraciones. Lo anterior le permitió al algoritmo mejorar doce veces las respuestas inicialmente muestreadas (lo anterior se definió con base en revisión de literatura (Kennedy & Eberhart, 1995)). En cada bloque de subcuencas se especificaron rangos diferentes de muestreo, con base en los resultados de las simulaciones semi-manuales y un número diferente de simulaciones por iteración. En la Tabla 2.9, se consignan los valores de las simulaciones por iteración para cada bloque.

Tabla 2.9 Configuración de las simulaciones automáticas con el algoritmo PSO en cada bloque de subcuencas

Bloque	Sim.	Iter.	Sim. totales	Observación
Bloque 1 Montaña	60	25	1500	Se buscó que con 60 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 1 Pte. Sar.	60	25	1500	Se buscó que con 60 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 3 Café Madrid	80	30	2400	Se buscó refinar los valores encontrados en las calibraciones semi manuales
Bloque 4 San Rafael	80	30	2400	Se buscó refinar los valores encontrados en las calibraciones semi manuales
Bloque 5 El hoyo	80	30	2400	Se buscó que con 80 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 2 Planicie	80	30	2400	Al conocer mejor el rango de los parámetros que mejoran un poco las simulaciones originales, solo se estableció que se hicieran 40 simulaciones por iteración

Valores definidos finalmente para los parámetros

Posterior a la refinación de los valores paramétricos con el algoritmo PSO, se fijaron los valores consignados en la Tabla 2.10. Se debe resaltar que en la mayoría de los casos los 10 mejores conjuntos de parámetros ensayados tuvieron desempeños muy parecidos debido a procesos de equifinalidad (Beven, 2012).

Tabla 2.10 Valores de los parámetros fijados para cada bloque de calibración en la SZH del río Lebrija

Bloque	CN	SOL K	AWC	Alpha Bf	GWrevap	GWQMN	GWdelay	CH_N	CH_K	Rchrg DP
1 Montaña	-0.307	-0.709	0.219	0.524	0.291	0.077	58.602	0.042	33.235	0.362
1 Montaña Pte Sardinas	-0.456	-0.037	-0.885	0.114	0.014	-0.389	23.641	0.042	21.139	0.079
2 Planicie	-0.340	-0.145	0.601	0.406	0.271	0.086	2.014	0.006	2.874	0.041
3 Café Madrid	-0.396	-0.442	-0.006	0.022	0.371	-0.025	30.077	0.096	17.793	0.082
4 San Rafael	-0.314	-0.143	0.270	0.496	0.259	-0.629	33.356	0.049	5.440	0.198
5 El Hoyo	-0.213	-0.037	-0.428	0.521	0.072	-0.482	1.992	0.031	11.398	0.035

Uno de los parámetros más influyentes, que también fue reconocido en el análisis de sensibilidad fue el CN. Su modificación en un porcentaje alto se justifica en el sentido que el valor original asignado por coberturas y suelos está sujeto a que la pendiente sea cercana al 5% (Arnold, y otros, 2012). En la mayoría de los bloques tuvo que ser reducido en un valor superior al 10%. De igual forma la conductividad hidráulica de los suelos también tuvo en algunos casos un papel importante. Esto puede verse más claramente en la Figura 2.25, que describe el aumento en la función objetivo a medida que avanzan las iteraciones del algoritmo PSO y donde se puede ver como el algoritmo va convergiendo hacia mejores valores hasta llegar a ciertos límites. Estos límites se ocasionan por la imposibilidad del modelo de representar de manera perfecta la realidad, y se manifiestan como planicies en la función objetivo debido a la equifinalidad producida por la combinación de parámetros.

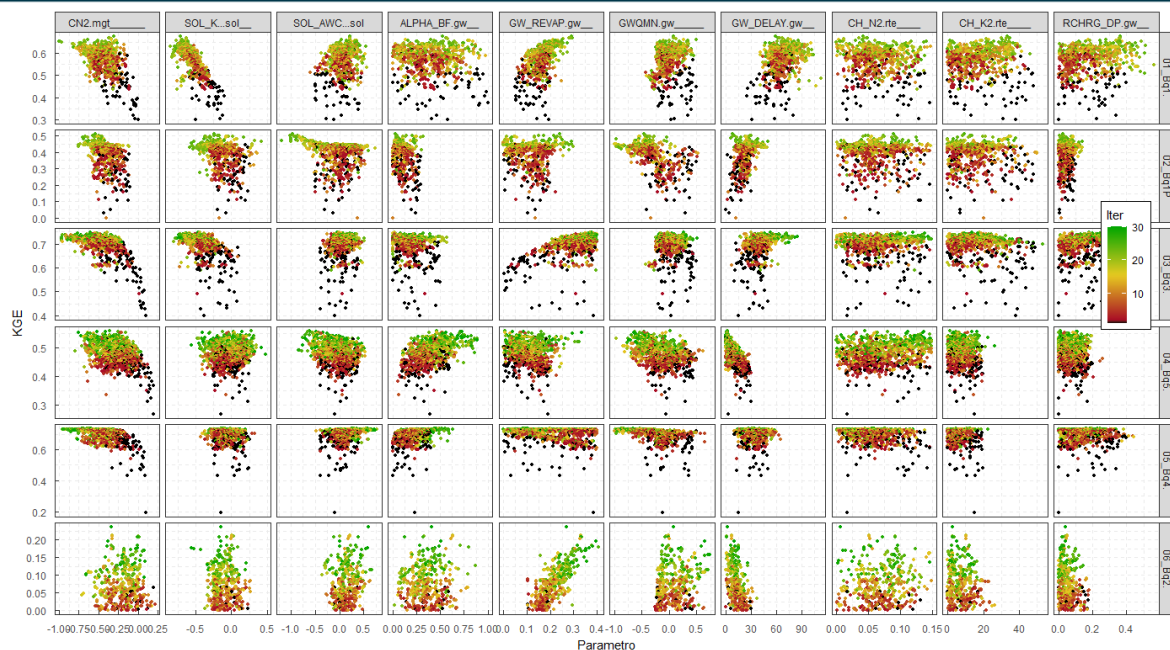


Figura 2.25 Dotty plots de la modificación automática de parámetros con el algoritmo PSO para cada bloque de calibración

2.3.1.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

Debido a que existen en las SZH de interés subcuencas en las cuales no se cuenta con observaciones de caudal que posibiliten su calibración, se requiere de una transferencia de los parámetros desde las subcuencas en las que sí es posible la calibración hacia las subcuencas en las que no. En el caso particular de la SZH del río Opón aguas abajo de la estación AYACUCHO existe un grupo de 7 subcuencas hacia las que se debe transferir los parámetros de las subcuencas aguas arriba de la estación. Así mismo, aguas abajo de la estación PTE FERROCARRIL hay un grupo de 5 subcuencas que requieren de la transferencia de los parámetros desde las subcuencas calibradas. Para la SZH del río Sogamoso también se evidencia la condición anteriormente mencionada por lo que se hace necesaria la transferencia de parámetros hacia subcuencas en la parte baja asociadas a la quebrada La Vizcaína. Además, la construcción de la hidroeléctrica generó cambios significativos en el régimen de caudal sobre el río Sogamoso, por lo que se plantea la calibración de las subcuencas en un escenario para el periodo anterior a la construcción de la hidroeléctrica (1980-2014) y un segundo escenario para el periodo posterior a la entrada en operación del embalse, conservando los parámetros para las subcuencas hallados en el primer escenario e introduciendo la serie de descargas (generación + vertimientos) desde el embalse para obtener los resultados en el tramo del río Sogamoso aguas abajo del sitio de presa.

Las subcuencas en un mismo conjunto no tendrán los mismos valores de parámetros, lo compartido entre las subcuencas de un conjunto son los factores de calibración. En consecuencia, los valores de los parámetros finales dependerán tanto del valor preasignado como del factor de calibración ajustado y la transferencia hacia las subcuencas no monitoreadas será de factores de calibración.

Factores de ajuste de parámetros

El ajuste de los parámetros relacionados a los flujos en las coberturas y en los suelos se llevó a cabo mediante la modificación de los valores de los parámetros de forma relativa a través de un factor de calibración. Esta estrategia permite mantener la variabilidad espacial de los parámetros preasignada a través de la reclasificación de la información fisiográfica realizada para la definición de los HRUs. En la Figura 2.26 se ejemplifica el uso de los factores de ajuste de los parámetros. Los demás parámetros son preasignados por SWAT de manera estandarizada, por lo que el ajuste de estos se debe realizar de manera absoluta, es decir reemplazando el valor preasignado por SWAT por uno dentro del posible rango de variación.

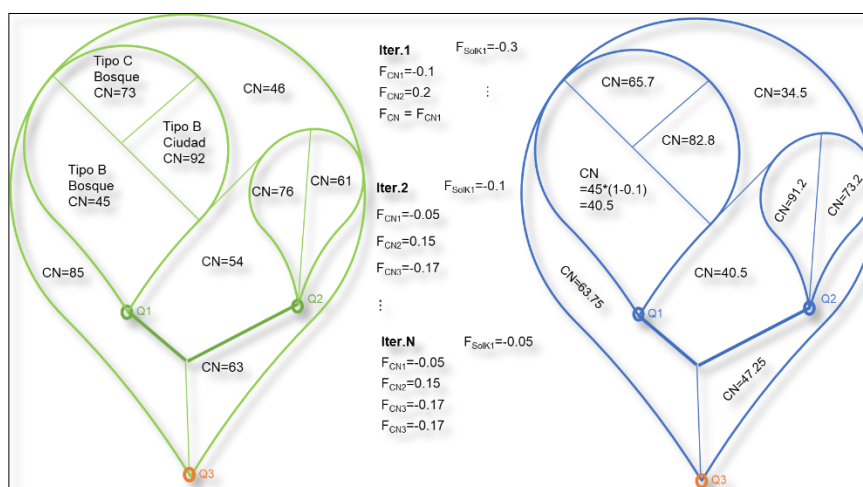


Figura 2.26 Aplicación factores de ajuste de parámetros

Análisis de sensibilidad paramétrica

El aplicativo SWAT cuenta con más de 60 parámetros en lo que a hidrología respecta, por lo que el análisis de sensibilidad paramétrica inició con la revisión de la literatura en específico de aplicaciones previas del modelo SWAT en las que se detalla los parámetros de calibración utilizados con el fin de limitar los parámetros iniciales para la calibración. Arnold et al., (2012) realizó una recopilación de los estudios y en la Figura 2.27 detalla el número de veces que dicho parámetro fue usado para la calibración de los modelos.

Table 1. Calibration parameters reported in 64 selected SWAT watershed studies.^[4] Numbers in parentheses are the number of times the parameter was used in calibration. Definitions of variables are found in the SWAT user manual (<http://swatmodel.tamu.edu/documentation>).

Process	Input Parameters									
Surface runoff	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)				
Baseflow	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELAP (21)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)				
Snow	SFTMP (11)	SMFMN (14)	SMFMX (18)	SMTMP (13)	TIMP (7)	SNO50COV (4)	SNOCVMX (3)			
Sediment from channels	PRF (10)	APM (7)	SPEXP (10)	SPCON (11)	CH_EROD (6)	CH_COV (7)				
Sediment from landscape	USLE_P (7)	USLE_C (7)	USLE_K (7)	LAT_SED (1)	SLSOIL (2)	SLOPE (8)				
N from landscape	RCN (1)	UBN (3)	GWNO3 (2)	ERORGN (5)	NPERCO (11)	ANION_EXCL (2)				
P from landscape	PSP (5)	PHOSKD (6)	UBP (5)	PPERCO (8)	GWQMINP (1)	ERORGP (5)				
Pesticides	KOC (1)	HL_SOIL (1)	HL_FOL (1)	WSOL (1)	WOFFW (2)					
Subsurface tile	TDRAIN (1)	GDRAIN (2)	DEP_IMP (1)							
N and P from channels	BC1 (2)	BC2 (2)	BC3 (2)	BC4 (2)	RS4 (2)	RS5 (1)				
Plant growth	GSI (3)	HI (1)	BLAI (3)	PHU (1)	CN_YLD (1)					
Bacteria	BACTRDQ (1)	BACTMIX (1)	BCNST (1)	CFRT_KG (1)	WDPRCH (1)	WDPQ (1)				
Other	BIOMIX (4)	SOL_ROCK (1)	MSK_COL (1)	MSK_CO2 (2)	CBNINT (1)	SOL_BD (3)	ALPHA_BNR (1)	EVRCH (1)	SOL_ALB (2)	LAT_TTIME (1)

Figura 2.27 Parámetros usados en la calibración del SWAT

A partir de la revisión bibliográfica realizada se seleccionó un grupo de 12 parámetros los cuales se considera pueden ser los más sensibles con base a las características de las SZH de interés. Estos parámetros y la metodología usada para su variación son presentados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Parámetros para la calibración de los modelos

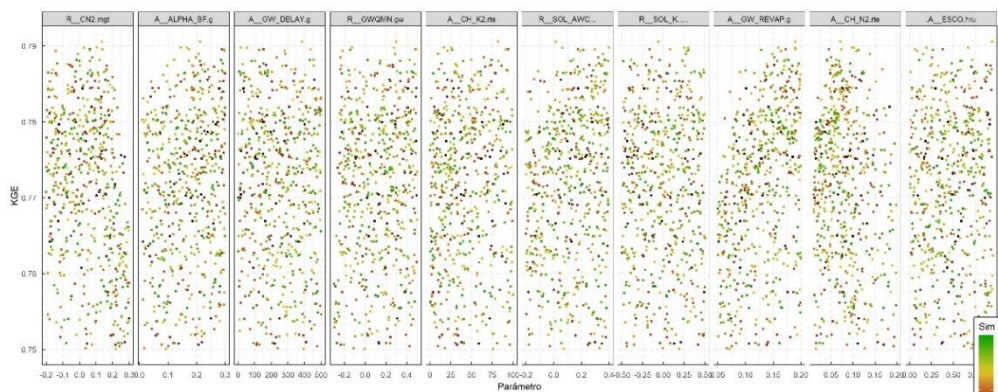
Parámetro	Proceso hidrológico	Tipo de variación
CN2	Escorrentía superficial	Relativa
SOL_AWC	Escorrentía superficial	Relativa
SOL_K	Escorrentía superficial	Relativa
ESCO	Escorrentía superficial	Valor
ALPHA_BF	Flujo base	Valor
GWREVAP	Flujo base	Valor
GWDELAY	Flujo base	Valor
GWQMN	Flujo base	Valor
CH_N2	Flujo base	Valor
CH_K2	Flujo base	Valor
SURFACE_LAG	Escorrentía superficial	Valor
REVAPMN	Flujo base	Valor

Para el análisis de sensibilidad paramétrica se seleccionaron las estaciones PTE FERROCARRIL, AYACUCHO AUT en la SZH del río Opón y PTE SOGAMOSO como estación de cierre en la SZH del río Sogamoso, pues son estas estaciones las que monitorean lo acumulado en la mayor parte de sus SZH.

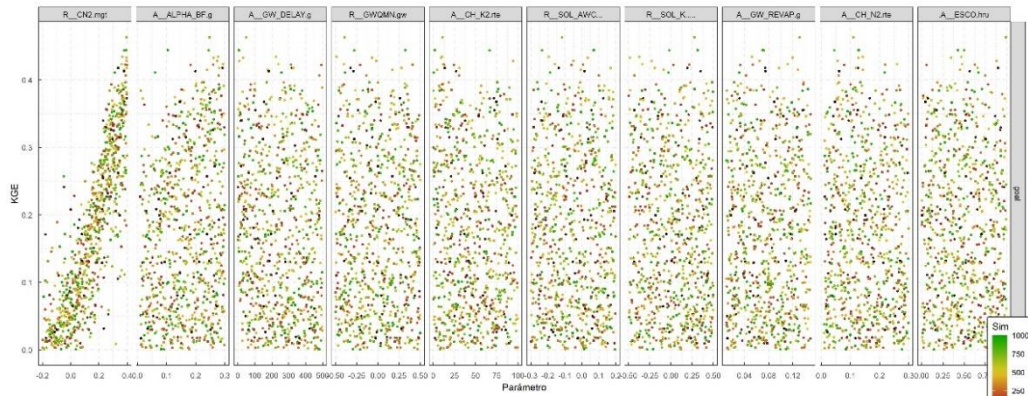


Los parámetros seleccionados fueron evaluados simultáneamente en grupos de 300 simulaciones hasta alcanzar un total de 1,200 simulaciones en cada una de las estaciones seleccionadas. Este ejercicio se realizó haciendo uso de la herramienta para la calibración del modelo SWAT-CUP y seleccionando el algoritmo SUFI-2. Con los resultados que se obtuvieron de cada grupo de simulaciones se evaluó la sensibilidad global de los parámetros y se realizó el ajuste de los rangos de variación propuestos inicialmente, con el fin de orientar las simulaciones hacía una mejor respuesta. Los diagramas de dispersión con los resultados en rangos de variación a los que se llegó después de completar las iteraciones son presentados en la Figura 2.28.

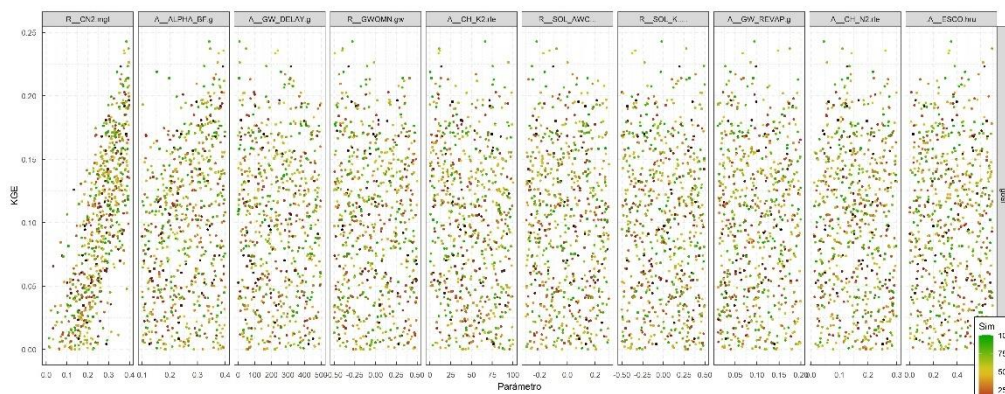
Como se parecía en la Figura 2.28 los resultados obtenidos de manera preliminar en la estación PTE SOGAMOSO son buenos en términos de KGE alcanzando un valor de aproximadamente 0.8. Esto se debe a que el flujo en esta corriente es altamente influenciado por los caudales provenientes de la SZH del río Chicamocha y la SZH del río Suarez. En el caso de la estación PTE FERROCARRIL los resultados son satisfactorios en términos del KGE y se logró una mejora con los ajustes realizados pasando de un KGE de 0.35 a 0.43. Tanto en la estación PTE FERROCARRIL como en la Estación AYACUCHO se evidenciaron posibilidades de mejora. Sin embargo, el algoritmo SUFI-2 al operar secuencialmente sin interpretar los resultados de las simulaciones realizadas se hace altamente ineficiente para alcanzar el objetivo que se persigue. Con base en lo anterior, se planteó una posterior etapa de ajustes automáticos con el algoritmo inteligente PSO disponible en la herramienta SWAT CUP.



a) *Desempeño de las simulaciones en la estación PTE SOGAMOSO*



b) Desempeño de las simulaciones en la estación PTE FERROCARRIL



c) Desempeño de las simulaciones en la estación AYACUCHO

Figura 2.28 Diagramas de dispersión en análisis de sensibilidad

Adicionalmente, con los resultados obtenidos se identificó que los parámetros CN2, SOL_AWC, SOL_K, GWDELAY y CH_K presentan una sensibilidad local alta en la totalidad de las estaciones en las que se realizó la evaluación. La modificación del CN2 cambia el valor de los picos de caudal y del valor de los periodos de recesión. El aumento del SOL_AWC reduce los picos de caudal. La reducción del SOL_K se reducen los picos de caudal. El aumento del GWDELAY hace que se baje la pendiente en la curva de recesión, por lo que no se llega a valores muy bajos. Una modificación abrupta en el parámetro CH_K hace que se reduzcan los picos del caudal hasta el punto de tener una hidrógrafa totalmente plana.

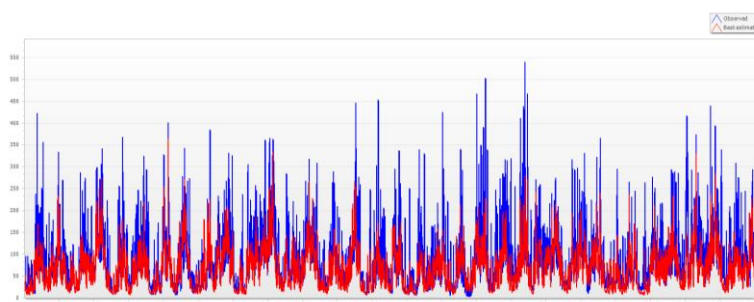
Otros parámetros como el GWQMN y CH_N tienen una incidencia media la determinación de los caudales pico y en la magnitud del caudal en periodos de bajas afluencias. El incremento del parámetro ALPHA_BF tiene una incidencia alta en la determinación de la pendiente de la curva de recesión de caudales.

Las métricas estimadas para la evaluación diagnóstica de los modelos implementados en la etapa de sensibilidad paramétrica se presentan en la Tabla 2.12. Las hidrógrafas correspondientes a la simulación con mayor KGE son presentadas en la Figura 2.29.

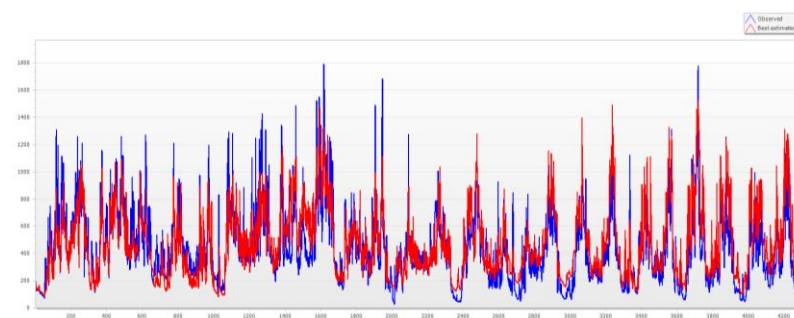
Tabla 2.12 Métricas iniciales proceso de calibración

Variable	Corriente	R2	NSE	PBIAS	KGE
PTE FERROCARRIL	Río Opón	0.43	0.33	24.6	0.46
PTE SOGAMOSO	Río Sogamoso	0.65	0.56	-8	0.78
AYACUCHO	Río La Colorada	0.23	0.2	17.3	0.29

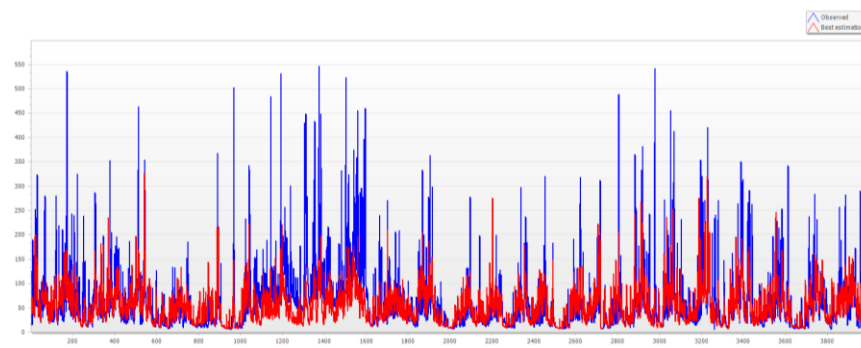
Estos resultados hacen evidente la necesidad de una exploración más detallada del espacio parametral que se puede dar con un incremento en el número de simulaciones o con la implementación de un algoritmo de calibración evolutivo cuyo avance entre generaciones se dé intencionalmente en la selección de parámetros que permitan un mejor ajuste de las series observadas y simuladas.



a) Resultados en la estación PTE FERROCARRIL, río Opón.



b) Resultados en la estación PTE SOGAMOSO, río Sogamoso.



c) Resultados en la estación AYACUCHO, río La Colorada.

Figura 2.29 Hidrógrafas observadas y simuladas en las estaciones analizadas

Calibración y validación

Posterior al proceso de análisis de sensibilidad paramétrica se llevó a cabo el ajuste automático de los parámetros, pero esta vez haciendo uso del algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) en los rangos paramétricos previamente definidos, con el fin de identificar los factores de calibración relativa y los valores absolutos de los parámetros que hacen que los modelos reproduzcan acertadamente los procesos hidrológicos en las cuencas estudiadas. Para esta etapa se incluyeron adicionales a las estaciones utilizadas en el análisis de sensibilidad, las estaciones EL TABLAZO y PUENTE COMUNA para su calibración escalonada con las demás estaciones en la SZH del río Sogamoso.

Para cumplir el objetivo de ajuste de los parámetros, se definió un número de simulaciones por iteración con base en el desempeño alcanzado por los modelos en las etapas previas y se buscó alcanzar por lo menos 50 iteraciones, de modo que el algoritmo PSO pudiese mejorar en estas iteraciones los resultados producto del muestreo aleatorio. Para cada conjunto de subcuencas objeto de calibración se definieron las simulaciones presentadas en la Tabla 2.13

Tabla 2.13 Simulaciones planteadas para la calibración

Estación	Simulaciones	Iteraciones	Total simulaciones	Observación
Pte Sogamoso	65	50	3250	Realizar una búsqueda general complementaria a la realizada con las simulaciones semi-manuales y refinar los valores paramétricos
Tablazo	50	50	2500	
Pte Comuna	60	50	3000	
Pte Ferrocarril	50	50	2500	
Ayacucho	65	50	3250	

El proceso de calibración llevado a cabo en la SZH del Río Sogamoso fue realizado de manera escalonada por bloques de subcuencas. En primer lugar, se realizó el ajuste en las subcuencas que drenan hasta la estación EL TABLAZO y paralelamente se realizó el ajuste de los parámetros para el bloque del río Chucurí (hasta la estación PTE COMUNA). Seguidamente, fijando los parámetros encontrados para los anteriores bloques, se realizó la calibración en la estación PTE SOGAMOSO. Finalmente, se fijaron los parámetros encontrados en los 3 bloques de calibración y se realizó la transferencia hacia las subcuencas aguas abajo de la estación PTE SOGAMOSO, para así obtener los resultados en la SZH.

En cuanto a la SZH del río Opón se realizó la calibración en paralelo de los bloques de subcuencas que drenan hasta las estaciones PTE FERROCARRIL y AYACUCHO. Una vez finalizado el proceso de calibración se fijaron los parámetros encontrados y se transfirieron hacia las subzonas no instrumentadas para obtener los resultados de la SZH.

Posterior al proceso de calibración llevado a cabo con el algoritmo PSO, en el que se llegó a los conjuntos de parámetros que generaron un mejor desempeño de los modelos a través de la métrica de calibración KGE, se revisó la lógica de los parámetros obtenidos y su incidencia en los resultados de la modelación. Los parámetros encontrados son presentados en la Tabla 2.14.

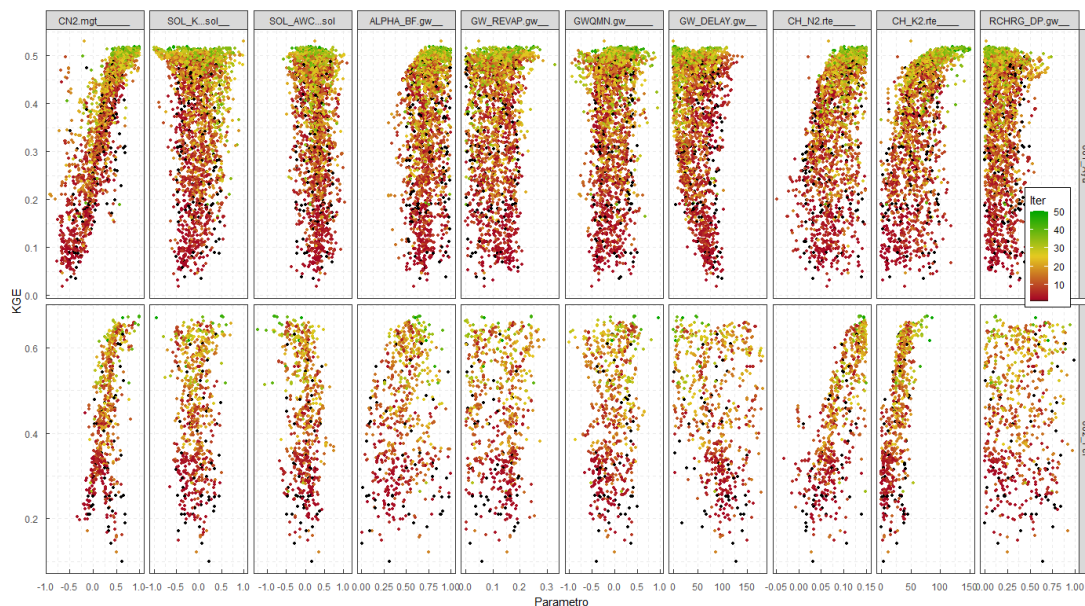
Tabla 2.14 Valores de los parámetros ajustados

Parámetro	PTE FERROCARRIL	AYACUCHO	PTE SOGAMOSO	EL TABLAZO	PTE COMUNA
CN	-0.380	-0.209	-0.042	-0.157	-0.341
SOLK	0.333	0.279	-0.119	-0.112	0.331
AWC	0.000	0.371	0.102	0.147	-0.258
AlphaBf	0.957	0.719	0.486	0.717	0.994
GWrevap	-0.024	0.027	0.196	0.211	0.009
GWQMN	-0.187	0.440	0.208	-0.045	-0.195
GWdelay	1.000	0.512	1.21	2.158	0.755
CH_N	0.140	0.105	0.13	0.044	0.091
CH_K	31.222	68.98	42.97	0.004	31.869
Rchrg DP	0.050	0.016	0.138	0.031	0.017

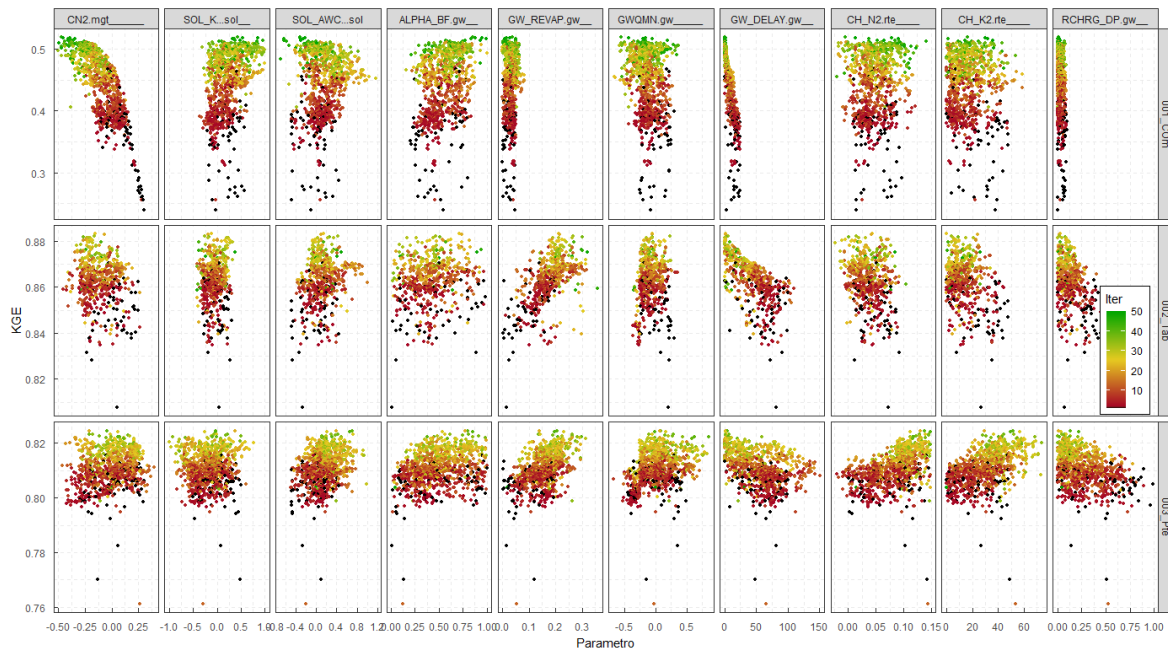
El parámetro que mostró mayor sensibilidad en el proceso de calibración fue el CN, por lo que los resultados que se obtuvieron en las diferentes simulaciones estuvieron sujetos al incremento o reducción de este parámetro. El CN es asignado automáticamente a las subcuencas con base en la información de cobertura de la tierra y de los suelos. Sin embargo, en general se apreció que dicha asignación al estar influenciada por la pendiente del terreno, en zonas muy planas/altas se subestimaba significativamente. Lo anterior justifica los incrementos altos en los valores ajustados de CN en algunas subzonas.

Por otra parte, los parámetros asociados al flujo en el subsuelo y a la generación del flujo base, los cuales son asignados arbitrariamente por el modelo, también mostraron sensibilidad y en general distaron en gran medida de los parámetros que SWAT utiliza por defecto. Lo anteriormente descrito puede verse en la Figura 2.30 la cual muestra el avance del PSO a través de las iteraciones y las mejoras que se obtuvieron en la función objetivo.

Los parámetros presentados en la Tabla 2.14 fueron fijados y se realizaron las simulaciones que permitieron obtener las series en la totalidad de las estaciones para el periodo 1983-2019. Teniendo en cuenta que no todas las series de caudal observado tenían esta longitud, se debe contemplar las limitaciones asociadas a los datos generados fuera de los periodos observados.



a) *Desempeño de las simulaciones en las estaciones de la SZH del río Opón*



b) *Desempeño de las simulaciones en las estaciones de la SZH del río Sogamoso*

Figura 2.30 Dotty plots de la calibración con PSO

Pese a los esfuerzos realizados por obtener una mejor calibración en la estación PTE COMUNA, no fue posible encontrar una solución paramétrica. Si bien algunos de los parámetros muestran alta sensibilidad, el ajuste de estos no guía la simulación hacia resultados satisfactorios. Con base en esto, se realizó un análisis de la precipitación reportada por la estación pluviométrica SAN VICENTE en la cuenca del río Chucurí y se evaluó la correlación de esta con la serie de caudal reportada en la estación PTE COMUNA, encontrándose que el coeficiente de correlación es inferior a 0.3 y, además no se aprecia que la serie de caudales responda a los pulsos de precipitación. Lo anterior es una señal que el problema puede encontrarse en alguna de las series de entrada a la modelación (precipitación o caudal).

2.3.2. Desempeño del modelo, validación y evaluación diagnóstica de las simulaciones

El desempeño del modelo se evalúa a través de la evaluación de métricas y en combinación con gráficas para diagnosticar el comportamiento alcanzado por el modelo. Esto se realiza para el periodo de calibración y de manera separada para el periodo de validación, resaltando que ciertas estaciones de caudal no tienen registros en ciertos periodos. Primero se hace una evaluación general

a escalas mensual y diaria, y posteriormente se hace una evaluación detalla que explique el resultado general en cada estación.

2.3.2.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

La Tabla 2.15 muestra el desempeño alcanzado a nivel mensual para calibración, expresado a través de varias métricas donde se puede ver un comportamiento variado (en la Figura 2.31 se muestra la ubicación de las estaciones con el desempeño expresado en términos del KGE). En la Tabla 2.16 se pueden ver los resultados para el periodo de validación. Se puede ver que hay resultados aceptables pero insatisfactorios y también hay algunos satisfactorios, pero para la estación San Rafael se encontraron resultados clasificados como buenos (Moriasi, y otros, 2007). Se debe resaltar que el sesgo en prácticamente todas las estaciones se encuentra dentro del rango de 30% de sub o sobreestimación, lo cual garantiza una estimación a nivel anual multianual muy parecida a la reportada por las estaciones de caudal más la estimación en puntos no instrumentados. Se resalta también que a nivel mensual la correspondencia temporal (expresada a través de coeficiente de determinación, es aceptable y en algunos casos buena; lo anterior permite confiar en la variación intraanual de las simulaciones. De igual manera, la relación de varianzas también es cercana a la unidad en varios casos, solo siendo la estación Tamarindo la que presenta una gran desviación.

Tabla 2.15 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de calibración

Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \sigma_s / \sigma_o$
EL HOYO [23197410]	0.37	0.69	9.90	-11.40	0.56	1.14
SAN RAFAEL [23197370]	0.71	0.81	23.01	-5.40	0.79	1.15
ANGOSTURAS [23197400] *	0.42	0.62	16.72	6.80	0.69	1.27
PUENTE SARDINAS - AUT	0.20	0.59	1.84	-27.50	0.57	0.82
PUENTE PANEGA [23197270]	0.26	0.61	1.01	16.20	0.60	1.29
CHOCOA LA [23187040]	-0.02	0.25	4.33	-53.60	0.46	0.55
TAMARINDO [23187240]	-0.57	0.13	0.96	47.30	0.57	1.63
CAFE MADRID [23197290]	0.68	0.77	4.10	4.80	0.78	1.19
COLOMBIA [23197680]	0.90	0.92	1.06	-1.90	0.91	1.16
MAJADAS - AUT [23197700]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PALOGORDO - AUT [23197690]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESPERANZA LA [23197460]	-0.39	0.46	0.45	-21.90	0.26	1.12

Tabla 2.16 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de validación



Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \sigma_s/\sigma_o$
EL HOYO [23197410]	0.40	0.67	10.41	-8.00	0.62	1.23
SAN RAFAEL [23197370]	0.70	0.84	29.56	4.70	0.74	1.07
ANGOSTURAS [23197400] ¹	-0.06	0.27	19.21	15.30	0.78	1.75
PUENTE SARDINAS - AUT	0.53	0.76	1.38	-15.50	0.67	1.01
PUENTE PANEGA [23197270]	0.64	0.74	0.96	10.70	0.78	1.15
CHOCOA LA [23187040]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TAMARINDO [23187240]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CAFE MADRID [23197290]	0.71	0.83	4.64	-3.60	0.72	1.15
COLOMBIA [23197680]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MAJADAS - AUT [23197700]	0.74	0.59	4.06	-14.10	0.85	0.62
PALOGORDO - AUT [23197690]	-0.33	0.42	2.13	-44.10	0.60	0.66
ESPERANZA LA [23197460] ¹	-3.06	-0.02	0.39	-25.10	0.35	2.30

¹ La cantidad de datos con los que se calculan las métricas para estas estaciones es bastante reducida en el periodo de validación.

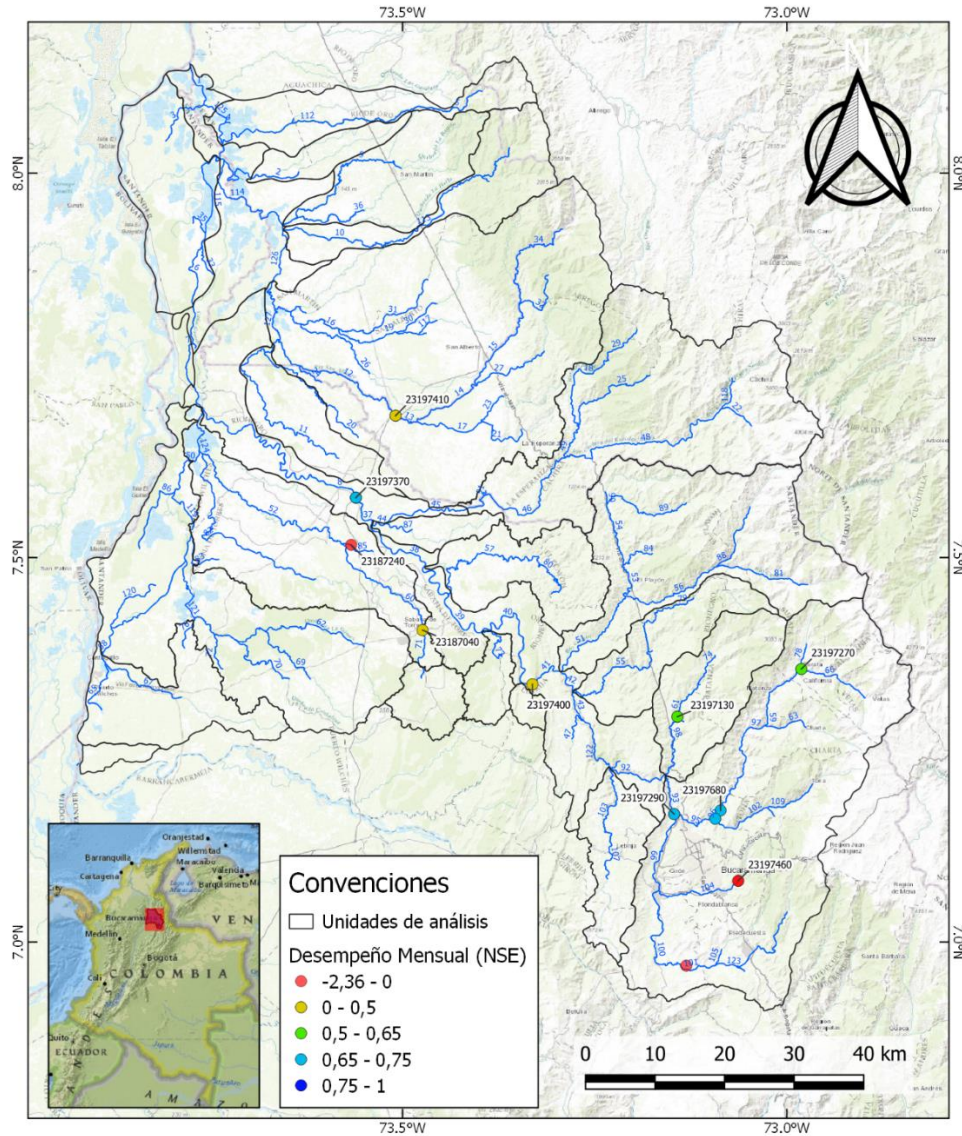


Figura 2.31 Desempeño de los caudales a escala mensual

Igualmente, para el periodo de validación se encontraron desempeños mejores en varias estaciones, mientras que otras desmejoraron. Los desempeños en las estaciones de Puente Sardinas y Puente Panega son satisfactorios y para San Rafael y Majadas son buenos y muy cercanos a muy buenos, de acuerdo con Moriasi y otros (2007). Se debe resaltar que el sesgo en casi todas las estaciones es menor al 30% lo cual es muy bueno en relación con la estimación del caudal anual multianual (se resalta de Puente Sardinas que para este periodo de tiempo se sigue presentando subestimación, es menor que para calibración, pero su correspondencia temporal es bastante alta). Sin embargo, las simulaciones en muchas de las estaciones a nivel mensual no tienen una varianza similar a la

observada, en parte por los promedios generados para hallar las series a escala mensual. A pesar de esto, la correlación temporal es alta en la mayoría de las estaciones evidenciando que el régimen estacional se encuentra bien representado en las simulaciones.

La Tabla 2.17 muestra el desempeño alcanzado a nivel diario, (en la Figura 2.32 se muestra la ubicación de las estaciones con el desempeño expresado en términos del KGE). En la Tabla 2.18 se pueden ver los resultados para el periodo de validación. Las estaciones que se encuentran en la parte alta de la cuenca presentan desempeños aceptables, pero no satisfactorios y en un solo caso es satisfactorio, en dos casos no se alcanzó un desempeño aceptable; en la parte baja los resultados son en general aceptables. Se resalta que solo dos estaciones en toda la cuenca tienen un sesgo significativo entre las simulaciones y las observaciones (superiores al 30%), y pertenecen a estaciones con las áreas de drenaje pequeña lo que dificulta la medición de caudal y limita la posibilidad que existan pluviómetros dentro de sus límites. El sesgo de la variabilidad (α), se encuentra acotado dentro de rangos aceptables, no mayores al 30%. Sin embargo, la correlación temporal no es alta a excepción de una estación a esta escala temporal, y una posible razón es la estimación de los campos de lluvia que pueden no haber registrado lluvias localizadas en ciertas subcuencas de la subzona en días específicos.

Tabla 2.17 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de calibración

Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \sigma_s / \sigma_o$
EL HOYO [23197410]	0.23	0.53	18.18	-10.80	0.32	0.87
SAN RAFAEL [23197370]	0.50	0.72	43.97	-5.70	0.54	0.93
ANGOSTURAS [23197400] *	0.31	0.67	26.24	5.10	0.47	1.08
PUENTE SARDINAS - AUT	0.11	0.48	2.65	-27.70	0.36	0.82
PUENTE PANEGA [23197270]	0.35	0.66	1.30	12.10	0.47	1.09
CHOCOA LA [23187040]	0.08	0.05	7.23	-54.20	0.24	0.40
TAMARINDO [23187240]	-0.03	0.31	1.92	44.30	0.23	0.94
CAFE MADRID [23197290]	0.47	0.74	6.76	4.70	0.57	1.08
COLOMBIA [23197680]	0.72	0.85	2.20	-2.20	0.74	1.07
MAJADAS - AUT [23197700]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PALOGORDO - AUT [23197690]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESPERANZA LA [23197460]	-0.23	0.41	0.56	-21.80	0.20	0.98

Tabla 2.18 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de validación

Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \sigma_s / \sigma_o$
EL HOYO [23197410]	0.24	0.61	18.31	-7.30	0.38	0.97
SAN RAFAEL [23197370]	0.52	0.72	51.59	4.30	0.55	0.90
ANGOSTURAS [23197400] ²	0.17	0.52	24.19	12.00	0.62	1.50
PUENTE SARDINAS - AUT	0.27	0.63	2.21	-16.80	0.45	1.04
PUENTE PANEGA [23197270]	0.58	0.78	1.32	8.70	0.66	1.05
CHOCOA LA [23187040]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TAMARINDO [23187240]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CAFE MADRID [23197290]	0.57	0.71	7.72	-4.40	0.59	0.99
COLOMBIA [23197680]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MAJADAS - AUT [23197700]	0.63	0.51	6.12	-14.90	0.73	0.56
PALOGORDO - AUT [23197690]	-0.09	0.25	2.81	-44.40	0.36	0.53
ESPERANZA LA [23197460] ²	-2.67	0.06	0.44	-28.00	0.28	2.35

Para el periodo de validación se registra una mejora de los desempeños a escala diaria. Esto puede deberse a una mayor cantidad de mediciones pluviométricas para el periodo posterior al año 2001 como se evidencio en los análisis de disponibilidad de datos. Los sesgos entre las simulaciones y las observaciones también se mantienen bajos (menores al 30% absoluto). En varias estaciones la correlación temporal se encuentra bien representada con coeficientes mayores a 0.5 y uno cercano a 0.7.

A continuación, se detallan las hidrógrafas simuladas y observadas en algunas estaciones para diagnosticar las fortalezas y valencias de la modelación. Esto incluye también el análisis de las Curvas de Duración de Caudales (CDC) que permiten observar si los caudales bajos, medios y altos están siendo bien representados.

² La cantidad de datos con los que se calculan las métricas para estas estaciones es bastante reducida en el periodo de validación.

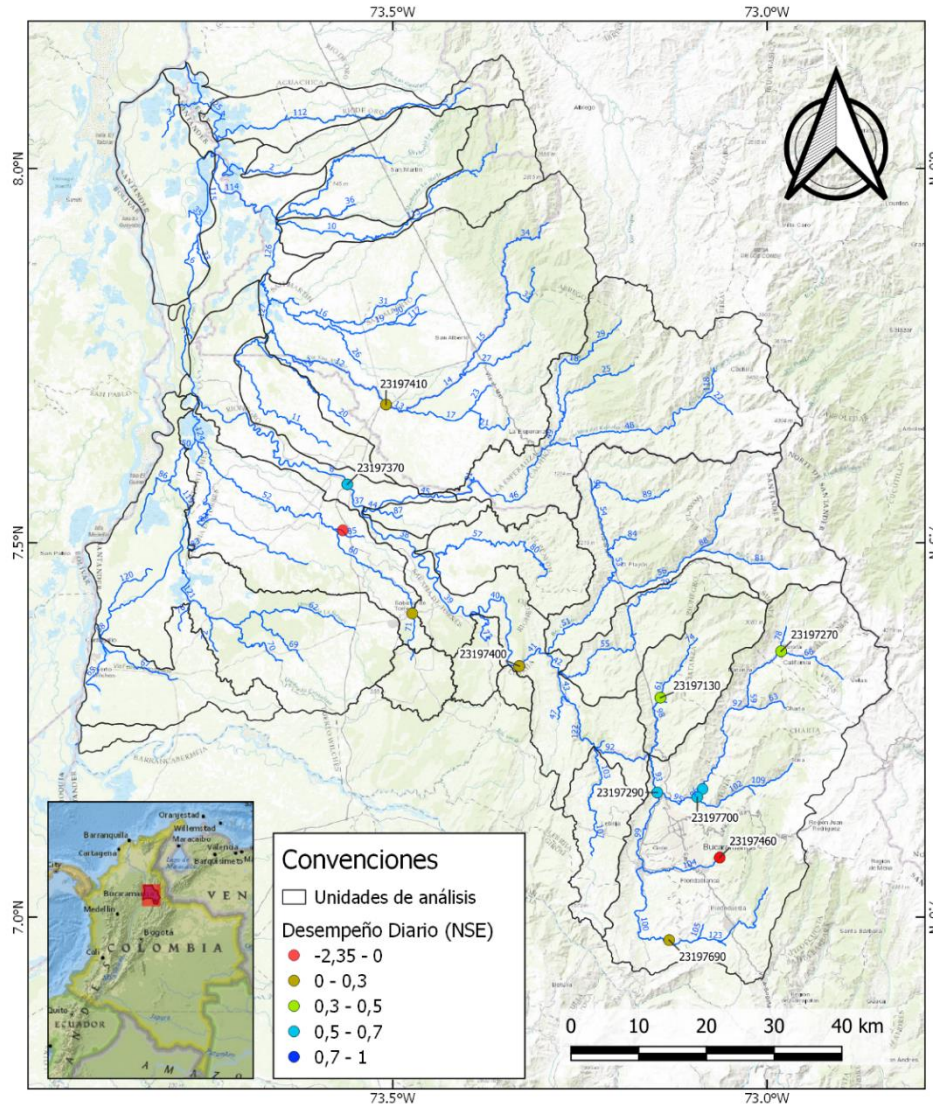


Figura 2.32 Desempeño de los caudales a escala diaria

Majadas - Aut [23197700]

Esta estación se destinó para validación del modelo debido a periodo en el cual cuenta con registros y a su cercanía con la estación Colombia [23197860]. Se resalta que a pesar de las subestimaciones presentes en el fenómeno de la Niña del 2010-2011, los caudales diarios se reproducen de buena manera. El sesgo se da principalmente por la temporada mencionada, pero la correlación temporal es alta de acuerdo con Moriasi y otros (2007). La relación de variabilidades (α), se encuentra alejada del valor de 1 principalmente por la subestimación en el periodo mencionado. Las subestimaciones de las simulaciones en esa temporada invernal pueden deberse a dos razones:

primero al inevitable suavizamiento de los campos de precipitación producto de realizar la interpolación de datos pluviométricos, y la segunda a una sobreestimación del caudal observado producto de la incertidumbre propia de la curva de gasto de la estación de caudal.

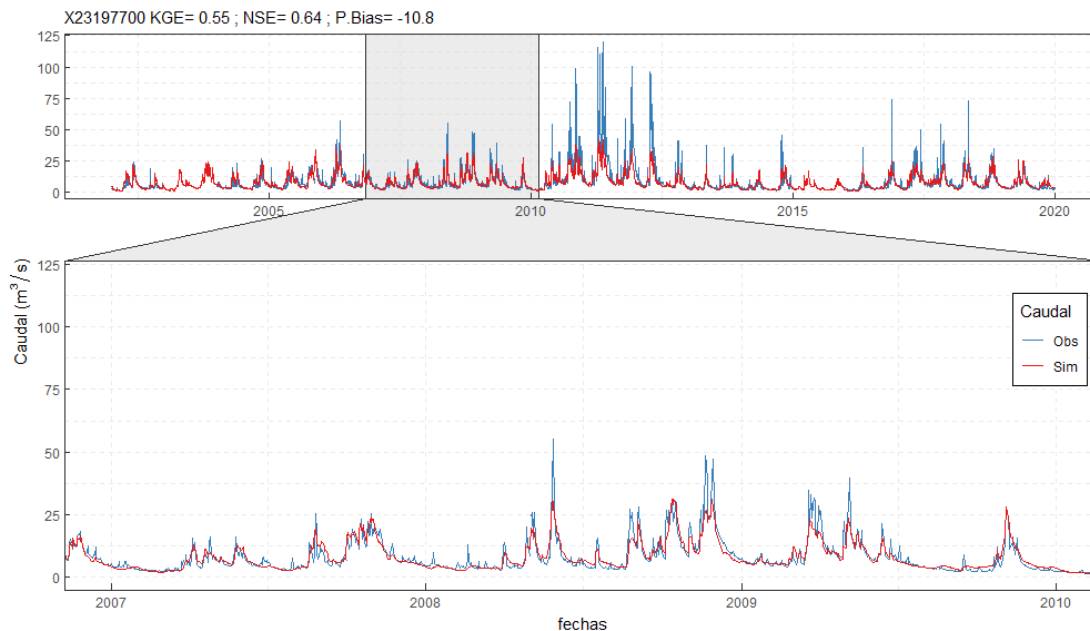


Figura 2.33 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Majadas a escala diaria

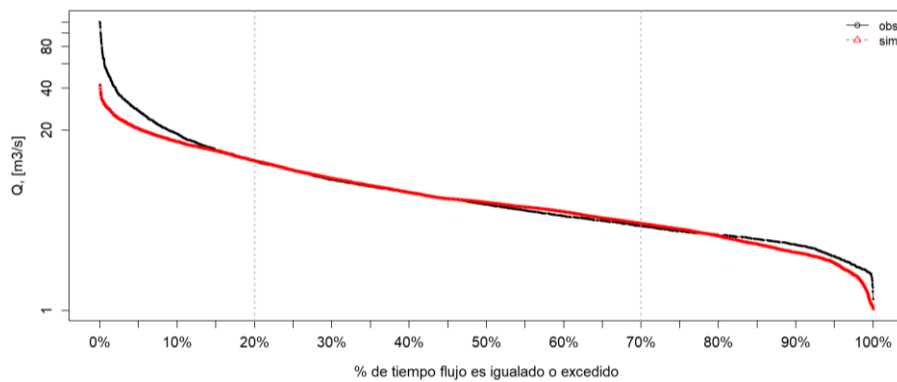


Figura 2.34 CDC diarios para la estación Majadas en el periodo posterior a 2001

De igual manera, la Figura 2.34 muestra que las simulaciones tienen una buena correspondencia para casi todos los rangos de caudal. Solo para aquellos caudales superiores al 10% del tiempo se evidencia la subestimación.

Para corroborar que la precipitación ingresada al modelo se encuentra estimada de manera acorde se comparó contra el producto CHIRPS-IRE desarrollado por la subdirección de meteorología. Esto

se realizó en la cuenca aferente a la estación Majadas y en otras estaciones, comparando los estimados de manera agregada debido a que las cuencas no son de gran tamaño (menores a 200 km²). En la Figura 2.35, se puede ver la comparación de la interpolación con IDW contra la precipitación de CHIRPS-IRE a nivel mensual. Se aprecia que existe una alta correspondencia entre los dos productos de precipitación, con un sesgo absoluto menor al 5% estando CHIRPS un poco por encima, y la correlación temporal es también muy alta. Estos resultados resaltan la consistencia de la estimación realizada con el método de IDW.

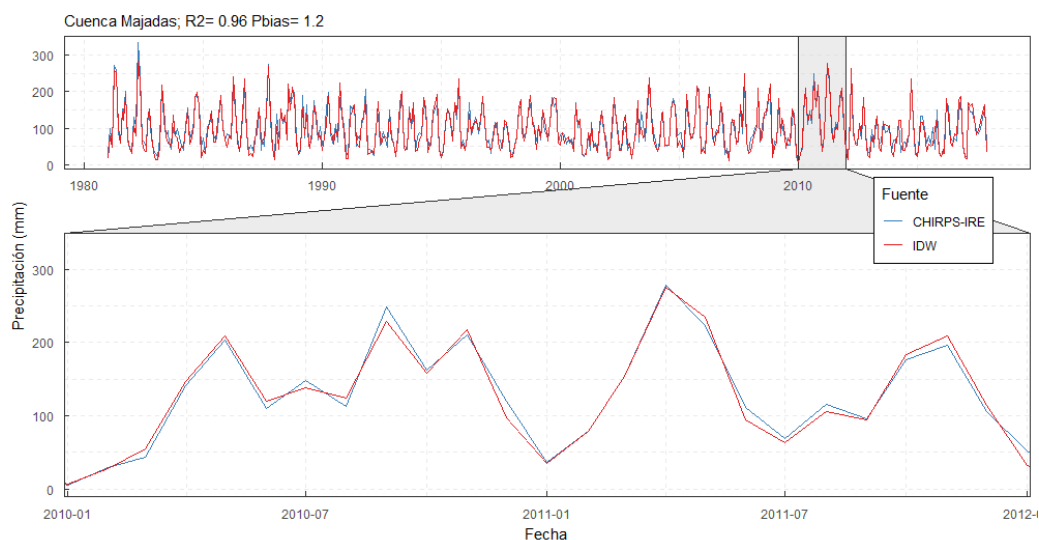


Figura 2.35 Comparación de las precipitaciones estimadas en la cuenca aferente a la estación Majadas

La Esperanza [23197460]

Esta estación drena una subcuenca de aproximadamente 40 km² en la zona oriental de la SZH el río Lebrija. El desempeño del modelo en la estación es bajo en la correspondencia temporal, pero tiene un sesgo bajo. Al observar la Figura 2.36, se puede ver que los datos observados no tienen una estacionalidad bimodal y desde el año 1994 hacia adelante y es muy claro que no tiene la reducción de caudales esperada para el periodo de sequía del año de 1997 (IDEAM, 2019). En la revisión de análisis de homogeneidad, la estación La Esperanza cumple con algunas de las pruebas de homogeneidad, pero se debe resaltar que tiene varios vacíos y tendencias que no concuerdan con la hidrología de la zona. La cantidad de datos con los que se pudo calcular las métricas para el periodo de validación (posterior al 2001), fue muy baja con lo cual se afecta el valor y se da un concepto sesgado del desempeño del modelo. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda mirar

los resultados de bajo desempeño en esta estación con cautela debido a las dudas que existen sobre los registros observados.

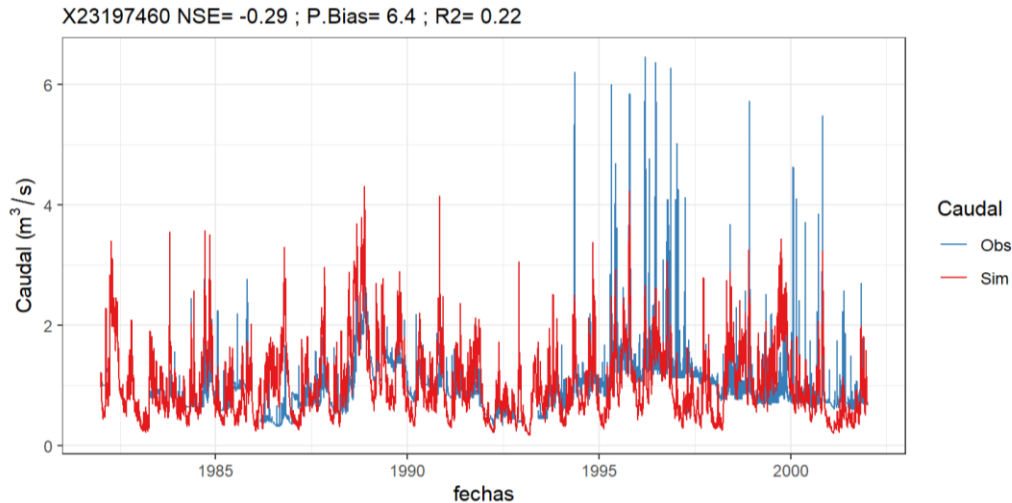


Figura 2.36 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación La Esperanza a escala diaria

Palogordo - Aut [23197690]

Esta estación también se dedicó exclusivamente al periodo de validación por la disponibilidad de datos y a pesar de que no paso las pruebas de homogeneidad, debido a su importante posición dentro de la parte alta de la SZH. Por tanto, es otra estación “ciega” al ajuste de parámetros. Se ve en la Figura 2.37, que durante el periodo comprendido del 2004 al 2009 la serie observada no presenta periodos de estiaje como si se dan para finales de 2009 y en los valles del 2010 y 2011. Lo anterior no concuerda con lo reportado por la simulación, pero si se observa una mejor correspondencia entre los caudales simulados y observados para la temporada invernal del 2010-2011 siendo que las subcuencas que drenan a esta estación no fueron calibradas con sus registros. Esto conlleva a considerar que los caudales observados si tienen deficiencias en su estimación sobre todo para los primeros años de registro, lo que en parte explica el bajo desempeño hallado.

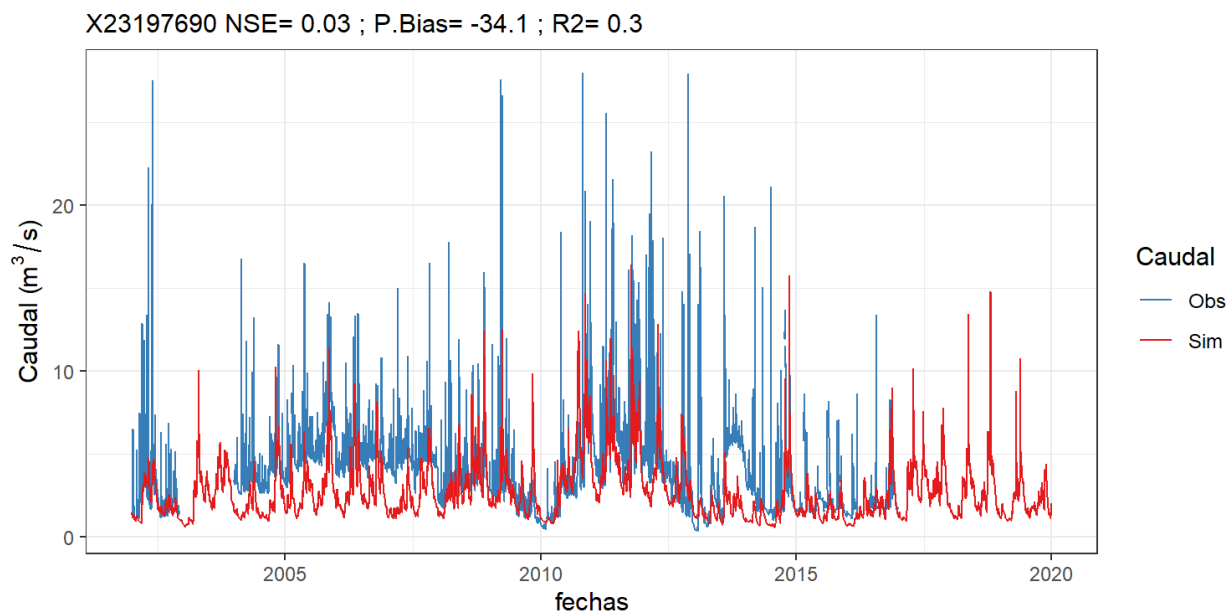


Figura 2.37 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Palogordo a escala diaria

También se debe resaltar que las subcuencas que drenan hacia la estación también se encuentran poco instrumentadas. Sobre todo, en la parte alta hacia y el único pluviómetro al interior del área drenante se encuentra muy cercano a la salida en el municipio de Piedecuesta.

Angosturas [23197400]

Esta estación se dedicó como punto “ciego” a la calibración a pesar que la mayoría de sus registros se encuentran antes del año 2001. Esto se debió a que sus registros están bastante fragmentados y no pasaron completamente las pruebas de homogeneidad. Sin embargo, las simulaciones mantienen la variación estacional del caudal, pero tiende a sobreestimar los caudales en las temporadas lluviosas (Figura 2.38). Estas deficiencias no se registran en la estación aguas abajo San Rafael, lo cual puede ser un indicio de errores en los caudales observados en la estación Angosturas, ya que el área que drena a esta estación fue también calibrada. Para el periodo de validación se registra a nivel mensual un valor negativo del coeficiente NSE, esto se da por la poca cantidad de datos con la que se puede calcular la métrica después del año 2001.

Con respecto a los datos diarios, el régimen de caudales simulados representa bien la parte media y baja (Figura 2.39). No obstante, tiende a sobreestimar los caudales medio altos y altos, al igual que los extremos bajos. Esto también se da por la no calibración de los parámetros de las subcuencas que drenan hacia esta estación, por las razones ya mencionadas.

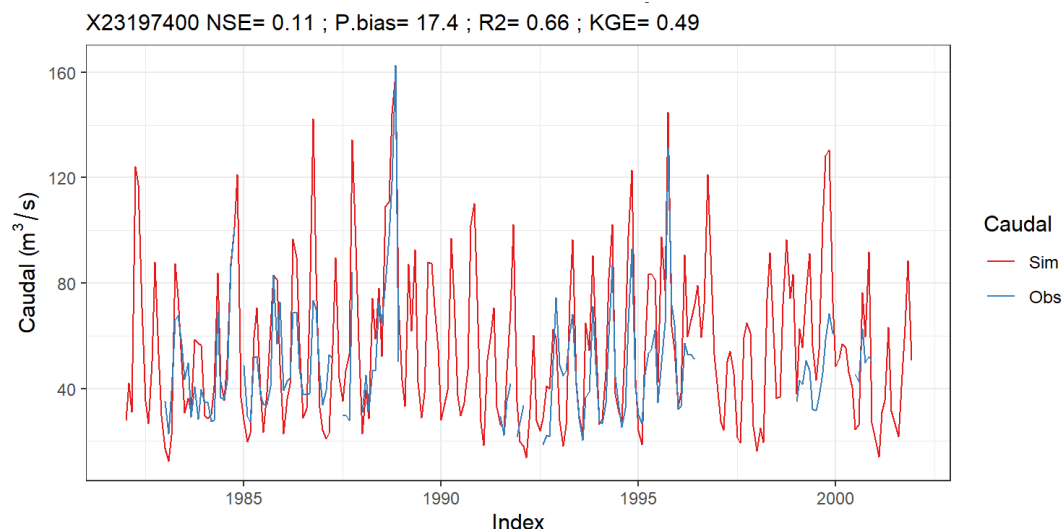


Figura 2.38 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Angosturas a escala mensual

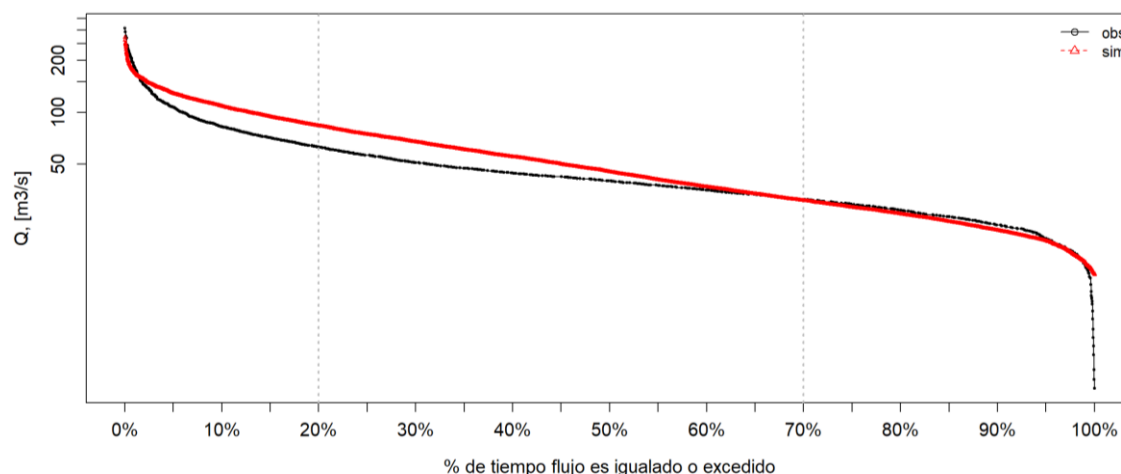


Figura 2.39 CDC diarios para la estación Angosturas en el periodo previo a 2001

A pesar de lo señalado, se debe resaltar que los resultados para este punto “ciego” a la calibración son bastante buenos.

Puente Sardinias [23197130]

La Figura 2.40 muestra que las hidrógrafas simuladas en esta estación siguen la estacionalidad de los caudales. El valor del coeficiente de correlación corrobora esta afirmación, a pesar que su valor no es alto. Al detallar las curvas de recesión se puede apreciar que se subestiman los caudales bajos, lo que se puede corroborar a través de la Figura 2.41, donde se ve que el mayor sesgo se presenta en los caudales de bajo valor.

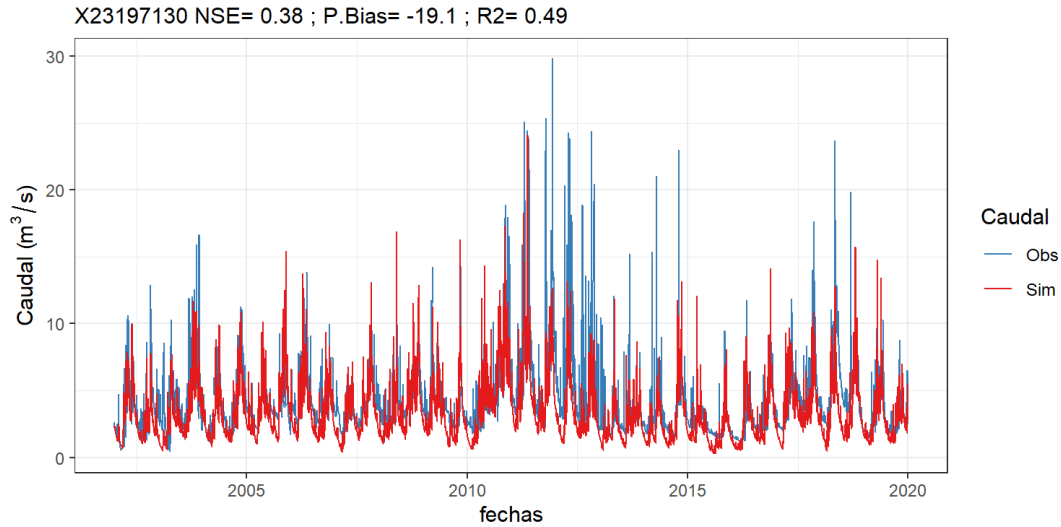


Figura 2.40 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Puente Sardinias a escala diaria

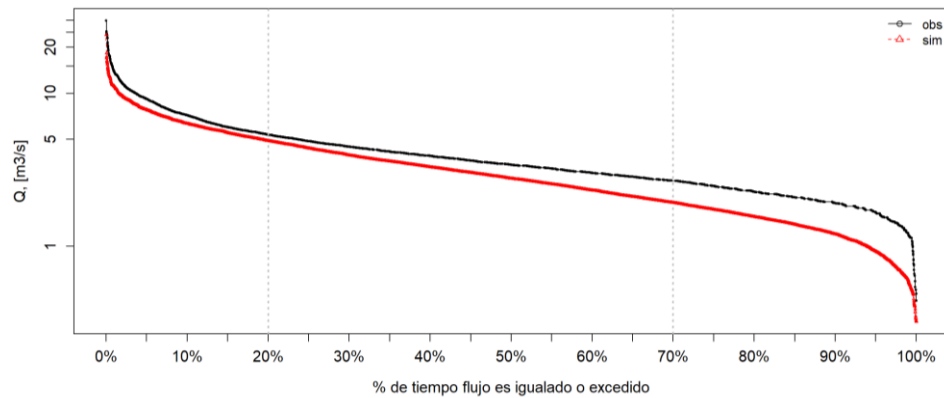


Figura 2.41 CDC diarios para la estación Puente Sardinias en el periodo posterior a 2001

La subestimación se puede deber a una baja precipitación en las subcuencas que drenan hacia esta estación, y al suavizamiento del campo de lluvia producido por la interpolación. En la Figura 2.42 se ve que dentro de la subcuenca no existe ningún pluviómetro que permita estimar de mejor manera la precipitación en dicho territorio y tampoco permita validar los estimados del campo de precipitación. A pesar que la calibración del modelo no debe y no logra corregir estas falencias, se resalta que la estimación de los caudales con el modelo en esta estación son aceptables de acuerdo con Moriasi y otros (2007).

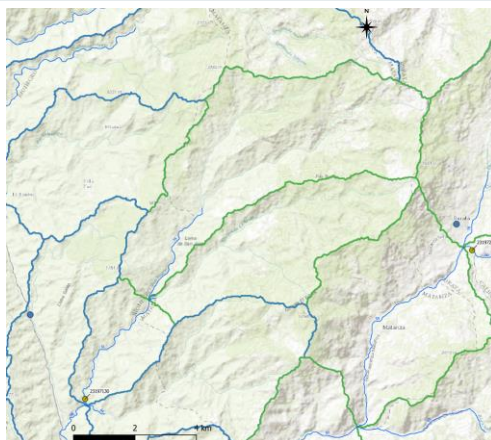


Figura 2.42 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas a las subcuencas drenantes a la estación Puente Sardinas

Igualmente, se corroboró que la precipitación ingresada al modelo de la misma manera que en la estación Majadas. En la *Figura 2.43*, se puede ver la comparación de la interpolación con IDW contra la precipitación de CHIRPS-IRE a nivel mensual. Se aprecia que existe una alta correspondencia entre los dos productos de precipitación, con una subestimación del 7% por parte de la interpolación con IDW, y la correlación temporal es también muy alta. Estos resultados resaltan la consistencia de la estimación realizada con el método de IDW y evidencian que los resultados con sesgo en los caudales tienen su raíz en la subestimación de la precipitación que puede estar presente en la cuenca.

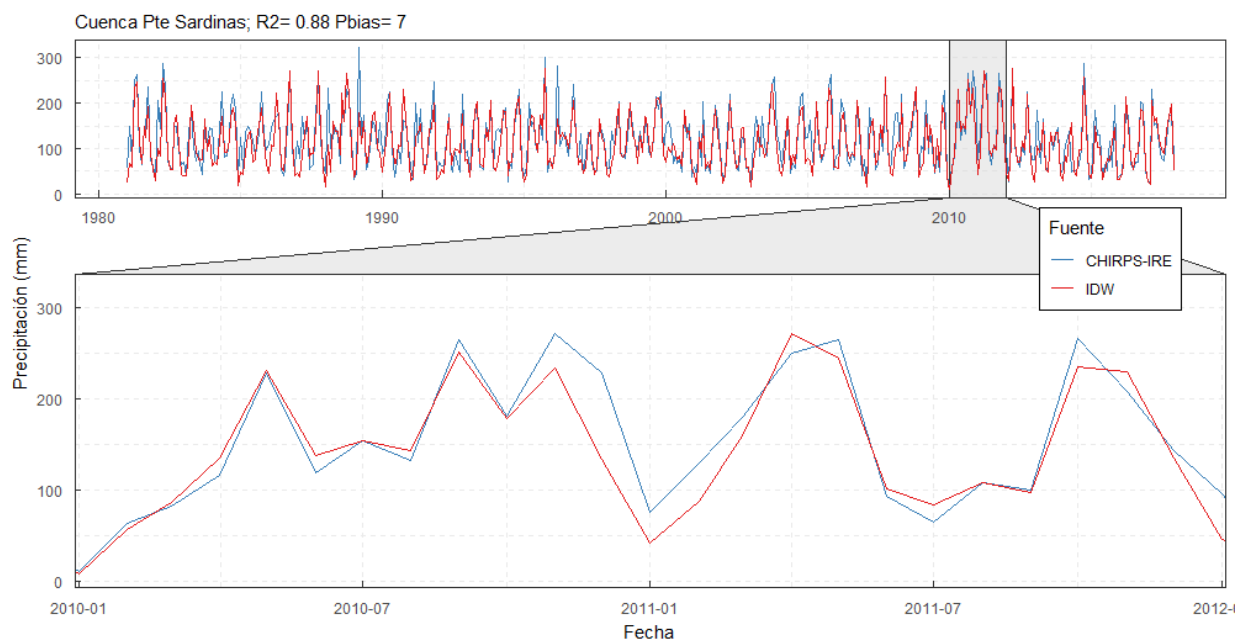


Figura 2.43 Comparación de la precipitación estimada en la cuenca aferente a la estación Puente Sardinas

Café Madrid [23197290]

En esta estación se alcanzó un mejor resultado en el periodo de validación que en calibración probablemente debido a la mayor cantidad de datos pluviométricos que existen sobre el segundo periodo. En la Figura 2.44, se puede ver que existe una leve tendencia a sobreestimar el caudal en las temporadas de lluvias (sobre todo en el periodo desde 1989 hasta 1991). Sin embargo, la temporalidad está bien representada (el R^2 es mayor a 0.7) y la varianza de los caudales simulados es muy parecida a los observados, sobre todo en el periodo de validación (Figura 2.45). En el intervalo de tiempo detallado para el periodo de validación se puede apreciar que en general la simulación está acorde con todos los picos y valles del caudal observados, a excepción de algunos pocos como por ejemplo los del mes de enero y febrero del año 2007. La razón por la que estos picos de caudal no fueron representados es porque en el forzamiento de precipitación no se debieron registrar algunos pulsos localizados de lluvia que pudieron ocurrir en subcuencas no instrumentadas (esto de acuerdo con lo planteado por Arnold y otros (2012)). La certeza sobre la ocurrencia de esos pulsos de lluvia se da porque la transformación de la lluvia a caudal terminó siendo registrada en los caudales observados en la estación.

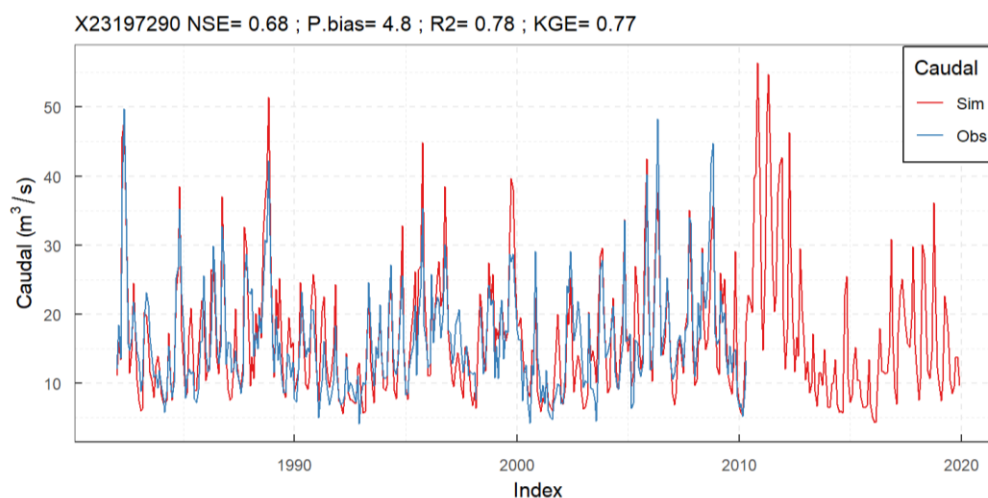


Figura 2.44 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala mensual

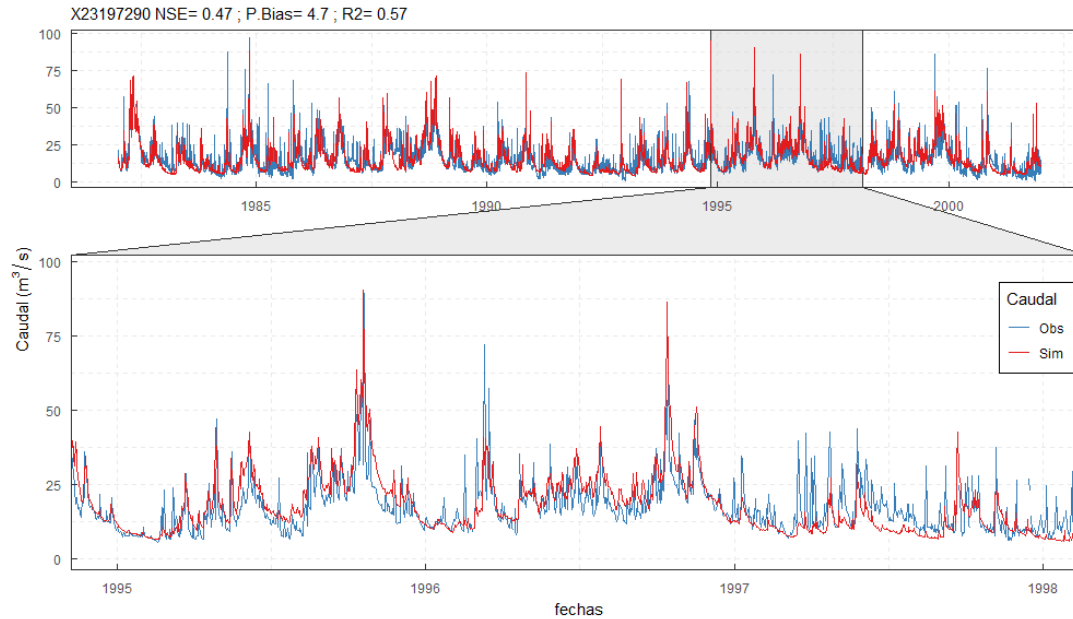


Figura 2.45 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala diaria

En la Figura 2.46, se puede ver que en general el modelo está representando bien los caudales medios y la mayor parte de los caudales altos. En los caudales bajos, si bien tiene una buena correspondencia en casi todos los valores, en la parte más baja se presenta una diferencia que en volumen no es significativa. Sin embargo, se deber resaltar que los resultados mostrados en la figura son a temporales y se debe recordar que el coeficiente de determinación tuvo un valor de 0.57 para el periodo de validación.

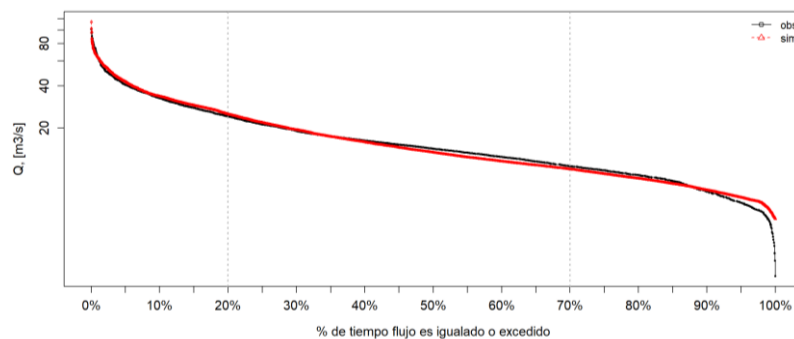


Figura 2.46 CDC diarios para la estación Café Madrid en el periodo posterior a 2001

San Rafael [23197370]

Esta estación acumula el tránsito del agua que se produce en la parte alta y media de la SZH. Tanto a nivel diario como a escala mensual se obtuvieron buenos resultados. En la Figura 2.47 se puede

ver que en general la correspondencia es buena, pero se presentan algunas fallas a nivel diario en periodos cortos de tiempo en algunos picos de caudal quizás también debido a lluvias localizadas en algunas subcuencas no instrumentadas.

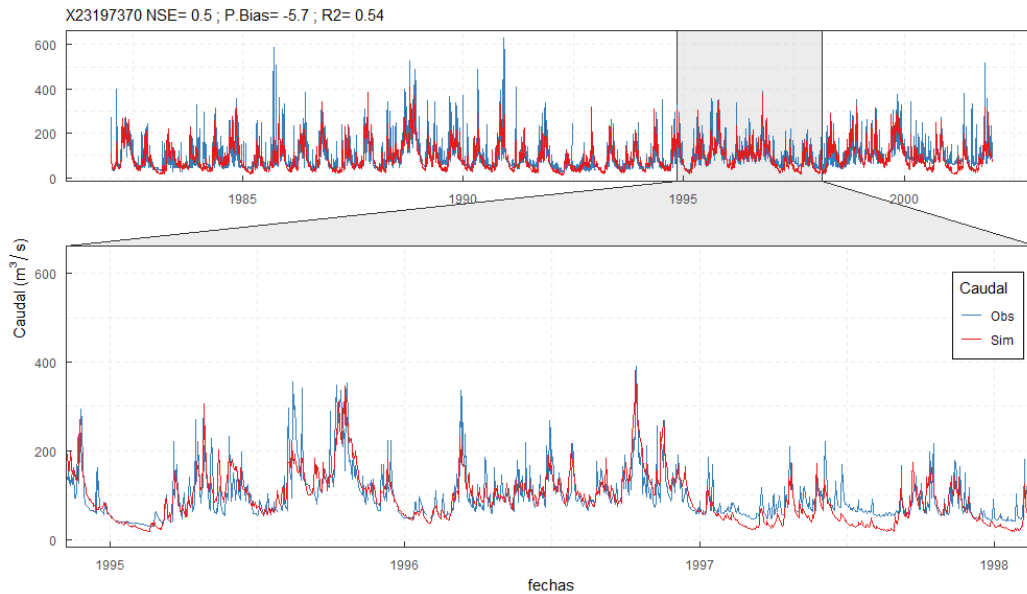


Figura 2.47 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación San Rafael a escala diaria

También se analizó la dispersión de los caudales a nivel diario y mensual para evidenciar posibles sesgos en algunos rangos de caudal. En la Figura 2.48 no se evidencia un sesgo hacia la sobre estimación o subestimación para algún rango y solo se presentan pocos datos que se alejan de manera significativa desde la línea central con pendiente unitaria.

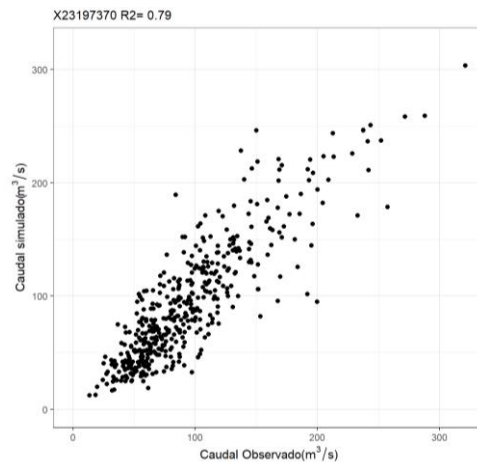


Figura 2.48 Scatter plot de los caudales simulados y observados mensuales para la estación San Rafael posteriores al año 2001

Todos los tipos de gráficas mostradas en esta sección se realizaron para todas las estaciones y se anexan a este documento. Los archivos de salidas del modelo SWAT también se anexan a este documento.

2.3.2.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

En las SZH Opón y Sogamoso, el desempeño de los modelos fue evaluado a través del conjunto de métricas KGE, NSE, PBIAS y la revisión gráfica de las series, esto con el objetivo de tener una evaluación diagnóstica de las simulaciones. Para esto, se consideraron dos etapas de manera independiente, la calibración y la validación según los periodos definidos en el planteamiento del modelo conceptual.

Debido a que los modelos fueron construidos a resolución temporal diaria, la primera evaluación se realizó a esta escala. Posteriormente, teniendo en cuenta que existe literatura que permite clasificar el desempeño de los modelos con base a las métricas obtenidas (Moriassi et al., 2007), se generó la agregación a escala mensual de las series observadas y simuladas para la estimación de las métricas.

En la Tabla 2.19 se presentan los resultados para la calibración diaria en cada una de las estaciones consideradas. En general se obtuvo una mejoría significativa respecto a los resultados obtenidos en la etapa de análisis de la sensibilidad de los parámetros, salvo en la estación PTE SOGAMOSO en la cual, debido al proceso de calibración escalonado, que no se realizó en el primer ejercicio, se tuvo una reducción en las métricas evaluadas. En todas las estaciones se obtuvo valores de NSE superiores a cero, lo que significa que los caudales simulados tienen un desempeño más alto que el de la reproducción de la media de los valores observados.

Tabla 2.19 Métricas periodo de calibración diarias

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.33	0.41	53.76	-18.9	0.36	0.62
Pte Ferrocarril	0.46	0.63	50.43	-15.6	0.51	0.83
Pte Sogamoso	0.64	0.82	152.50	4.3	0.68	1.07
El Tablazo	0.80	0.88	113.50	6.7	0.83	1.03
Pte Comuna	0.13	0.51	11.07	-8.2	0.28	0.91

En cuanto al porcentaje de sesgo (PBIAS) se tiene que este se encuentra en general alrededor del $\pm 15\%$ lo cual es aceptable y satisfactorio. Los resultados en la SZH del río Opón tienden a la

subestimación de los caudales, mientras que en las estimaciones sobre el río Sogamoso tienden a sobreestimar el caudal. El KGE utilizado como métrica de calibración es satisfactorio en la mayoría de las estaciones a excepción de la estación PTE COMUNA en la que el modelo construido no tiene la capacidad de reproducir los caudales observados, subestimándolos en gran medida.

Tras agrupar a resolución mensual los resultados, se obtuvieron las métricas de la Tabla 2.20 para el periodo de calibración. Según los valores de NSE propuestos por Moriasi et al 2007, el desempeño en la mayoría de las estaciones fue satisfactorio ($0.50 < NSE < 0.65$), llegando a ser bueno en la estación PTE FERROCARRIL y muy bueno en la estación EL TABLAZO. Sin embargo, los resultados para las estaciones AYACUCHO y PTE COMUNA son aceptables, pero NO satisfactorios.

No obstante, la métrica KGE seleccionada como función objetivo para la calibración, la cual hace una evaluación holística de las series observadas y simuladas, presentó un valor superior a 0.5 en todas las estaciones a nivel mensual, por lo que en general el desempeño de los modelos fue satisfactorio a esta escala. A excepción de la estación PTE COMUNA, la correlación temporal de las series se encuentra bien representada con coeficientes superiores a 0.5.

Tabla 2.20 Métricas calibración mensuales

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.41	0.56	30.42	-20.3	0.51	0.78
Pte Ferrocarril	0.63	0.80	24.57	-13.6	0.76	1.07
Pte Sogamoso	0.81	0.84	84.33	4.1	0.86	1.20
El Tablazo	0.87	0.90	70.86	6.5	0.90	1.06
Pte Comuna	0.38	0.69	5.12	-7.3	0.58	1.18

Resultados de la validación

Con el fin de corroborar la robustez de los modelos y conjuntos de parámetros encontrados en la etapa de calibración, se realizó la validación con simulaciones en periodos de tiempo no incluidos en la calibración. Los resultados de las métricas de evaluación para el periodo de validación a resolución diaria y mensual son presentados en la Tabla 2.21 y Tabla 2.22 respectivamente.

Tabla 2.21 Métricas validación a escala diaria

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.28	0.28	79.30	-25.3	0.33	0.47



Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Pte Ferrocarril	0.53	0.64	49.42	-16	0.57	0.82
Pte Sogamoso	0.62	0.78	190.52	13.00	0.69	1.07
El Tablazo	0.84	0.85	112.08	11.9	0.88	1.14
Pte Comuna	0.20	0.23	22.65	-16	0.21	0.46

Los resultados de la validación a escala diaria muestran una reducción del KGE de alrededor del 10% en las estaciones de la SZH del río Opón y un aumento de aproximadamente el 6% en las estaciones de la SZH del río Sogamoso. Algo similar ocurre con el NSE solo que para esta métrica se tiene un incremento del 5% en la SZH hidrográfica del río Sogamoso y una reducción del 4% en la SZH del río Opón. Para todas las estaciones el sesgo se mantiene inferior al 30% por lo que los resultados de la modelación pueden considerarse buenos respecto a la estimación del caudal anual multianual.

En lo que respecta a la escala mensual, los resultados presentan una mejora significativa respecto a los resultados obtenidos en la etapa de calibración y respecto a los resultados de la validación diaria. A esta resolución los resultados de la modelación en cuanto al NSE son satisfactorios en todas las estaciones, inclusive en la estación PTE COMUNA, cuyos resultados en la calibración había sido aceptables, pero no satisfactorios. En las estaciones PTE FERROCARRIL, PTE SOGAMOSO, EL TABLAZO y PTE COMUNA son buenos según los criterios de Moriasi et al., (2007). El sesgo en las estaciones se mantiene por debajo del 25 % lo cual se considera satisfactorio y bueno por debajo del 15%. La correlación temporal de las series simuladas y observadas se considera bien representadas con coeficientes de determinación superiores a 0.6 en todas las estaciones.

En cuanto a la métrica de calibración KGE se aprecia un incremento de aproximadamente 9% para la etapa de validación. Con base en las evaluaciones realizadas, se concluye que los resultados obtenidos para este periodo fueron satisfactorios.

Tabla 2.22 Métricas validación mensuales

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.55	0.65	29.22	-20.4	0.64	0.79

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Pte Ferrocarril	0.70	0.77	28.03	-16.8	0.79	0.89
Pte Sogamoso	0.73	0.81	127.92	13.50	0.82	1.09
El Tablazo	0.87	0.82	78.07	13.9	0.96	1.12
Pte Comuna	0.38	0.53	9.22	-19.7	0.45	0.72

Análisis gráfico en las estaciones hidrométricas

En esta sección se detallan las hidrógrafas simuladas y observadas en las estaciones utilizadas para la calibración/validación a escala diaria y mensual. Adicionalmente, se presentan las Curvas de Duración de Caudal (CDQ) para el análisis de la representación de los caudales simulados.

PTE FERROCARRIL (23147020)

La estación 23147020 acumula el flujo que se genera en la parte alta y media de la cuenca del río Opón, pero se encuentra antes de la confluencia con el río La Colorada. En la Figura 2.49 se puede apreciar que existe una leve tendencia a la subestimación de los caudales más altos en el periodo simulado. Lo anterior puede estar relacionado con la baja densidad de estaciones pluviométricas en la cuenca alta y media del río Opón, lo cual sumado al suavizado del campo de precipitación producido por la interpolación realizada se traduce en una precipitación muy baja en las cuencas de modelación. No obstante, otro atributos del régimen de caudal como el régimen bimodal en el periodo intra-anual, caudales medios y el caudal base son bien representados en la simulación, esto es especialmente apreciable en las hidrógrafas de caudales medios.

El diagrama de dispersión entre los caudales observados y los caudales simulados muestran un resultado satisfactorio en caudales de hasta 150 m³/s, cabe resaltar que los caudales altos observados puede que correspondan a extrapolaciones de la curva de calibración de la estación, por lo que puede existir un error asociado a estos.

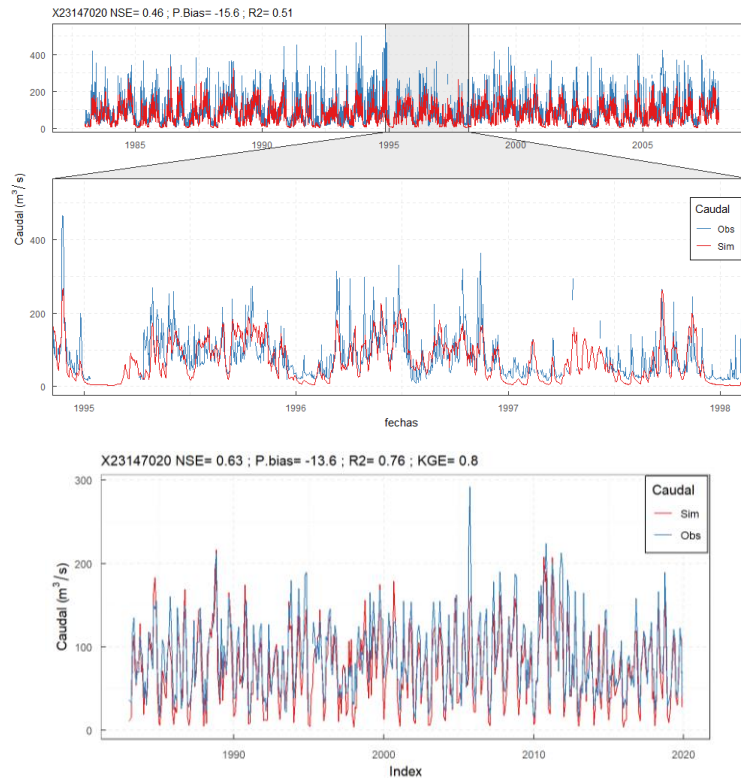


Figura 2.49 Hidrógrafas en la estación 23147020

En cuanto a las CDQ construidas con los caudales diarios observados y simulados para la estación PTE FERROCARRIL se aprecia una buena reproducción de los caudales bajos y medios, y la subestimación de los caudales más altos se empieza a presentar en aquellos que se presentan tan solo un 30% del tiempo, siendo más evidente la subestimación en aquellos que son igualados o excedidos el 15% de tiempo (ver Figura 2.50).

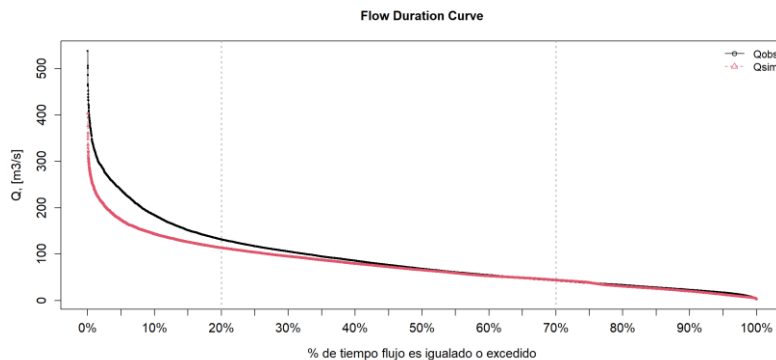


Figura 2.50 CDQ en la estación 23147020

AYACUCHO AUT (23147040)

La estación 23147040 sobre el río La Colorada registra el flujo generado de la parte alta y media de la cuenca de este río hasta antes de su desembocadura en el río Opón. En las hidrógrafas diarias de la Figura 2.51 se visualiza una subestimación generalizada de los caudales. Esta subestimación se hace más evidente en los periodos 1998-2000 y 2010-2012, los cuales corresponden a la ocurrencia del fenómeno ENSO en su fase fría, para los cuales se identificó en la caracterización hidrológica que existe un incremento en las afluencias asociado a un incremento en las lluvias en la SZH del río Opón.

Como es evidente en la Figura 2.51 no en todos los periodos mencionados existe una correlación de la precipitación observada con los caudales observados (p.ej. 1998-2000), esto permite ver que existe una deficiencia en la serie de lluvias generadas mediante la interpolación de los datos medidos en estaciones pluviométricas. Lo anterior hace que los resultados de la simulación no sean los mejores, puesto que el problema no es paramétrico al reproducirse acertadamente otras características del régimen de caudal, sino que el déficit se encuentra en la serie de lluvias ingresadas al modelo.

A partir de las series mensuales es posible observar que existe una buena simulación de los tiempos de ocurrencia y en general del régimen mensual intra-anual en los resultados. Sin embargo, en esta también es evidente el problema de subestimación en los periodos 1998-2000 y 2010-2012. El diagrama de dispersión muestra como para caudales superiores a $110 \text{ m}^3/\text{s}$ se subestima por completo los caudales observados.

En la CDQ se evidenció que los caudales subestimados son los que son igualados o excedidos hasta el 20% del tiempo (ver Figura 2.52). Sin embargo, los caudales inferiores a están siendo estimados satisfactoriamente por el modelo.

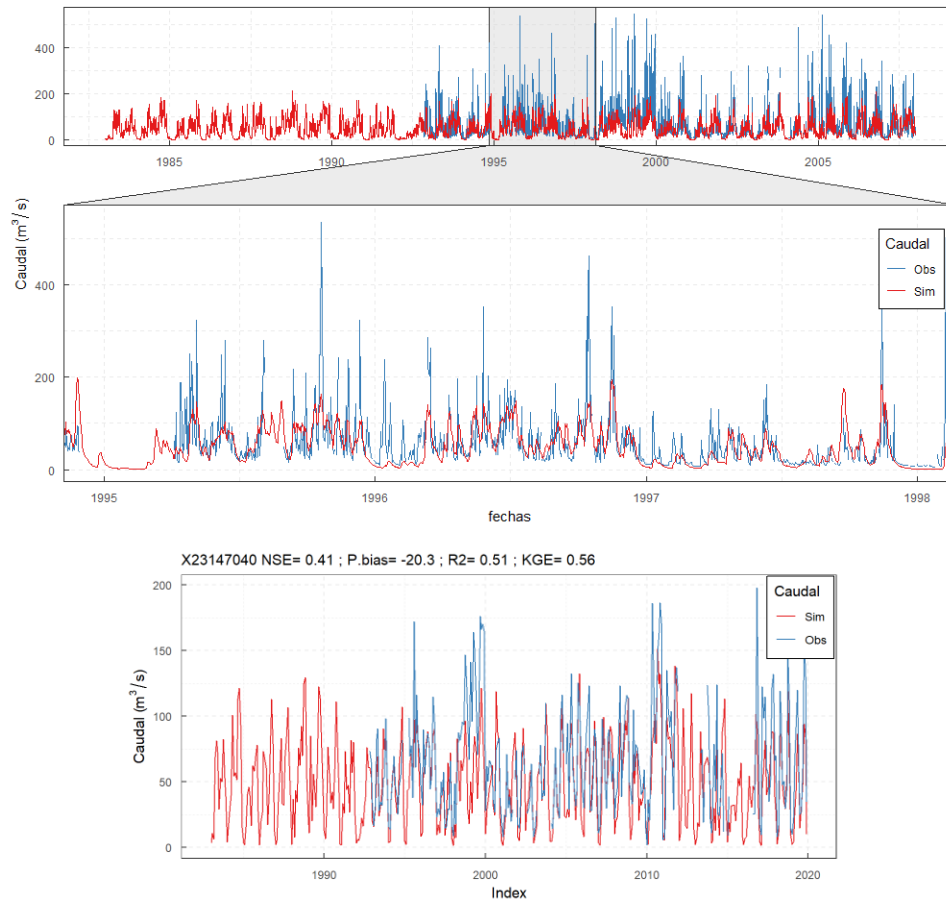


Figura 2.51 Hidrógrafas en la estación 23147040

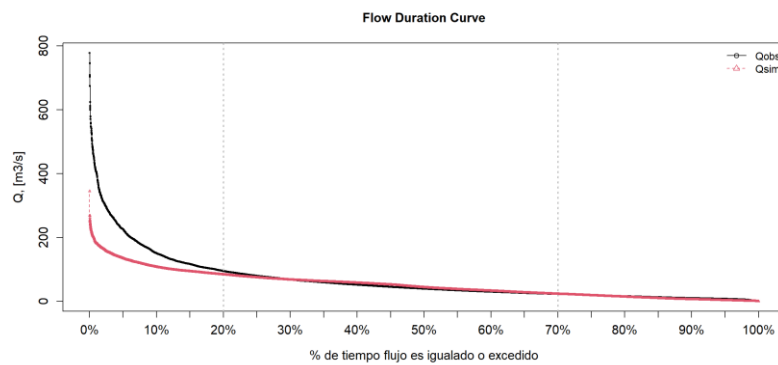


Figura 2.52 CDQ en la estación 23147040

EL TABLAZO (24067010)

La estación el tablazo en el río Sogamoso con registros hasta el año 2014 debido al llenado del embalse de Topocoro, es la estación localizada más aguas arriba del río por lo que sus registros incorporan las afluencias provenientes de los ríos Chicamocha y Suárez y lo transitado de las

subcuencas altas de la SZH. El desempeño tanto en la calibración como en la validación de esta estación fue bueno con KGE por encima de 0.8 y NSE de 0.76. Esto es evidente en la comparación de las hidrógrafas diarias y mensuales presentadas en la Figura 2.53.

Al contrario de lo mencionado para las estaciones de los río Opón y La Colorada, los resultados de la simulación en esta estación sobreestiman los caudales observados en aproximadamente un 10%. De lo registrado en esta estación, la mayoría del flujo proviene de los registros de las estaciones EL JORDAN, SAN GIL y LA CEIBA AUT por lo que las incertidumbres y errores en la medición de caudales en estas estaciones son transmitidos directamente a las estaciones localizadas aguas abajo. Lo anteriormente mencionado puede ser causal de las sobreestimaciones apreciadas. Adicionalmente, es posible se estén realizando extracciones en los tramos de río comprendidos entre las estaciones mencionadas. No obstante, una sobreestimación de menos del 15% es considerada satisfactoria.

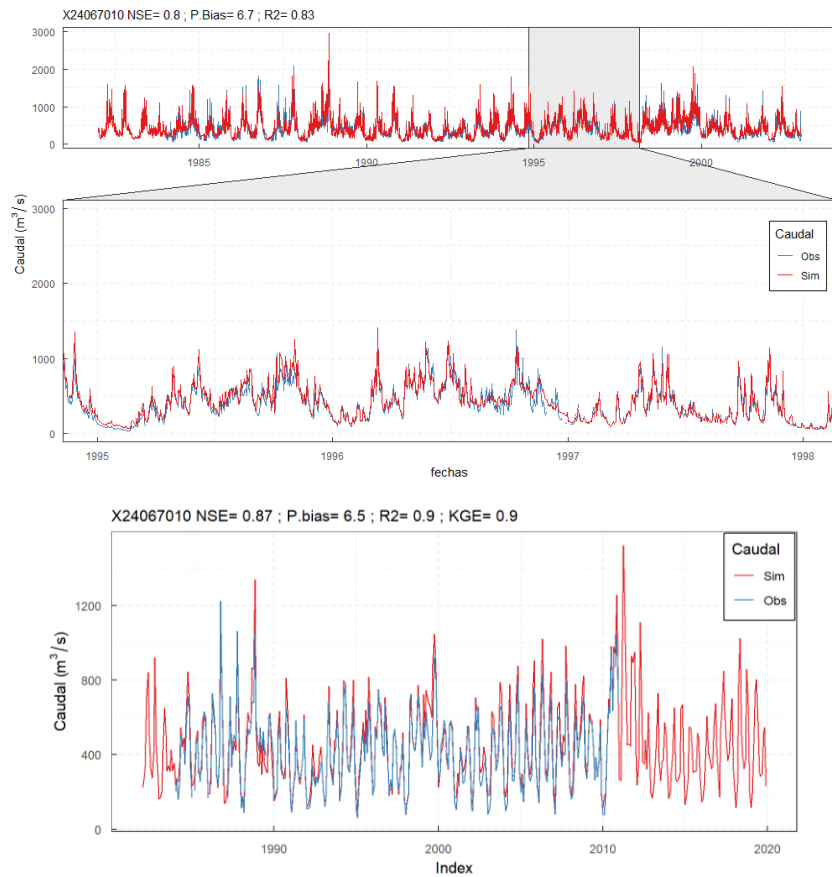


Figura 2.53 Hidrógrafas en la estación 24067010

El gráfico de dispersión muestra una muy buena correlación lineal de los caudales observados y simulados salvo algunos valores que en general se encuentran por encima de lo esperado. En la serie mensual se evidencia una buena reproducción del régimen mensual intra-anual, pero contrario a las estaciones anteriores, es posible observar una leve sobreestimación de los caudales base en periodos específicos de la serie.

Por último, en la CDQ de esta estación se puede ver que en general el modelo representa de buena manera los caudales medios, bajos y la mayor parte de los caudales altos (ver Figura 2.54). Sin embargo, la curva de duración de caudales es atemporal y el coeficiente de determinación para esta estación a resolución diaria fue de 0.82.

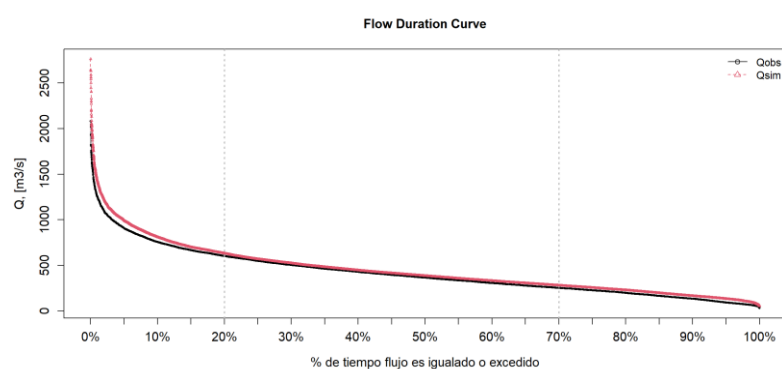


Figura 2.54 CDQ en la estación 24067010

PTE COMUNA (24057050)

Los resultados en la estación 24057050 fueron aceptables, pero no satisfactorios en las escala diaria tanto en calibración como en validación. En general no se encontró una correlación entre la precipitación registrada en la estación pluviométrica SAN VICENTE (24050060) localizada en la parte media de la cuenca del río Chucurí y los caudales observados, lo que deja en evidencia un déficit en la información de entrada que probablemente esté asociado a la serie de precipitación y a la calidad de la serie de caudales observados. Teniendo en cuenta que existe una estación de precipitación directamente en la cuenca y que esta fue utilizada en el proceso de interpolación para la creación del campo de lluvia, se considera que las falencias pueden obedecer a fallas en la medición del caudal por lo que se debe revisar con más detalle las mediciones de niveles y las curvas de calibración nivel- caudal en la estación PTE COMUNA.

Como se aprecia en la Figura 2.55, las hidrógrafas mensuales en general tienen un buen ajuste de los caudales mínimos y el tiempo de ocurrencia de los picos y valles. Para el periodo de validación

se presenta una gran mejoría en las métricas mensuales, sin embargo, esto pudo estar influenciado por la baja cantidad de datos disponibles para el periodo analizado.

En lo que respecta a la CDQ se presenta una pendiente muy baja, poco característica de un río de montaña como el estudiado. A pesar de que se evidencia una buena correlación desde el Q100 hasta el Q10 (ver Figura 2.56) se debe considerar la atemporalidad de esta gráfica y que el coeficiente de determinación obtenido para los caudales diarios es de apenas 0.14 en calibración y 0.23 en validación.

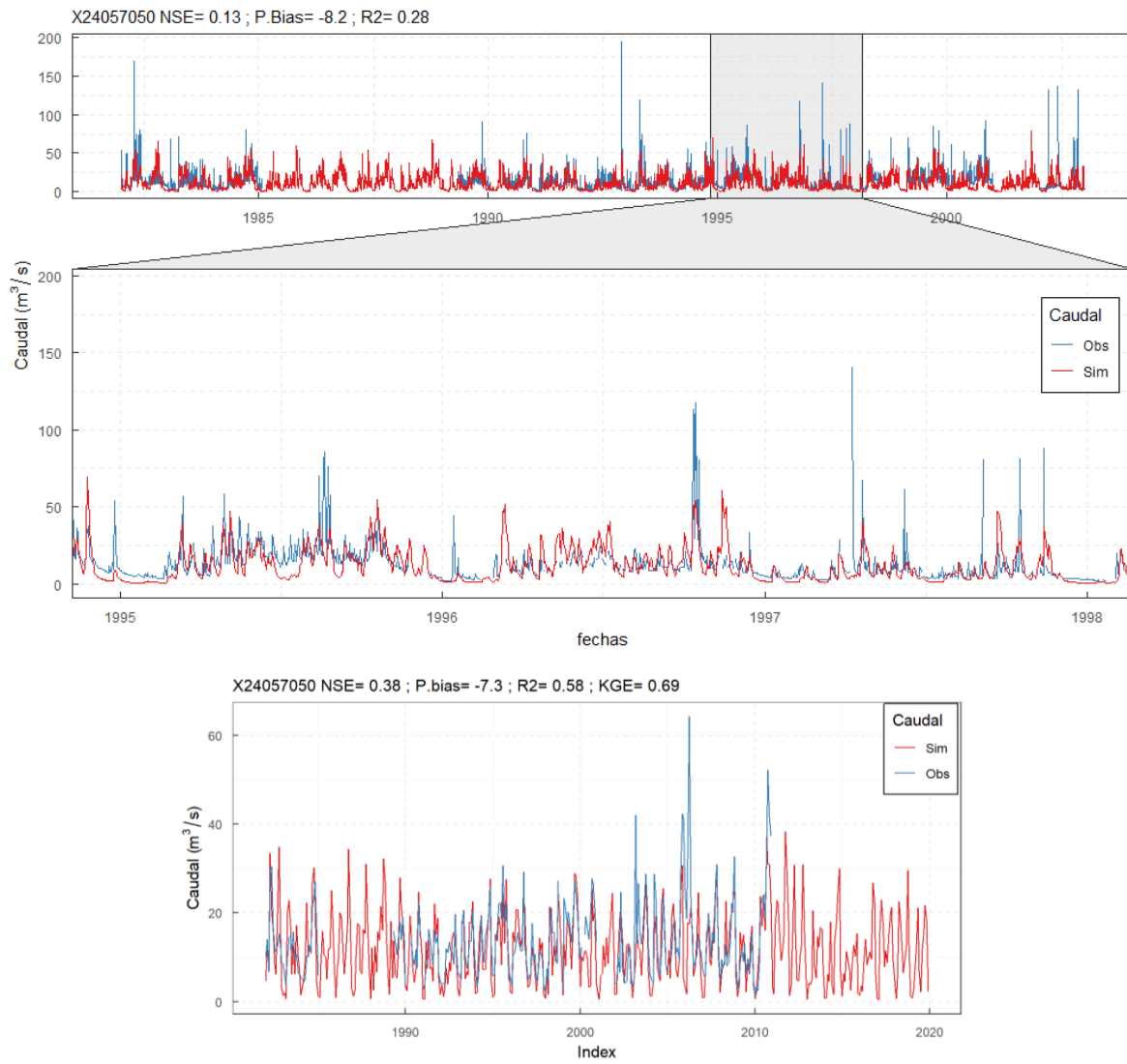


Figura 2.55 Hidrógrafas en la estación 24057050

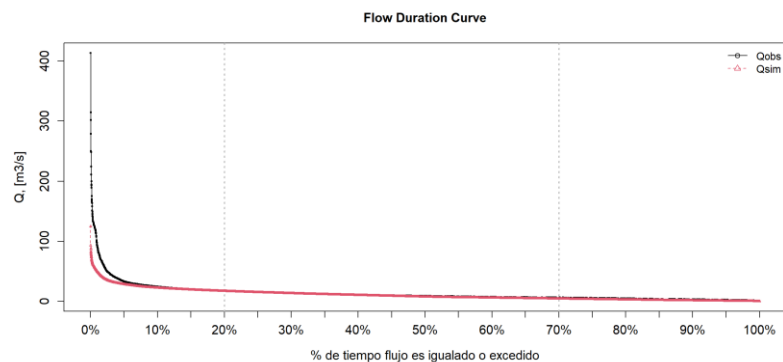


Figura 2.56 CDQ en la estación 24057050

PTE SOGAMOSO (24067020)

La estación 24067020 localizada en la parte baja del río Sogamoso registra el flujo de toda la Zona Hidrográfica del río Sogamoso. Para esta estación tanto a nivel diario como a nivel mensual se obtuvieron buenos resultados, lo cual también es evidente en las gráficas de las hidrógrafas generadas (ver Figura 2.57). Como se aprecia en las hidrógrafas diarias, en general se tiene una buena correspondencia entre lo simulado y lo observado. Sin embargo, se evidencian algunas desviaciones como la que se puede apreciar en los caudales base para el periodo 1999 -2010 en el cual son sobreestimados.

La condición anteriormente descrita se hace evidente de la misma manera en las hidrógrafas mensuales, solo que allí la sobreestimación además de en los caudales valles, también se presenta en los caudales pico. Lo anterior puede deberse a la no consideración de las infiltraciones que se pueden presentar desde el cauce principal del río Sogamoso hacia el subsuelo, lo cual puede llegar a ser considerablemente alto si se tiene en cuenta que el ancho medio del río es de aproximadamente 200 metros.

El diagrama de dispersión de los caudales muestra que dicha sobreestimación que se mide en aproximadamente un 16% se presenta en mayor medida en el rango de 400 a 900 m³/s, lo que corresponde a un rango de caudales medios.

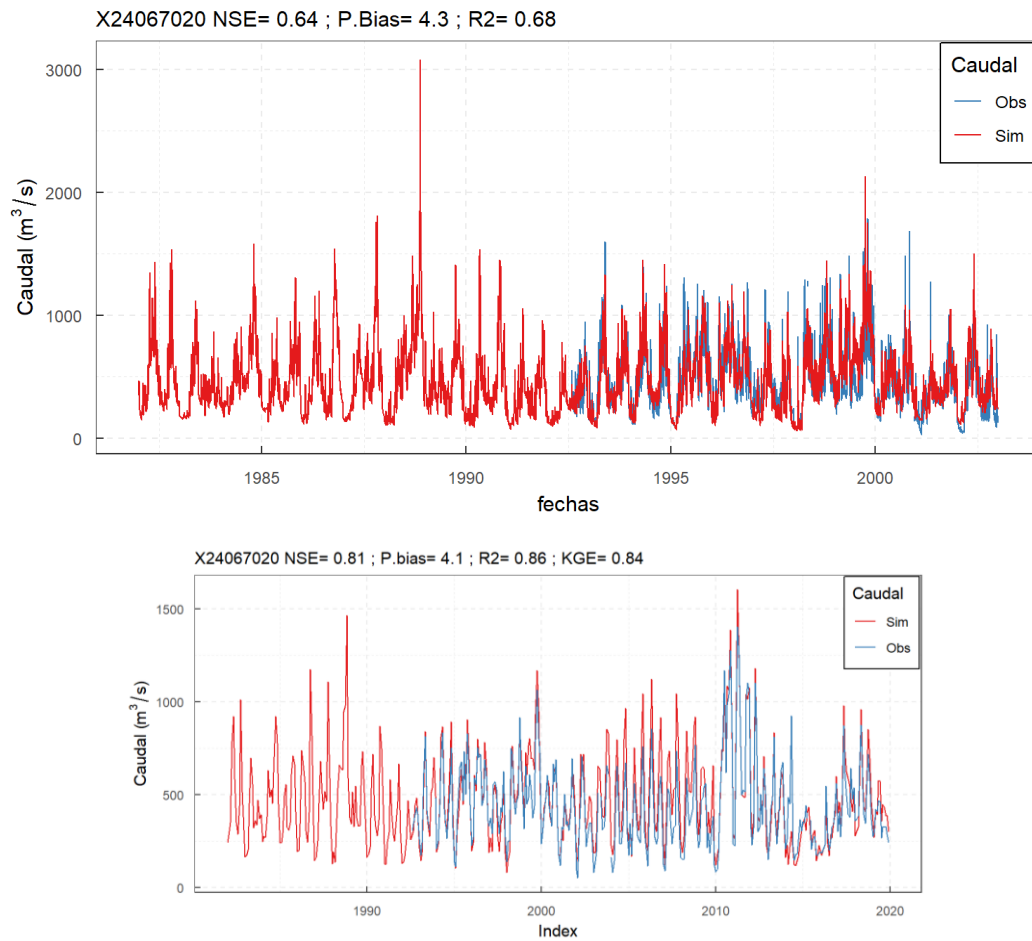


Figura 2.57 Hidrógrafas en la estación 24067020

Complementariamente la CDQ construida para esta estación muestra un ajuste satisfactorio en caudales bajos y la mayoría de los caudales altos, pero deja en evidencia la leve sobreestimación entre los caudales que son excedidos el 70% del tiempo y los que los excedidos el 10% del tiempo (ver Figura 2.58). No obstante, una sobreestimación inferior al 25 % en caudales diarios y mensuales según lo planteado por Moriasi et al., (2007) puede ser considera satisfactoria.

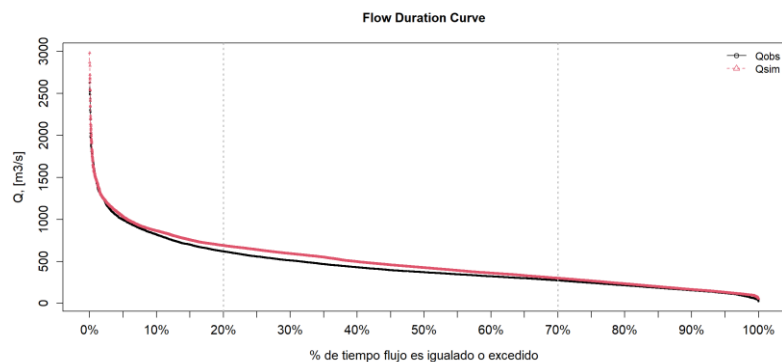


Figura 2.58 CDQ en la estación 24067020

Consideraciones y recomendaciones

En general se identificaron tres situaciones que se considera condicionan los resultados de la modelación y los valores de desempeño obtenidos. La primera de ellas está asociada con los campos de precipitación generados para el ingreso de estas series a cada una de las subcuencas de los modelos. Se considera que debido a la baja densidad de estaciones con registros de lluvia en las SZHs estudiadas, la interpolación realizada en los primeros modelos generó un suavizamiento excesivo de este proceso lo que impone un déficit de hídrico en la modelación que imposibilita que en muchos casos se llegue a los picos de caudal observados. La mezcla con datos de satélite en los modelos *refinados* mejoró el campo de precipitación y en consecuencia los desempeños del modelo en términos de caudal, pero no pudo llevar todas las estaciones a desempeños buenos o muy buenos. En incremento en la medición de la precipitación es importante para poder *construir mejores modelos* y el aumento del monitoreo de algunos afluentes también ayudaría a ajustarlos en más puntos de control.

En segundo lugar, en cuanto a las series de caudal de las estaciones hidrométricas utilizadas para la modelación, se recomienda hacer un ejercicio exhaustivo en la revisión de las curvas de calibración debido a que las dinámicas fluviales y el comportamiento no estacionario de los ríos puede llevar a errores asociados a cambios de la sección de aforo no identificados a tiempo. Adicionalmente, se desconoce el rango de caudales realmente aforados en las estaciones, por lo que una cantidad de los caudales pico existentes en la serie se considera pueden corresponder a extrapolaciones de la curva, que incrementan considerablemente la incertidumbre asociada a estos al no necesariamente corresponder a las condiciones naturales de la climatología y geomorfología del río.

Finalmente, se resalta que la parte baja de las SZH, en especial las subcuencas aguas abajo de las estaciones de caudal utilizadas para el análisis, presentan un comportamiento muy complejo debido a las interacciones mayoritariamente hidráulicas entre las ciénagas y ríos o caños. Dichas interacciones no fueron consideradas en la modelación hidrológica en gran parte debido a que no existen estaciones de niveles o caudales con registros consistentes que permitan la calibración de estas. Por lo anterior, las estimaciones de oferta hídrica carecen de calibración y el tránsito generado por el modelo SWAT puede distanciarse en gran medida de la realidad. La oferta y regulación hídrica estimadas deben analizarse bajo estas consideraciones y se recomienda la realización de ejercicios de modelación acompañados de mediciones que permitan obtener una mejor representación de estas interacciones y así mismo la oferta y regulación asociada a estos cuerpos hídricos.

2.3.3. Evaluación de la incertidumbre

En esta sección se hace un recuento de las principales fuentes de incertidumbre que se considera inciden directamente en los resultados obtenidos, con el fin de que estas sean consideradas al momento de interpretar los resultados presentados.

Según Montanari, Shoemaker, & Van De Giesen (2009) la incertidumbre es un producto de la falta de comprensión de los fenómenos hidrológicos y procesos involucrados; esta puede surgir de cuatro fuentes: La aleatoriedad propia de las variables climáticas; El error estructural de los modelos que le impide reproducir con precisión el comportamiento real de los sistemas; El error asociado a los parámetros del modelo; y el error de los datos de entrada utilizados. Se puede clasificar las fuentes de incertidumbre como acotadas y las no acotadas. Las acotadas se refieren al sistema sobre el cual todos los posibles resultados se conocen o pueden ser tratados a través de probabilidades, y las no acotadas se refiere a aquellos en los que los resultados no se conocen.

La incertidumbre asociada al error en los parámetros del modelo y sus efectos en la modelación puede ser estimada con relativa facilidad; así mismo la asociada al error en los datos de entrada, sobre la cual ya se realizaron consideraciones en la anterior sección. Con base en lo anterior en esta sección se darán las consideraciones sobre la incertidumbre asociada a los parámetros del modelo SWAT.

La incertidumbre paramétrica puede ser representada mediante intervalos de confianza, estos se construyen definiendo unos límites de confianza, usualmente el 5 y 95%, sobre la variable de salida del modelo implementado. El algoritmo SUFI-2 disponible en la herramienta SWAT-CUP como una aproximación estocástica a la calibración reconoce la incertidumbre en el trabajo de modelación e intenta capturar alguna medida dicha falta de conocimiento. Para ello se busca que las simulaciones que generan la banda de confianza envuelvan a las observaciones en la mayor medida posible. Lo anterior es medido a través de dos simples métricas: en primer lugar, el factor P correspondiente al porcentaje de datos observados que se encuentran dentro de los intervalos de confianza y en segundo lugar el factor R correspondiente al ancho de las bandas (K. C. Abbaspour, Johnson, & van Genuchten, 2004).

El concepto del análisis de incertidumbre de SUFI-2 es representado gráficamente en la Figura 2.59. Allí se evidencia que un valor de parámetro único (a) conduce a una respuesta de modelo única, mientras que la propagación de la incertidumbre en el mismo parámetro (línea) conduce a la 95PPU ilustrada por la región sombreada (b). En la medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre de salida también aumenta (c). (Karim C. Abbaspour, 2015)

La bondad del ajuste y el grado en que el modelo calibrado tiene en cuenta las incertidumbres paramétricas se evalúa mediante las dos métricas anteriores. El valor del factor P varía entre 0 y 1, mientras que el factor R varía entre 0 e infinito. Un factor P de 1 y un factor R de 0, indican que los resultados de la simulación corresponden exactamente a los datos medidos.

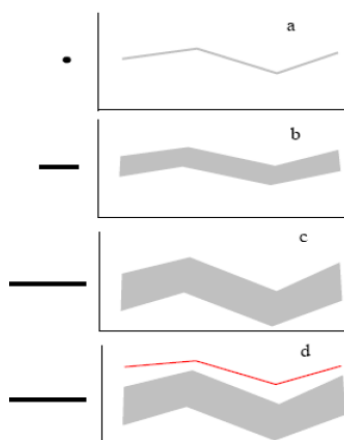


Figura 2.59 Esquematización del enfoque del SUFI-2. Tomado de: Karim C. Abbaspour, (2015)

Con base en lo anterior se utilizó el SUFI-2 para la determinación de la incertidumbre asociada a los parámetros utilizados en la calibración del modelo, a partir de la estimación de las bandas de incertidumbre de las simulaciones en un rango ampliado de los parámetros óptimos encontrados en el proceso de calibración. A continuación, se presentan los resultados del factor P y factor R estimado en cada una de las estaciones contempladas en la modelación.

2.3.3.1. Resultados de la evaluación de incertidumbre en la SZH del río Lebrija

La Figura 2.60 muestra un ejemplo de las bandas de confianza del 95% central de 1550 simulaciones realizadas en el espacio parametral que superaron el umbral definido para simulaciones comportamentales. Se puede ver como la mayor variación producida por el cambio en los parámetros se encuentra en los flujos base y un poco en los picos (esto también sucede en las demás estaciones, en algunas en menor medida). En la figura se resalta la mejor simulación obtenida en las simulaciones, que es distinta a la conseguida con el algoritmo PSO, no es la intención con el algoritmo SUFI2 alcanzar el mejor desempeño. Se puede también ver que la incertidumbre paramétrica no puede reducir la incertidumbre en las entradas del modelo; las simulaciones que componen las bandas en algunos casos no presentan picos de simulación cuando se presentaron picos de caudal, indicando que no se registraron datos de lluvias en algunos intervalos de tiempo. Por otra parte, se observa que las bandas tienden a envolver más las curvas de recesión que los picos de caudal, resultado que puede darse por haber limitado el espacio parametral a la zona cercana a simulaciones con un alto valor de desempeño.

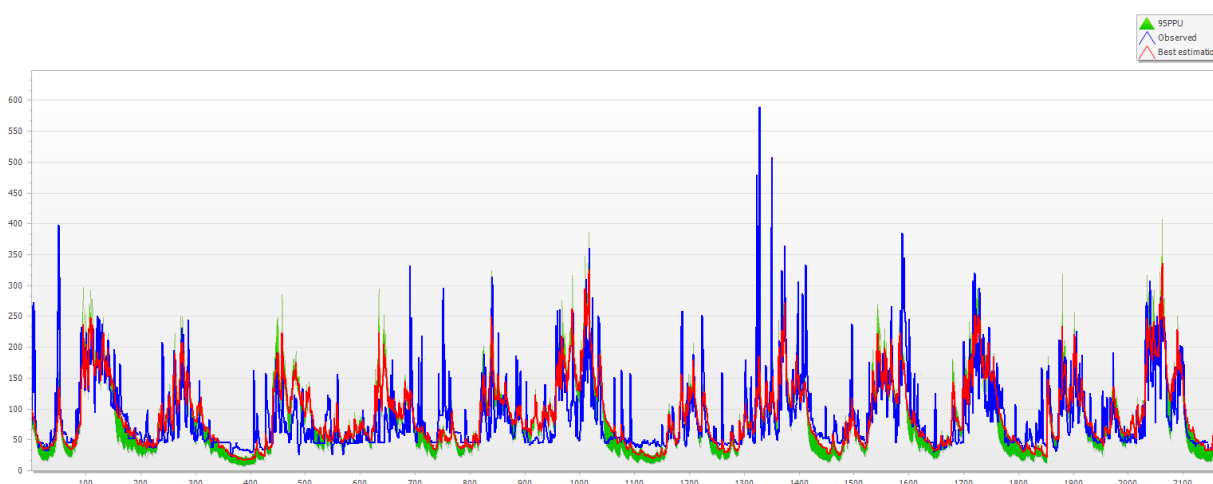


Figura 2.60 Detalle de las bandas de confianza del 95% para la estación San Rafael

En la Tabla 2.23 se indican algunas métricas relacionadas con la incertidumbre estimada por las bandas de confianza. Allí se puede apreciar que el porcentaje de cubrimiento no es elevado debido a que se realizó el análisis sobre un espacio parametral reducido. Se resalta que las estaciones con mayor cubrimiento fueron aquellas con mejores desempeños en la calibración y validación. Esto indica que el rango parametral escogido es suficientemente robusto para no solo contener la respuesta escogida para la estimación de los flujos (aquella con los parámetros escogidos para ser fijados), sino también para tener en cuenta las variaciones de aquellos parámetros que tuvieron una incertidumbre mayor por no evidenciar un valor claro en los dot plots (ver Figura 2.25). Estaciones ejemplo de esto son Café Madrid, Colombia y San Rafael. Los factores de anchura de la banda en muchos casos son bastante bajos (el factor de ancho es el ancho de la banda normalizado por la desviación estándar de las observaciones), lo cual sería muy buen si el porcentaje de cubrimiento fuera elevado; en este caso los valores son reducidos debido a que el espacio parametral muestreado también se redujo. Se resalta que tanto el ancho medio, cómo el máximo y el mínimo se relacionan con el tamaño de la corriente, a mayor caudal promedio en el cauce mayor son los anchos de las bandas. Los valores del espacio parametral muestreado se anexan a este documento, así como los valores del límite superior y del inferior de las bandas para cada estación.

Estación	Código	% Cubrimiento	Factor de ancho	Ancho Medio (m ³ /s)	Ancho Máximo (m ³ /s)	Ancho Mínimo (m ³ /s)
El Hoyo	23197410	0.2	0.23	4.75	38.05	0.30
San Rafael	23197370	0.42	0.4	25.08	128.41	6.19
Puente Sardinias	23197130	0.34	0.44	1.23	6.35	0.26
Puente Panega	23197270	0.28	0.27	0.43	3.50	0.09
La Chocóa	23187040	0.12	0.07	0.54	4.62	0.05
Tamarindo	23187240	0.19	0.16	0.30	2.80	0.02
Café Madrid	23197290	0.46	0.62	5.73	55.04	1.95
Colombia	23197680	0.43	0.3	1.26	22.22	0.35
La Esperanza	23197460	0.24	0.29	0.15	3.01	0.03

Tabla 2.23 Métricas de incertidumbre de las simulaciones de caudal en la SZH del río Lebrija

Estos resultados resaltan que, a pesar de las falencias que se puedan presentar en la simulación con los parámetros escogidos, los estimados de caudal están lo suficientemente cerca de los observados. Por tanto, pueden usarse con cautela para estimar los flujos hídricos en la SZH teniendo en cuenta que estas bandas y valores indicados se encuentran alrededor de los valores estimados con los parámetros escogidos para ser fijados. Se debe resaltar que los flujos en las subcuencas que se encuentran aguas abajo de la estación San Rafael y El hoyo no se encuentran directamente calibrados y por tanto su incertidumbre será mayor y no puede ser estimada directamente con registros de caudal.

2.3.3.2. Resultados de la evaluación de incertidumbre en la SZH del río Opón y Sogamoso

Como se aprecia en la Tabla 2.24 el factor P indicativo del porcentaje de cubrimiento de los valores observados por las bandas, en la mayoría de las estaciones ronda el 47%, estos bajos porcentajes de cubrimiento se deben a que el análisis se realizó en un rango reducido de los parámetros. En este análisis no necesariamente las estaciones con mayor cubrimiento, como el caso de la estación puente ferrocarril, corresponden a las estaciones con mayor desempeño en las etapas de calibración. Esto puede deberse a que el aumento en la incertidumbre de los parámetros no necesariamente es lineal al aumento de la incertidumbre de salida del modelo (95PPU) (Karim C. Abbaspour, 2015).

Tabla 2.24 Resultados evaluación de la incertidumbre SUFI-2

Estación	Código	Corriente	N° Simulaciones SUFI-2	Factor P	Factor R
Pte Sogamoso	24067020	Río Sogamoso	1200	0.29	0.25
El Tablazo	24067010	Río Sogamoso	1200	0.48	0.22
Pte Comuna	24057050	Río Chucurí	1200	0.46	0.33
Ayacucho	23147040	Río La Colorada	1200	0.47	0.42
Pte Ferrocarril	23147020	Río Opón	1000	0.51	0.45

En lo que respecta al factor R correspondiente al ancho de la banda normalizado por la desviación estándar de las observaciones, es bastante bajo en estaciones como el Tablazo y Puente Sogamoso, lo que se considera bueno en caso de que el factor P sea muy alto, en este caso los valores son bajos debido a la reducción en el espacio parametral. Por el contrario, en las estaciones Ayacucho



y Pte Ferrocarril con valores altos del factor R implican que se debe aumentar en exceso la incertidumbre de los parámetros para tener un cubrimiento satisfactorio de los valores observados. En la Figura 2.61 se muestra el ejemplo de las bandas de confianza del 95% construidas a partir de 1000 simulaciones realizadas para El río Opón en el rango parametral establecido con base en los resultados del proceso de calibración. En esta se aprecia como las variaciones más significativas debido al cambio de los parámetros se reflejan en cambios en el caudal base y muy poco en los picos más altos, con lo que se evidencia que existen incertidumbres más allá de los parámetros, como la ausencia de una muy buena representación espacial y temporal de la lluvia. La línea roja de la mejor estimación no necesariamente corresponde a la obtenida mediante el algoritmo PSO, sino que corresponde a la mejor de las simulaciones realizadas con el SUFI-2.

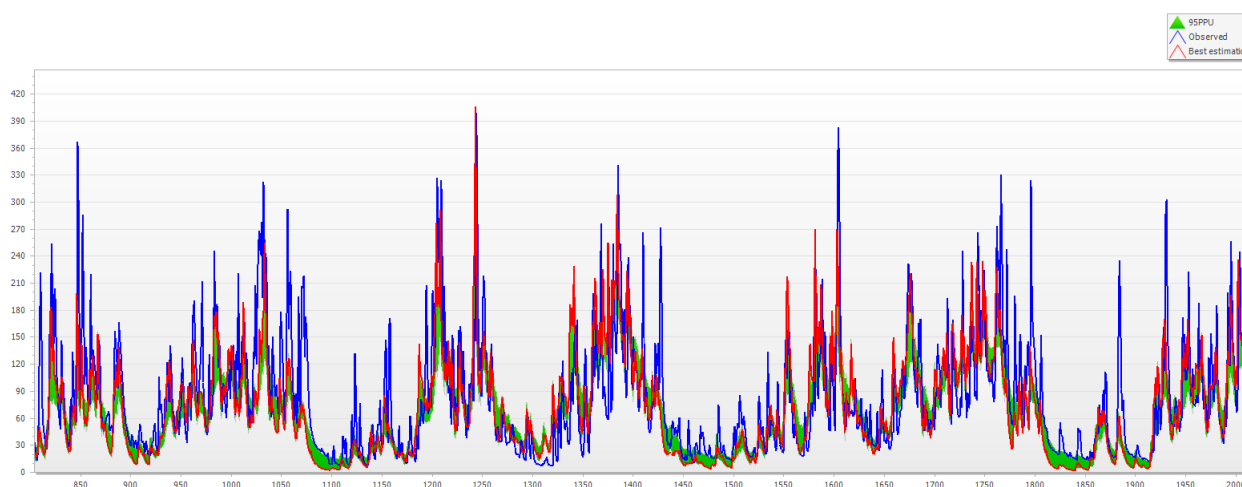


Figura 2.61 95PPU para la estación PTE FERROCARRIL

En conclusión, a pesar de las desviaciones observadas en los caudales simulados respecto a las observaciones, los parámetros escogidos como óptimos generan resultados satisfactorios al encontrarse bastante cerca de los observados, por lo que el modelo podría utilizarse para la simulación de los procesos hidrológicos en las SZHs estudiadas teniendo en cuenta las limitaciones. Adicionalmente, es posible que se logre una mejora en el desempeño de los modelos al tener una mejor información de entrada.

2.4. Posibles escenarios de caudal a 5 y 10 años

Con el objetivo de caracterizar los posibles eventos de estiaje y alta disponibilidad del recurso, se pretende realizar un análisis estadístico de las series para prever las posibles condiciones extremas

a cinco y diez años. Debe recalcar que los resultados de este análisis se basan en la climatología ingresada al modelo, transformada a esorrentía y posteriormente a caudal, y en consecuencia corresponde a las condiciones de la normal climatológica actual. En consecuencia, este análisis *NO* es un estudio de escenarios de cambio climático debido a que no se cambia la climatología ingresada al modelo, condición que implica primero realizar un “downscaling” de las proyecciones del IPCC para generar un estimado de la climatología y variabilidad climatológica futura y posteriormente evaluar los impactos a través de la modelación (Arora, 2002) (Kolokytha, Oishi, & Teegavarapu, 2017).

El análisis consiste en estimar el periodo de caudales con mayores y menores volúmenes, para las dos ventanas de tiempo mencionadas (cinco y diez años). Es decir, con los promedios móviles centrados de 5 y 10 años, se puede identificar el punto central con mayor o valor caudal promedio.

2.4.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

En la Figura 2.62 se puede ver que en periodos de 5 años el caudal promedio presenta cambios importantes y que hacia el final del periodo se ha ampliado el rango en el cual han variado los caudales (esto puede ser producto de la variabilidad climática o a cambio climático, pero se requieren estudios más detallados para saber su origen). Se identifica un periodo de 5 años centrado hacia finales de 2009 como el más húmedo ocurrido en el periodo 1982 a 2019, mientras que el periodo más seco se centra hacia finales de 2014 y cabe resaltar que los periodos logran sobreponerse en unos días para este caso particular. Estos periodos se explican debido a los fenómenos de la Niña de 2010-2011 y al de el Niño de 2015-2016. Los caudales que generan ese periodo más húmedo y el más seco se pueden ver en la Figura 2.63 para la desembocadura del río Lebrija en el río Magdalena, donde se ve que no solamente el año 2010 y 2011 tuvieron altos valores de caudal, sino que también el año 2008 presento temporadas invernales bastante extendidas.

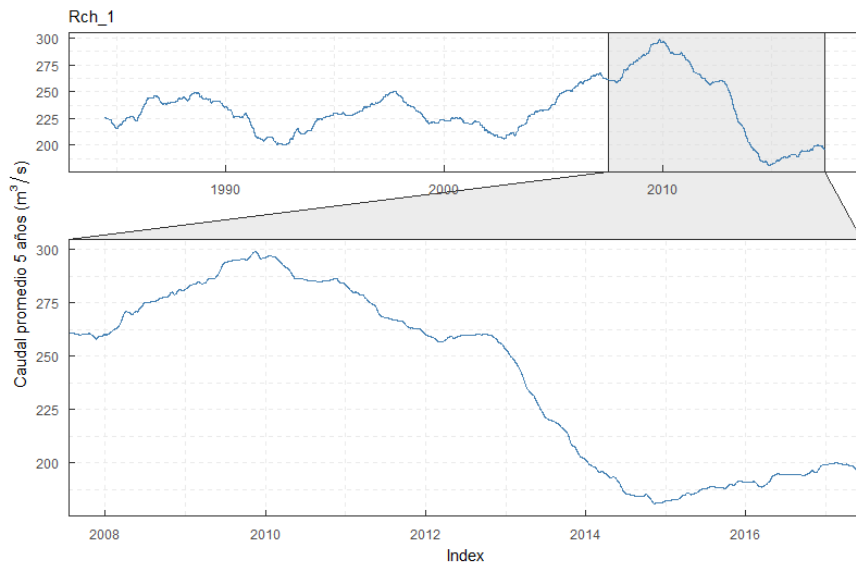


Figura 2.62 Media móvil de 5 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija

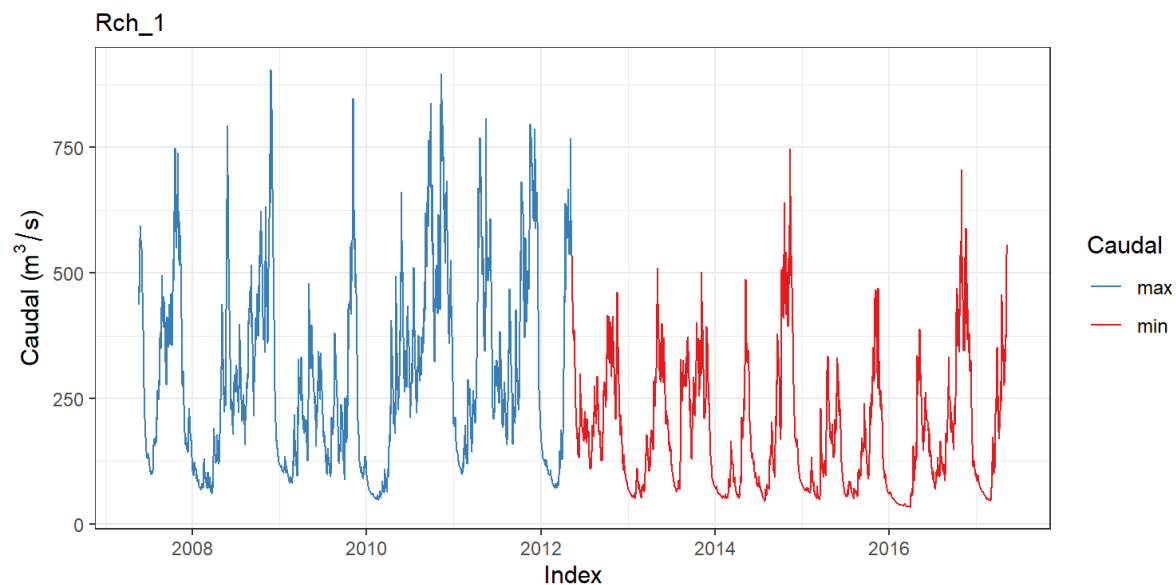


Figura 2.63 Series de caudales para el periodo más húmedo y seco de 5 años

Este mismo procedimiento se realizó con ventanas de una década, encontrando que también se presentan cambios, pero no se identifican ciclos tan claros. En la Figura 2.64 se puede ver que el primer tercio del periodo de estudio tiene un comportamiento relativamente estable entre los 225 y los 230 m³/s, con algunas reducciones y ascensos no significativos. Sin embargo, desde mediados de la década de los 2000 se presentó un ascenso consistente que se mantuvo hasta casi llegar al 2012 que se debió a varios fenómenos de la Niña registrados en 2007-2009 y la Niña de 2010-2011

(en varios de estos periodos no se registró el veranillo de mitad de año). Los periodos de 10 años tienen en algunos casos un traslape mayor entre aquella década identificada como la más húmeda y la más seca (lo cual se puede ver en las gráficas de 10 años anexas), pero en prácticamente todos los canales simulados, el periodo más húmedo contuvo a los fenómenos de la Niña mencionados.

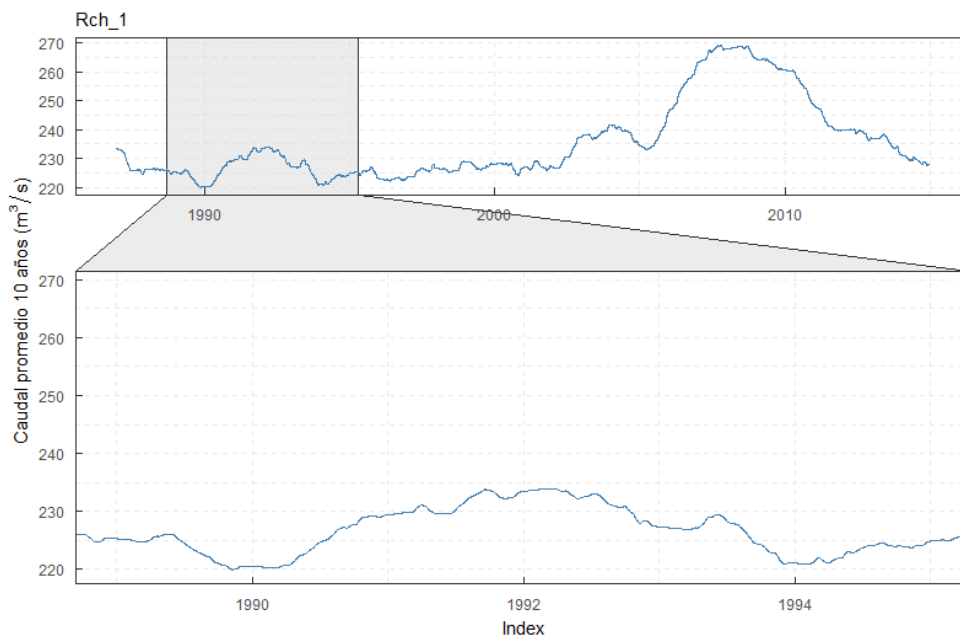
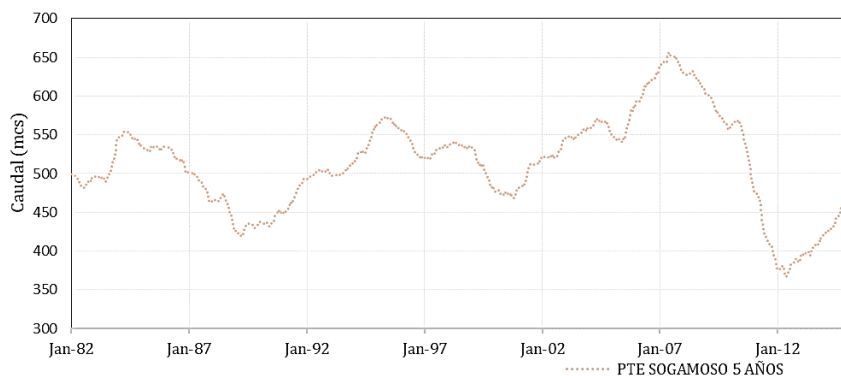


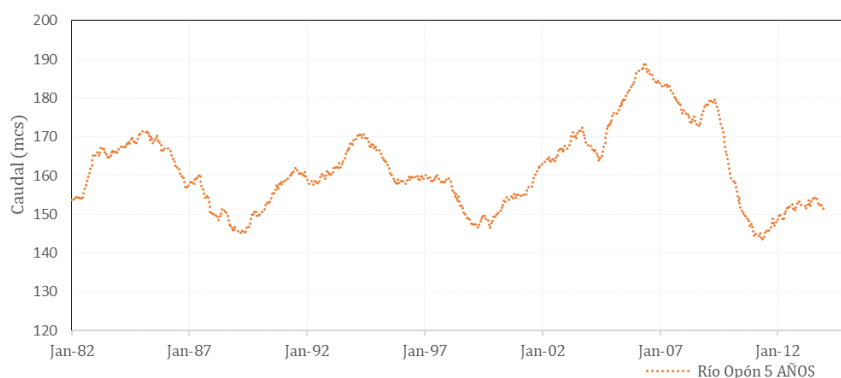
Figura 2.64 Media móvil de 10 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija

2.4.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

En la Figura 2.65 se presenta la media móvil estimada para las series de caudales en la desembocadura de los ríos Opón y Sogamoso al río Magdalena en la ventana de 5 años. Estas gráficas son representativas del comportamiento de toda la SZH asociada, por lo que los periodos identificados pueden ser replicados en cualquiera de los ríos al interior de las SZH.



a) Río Sogamoso

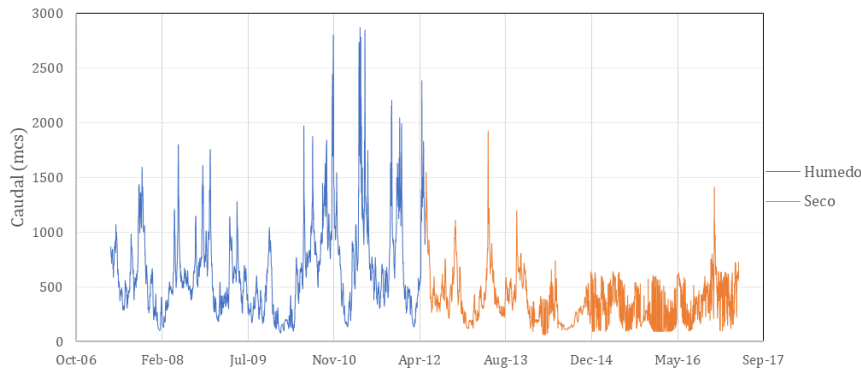


b) Río Opón

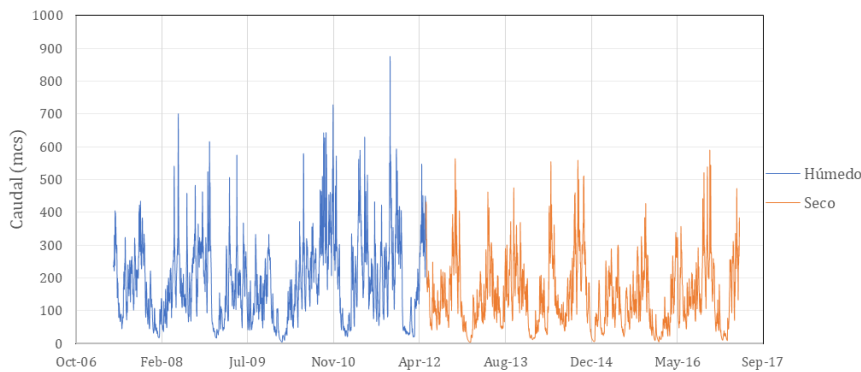
Figura 2.65 Media móvil de caudal simulado en ventanas de 5 años

Como se aprecia en la Figura 2.65 para las dos SZHs el periodo identificado como húmedo inicia en el año 2007 y se extiende hasta el 2012. Este periodo se debe a la ocurrencia del fenómeno de La Niña 2010-2011 el cual se encuentra categorizado como fuerte. En lo que respecta al periodo más seco, este se identificó inmediatamente posterior al escenario húmedo iniciando en el año 2012 y extendiéndose hasta el año 2017 sobreponiéndose en unos cuantos días los dos escenarios. Durante este periodo más seco se tuvo el fenómeno del Niño 2015-2016.

En la Figura 2.66 se presentan las hidrógrafas de caudales asociadas a cada uno de los escenarios en los periodos identificados, en estas es evidente el incremento de las afluencias durante el periodo bajo la influencia del fenómeno de La Niña 2007-2008 y 2010-2011. Este incremento es evidente no solo en la ocurrencia de caudales máximos sino que también se aprecia el incremento de la media y el caudal base registrados. Para la SZH del río Sogamoso el decremento en las afluencias para el escenario seco se ve influenciado tanto por la ocurrencia del fenómeno del niño 2015-2016, como por la regulación impuesta por la entrada en operación del embalse.



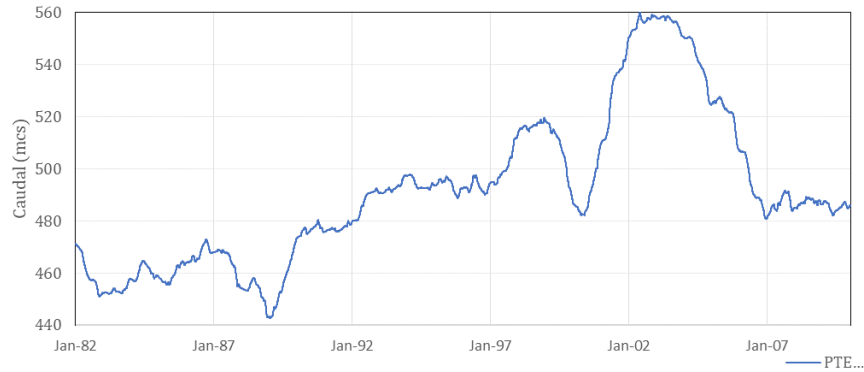
a) *hidrógrafas escenarios río Sogamoso*



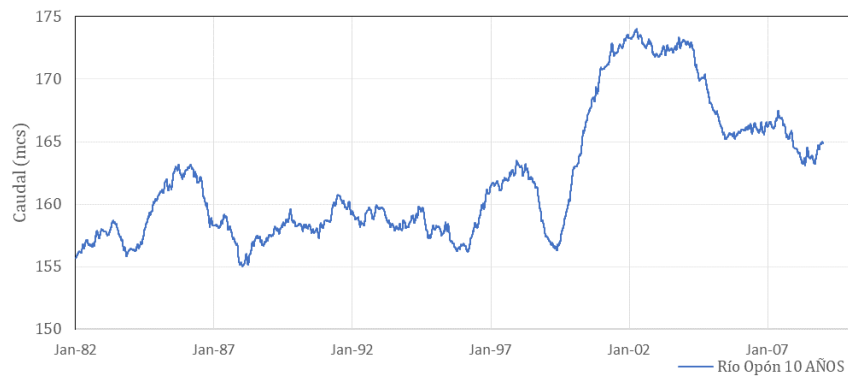
b) *hidrógrafas escenarios río Opón*

Figura 2.66 *Hidrógrafas escenarios húmedo y seco de 5 años*

En cuanto los escenarios de 10 años continuos se siguió el mismo procedimiento aplicando una ventana en la media móvil de 10 años, las gráficas de la media móvil para las series de caudal en la desembocadura de los ríos Opón y Sogamoso son presentados en la Figura 2.67. En ellas es posible identificar un incremento en la media de caudal que se estuvo presentando constantemente hasta el año 2012.



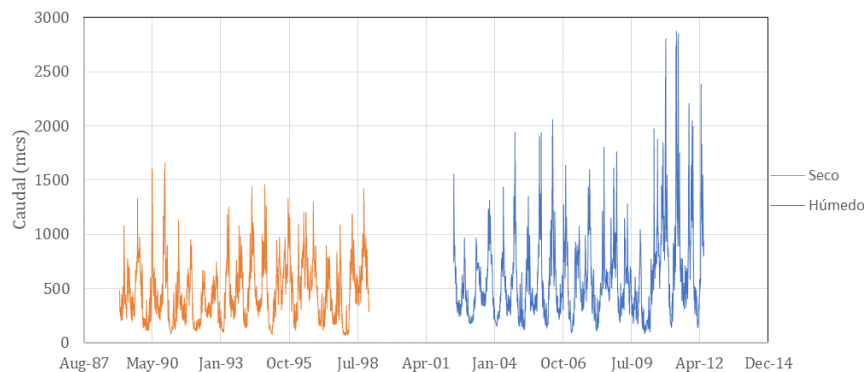
a) Media móvil río Sogamoso



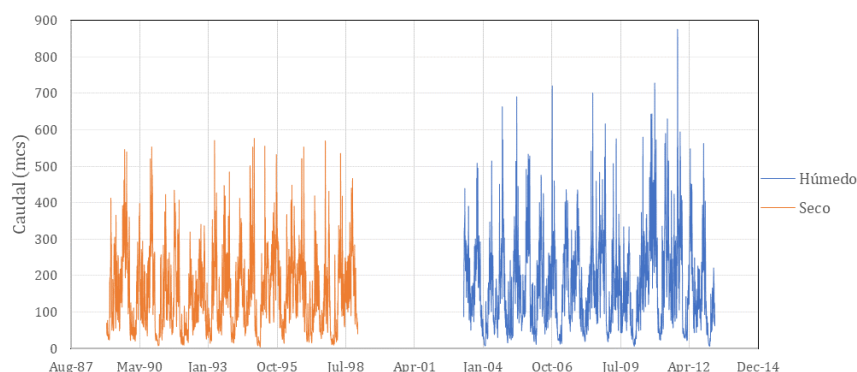
b) Media móvil río Opón

Figura 2.67 Media móvil de las series de caudal en ventana de 10 años

El periodo 2002-2012 fue seleccionado para el escenario húmedo en las dos SZHs, mientras que para el escenario seco se identificó el periodo 1989 – 1999 en cual se presentaron los fenómenos del Niño 1991-1992 y 1997-1998. Las hidrógrafas para los escenarios húmedo y seco en cada uno de los ríos son presentadas en la Figura 2.68.



a) Hidrógrafas río Sogamoso escenarios seco y húmedo



b) Hidrógrafas río Opón escenarios seco y húmedo

Figura 2.68 Hidrógrafas para escenarios de 10 años

La diferencia en la media del escenario húmedo y seco para el río Sogamoso es de 116 m³/s lo que equivale a un 20% menos. En lo que respecta al río Opón la diferencia de la media es de tan solo 10%, pero el caudal máximo registrado se reduce en aproximadamente 300 m³/s. En la Tabla 2.25 se presentan estadísticos descriptivos para cada uno de los escenarios en las dos ventanas de tiempo.

Tabla 2.25 Estadísticos descriptivos escenarios de caudal .

Corriente	Escenario	5 años				10 años			
		Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Río Opón	húmedo	188.80	875.40	5.32	123.40	174.01	875.40	5.32	117.71
	seco	143.54	586.40	5.58	99.62	155.00	576.80	5.01	102.11
Río Sogamoso	húmedo	652.70	2870.00	80.42	414.72	587.15	2870.00	80.42	370.99
	seco	368.50	1926.00	80.42	433.96	470.22	1657.00	65.55	265.94

Los valores presentados corresponden a caudales en metros cúbicos por segundo.

3. Evaluación de la demanda del agua en el Valle Medio del Magdalena

En este capítulo se presenta los objetivos, alcance, marco conceptual y metodológico, análisis de la información y resultados de la evaluación de la demanda del agua en el Valle Medio del Magdalena.

3.1. Objetivos y alcances de la evaluación de la demanda de agua

Este capítulo tiene por objeto general presentar la estimación y análisis de la demanda de agua superficial en la zona del Valle Medio del Río Magdalena (VMM) en el área de interés e influencia. Los objetivos específicos consisten en:

- establecer las actividades económicas con mayor presencia en el área de estudio
- recopilar la información institucional sobre el uso del agua o en su defecto la cantidad de producción y los módulos de uso de agua para la estimarla.
- establecer el método de estimación de acuerdo con la metodología referenciada en el Estudio Nacional del Agua y ajustarla de acuerdo con el estado de la información
- realizar la estimación de la demanda en el Valle Medio del Magdalena y verificar los resultados.

El alcance de la evaluación de la demanda del agua se define como la estimación y análisis de la demanda del recurso hídrico para las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija Medio - Bajo (incluido Tramo río Magdalena)” Río carare minero, Río Cimitarra y otros directos al Magdalena, Río Suarez, Río Fonce y Río Chicamocha, a partir de la información secundaria disponible sobre cantidad del recurso hídrico, para el año 2019, para los sectores de agricultura y postcosecha de caucho, café y palma, pecuario y sacrificio de ganado, piscícola, industria, construcción, minería, hidroenergía, hidrocarburos, servicios y uso doméstico.

3.2. Aspectos conceptuales

Evaluar la demanda hídrica parte del reconocimiento del agua como elemento estructurante del medio natural y su carácter decisorio en las dinámicas sociales, los procesos productivos, y las condiciones ecosistémicas de áreas bajo estudio. La evaluación de la demanda hídrica implica la sustracción, alteración, trasvase, desviación o retención temporal del agua, incluyendo en esta última los sistemas de almacenamiento que limitan el aprovechamiento para usos compartidos u

otros excluyentes (IDEAM, 2011). Dependiendo de las características técnicas, sociales, económicas y culturales de estos aspectos, junto a los de consumo y retorno, son definidas las condiciones de uso, acceso, manejo y gestión del agua en las unidades hidrográficas por parte de las comunidades, los ecosistemas, la biodiversidad, y las actividades económicas presentes.

El agua puede ser usada para la satisfacción directa de las necesidades humanas, como parte de un proceso productivo o demandada por los ecosistemas para su sostenimiento. Contribuye a la elaboración de bienes finales cuando en el proceso productivo es combinado con otros bienes intermedios. En tal sentido, cumple una función como materia prima o como insumo. Por lo tanto, el proceso de caracterización y cuantificación de la demanda hídrica implica revisar inventarios y registros de usuarios (legales y por legalizar) del agua superficial, subterránea, identificar el tipo de actividades económicas sectoriales, las tecnologías utilizadas y la cantidad/calidad del agua requerida para el desarrollo de tales actividades, implementar un seguimiento periódico a los procedimientos de medición, así como de los mecanismos indirectos de cálculo del uso. Por último, como el cálculo de la demanda hídrica es un instrumento para analizar la presión que se ejerce sobre el recurso, se requiere aplicar metodologías de balance hídrico (oferta - demanda) para gestionar la demanda de agua, teniendo en cuenta el caudal ambiental.

Finalmente, la estimación de la demanda hídrica total en una unidad hidrográfica permite identificar, aquellas que, por el uso del agua, presentan una mayor o menor presión sobre los sistemas hídricos superficiales o subterráneos en la obtención del Índice de Uso de Agua, como también, aquellas que presentan vulnerabilidad al desabastecimiento cuando esta relación oferta-demanda se articula con la regulación de agua.

Teniendo en cuenta este contexto, se presentan a continuación, los conceptos necesarios para evaluar la demanda del agua en la región, los cuales se sintetizan en la Figura 3.1

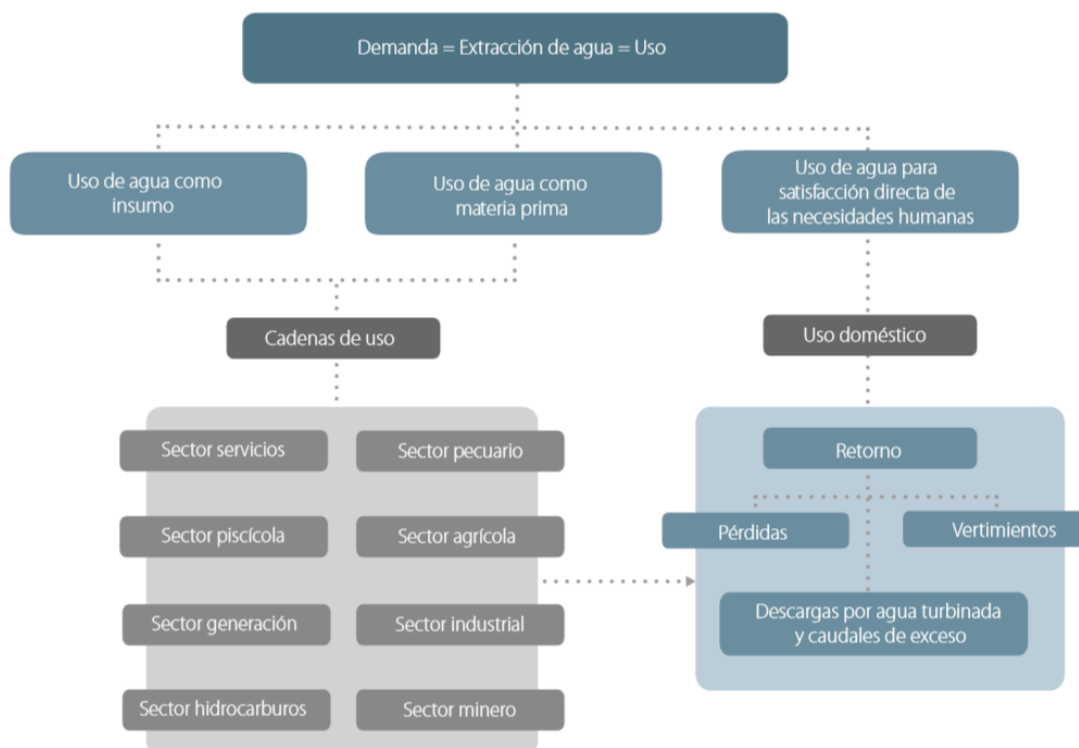


Figura 3.1 Conceptos de demanda (Fuente: IDEAM, 2015)

La demanda hídrica en el contexto de la hidrología se entiende como la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades económicas y para el uso doméstico. También se entiende a partir de la competencia por el uso que hacen los sectores y, por lo tanto, se asume, como la no disponibilidad de agua para otras actividades económicas en un territorio y por un periodo de tiempo (IDEAM, 2019)

El agua se usa como insumo o como materia prima en los procesos productivos y toda o una parte de esta retorna al sistema. Los retornos de agua incluyen las pérdidas, los vertimientos y las descargas de agua turbinada.

La organización de las actividades económicas permite identificar cadenas de uso. El concepto es aplicable al uso que se hace del agua en cada una de las etapas de los procesos productivos sectoriales. Así, en el sector pecuario hace referencia a la cantidad de agua utilizada en cada actividad unitaria de la cadena productiva teniendo en cuenta las etapas de cría, levante, engorde y sacrificio (formal o informal) de ganado, más el consumo del recurso en labores de manejo de la población en los diferentes lugares de alojamiento y beneficio (porquerizas, galpones, plantas de sacrificio y hatos ganaderos).

También hace referencia a las cadenas de uso del sector agrícola, incluyendo etapas como la siembra, crecimiento (y que se identifican con las necesidades de riego), cosecha y postcosecha. En el sector industrial se refiere al procesamiento, lavado y enfriamiento en la obtención de los productos manufacturados, etc. (IDEAM, 2011).

En el sector piscícola, se incluyen las etapas de producción de semilla, engorde y sacrificio. Estas etapas incluyen los caudales incorporados y, el volumen contenido en los estanques, el agua incorporada al pescado el volumen de agua usada para mantenimientos y el volumen de agua en el beneficio de la producción (incluido en ENA, 2018)

El caudal o flujo de Retorno es el volumen de agua que se reincorpora o es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas y en el consumo humano. Las descargas por agua turbinada y los vertimientos industriales conforman una parte del caudal de retorno (IDEAM, 2015)

Las pérdidas están asociadas al uso del agua desde la captación hasta la entrega nuevamente a la fuente por las actividades antrópicas, sean estas económicas o no. Las pérdidas de agua, una vez se extrae de la fuente para uso en los procesos productivos, se puede aducir a uso ineficiente, o a falta de mantenimiento de la infraestructura, entre otros. Por lo tanto, las pérdidas se asumen como el agua que, habiendo entrado en el proceso productivo, no se usa en este, sino que sale del mismo por exceso o por fuga. Los vertimientos no se consideran pérdidas.

En un territorio, la dinámica del uso del agua se inicia con la entrada de agua para las actividades propias de ese territorio. Dicho influjo es tomado de alguna fuente que puede ser superficial o subterránea que fluye o está confinada denominada fuente abastecedora. De este influjo se extrae una cantidad destinada a los usos de las actividades económicas y al consumo humano, como fue definido previamente. La extracción puede destinarse al uso en las diversas actividades, pero también se almacena artificialmente en embalses, reservorios estanques, pozos, etc. Las actividades permiten que una parte del agua usada salga y sea dispuesta nuevamente a las fuentes. Aquella cantidad de agua que no se utilizó o que habiendo sido utilizada se convierte en vertimiento, y se denomina descargas. Tales descargas se vierten a alguna fuente, denominada receptora, pasando antes, o sin pasar por un proceso de depuración.

3.3. Aspectos metodológicos

Los aspectos metodológicos asociados a la estimación de la demanda comprenden las fuentes de información y los métodos de análisis para la evaluación de la demanda del agua.

3.3.1. Métodos de análisis

El procedimiento general que lleva a la evaluación de la demanda del agua consiste en realizar la sumatoria de los usos de agua de todos los sectores presentes en el área de estudio de la siguiente manera:

$$DHT = C_{saj} + C_{spj} + C_{sgj} + C_{pj} + C_{sj} + C_{sij} + C_{ej} + C_{smj} + C_{shj} + C_{hj} + C_{ssj} + C_{sej} + C_{cj}$$

Donde:

DHT: demanda hídrica total

C_{saj}: uso del sector agrícola

C_{spj}: uso del sector pecuario

C_{sgj}: uso en el sacrificio de ganado

C_{pj}: uso del sector piscícola

C_{sij}: uso del sector industrial

C_{ej}: uso del sector energía (termoeléctricas e hidroeléctricas)

C_{smj}: uso del sector minero

C_{shj}: uso del sector hidrocarburos

C_{hj}: uso humano o doméstico

C_{ssj}: uso del sector servicios

C_{cj}: uso de agua en Construcción

La metodología de cálculo planteada para cada sector se resume en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Síntesis de las metodologías de cálculo del uso de agua en los sectores económicos

Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
<p>Agrícola (C_{saj})</p>	<p>Se estima el uso de agua para 29 cultivos presentes en el área de estudio que corresponden al 98% del área sembrada. La metodología consiste inicialmente en la identificación de áreas sembradas de los cultivos y de los pastos empleados en ganadería en la zona de estudio se realiza, mediante el establecimiento de polígonos agroclimáticamente homogéneos. Posteriormente, se procede a estimar las variables necesarias para el cálculo del requerimiento hídrico del cultivo en cada polígono.</p> <p>Luego, para estimar la demanda hídrica en la fase de cultivo – cosecha, se realiza un balance hídrico en el cual se determina si la precipitación efectiva es suficiente para satisfacer las necesidades o el requerimiento hídrico del cultivo, considerando todas sus características fisiológicas y las condiciones del suelo. Las dos condiciones básicas son las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Si la precipitación efectiva \geq requerimiento hídrico del cultivo; no se requiere riego · Si la precipitación efectiva $<$ requerimiento hídrico del cultivo; el faltante de agua debe ser proporcionado al cultivo por medio de riego. En este caso se asume que el agua para riego es proporcionada por fuentes hídricas superficiales y/o subterráneas, por lo tanto, es agua captada y usada en un proceso antrópico y se debe incluir tanto en la demanda multisectorial como en el cálculo del Índice de Uso del Agua. <p>El cálculo del agua en la postcosecha se estima teniendo en cuenta la producción diaria de las plantas de procesamiento de Caucho, Palma y Café, reportadas en las Evaluaciones Agropecuarias (EVA) (DANE, 2014; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020) y utilizando módulos de uso del agua, validados en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2011) y en el caso de Caucho, con la visita realizada en campo.</p>	<p>a. Se emplearon los polígonos definidos para el área de estudio (52.410 polígonos).</p> <p>b. Se seleccionó la zona de estudio (SZHs, Subcuencas Nivel 4 y municipios), descartando municipios con áreas despreciables dentro de la zona de estudio (208 municipios total o parcialmente incluidos en el área de estudio).</p> <p>c. Se realizó el procedimiento de asignación de áreas sembradas de cultivo dentro de cada municipio, del área de estudio (considerando los porcentajes del municipio dentro del área de estudio).</p>
<p>Pecuario (C_{spj})</p>	<p>Se estima la demanda de agua para bovinos, bufalinos, equinos porcinos, caprinos, y ovinos, utilizando módulos de consumo por animal, (por edad para bovinos y porcinos) verificados en la zona a partir de los inventarios de vacunación del ICA para 2019.</p> $D_p = C_v + C_{ua} + C_s$ <p>Donde: D_p: demanda pecuaria C_v: consumo vital en la fase de cría, levante y terminación C_{ua}: consumo en lugares de manejo y alojamiento animal C_s: consumo en sacrificio (explicada más adelante)</p>	<p>Para ganado bovino, equino y bufalino: Criterios de distribución es el área de cobertura de pasto Se hace la distribución de acuerdo con el porcentaje de área cubierta en pastos del municipio en la respectiva subzona hidrográfica y en el nivel de la unidad de análisis del estudio)</p> <p>Para aves, caprinos, ovinos y porcinos la distribución se hizo en función en proporción al área del municipio por unidades de análisis</p>
<p>Sacrificio de ganado (C_{sgj})</p>	<p>El cálculo de la demanda hídrica del sacrificio de ganado, incluida dentro del sector pecuario, se realizó diferenciado para ganado bovino – bufalino y para el resto de los animales (porcícola, ovino y caprino). Para el cálculo del sacrificio de ganado bovino – bufalino, se asumió que el número de animales sacrificados es proporcional a todas las plantas de sacrificio identificadas en el respectivo departamento. Una vez cuantificada la cantidad de animales sacrificados pro-planta, se procedió a identificar que plantas se localizan en la zona de estudio.</p> <p>Una vez, calculado el número de animales sacrificados, se procede a estimar la demanda hídrica mediante la siguiente ecuación:</p> $DHP_{Sac-bov-buf-cuenca} = \sum (Inv_{bov-buf} \times F_{ca} \times animal \times DT_{municipio-cuenca})$	<p>se asignó a cabeceras municipales por la existencia de las plantas de sacrificio.</p> <p>Las cabeceras siempre pertenecen a una única unidad de análisis</p>



Acuerdo de Cooperación ECOPETROL – IDEAM AC No. 4 (3034153)

Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
Sector piscícola Cpj	<p>Estimación a partir de revisión de concesiones, opinión de expertos e información de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap). Además, se complementó con visitas a piscícolas, con el fin de establecer conjuntamente el uso de agua. Se establece el proceso productivo y su cadena de uso. Se verifican los módulos de uso de agua para las especies presentes en la zona y se determina el uso de agua en la producción de alevinos, engorde y sacrificio.</p> <p>La estimación incluye factores como el agua que permanece en las piscinas, el flujo de agua para oxigenar (su cantidad depende de la especie), el agua que se convierte en biomasa, el agua que se utiliza para el mantenimiento de las</p>	No se espacializa porque no hay información completa y porque las fuentes no tienen una evaluación de la calidad del dato
Sector industrial Csj	A partir de la información del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) y del RUA, las encuestas Anual Manufacturera y Ambiental Industrial, se integra para consolidar una sola base de información de establecimientos industriales del área de estudio, teniendo en cuenta que, si los registros aparecen en las cuatro bases de datos, se tomará el valor de uso de agua más alto registrado. Se incluyen aquellos registros únicos en cada una de las bases y se verifica la existencia de registros en algunas de las bases de datos, haciendo el mismo ejercicio de establecer el valor más alto registrado.	SIRH y RUA registran las coordenadas de cada establecimiento por lo tanto su georreferenciación indica exactamente a que unidades de análisis pertenece. En el caso de la información de la Superintendencia, se asigna el valor a cabeceras municipales
Sector energía (Cej)	Agregación de las cifras de los registros de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de las grandes hidroeléctricas y las termoeléctricas presentes. Se verifica la localización de cada hidroeléctrica, embalse, central térmica y Pequeña central hidroeléctrica (PCH) en el área de estudio. Se solicita la información de hidroeléctricas a filo de agua a los operadores de termoeléctricas, y se agrega el uso de agua reportado.	Existen las coordenadas de cada embalse central hidroeléctrica, termoeléctrica y pch. por lo tanto, su georreferenciación dice exactamente a que unidades de análisis pertenece
Sector minero (Csmj)	<p>Se estima a partir de los módulos de uso establecidos para cada mineral y la base de producción de los minerales en cada municipio.</p> <p>El cálculo es el siguiente:</p> $Csmj = P_{\text{mineral 1}} * (\text{mdu mineral 1}) + P_{\text{mineral 2}} (\text{mdu mineral 2}) + P_{\text{mineral 3}} * (\text{mdul 3}) + \dots + P_{\text{mineral n}} * (\text{mdu mineral n})$ <p>Donde: Csm = Uso de agua del sector minero</p> <p>P_{mineral} = producción del mineral en toneladas mdu= módulo de uso de cada mineral</p>	Para distribuir a nivel de unidad de análisis la demanda hídrica del sector minero, se adoptó el criterio relacionado con el número de títulos por municipios y su distribución en dicha unidad. A cada polígono o título se le identificó su centroide, de esta manera se podría cuantificar claramente la cantidad de puntos (centroides) por unidad de análisis De acuerdo al porcentaje de títulos en el municipio dentro de la unidad de análisis se calcula proporcionalmente. Por ejemplo, si el 50% de los títulos de Segovia están en la unidad de análisis x, entonces el
Sector hidrocarburos (Cshj)	En el caso de Ecopetrol, se agregan los registros de uso de agua en las diferentes etapas de la exploración, producción, transporte y refinación del petróleo, sin incluir el agua que se extrae de zonas profundas. En el caso de los demás campos presentes en el área, la estimación se realiza con base en módulos de consumo identificados por la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP).	Existen las coordenadas de cada pozo y refinería de Ecopetrol, por lo tanto, la georreferenciación indica exactamente a que unidades de análisis pertenece. La producción que corresponden a los demás operadores se distribuye en proporción al área del municipio donde están ubicados

Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
Doméstico (Chj)	<p>La estimación de la demanda de la población habitante en el área de estudio se realiza a partir del número de viviendas y el tamaño del hogar y los módulos de uso de agua existentes para la zona.</p> <p>Chj: $Pob * intensidad + pérdidas técnicas$</p> <p>Donde</p> <p>Chj es la demanda de agua para uso doméstico. Pob: es el número de habitantes que pertenecen al área de estudio. Intensidad: es la cantidad de agua que requiere una persona para suplir sus necesidades diarias, expresada en litros/ habitante-día. Pérdidas técnicas: es la cantidad de agua que es extraída y no consumida por pérdidas en el sistema de prestación del servicio de acueducto, siendo 30% para las ciudades mayores de 50.000 habitantes, 60% para los municipios entre 20.000 y 50.000 y 70% para las menores de 20.000 habitantes</p>	El uso urbano se distribuye en las cabeceras y el uso rural se distribuye en proporción al área total del municipio
Servicios (Cssj)	La estimación se basa en los registros del Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI), además se verifica con las concesiones de agua de la actividad en la CAS	Se asocia a cabeceras municipales
Construcción (Cej)	Se realiza una agregación del uso en las concesiones de agua, a partir del registro en el SIRH	No se espacializa porque no hay información completa y porque las fuentes no tienen una evaluación de la calidad del dato

Cada sector tiene sus particularidades y es difícil utilizar un mismo método para todos. En general, son pocos los sectores que tienen registros de uso de agua con series de tiempo suficientes para su análisis, por lo tanto, es necesario establecer métodos indirectos para estimarla como se explicó en la tabla anterior.

El sector agrícola es considerado un caso especial, dado que se base en el cálculo del requerimiento hídrico de los cultivos, razón por la cual se realiza a continuación una síntesis de la metodología usada para su cálculo.

La estimación del requerimiento hídrico de un cultivo se realiza mediante un balance mensual de agua en el suelo, aplicando la metodología propuesta por la FAO (2006), la cual se basa en la estimación de la evapotranspiración ajustada, tal como se muestra en la Ecuación 2.

Ecuación 2.

$$ET_a = K_s * K_C * ET_o$$

La evapotranspiración ajustada del cultivo (ET_a ; [mm/periodo]) es estimada como la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_o ; [mm/periodo]) multiplicada por el factor



único de cultivo (K_C ; [-]), el cual para cultivos permanentes se asume como el que se presenta en la etapa media de crecimiento del cultivo y para los transitorios como un promedio ponderado³ (Ecuación 3), ambos multiplicados también por un factor de reducción de la evapotranspiración del cultivo por déficit de agua en la zona radicular (K_S ; [-]), este factor se define según se muestra en la Ecuación 3 y Ecuación 5.

La (ET_o) se toma como la evapotranspiración potencial estimada por medio del método de Hargreaves y suministrada por Ideam en mapas mensuales.

Ecuación 3. Coeficiente ponderado

$$K_C = \frac{K_{C_i} * t_i + \left[\frac{K_{C_m} + K_{C_i}}{2} * t_d \right] + K_{C_m} * t_m + \left[\frac{K_{C_m} + K_{C_f}}{2} * t_f \right]}{t_{total}}$$

Ecuación 4. Coeficiente de estrés hídrico

$$K_S = 1 \quad \text{si } D_r \leq AFA$$

Ecuación 5. Coeficiente de estrés hídrico

$$K_S = \frac{ADT - D_r}{(1-p)ADT} \quad \text{si } D_r > AFA$$

De donde:

K_{C_i} , K_{C_m} y K_{C_f} : Coeficientes de cultivo en etapa inicial, media y final.

t_i , t_d , t_m y t_f : Tiempo de duración del período inicial, de desarrollo, medio y final del cultivo.

t_{total} : Tiempo total de cultivo, desde la siembra hasta la cosecha.

³ El K_C puede consultarse en FAO (2006) o en información suministrada por estudios específicos nacionales o locales. Se considera el K_C de etapa media para cultivos permanentes puesto que se evalúa la sostenibilidad hídrica territorial considerando la máxima carga posible de uso de agua en el momento de evaluación y para el cultivo de análisis, lo cual coincide con el K_C medio de cultivo que representa su máximo requerimiento hídrico. En el caso de los cultivos transitorios se considera el K_C como promedio ponderado de las diferentes etapas de cultivo, esto permite simplificar el modelo de acumulación de áreas propuesto, ya que, en un mismo mes, se asume que coexisten áreas sembradas en diferentes etapas de cultivo, pues se acumulan de meses anteriores hasta cumplir el tiempo de cultivo y ser cosechadas. Esta suposición de K_C ponderado se aproximaría al máximo requerimiento hídrico del cultivo en el mes, lo cual permite evaluar la sostenibilidad hídrica territorial considerando la máxima carga posible de uso de agua en el momento de evaluación.

ADT: Agua disponible total, que representa la cantidad de agua que el suelo puede retener en contra de las fuerzas de gravedad y que un cultivo puede extraer de su zona radicular (*Ecuación 6*).

Dr: Representa el agotamiento de la humedad del suelo.

p: Representa la fracción de agotamiento característica de cada cultivo. Puede obtenerse de información local del cultivo o en información general como la suministrada por FAO (2006).

AFA: Agua fácilmente aprovechable, corresponde a la fracción del *ADT* que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico (*Ecuación 7*)

Ecuación 6. Agua Disponible Total

$$ADT = Zr * Hu$$

Ecuación 7. Agua Fácilmente Aprovechable

$$AFA = p * ADT$$

De donde:

Hu: Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, expresada en milímetros de agua por metro de profundidad del suelo y que se obtiene para cada unidad cartográfica de suelos.

Zr: Profundidad de las raíces en metros. Puede obtenerse de información local del cultivo o en información general como la suministrada por FAO (2006).

Según estas consideraciones, en el momento en que el agotamiento (*Dr*) es igual al (*AFA*) comienza el estrés hídrico. Cuando el agotamiento supera el (*AFA*), se reduce la evapotranspiración en función de la cantidad de agua remanente en la zona radicular ($ADT - Dr$).

El agotamiento al final del período *i* (Dr_i), depende de la condición de humedad inicial (Dr_{i-1}), de la precipitación ocurrida en el período *i* (P_i)⁴, del riego efectivo aplicado en el período *i* (I_i) y de la evapotranspiración ocurrida en el período *i* (ETa_i) (*Ecuación 8*).

Ecuación 8. Agotamiento del agua disponible

$$Dr_i = Dr_{i-1} - P_i - I_i - CR_i + ETa_i + (DP_i + RO_i)$$

⁴ Precipitación obtenida de la información raster mensual generada en ENA 2014 por IDEAM.

Donde

$$0 \leq Dr_i \leq ADT$$

Una vez definido el agotamiento inicial, se calcula el (K_s) del mes y luego se calcula la evapotranspiración ajustada (ETa). Al sumar (P_i) y restar (ETa) al contenido de humedad preexistente en el suelo ($ADT - Dr_{i-1}$), puede presentarse el caso de que se supere la capacidad de campo generando excedentes de agua en el suelo ($DP_i + RO_i$), o puede ocurrir que la humedad del suelo resultante esté por encima del umbral de estrés ($ADT - AFA$); en ambos casos no hay necesidad de riego. Estos excedentes se pueden definir como se muestra en la Ecuación 9.

Ecuación 9. Excedentes de Agua

$$(DP_i + RO_i) = P_i - ETa + (ADT - Dr_{i-1}) - ADT$$

$$(DP_i + RO_i) = P_i - ETa - Dr_{i-1}$$

Para determinar el momento de riego y la cantidad de riego requerido se asume que:

- los cultivos no sufren estrés, por lo tanto, el tiempo de riego estaría dado por un agotamiento igual al umbral de estrés ($ADT - AFA$) para evitar una reducción mayor de la humedad en el suelo.
- la cantidad de riego aplicada es la necesaria para alcanzar la capacidad de campo, o lo que es igual, para llevar el nivel de agotamiento a cero sin generar excesos de agua.
- para evitar el estrés hídrico y considerando que en un balance mensual se pierde el detalle diario, se asume como altamente probable que la humedad del suelo en promedio al final del mes se mantiene en: $ADT - \frac{AFA}{2}$

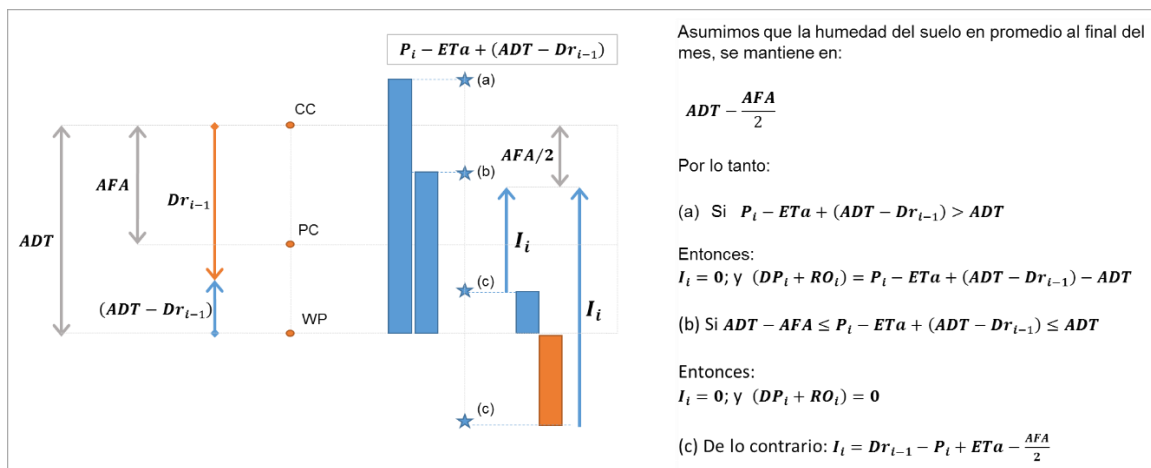


Figura 3.2. El riego (I_i) y las pérdidas ($DP_i + RO_i$) en el balance de agua del suelo. Fuente: Elaboración propia con base en (FAO, 2006).

Con las suposiciones anteriormente descritas se estima el riego según la Ecuación 10.

Ecuación 10. Riego

$$I_i + P_i - ETa + (ADT - Dr_{i-1}) = ADT - \frac{AFA}{2}$$

$$I_i = -P_i + ETa - (ADT - Dr_{i-1}) + ADT - \frac{AFA}{2}$$

$$I_i = Dr_{i-1} - P_i + ETa - \frac{AFA}{2}$$

La Ecuación 10 responde únicamente a las suposiciones antes descritas y a cultivos para los que se conoce que se riegan o se asume que se riegan cuando no existe información que lo confirme. Una vez definido el exceso de agua ($DP_i + RO_i$) y el riego (I_i), se estima el agotamiento al final del mes (Dr_i) según la Ecuación 8 y se inicia el balance para el mes siguiente, considerando como condición inicial el agotamiento del mes anterior (Dr_{i-1}).

Finalmente se busca diferenciar la parte de la evapotranspiración que se suple con el riego, relacionada con el agua azul y definida como la ETa_{azul} (Ecuación 11) y la parte que se suple con agua de lluvia, que está relacionada con el agua verde y definida como la ETa_{verde} (Ecuación 12).

Ecuación 11. Evapotranspiración azul

$$ETa_{azul} = \text{mínimo} (I_i; ETa)$$

Ecuación 12. Evapotranspiración verde

$$ETa_{verde} = ETa - ETa_{azul}$$

Teniendo en cuenta este procedimiento, se calcula el rendimiento hídrico del cultivo, es decir la huella hídrica. Para calcular la huella hídrica azul y huella hídrica verde, es necesario conocer el área sembrada de cada cultivo en cada polígono homogéneo, para luego aplicar la Ecuación 13⁵ y

⁵ El “10” representa el factor de conversión que permite incorporar la evapotranspiración en mm y el área sembrada en ha para obtener la Huella Hídrica Azul en m³.

la *Ecuación 14* basados en las evapotranspiraciones calculadas de acuerdo con las anteriores ecuaciones.

Ecuación 13. Requerimiento de agua azul

$$RAA = 10 * ETa\ azul * As$$

Ecuación 14. Requerimiento de agua verde

$$RAV = 10 * ETa\ verde * As$$

De donde:

RAA: Requerimiento de agua azul [m³/unidad de tiempo].

ETa azul: Evapotranspiración azul ajustada [mm].

RAV: Requerimiento de agua verde [m³/unidad de tiempo].

ETa verde: Evapotranspiración verde [mm].

AS: Área sembrada actual⁶ [ha].

Adicional, a este cálculo es necesario estimar las pérdidas de los sistemas de riego, teniendo en cuenta la eficiencia (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Eficiencias asignadas al tipo de riego de los sistemas de riego en Colombia.

Tipo de riego	Eficiencia de riego (%)
Aspersión	80
Gravedad	50
Gravedad y Goteo	65
Aspersión y sin información	75

⁶ En el caso de los cultivos transitorios, esta área se corresponde con el proceso de distribución mensual de áreas semestrales y la acumulación de áreas distribuidas según el período de siembra y cosecha del cultivo

Aspersión y gravedad	65
Aspersión y goteo	85
Sin información	70

Fuente: (IDEAM, 2014)⁷

Las eficiencias de riego se asignaron para cada cultivo según estuvieran reportados en los distritos de riego. En el caso que no se tuviera información se asumió una eficiencia de riego del 70%. La ecuación utilizada para la estimación de la demanda se presenta en la *Ecuación 15*.

Ecuación 15

$$Demanda = \frac{HH\ azul}{eficiencia\ (\%)}$$

La información es parcial o es indirecta. En general, el tratamiento comienza por establecer criterios para manejarla, ya sea para completarla, o depurarla, acompañado de jornadas de discusión con las instituciones, donde se aclaran dudas al respecto de la información y se conocen las limitaciones de la información.

La información que proviene de registros de las instituciones se revisa y si existe inconsistencia en algunos de sus datos, se generan espacios técnicos con las instituciones. Una vez aclarados se procede a hacer las sumatorias para establecer el uso de agua.

Cuando se trata de hacer la estimación por métodos indirectos, por lo general hay dos métodos, si la información es muy precaria, se organizan mesas de trabajo con las instituciones para establecer los datos necesarios. Cuando la información proviene de bases de datos como la producción del sector, se verifica el total de la producción en el área de estudio y en los municipios, se consulta con los funcionarios o contratistas sobre estos niveles de producción al igual que sobre los módulos de consumo de agua utilizados y, se procede a calcular de acuerdo con la metodología establecida.

⁷ En el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2014) se definieron eficiencias de riego por municipio y cultivo considerando la existencia de distritos de riego e información específica publicada por dichos distritos.

3.3.2. Fuentes de información disponible para la evaluación de la demanda del agua

En el desarrollo del proceso de estimación se indagó en todas las fuentes disponibles de las que se tuvo conocimiento. La Tabla 3.3 sintetiza las fuentes de información, la información recopilada y el estado de la información para cada sector.

Tabla 3.3 Fuentes de información disponible

Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
Agrícola	DANE Ministerio de Agricultura Agronet Evaluaciones Agropecuarias Municipales -EVAs-	Áreas sembradas por departamento Áreas sembradas por municipio y departamento	En el DANE hay datos municipales y gran parte de la información esta concertada con los gremios y no tiene información de cultivos tradicionales. En este sentido, tiene categorías distintas a las presentadas por el ministerio. Por ejemplo, en EVAS se puede encontrar el caucho, pero en el DANE está agrupado con otros cultivos. El DANE presenta datos de arroz en categoría distinta a las EVAs. Por ejemplo: en el Dane se considera arroz manual y mecanizado, mientras que en las EVAs es definido como arroz seco manual y seco mecanizado.
	IDEAM	Mapa de coberturas o usos del suelo Zonificación climática para Colombia Zonificación hidrológica Límites municipales y departamentales	Como no se tiene información de polígonos de cultivo, se asigna una zona de cultivo bajo una metodología que establece la probabilidad de su existencia en un área con ciertas características climáticas y de usos del suelo Mapa de zonificación climática para Colombia (IDEAM, 2007): Se empleó la capa (vector) de zonificación climática con el fin de emplearla en el proceso de polígonos homogéneos. (IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2015) Mapa de coberturas terrestres para Colombia (IDEAM, 2018-2020): Se empleó la capa (vector) de cobertura terrestre para Colombia (cobertura_tierra_2018).
	Ministerio de Agricultura EVAs	Pastos	Es información de 2013, dado que no se encuentra para años posteriores. La información corresponde a la base de datos de áreas con pastos de Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, 2013b), donde se consolida el área en pastos para cada municipio, según cinco categorías: pastos de corte, forrajes, pastos mejorados, pastos naturales, y sistema silvopastoril.

Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
Post cosecha	Palma: Fedepalma	Toneladas de fruto fresco que entra a procesar Nombre y localización de la planta de transformación primaria de aceite de palma Módulo de uso de agua de cada planta	La información fue suministrada por Fedepalma quien actualiza permanentemente sus bases de datos. Se verificó buscando la información en las páginas web de cada empresa que las plantas realmente estén dentro del área de estudio. La información suministrada por Fedepalma viene verificada pues son los reportes de las plantas que están afiliadas a la federación Los módulos de uso fueron levantados por Cenipalma en el año 2017. No se cuenta con una actualización de esos usos.
	Café: Agronet Federación nacional de cafeteros	EVAS, Toneladas de café pergamino por municipio Módulo de uso de agua para beneficio tradicional y Módulo de uso de agua para beneficio orgánico	Es la información reportada por las UMATAS al Sistema de información del ministerio de agricultura. Tiene problemas de precisión pues es una autoevaluación. El módulo de uso del agua fue obtenido de la literatura
	Caucho: Compañía Cauchera Colombiana	M ³ de agua usada en el proceso de transformación del latex en TSB 10 Technical Specific Rubber	Información obtenida en visita de campo donde se reconoce el proceso productivo y se entrevista al ingeniero encargado de la planta
Pecuario	ICA, Agronet	Inventarios de bovinos, porcinos, avícolas, bufalinos, equinos, caprinos y ovinos. La fuente de información corresponde al Censo Pecuario Nacional elaborado por el ICA y reportado en la plataforma de Agronet (ICA, 2020)	Bases de datos publicadas anualmente por el ICA como parte de su registro de vacunación. Se cuenta con datos para los 208 municipios a los que se aplica los módulos de uso, previamente revisados con Unipaz, para establecer su validez en la región. Se realizó ejercicio más detallado para el ganado bovino y porcino al existir información distribuida por edad y sexo, aplicándose módulos de uso para cada categoría.
Sacrificio de ganado	ICA, Agronet Módulos de uso obtenidos de: Bovinos: ENA 2018 verificados con la CAS (IDEAM, 2019). Porcinos: ENA 2018 (IDEAM, 2019). Caprinos y Ovinos: Literatura, y ENA 2010 (IDEAM, 2011), conversación con dueño de planta de sacrificio de ganado menor	Inventarios de bovinos, porcinos, avícolas, bufalinos, equinos, caprinos y ovinos. Plantas de sacrificio del país.	Se cuenta con una encuesta nacional ESAG del DANE, que tiene representatividad departamental, pero no municipal. El país y la región no cuenta con un registro de las cabezas de ganado sacrificadas y es necesario fortalecer la información de esta actividad. Se cuenta con la lista de las plantas de sacrificio por municipio y su característica, (procesamiento de bovinos, porcinos o aves) Se tiene información puntual (de una sola planta) sobre ovinos y caprinos No se calcula para equinos pues no se tiene ninguna información. Se utilizan los módulos de uso recogidos y validados por la CAS y productores de ovinos y caprinos.

Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
Piscícola	Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) SIRH	Espejos de agua existentes y extensión de alevinos Profundidad de las piscinas Producción estimada de pescado por municipio Factores de conversión en biomasa Factores de uso de agua en el beneficio	Es una información parcial, no se encuentra para todos los departamentos y no es uniforme. Está en diversas tablas, sin posibilidad de relacionarse. Es información depurada por la entidad.
Industria	IDEAM – RUA IDEAM – SIRH (SSDP, 2020)	Uso de agua como materia prima Uso de agua concesionada al usuario industrial que debe realizar ambientales Caudal otorgado al usuario para su actividad económica industrial Uso de agua en Industria	Las encuestas son realizadas anualmente por el DANE. El RUA y el SIRH son registros que los usuarios auto diligencian. Estas dos últimas no tienen los registros completos de los caudales otorgados y en algunos casos hay errores en los datos que se expresan como volúmenes y no como caudales. También presentan actividades que pertenecen a otros sectores como los de transformación primaria (post cosecha de palma y refinación) o las clasificaciones erradas como las actividades de comercio, servicios o construcción. Se validan y se eliminan los registros que no corresponden o generan duda.
Energía	UPME Embalse de Hidrosogamoso se obtienen datos del Sistema de Información Eléctrico Colombiano SIEL PCH y las termoeléctricas con los operadores.	Volumen de agua que permanece embalsada durante el año y promedio diario mensualizado Agua turbinada	Se presentan dos tipos de datos para hidroeléctricas. El primero relacionado con el agua que permanece embalsada y el agua turbinada de PCH: se agrega la información de los registros obtenidos de los operadores. El agua turbinada de las hidroeléctricas que hacen parte del sistema nacional interconectado es información que proviene directamente de los operadores que está en sus registros de operación diaria.
Minería	UPME – ANM UPME	Producción de metal, o mineral por municipio en toneladas Módulos de uso de agua por cada mineral/metall reportados en el portal web de la UPME (UPME, 2014, 2020)	Los registros de producción por municipio no necesariamente corresponden a la producción que hace el municipio, sino al registro de la venta (en el caso del oro), así que hay alguna distorsión en el cálculo de uso de agua. Se distribuye los metales en cada municipio del área y se multiplica por el módulo de uso dispuesto por la UPME
Hidrocarburos	Ecopetrol ACP	Agregación de los registros de uso de agua en las diferentes etapas de la exploración Módulos de uso de agua del proceso productivo	La información suministrada por pozo con la localización municipal y por subzona hidrográfica facilita la identificación del proceso productivo y el uso de agua. Se hacen reuniones de aclaración con Ecopetrol, por ejemplo, sobre el registro del recobro.
Doméstico	SSPD – registros del SUI	Agua facturada por los acueductos para consumo doméstico por municipio	Las bases de datos no registran toda la información o registran información parcial, generalmente de cabeceras. Como en los municipios pequeños no hay micro medición, el vacío de información real de uso de agua en labores domésticas es alto. Esto exige depurar la base de datos y definir criterios para completar los datos, diferenciando agua en el área rural y en la urbana.
Servicios	(SSDP, 2020)	Agua facturada por los acueductos para consumo para comercio y servicios oficiales por municipio	Se aceptan los datos de la base de datos. No existe un buen registro de usos por servicios, en especial
Construcción	RUA y SIRH	Agua facturada por los acueductos para consumo en actividades de construcción por municipio	Se revisan los datos de la información del RUA y de SIRH.

El cálculo de la demanda no es difícil si se tuviera la información suficiente y en el estado de calidad necesario para reducir la incertidumbre. La realidad es otra. Por ello es necesario continuar insistiendo en mejorar la información y que las fuentes asuman esta tarea con la debida profundidad. Por lo tanto, se hizo esta estimación con la mejor información encontrada y con la depuración necesaria para su utilización.

A continuación, se presentan los resultados de la estimación de la demanda por cada sector económico.

3.4. Resultados de la demanda sectorial del agua

El análisis se elabora para 9 sectores económicos y el uso doméstico como se presenta a continuación. Se presentan también algunas aclaraciones conceptuales y metodológicas para cada sector, con el fin de clarificar los resultados mostrados.

3.4.1. Sector agrícola

Como se indicó anteriormente, el cálculo de la demanda hídrica para el sector agrícola considera tanto el agua usada para el riego, en caso de ser necesario, como el agua utilizada en el proceso de post cosecha. A continuación, se presentan los cálculos realizados para cada uno.

Post cosecha

En el área de estudio se identifica la transformación primaria de palma, café y caucho. Se calculó el uso de agua en post cosecha con base en la información recopilada en Agronet (AGRONET, 2021), tomando la variable de producción en toneladas para cada uno de los cultivos.

Los módulos de uso de agua de la palma y café se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Módulos de uso de agua para la postcosecha de la palma y café

Postcosecha	Módulo	Fuente
Palma	7,9 m ³ /RFF 7,23 m ³ /RFF 6,6 m ³ /RFF 6,47 m ³ /RFF 4,5 m ³ /RFF 4,3 m ³ /RFF	Valores validados por FEDEPALMA y por el Convenio IDEAM – ECOPETROL, corresponden a los módulos identificados por planta procesadora (las plantas tienen patrones diferenciados en el uso del agua)

Postcosecha	Módulo	Fuente
	4,1 m ³ /RFF 3,3 m ³ /RFF 2,9 m ³ /RFF	
Café	45 L/Kg café (módulo para beneficio tradicional) 1 L/Kg café (módulo para beneficio orgánico)	(Federación Nacional de Cafeteros & Cenicafe, 2015). Se asume que el 70% de la producción se hace bajo la modalidad de beneficio tradicional, y el 30% restante en la modalidad orgánico

- Palma

El uso de agua para el procesamiento de palma se hace en 6 municipios del área en donde existen 14 plantas que reciben 1.397.094 toneladas de fruto fresco y para ello, utilizan 9.519.808,39 m³ de agua (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Uso de agua en procesamiento de palma

Departamento	Municipio	Planta de beneficio	Uso de agua (m ³)
Bolívar	San Pablo	Extractora Loma Fresca Sur de Bolívar S.A.S.	407.987,84
Bolívar	San Pablo	Extractora Vizcaya S.A.S.	354.505,99
Cesar	San Alberto	Palmas del Cesar S.A.	1.967.735,24
Cesar	San Alberto	Indupalma	1.051.094,88
Cesar	San Alberto		248.356,00
Cesar	San Martín	Agroindustrias del Sur Del Cesar Ltda Y Cía. S.c.a. - Agroince	1.096.999,69
Santander	San Vicente de Chucuri	Aceites del Magdalena Medio S.A.S.	No reporta
Santander	Puerto Wilches	Extractora Central S.A.	1.192.275,39
Santander	Sabana de Torres	Extractora San Fernando S.A.	368.924,72
Santander	Sabana de Torres	Procesadora de Aceite Oro Rojo Ltda	107.078,10
Santander	Puerto Wilches	Palma y Trabajo S.A.S.	653.330,29
Santander	Puerto Wilches	Palmas Oleaginosas Bucarelia S.A.S.	308.355,16
Santander	Puerto Wilches	Palmeras de Puerto Wilches S.A.	1.133.804,28
Santander	Puerto Wilches	Extractora Monterrey S.A.S.	501.899,83
Santander	Puerto Wilches	Oleaginosas del yuma S.A.S.	127.461,00
Total			9.519.808,39

Fuente: FEDEPALMA e IDEAM (SIRH)

- Beneficio de café

La estimación se hace con base en los módulos de uso de Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2011), en el cual se establece que el 70% del beneficio se hace por proceso tradicional y el 30% por proceso orgánico, con módulos de uso de 45 l/kg y 1 l/kg respectivamente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El uso total de agua es de 1.861.000 mil m³ de agua.

- Caucho

A partir de la visita a la planta de procesamiento de latex de la Compañía Cauchera Colombiana, en Puerto Araujo, en jurisdicción del municipio de cimitarra, se logró establecer el uso de agua de esta única planta, que recoge la producción de la región.

De acuerdo con los datos recopilados, se utilizan 40.000 litros diarios para el procesamiento de 18 toneladas de latex para convertirlo en TSB10. Esto quiere decir que utiliza 14.600 m³ de agua al año.

Cultivo

En las Tabla 3.6 y Tabla 3.7, se presenta el inventario de cultivos permanentes y transitorios identificados en la zona de estudio, resaltando aquellos cultivos de mayor representatividad en términos de área.

Tabla 3.6. Cultivos permanentes presentes en el área de estudio

Cultivo	Área Sembrada distribuida en Área de Estudio (ha)	% de participación del cultivo
Palma de aceite	131357,0	31,48
Cacao	66435,1	15,92
Café	60991,7	14,62
Caña panelera	52319,9	12,54
Yuca	18337,7	4,39
Plátano	11520,4	2,76
Piña	11354,2	2,72
Caucho	8667,2	2,08
Mandarina	9571,7	2,29
Naranja	8127,3	1,95
Aguacate	6188,0	1,48

Limón	5945,3	1,42
Guayaba	5036,4	1,21
Otros permanentes	21437,1	5,14

Fuente: (DANE, 2014; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020)

Tabla 3.7. Cultivos transitorios presentes en el área de estudio

Cultivo	Área Sembrada distribuida en Área de Estudio 2019A (ha)	% de participación del cultivo	Cultivo	Área Sembrada distribuida en Área de Estudio 2019B (ha)	% de participación del cultivo
Papa	38392,5	43,27	Papa	29.652	38,81
Maíz	20670,9	23,30	Maíz	13.086	17,13
Frijol	7868,2	8,87	Frijol	8.605	11,26
Arveja	5271,8	5,94	Arveja	4.746	6,21
Cebolla de bulbo	4206,1	4,74	Arroz seco mecanizado	4.359	5,70
Arroz riego	2997,6	3,38	Cebolla de bulbo	4.083	5,34
Arroz seco manual	1749,5	1,97	Arroz riego	3.431	4,49
Arroz seco mecanizado	1044,8	1,18	Arroz seco manual	1.794	2,35
Tomate	937,0	1,06	Tomate	1.139	1,49
Tabaco rubio	895,3	1,01	Tabaco rubio	745	0,97
Otros transitorios	3962,2	5,30	Otros transitorios	4768,6	6,24

Fuente: (DANE, 2014; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020)

De acuerdo con el modelo de estimación establecido se llegó a una demanda de agua de 699 Mm³ distribuida en cultivos permanentes, pastos y cultivos transitorios (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Uso de agua en agricultura por subzonas hidrográficas

Código SZH	Nombre de la subzona hidrográfica	Uso de agua (Mm ³ /año)			
		Permanentes	Transitorios	Pastos	Total
2.312	Río Carare (Minero)	4,4	1,0	7,9	13,3
2.314	Río Opón	3,0	0,0	0,0	3,0
2.317	Río Cimitarra y otros directos al Magdalena	22,7	1,2	8,7	32,6

Código SZH	Nombre de la subzona hidrográfica	Uso de agua (Mm ³ /año)			
		Permanentes	Transitorios	Pastos	Total
2.319	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	84,0	10,1	20,5	114,5
2.320	Directos al Magdalena (Brazo Morales)	64,2	5,7	33,6	103,5
2.401	Río Suarez	16,3	36,3	45,8	98,4
2.402	Río Fonce	13,6	2,9	4,9	21,4
2.403	Río Chicamocha	30,9	49,8	193,9	274,5
2.405	Río Sogamoso	8,0	0,5	28,8	37,3
Total					699

Los cultivos con mayor uso de agua en su orden son palma, papa y pastos de corte (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Uso de agua por cultivo permanente, transitorio y pastos

Tipo	Cultivo permanente	Uso del agua (Mm ³ /año)
Cultivo permanente	Palma de aceite	83,02
	Cacao	38,19
	Plátano	29,71
	Yuca	28,82
	Piña	7,65
	Caña panelera	7,44
	Limón	4,34
	Naranja	3,52
	Mandarina	3,36
	Aguacate	2,62
	Guayaba	0,77
Otros permanentes	37,68	
Cultivos transitorios	Papa	52,37
	Maíz	16,93
	Arroz riego	9,44
	Frijol	6,84
	Cebolla de bulbo	3,78

Tipo	Cultivo permanente	Uso del agua (Mm ³ /año)
	Arveja	3,66
	Tomate	2,02
	Tabaco rubio	1,78
	Arroz secano manual	-
	Arroz secano mecanizado	-
	Otros transitorios	10,55
Pastos	Pastos de corte	284,14
	Forrajeros	59,91

3.4.2. Sector pecuario

Los bovinos y porcinos corresponden a las poblaciones de ganado con mayor representatividad en el país, registrando 13% y el 3% respectivamente. Una cuarta parte de la población de búfalos se encuentra en el área de estudio y un 12% de los ovinos (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Inventario ganadero en el área de estudio y participación en el inventario nacional por ganadería del año 2019

Ganadería	Inventario del país	Inventario Área de Estudio	% del país	Cantidad municipios
Bovinos	27.234.027	3.582.109	13	208
Porcinos	6.473.525	225.458	3	118
Búfalos	356.908	73.707	21	208
Equinos	1.603.679	142.593	9	208
Caprinos	1.006.077	73.707	7	208
Ovinos	1.629.120	190.993	12	208

Fuente: elaboración propia a partir de ICA (2020)

La información de bovinos y porcinos se encuentra desagregada por edad y sexo, de acuerdo con el ciclo de producción y el número de fincas por tamaño para el caso de bovinos y el número de granjas tecnificadas por tamaño para el caso de los porcinos. En la Tabla 3.11 se presentan los factores o módulos de uso de agua aplicados para estimar la demanda hídrica del sector pecuario.

Tabla 3.11. Criterios de distribución del inventario y Factores de uso de agua para el sector pecuario

Subsector	Factor de uso de agua
Bovino y bufalino	Terneras y terneros <1 año: 30 L/animal – día Hembras y machos 1 – 2 años: 45 L/animal Hembras 2 – 3 años: 110 L/animal – día Machos 2 – 3 años: 80 L/animal – día Hembras > 3 años: 115 L/animal – día Machos > 3 años: 80 L/animal - día
Porcino	Lechones 1 – 60 días: 1,3 L/animal - día Levante 61 – 120 días: 5,5 L/animal - día Ceba 121 – 180 días: 9 L/animal - día Hembras reemplazo 120 – 240 días: 13,5 L/animal - día Hembras cría > 240 días: 23,5 L/animal – día Machos reproductores > 180 días: 16 L/animal - día
Avícola	Pollita: 0,25 L/animal -día Pollo:0,35 L/animal -día Ave traspatio: 0,30 L/animal -día Pérdidas: 32%
Equino	Animal de trabajo: 50 L/animal – día Animal de cría: 70 L/animal - día
Caprino y ovino	5 L/animal - día

Fuente: (IDEAM, 2019)

- **Bufalinos y bovinos**

El uso de agua en los búfalos se estimó con módulos de uso de la ganadería bovina, de acuerdo con la información recibida de la Unipaz. Es una ganadería que no se encorrala y su producción es si se quiere, más extensiva que la de la ganadería bovina.

El uso de agua para los bovinos se estimó en 99.521.580 m³ y 2.032.325 m³ para los búfalos.

- **Porcinos**

El uso de agua calculado y verificado con los parámetros establecidos se hace para los 208 municipios de acuerdo con la edad y sexo de los animales. De acuerdo con la información recopilada, el uso de agua se estima en 272.455 m³ para el año 2019.

- **Equinos**

Sobre los equinos es necesario establecer la diferencia entre la población en pesebrera y la población dedicada a trabajar en las fincas. En el primero, el consumo de agua asume el alojamiento, pues las pesebreras deben ser lavadas. De acuerdo con la información encontrada en

la literatura⁸ y verificando con la CAS, se establece que el uso de agua es de 50l/animal/día para animal de trabajo y 70l/animal/día para animal de cría. Se asume que la proporción de animales de pesebrera es de un 30% de la población total. Se hace la estimación para los 208 municipios. En este sentido, se tiene una demanda de 2.706.415 m³. La población de equinos de pesebrera se ubica en el área metropolitana de Bucaramanga y en la mesa de los santos

- **Caprinos y ovinos.**

De acuerdo con la revisión de literatura y las conversaciones⁹ con productores de caprinos y ovinos, se establece que un animal consume 5 litros por día, en promedio (Peig Ganadera, 2022). Para un total de 73.707 de caprinos se demanda 134.515 m³ de agua en el año 2019 y con un total de 190.993 de ovinos se usan 348.562 m³ al año.

Aves

La distribución del inventario entre los municipios de los departamentos del área de estudio se comparó con la rotación del inventario de acuerdo con la capacidad instalada, información obtenida del inventario de la actividad por departamento publicado por FENAVI para 2014 (FENAVI, 2021), mostrando coherencia entre los datos. A partir de esto, se realizó el cálculo de uso de agua de acuerdo con los módulos de uso de agua identificados para el sector en el ENA 2018. El inventario neto de aves que permanece durante todo el ciclo asciende a 231.137.714,3 de los cuales el 5% es pollitas y 95% pollos.

El cálculo de uso de agua se hace tanto para aves encasetas (galpones), como para aves de traspatio, utilizando factores de uso de 230 cc diarios por ave para calmar la sed y una proporción

⁸Un caballo puede beber entre 30 y 45 litros de agua al día, en condiciones normales. Estos requerimientos pueden incrementarse con el ejercicio, así como con temperaturas altas”. https://www.veterinariosavicente.com/agua_caballos/. “La literatura revisada menciona que el consumo diario de agua es de al menos cinco litros por cada 100 kg de peso del caballo, entonces con un caballo de 500 kg el consumo diario sería de al menos 25 litros, estando entre los 25 y los 60 litros diarios <https://zoovetempasion.com/caballos/cuanta-agua-consume-un-caballo-al-dia/>.”

⁹ Se conversó con Martin Humberto Ariza, Presidente de Caprisan. de acuerdo con su experiencia, pues tiene una granja de ovinos, comenta que en general en promedio un animal de 20 kilogramos consume entre el 12% y el 1% de su peso en agua.

de agua para los lugares de alojamiento. Se calculó la pérdida de agua relativa a consumo, lugares de alojamiento y sacrificio en un 32%. El uso de agua asciende a 47.900.930 m³.

En resumen, el uso de agua en la actividad pecuaria asciende a 153.197.605 millones de m³ que se presenta en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Resumen de uso de agua en actividad pecuaria

Ganadería	Inventario (No. animales)	Uso de Agua (m ³)
Bovinos	3.582.109	99.521.580
Búfalos	73.707	2.032.325
Equinos	142.593	2.706.415
Porcinos	225.458	272.454
Caprinos	73.707	134.515
Ovinos	190.993	348.562
Aves	231.137.714	41.972.048
Total	No aplica	146.987.901

3.4.3. Sacrificio de ganado

Aunque no es propiamente un sector económico como tal y sus resultados en otros estudios generalmente son incluidos en el sector pecuario, en este caso, se tomó la decisión de presentar sus resultados diferenciados, ya que, de acuerdo a la información disponible, se implementó un cálculo específico para el sacrificio. Para hacer el cálculo del beneficio bovino se realiza a partir de reunir varia información, como el uso de agua en sacrificio en la planta de sacrificio de Barrancabermeja, la encuesta del DANE sobre sacrificio de ganado y el inventario de plantas de sacrificio de la zona. Se sabe que la información adolece de parámetros que permita saber cuánta agua se utiliza en sacrificio informal. Se distribuye el valor total del uso de agua departamental en el caso de Santander, en las plantas presentes en el departamento.

Para el caso del sacrificio de ganado porcino, avícola y caprino, se asume que todo el inventario se sacrifica por lo que se utiliza la misma información del ICA reportada en el sector pecuario. El

sacrificio de ganado bufalino, se asume con el mismo comportamiento del sacrificio de ganado bovino. El total se presenta en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Uso de agua en sacrificio de ganado

Tipo de ganado	Uso de agua en Sacrificio m3
Bovinos- Bufalino	173.480
Porcinos	67.637
Caprinos	11.056
Ovinos	28.649
Aves	5.928.882
Total	6.209.704.22

3.4.4. Sector piscícola

De acuerdo con los datos de SIRH y los recibidos de la AUNAP, fue calculada el uso de agua para este sector, resultando un valor de 10.214.806 m³ de agua. Aunap entregó datos depurados de Santander y de Norte de Santander, en donde se pudo calcular el agua utilizada en la producción de alevinos y en el beneficio. Los demás datos se calculan con base en las concesiones.

Tabla 3.14. Uso de agua en Piscicultura

	Agua en estanques – Alevinos	Agua convertida en biomasa	Beneficio
Uso de agua (m³)	283.614	9.928.937	2.255

3.4.5. Sector industrial

A partir de la preparación de las bases de información de RUA y SIRH y depurando las actividades que no corresponden a industria (refinería de Barrancabermeja ni las plantas procesadoras de palma), se contabilizan 6.317.086,02 m³ de agua que se usan en 35 municipios. A esta se adiciona el valor identificado en la base de datos de la superintendencia de servicios públicos por 3.311.794 m³ para un total de. 9.628.880 m³.

3.4.6. Sector energético

En el área de estudio se presenta el embalse Topocoro y la hidroeléctrica más grande del país Sogamoso, 7 PCH y 7 termo eléctricas. El valor total de uso de agua para la generación de hidroenergía asciende a 2.767.037.979 m³. En este cálculo no se ha incluido el agua turbinada de Sogamoso que asciende a 12.434 Mm³. Tampoco se incluye el valor de otros embalses.

- Topocoro y Sogamoso

De acuerdo con los datos recibidos se calculó el agua embalsada durante el año como volumen útil promedio diario que alcanza 1.849 Mm³. El agua turbinada asciende a 12.434 Mm³.

Tabla 3.15. Agua Turbinada en Sogamoso (hidroeléctrica) y Volumen útil diario en Topocoro (Embalse) 2019

Mes	Volumen de agua turbinada en Sogamoso (Mm ³)	Volumen útil diario en Topocoro (Mm ³)
enero	994,17	1.408
febrero	713,42	1.143
Marzo	1237,13	1.039
abril	1064,96	1.860
mayo	1454,43	2.290
junio	1320,37	2.390
julio	894,23	2.276
agosto	1135,59	1.881
septiembre	1083,37	1.453
octubre	887,42	1.857
noviembre	884,86	2.341
diciembre	764,98	2.248
Total	12.434	1.849

Fuente: a partir UPME (2021) e información suministrada por ISAGEN

- **Hidroeléctricas a filo de agua**

Los valores de agua turbinada se obtuvieron de los operadores. La suma de la información recibida alcanza los 910 Mm³.

Tabla 3.16. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas presentes en el área de estudio

Nombre Planta	Subtipo	Cod Dane	Municipio	Departamento	Uso de agua (m ³)
PCH La Libertad	Filo agua	15814	Toca	Boyacá	91.391.868
Puente Guillermo	Filo agua	68572	Puente Nacional	Santander	357.933.600
Cascada	Filo agua	68001	Bucaramanga	Santander	206.418.413
Palmas San Gil	Filo agua	68679	San Gil	Santander	254.328.805
Total					910.072.686

- **Térmicas**

Las Térmicas se localizan en 4 municipios del área de estudio y con base en ellas, se elaboraron los cálculos y/o se solicitó información a los operadores.

Las Térmicas de Barranca y de Cimitarra no registran datos para 2019 en la información de XM, por lo tanto, no se calcula el uso de agua. Se revisaron los módulos y de acuerdo con el soporte de la literatura y obtenido de algunas térmicas a gas se asume un módulo de uso de 4.4 m³ por cada Mwh hora (Wilson, Leipzig, & Griffiths-Sattenspiel, 2012). Esto porque tienen un proceso de ciclo cerrado y de recirculación. De las termoeléctricas de carbón se utilizó el módulo de uso del ENA 2018 (IDEAM, 2019), pues no se tiene otra información que permita evaluar el uso de agua en este proceso. Sin embargo, paipa 4 envió su reporte de agua utilizada y registra un módulo de 2,2 m³ por cada Mwh. Se presenta a continuación el cálculo de uso de agua de las térmicas en el área de estudio.

Tabla 3.17. Uso de agua en Térmicas

Nombre Planta	Municipio	Generación MWh*	Uso de agua (m ³ /año)	Fuente de información u observación
PAIPA 1	Paipa	159.595 (Carbón)	2.740.097	Dato suministrado por GENSA
PAIPA 2	Paipa	211.027 (Carbón)		
PAIPA 3	Paipa	309.835 (Carbón)		
PAIPA 4	Paipa	966.405 (Carbón)	2.149.185	Dato suministrado por SOCHAGOTA
TERMOBOLI VAR 1	Tópaga	1.431 (Gas)	6.296	Se aplicó módulo (Wilson, Leipzig, & Griffiths-Sattenspiel, 2012) de 4,4 m ³ /MWh
AUTOG ARGOS SOGAMOSO	Sogamoso	19.117 (Carbón)	3.179.574	Se aplicó módulo del ENA 2018 (IDEAM, 2019)
MERILECTRICA 1	Barrancabermeja	4.135 (Gas)	10.973	Dato suministrado por CELSIA
*Información obtenida del SIEL y suministrada por XM				

Otros Embalses

Se encontró que en el área de estudio hay 4 embalse cuyos usos son riego y uso doméstico. Se registrará esta información, pero estos datos no se sumarán con otros, pues se estaría generando una doble contabilización con los otros sectores.

Tabla 3.18. Otros embalses en el área de estudio

Nombre del embalse	Cod Dane	Municipio	Departamento	volumen útil diaria (Mm ³)
La playa	15837	Tuta	Boyacá	5,00
La copa	15814	Toca	Boyacá	37,2
El Hato	25154	Carmen de Carupa	Cundinamarca	12,80
Gachaneca	15646	Samacá	Boyacá	6,00
Total				60.99

3.4.7. Sector minero

Se realizó el cálculo para 146 municipios donde la información de la UPME reporta producción mineral. Se calcula con base en módulos de uso publicados por la misma UPME, los cuales se relacionan a continuación.

Tabla 3.19. Módulos de uso de agua para los minerales considerados en el estudio

Mineral	Módulos de uso del agua aplicados en la zona de estudio	Mineral	Módulos de uso del agua aplicados en la zona de estudio
Arcillas cerámicas	0,08 m ³ /ton	Mármol	0,5 m ³ /m ³
Arcillas misceláneas	0,5993 m ³ /ton	Oro	1,99 m ³ /g
Arenas silíceas	0,002 m ³ /m ³	Plata	0,22 m ³ /g
Asfaltita	0,01 m ³ /m ³	Puzolana	0,0052 m ³ /ton
Barita	2,1561 m ³ /ton	Recebo	0,45 m ³ /m ³
Caliza	0,2443 m ³ /ton	Roca coralina	0,0439 m ³ /m ³
Carbón	1,43 m ³ /ton	Roca fosfórica	0,03 m ³ /ton
Gravas	0,22 m ³ /m ³	Yeso	0,01 m ³ /ton
Hierro	0,03 m ³ /ton		

Fuente: (UPME, 2014) (UPME, Captación del agua del sector minero colombiano, 2020)

En la Tabla 3.20 se presentan el uso del agua para la producción de cada mineral.

Tabla 3.20. Uso de agua en la actividad minera

Mineral/Metal	Uso de agua (m ³ /año)
Arcillas cerámicas (Ton)	18.877
Arcillas misceláneas (Ton)	201.204
Arenas silíceas (m3)	51
Asfaltita (m3)	59
Barita (ton)	4.216
Caliza (Ton)	1.098.806
Carbón (ton)	5.589.966
Esmeralda (quilates)	1.615.429
Gravas (m3)	441.222

Mineral/Metal	Uso de agua (m ³ /año)
Hierro (ton)	10.511
Mármol (m3)	22
Oro (gramos)	23.429.413
Plata (gramos)	1.391.382
Puzolana (Ton)	1.204
Recebo (m3)	360.387
Roca fosfórica (ton)	1.152
Yeso (ton)	2.921
Total	34.166.823

Luego, se realiza la espacialización del uso de agua, teniendo en cuenta el porcentaje del municipio que se encuentran dentro de las unidades de análisis, resultando un uso de agua de 18 millones de m³.

3.4.8. Sector hidrocarburos

Para este sector se tiene en cuenta los usos de agua en el proceso de extracción de petróleo y de la refinería de Barrancabermeja. Los usos de agua en la extracción de hidrocarburos se clasifican en tres categorías de acuerdo a la información reportada por la Asociación Colombiana del Petróleo – ACP- y por ECOPETROL, que corresponden a agua para uso doméstico, uso industrial y aguas de producción.

Los módulos de uso de agua para estimar la demanda en los campos con ausencia de información, se presentan en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Módulos de uso de agua para estimar la demanda por extracción de hidrocarburos

Módulo	Fuente	Observación
0,066 m³/barril	ACP (Asociación Colombiana del Petróleo ACP, 2020)	Módulo de uso de agua promedio para toda Colombia, valor que se puede ajustar al tipo de extracción de hidrocarburos en la zona de estudio

<p>2,25 barril/barril – 0,3577 m³/barril</p>	<p>ECOPETROL</p>	<p>Módulo de uso de agua para los campos de ECOPETROL, los cuales tienen características diferentes a los demás campos de extracción</p>
--	------------------	--

Fuente: elaboración propia a partir de (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2020) e información suministrada por ECOPETROL

Como se mencionó anteriormente, para estimar la demanda hídrica del sector hidrocarburos (extracción y refinería), se disponen de dos fuentes de información complementarias, lo que supone metodologías diferenciadas para generar el cálculo de demanda hídrica del sector. En el caso de la información reportada por ECOPETROL, se realiza un cálculo directo, ya que suministran el caudal de captación, simplemente se hace una conversión de unidades para expresar los resultados en metros cúbicos por año. Respecto al cálculo a partir de la información de producción de la ANH, se aplica el módulo de uso de agua definido por la ACP.

Ecopetrol representa el 75% de los campos explotados en la zona en 11 municipios, con 15 campos activos y 62 puntos de captación. La Tabla 3.22; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los datos de uso de agua anual para cada municipio.

Tabla 3.22. *Uso de agua por municipio para la explotación de hidrocarburos por parte de Ecopetrol*

Municipio	Uso de agua (m³/año)
Barrancabermeja	5.494.436
San Vicente de Chucurí	548.011
Cantagallo	112.196
Yondó	4.533.953
La Esperanza	31
Puerto Wilches	915.665

Municipio	Uso de agua (m ³ /año)
Rionegro	102.064
Sabana de Torres	60.697
San Martín	11.894
Total	11.778.949

Fuente: información suministrada por ECOPETROL

El uso de agua en la refinería es de 23.267.576 m³.

La información de la producción anual de barriles por municipio es presentada en la Tabla 3.23, para aquellos pozos que no son operados por Ecopetrol.

Tabla 3.23. Información de producción de hidrocarburos y uso de agua de acuerdo con ANH en pozos no operados por Ecopetrol

Departamento	Municipio	Total barriles/año (2019)	Uso de agua m ³ / año
BOYACÁ	CORRALES	92.233,8	6.087,4
BOYACÁ	TOPAGA	12.846,1	847,8
CESAR	AGUACHICA	215.985,8	14.255,1
CESAR	RIO DE ORO	317.629,9	20.963,6
CESAR	SAN ALBERTO	74.889,2	4.942,7
CESAR	SAN MARTÍN	6.297.748,3	415.651,4
SANTANDER	BOLIVAR	48,6	3,2
SANTANDER	CIMITARRA	24.756,9	1.634,0
SANTANDER	RIONEGRO	219.703,2	14.500,4
SANTANDER	SABANA DE TORRES	678.350,7	44.771,1
SANTANDER	SIMACOTA	133.689,7	8.823,5
Total general		8.067.882,1	532.480,2

Fuente: (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2020)

Tabla 3.24. Uso de agua total en el sector de hidrocarburos por municipio

Departamento	Municipio	Uso de agua (m ³ /año)
Antioquia	Yondó	4.533.953,00
Bolívar	Cantagallo	112.196,00
Boyacá	Corrales	6.087,43
Boyacá	Tópaga	847,84
César	Aguachica	14.255,06
César	Río de Oro	20.963,57
César	San Alberto	4.942,69
César	San Martín	427.545,88
Norte de Santander	La Esperanza	31,23
Santander	Barrancabermeja	28.762.012221
Santander	Cimitarra	1.633,96
Santander	Puerto Wilches	915.665,48
Santander	Rionegro	116.564,70
Santander	Sabana de Torres	105.468,29
Santander	San Vicente de Chucurí	548.011,09
Santander	Simacota	8.823,52
Total		35.579.001

3.4.9. Sector doméstico

El uso de agua doméstico para los 208 municipios y 3.904.445 habitantes se resume en la siguiente tabla. Calculando el uso urbano y el uso rural y una pérdida que se estima entre el 30% y el 70%, dependiendo del tamaño del municipio, el uso total alcanza a 255.7 Mm³ (Tabla 3.25).

Tabla 3.25. *Uso de agua para el sector doméstica*

Uso de agua urbano (m ³)	Uso de agua rural (m ³)	Uso de agua total urbano y rural (m ³)	Pérdidas en rural y urbano (m ³)	Uso de agua total (m ³ /año)

116.560.311	56.172.544	172.732.855	82.939.355	255.672.211
--------------------	------------	-------------	------------	-------------

3.4.10. Sector servicios

De acuerdo con la información de la superintendencia de servicios públicos, el uso de agua en comercio y servicios obtuvo un valor de 17.752.724 m³ y calculadas unas pérdidas estimadas en 40%, la demanda asciende a 24.853.813 m³.

Tabla 3.26. *Uso de Agua Comercial y Servicios*

Sector	Uso de agua rural (m³)	Uso de agua de Urbano (m³)	Uso total de agua (m³)	Uso total de agua con pérdidas (m³)
Oficial	28.580	5.861.688	5.890.268	8.246.375
Comercial	318.533	11.543.923	11.862.456	16.607.438
Total	347.113	17.405.611	17.752.724	24.853.814

3.4.11. Sector construcción

Se establece la demanda de agua a partir de las concesiones de agua del SIRH. Es una información que presenta subregistro, sin embargo, es la única fuente existente. El uso de agua asciende a 3.356.849 m³ para el año 2019. Se presenta un resumen de la demanda sectorial de agua, con el detalle de la subdivisión pertinente a cada sector. En total la demanda de agua es de 3.356.849 m³.

3.5. Resultados de la evaluación de la demanda de agua por subzona hidrográfica

La Tabla 3.27 y la Figura 3.3 muestra la distribución del uso del agua para las subzonas hidrográficas del área de interés y de influencia, donde se resalta la subzona hidrográfica 2405 Río Sogamoso con un 49% del total de la demanda, donde el sector energía aporta gran parte del uso del agua.

Tabla 3.27.. Uso del agua a nivel de subzona hidrográfica

Subzona hidrográfica	Agrícola	Pecuario	Sacrificio	Energía	Otros embalses	Hidrocarburos	Industria	Minería	Doméstico	Servicios	Total
	Mm ³ /año										
Río Carare (Minero)	13,4	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	10,2	0,2	38,7
Río Opón	3,0	7,3	0,2	0,0	0,0	6,0	0,1	0,2	10,5	0,9	28,3
Río Cimitarra y otros directos al Magdalena	32,6	6,3	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	5,2	5,2	0,2	54,2
Río Lebrija y otros directos al Magdalena	121,8	34,0	3,2	206,4	0,0	1,5	2,4	0,2	84,0	13,3	466,8
Directos al Magdalena (Brazo Morales)	104,3	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	8,6	0,3	124,6
Río Suárez	99,0	19,4	0,6	357,9	18,8	0,0	1,0	3,8	39,9	2,3	542,7
Río Fonce	21,9	3,7	0,2	254,3	0,0	0,0	0,0	0,2	8,9	0,9	290,2
Río Chicamocha	274,7	21,1	1,4	99,5	42,2	0,0	5,6	2,8	51,0	4,2	502,4
Río Sogamoso	38,1	15,8	2,3	1848,9	0,0	23,3	0,1	0,1	13,9	1,5	1.943,9
Total	708,7	128,2	8,0	2767,0	61,0	35,5	9,3	18,4	232,1	23,7	3.987

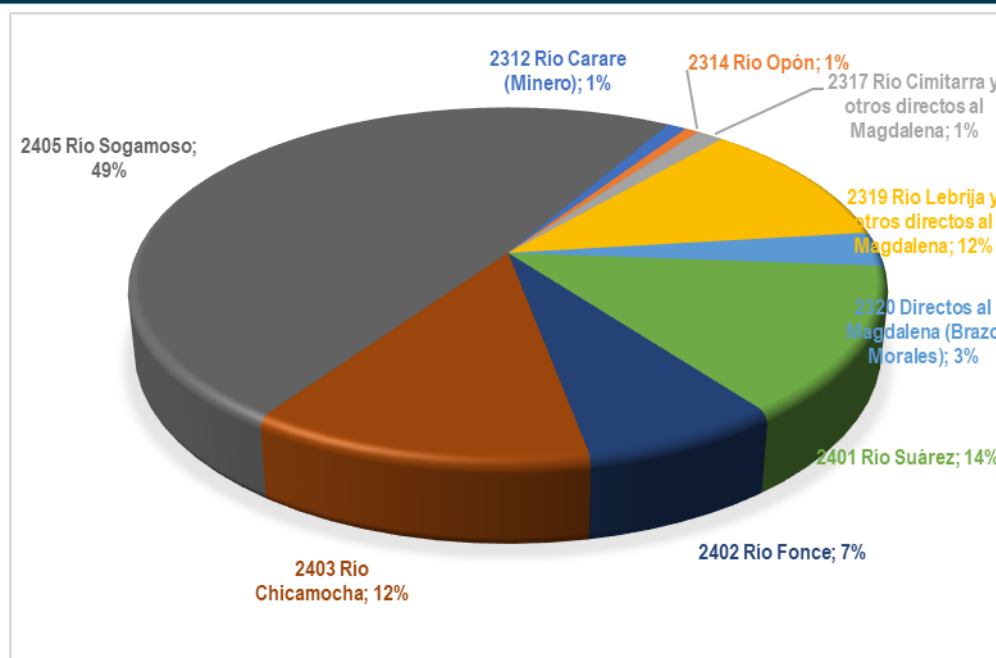


Figura 3.3. Distribución porcentual de la demanda anual del agua en las subzonas hidrográficas del área de interés e influencia para el año 2019.

Cuando se suma la estimación del uso de del agua para las subzonas hidrográficas en los sectores de industria, doméstico y de servicios, se registran valores totales menores a los contabilizados por los sectores sin la espacialización de la subzona hidrográfica (capítulos 3.4.5, 3.4.9 y 3.4.10 respectivamente), debido a que las áreas municipales no se encuentran en un 100% en la zona de estudio.

En el caso del uso del agua para hidrocarburos, en las subzonas 2314 y 2405, los valores asignados están influenciados por la escala del shape de unidades de análisis (1:100.000), el cual es diferente a la escala del shape de subzonas hidrográficas (1:500.000), de tal manera que cuando se agrega la información de la captación de la refinería ésta queda incluida en la subzona hidrográfica del río Sogamoso y no en la del Opón.

La Tabla 3.28 registra el uso del agua en los sectores en el área de estudio.

Tabla 3.28. Uso de agua en los sectores económicos presentes en el Valle Medio del Magdalena

Sector	Uso de agua (m ³ /año)	Porcentaje
Agrícola	698.517.877	17.52%
Permanentes	247.100.460	35.37%

Sector	Uso de agua (m ³ /año)	Porcentaje
Transitorios	107.365.301	15.37%
Pastos	344.052.115	49.25%
Post cosecha	11.395.131	0,29%
Café	1.860.722	16,33%
Palma	9.519.808	83.54%
Caucho	14.600	0.13%
Pecuario	146.987.901	3.69%
Bovinos	99.521.580	67.71%
Bufalinos	2.032.325	1.38%
Porcinos	272.454	0.19%
Equinos	2.706.415	1.84%
Caprinos	134.515	0.09%
Ovinos	348.562	0.24%
Avícola	41.972.048	28.55%
Sacrificio	6.209.704	0.16%
Bovinos y Bufalinos		2.79%
	173.480	
Porcinos	67.637	1.09%
Ovinos	28.648	0.46%
Caprinos	11.056	0.18%
Avícola	5.928.882	95.48%
Piscícola	10.214.806	0.26%
Industria	9.627.177	0.24%
Construcción	3.356.849	0.08%
Minería	18.357.163	0.46%
Hidroenergía	2.767.037.978	69.39%
Embalse Topocoro	1.848.879.167	66.82%
Sogamoso	12.434.900.000	311.82%
PCH	910.072.686	32.89%
Térmicas	8.086.125	0.29%
Otros Embalses	60.900.000	2.20%
Hidrocarburos	35.579.005	0.89%
Doméstico	255.672.210	6.41%
Servicios / oficial	24.853.813	0.62%
Total	3.987.809.618	100.00%

Los siguientes mapas presentan los resultados de la demanda sectorial y total en el Valle Medio del Magdalena.

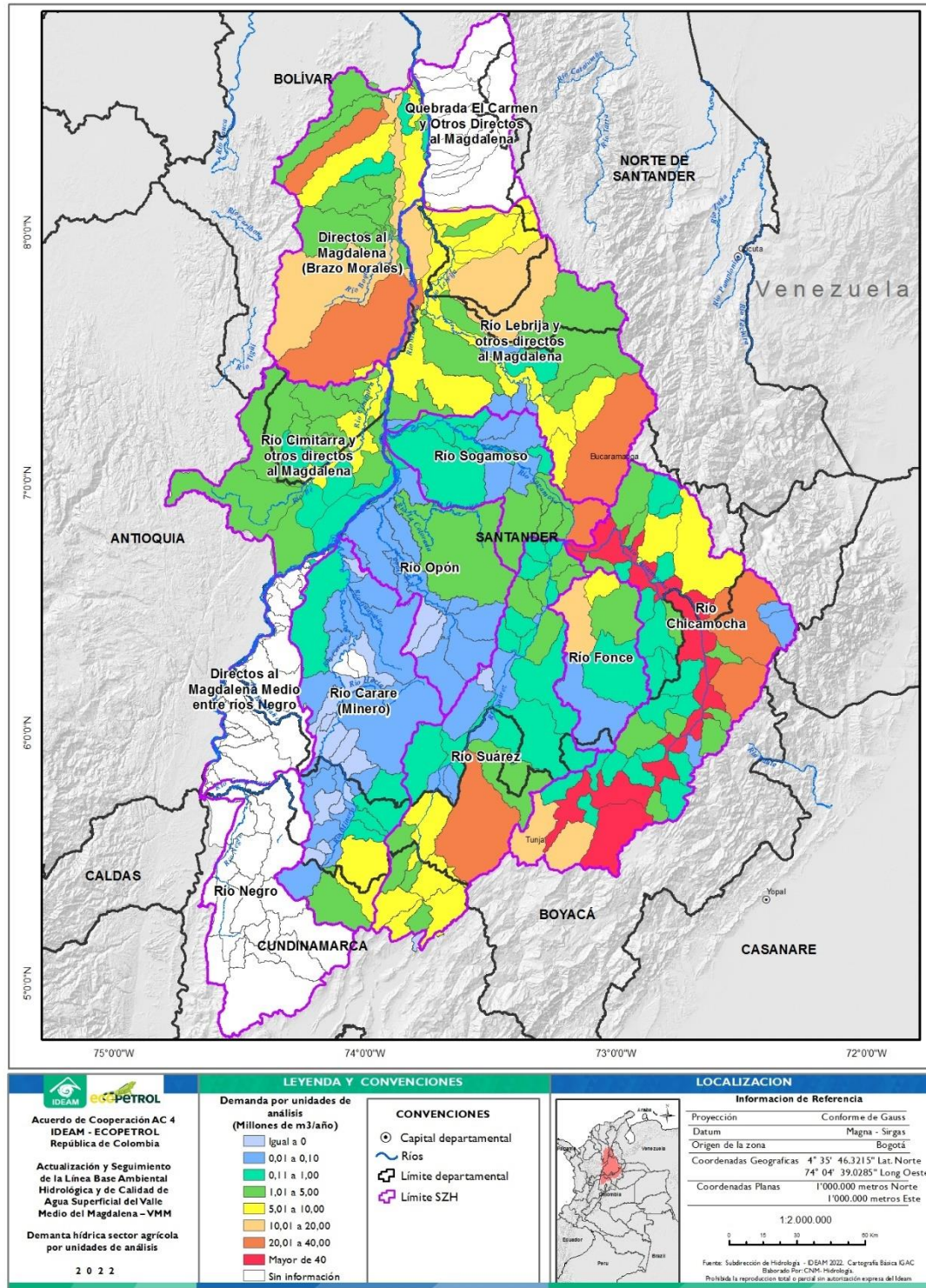


Figura 3.4.. Demanda hídrica para el sector agrícola por unidades de análisis

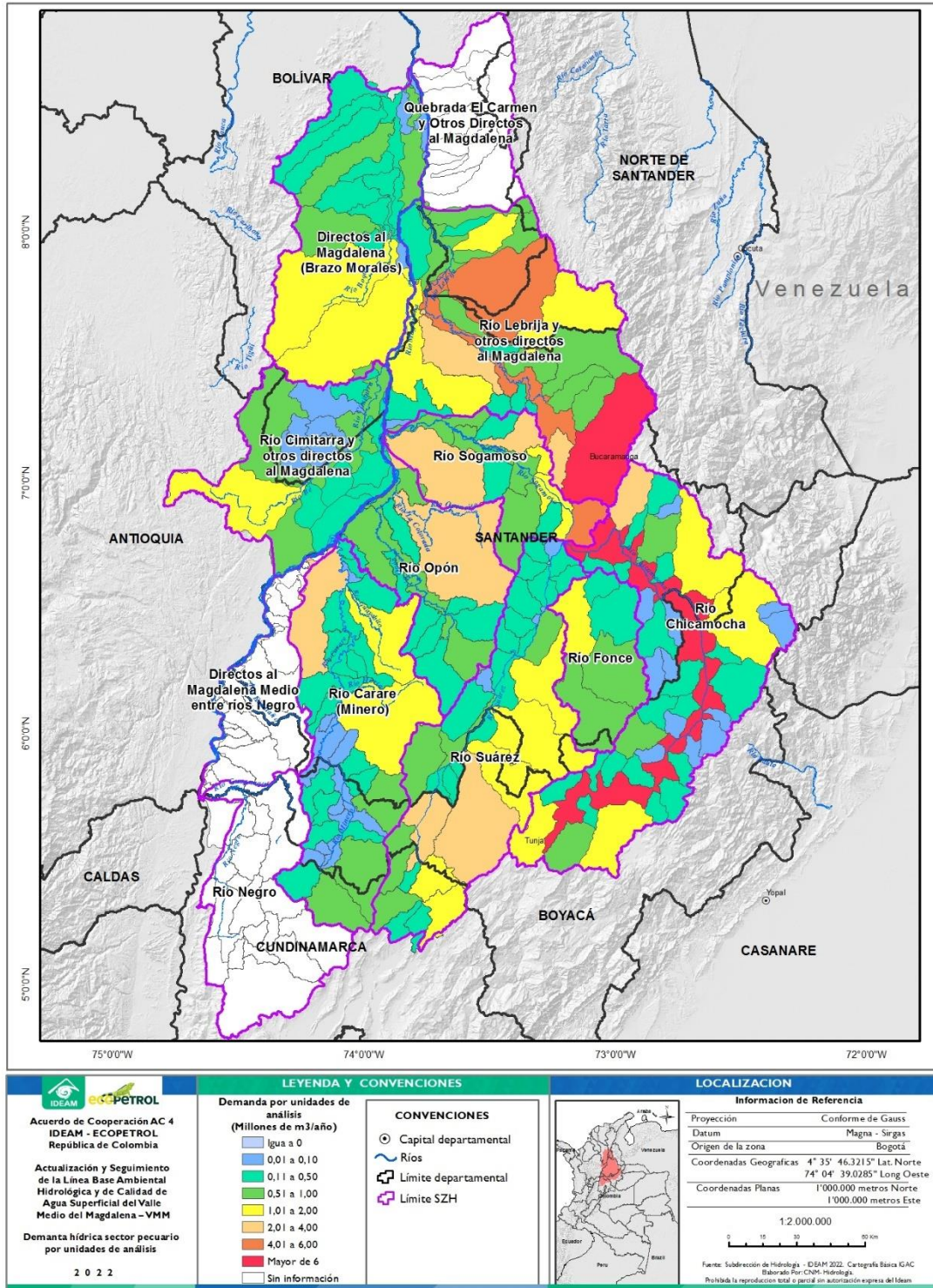


Figura 3.5. Demanda hídrica para el sector pecuario por unidades de análisis

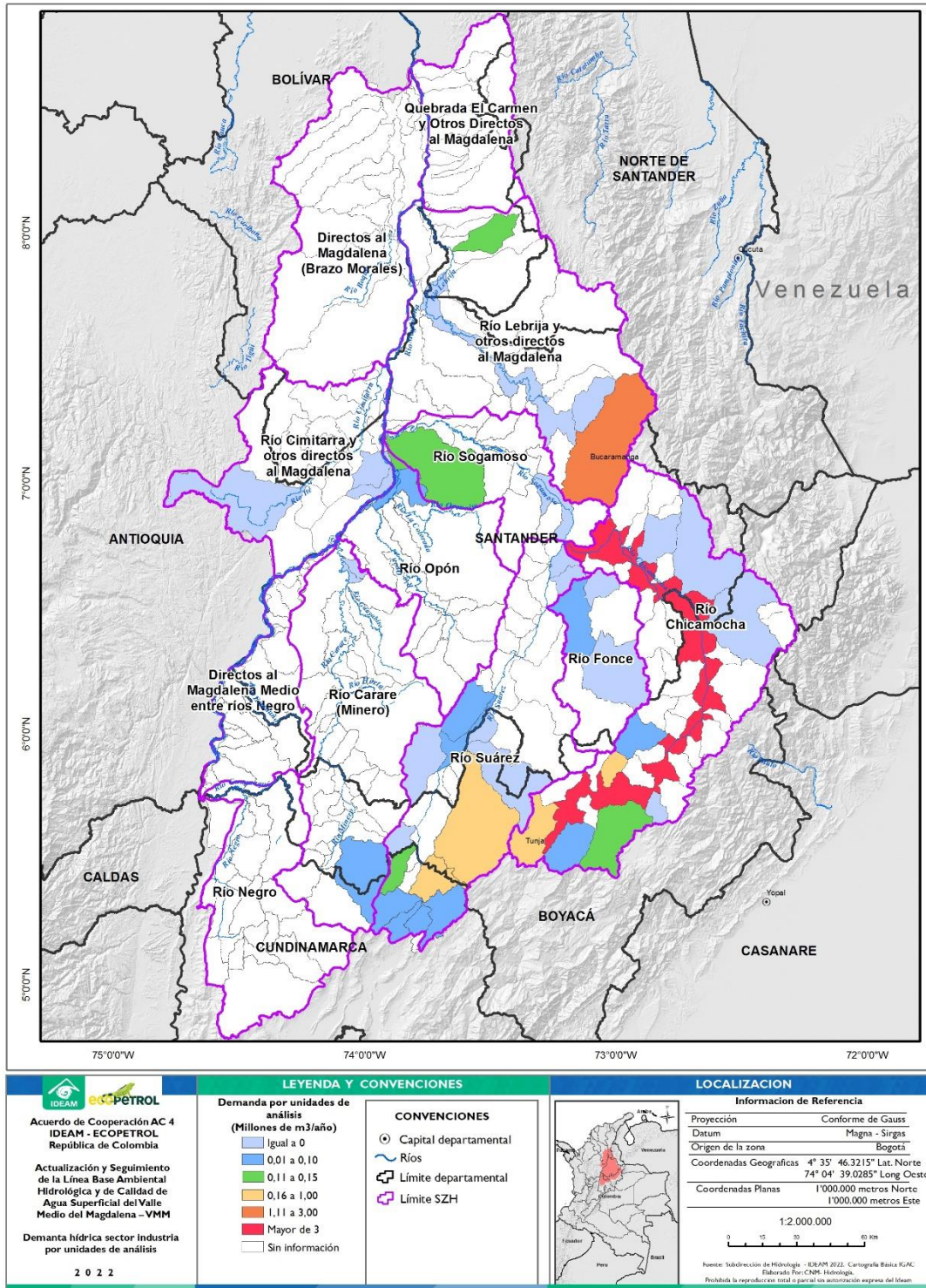


Figura 3.6.. Demanda hídrica para el sector industrial por unidades de análisis

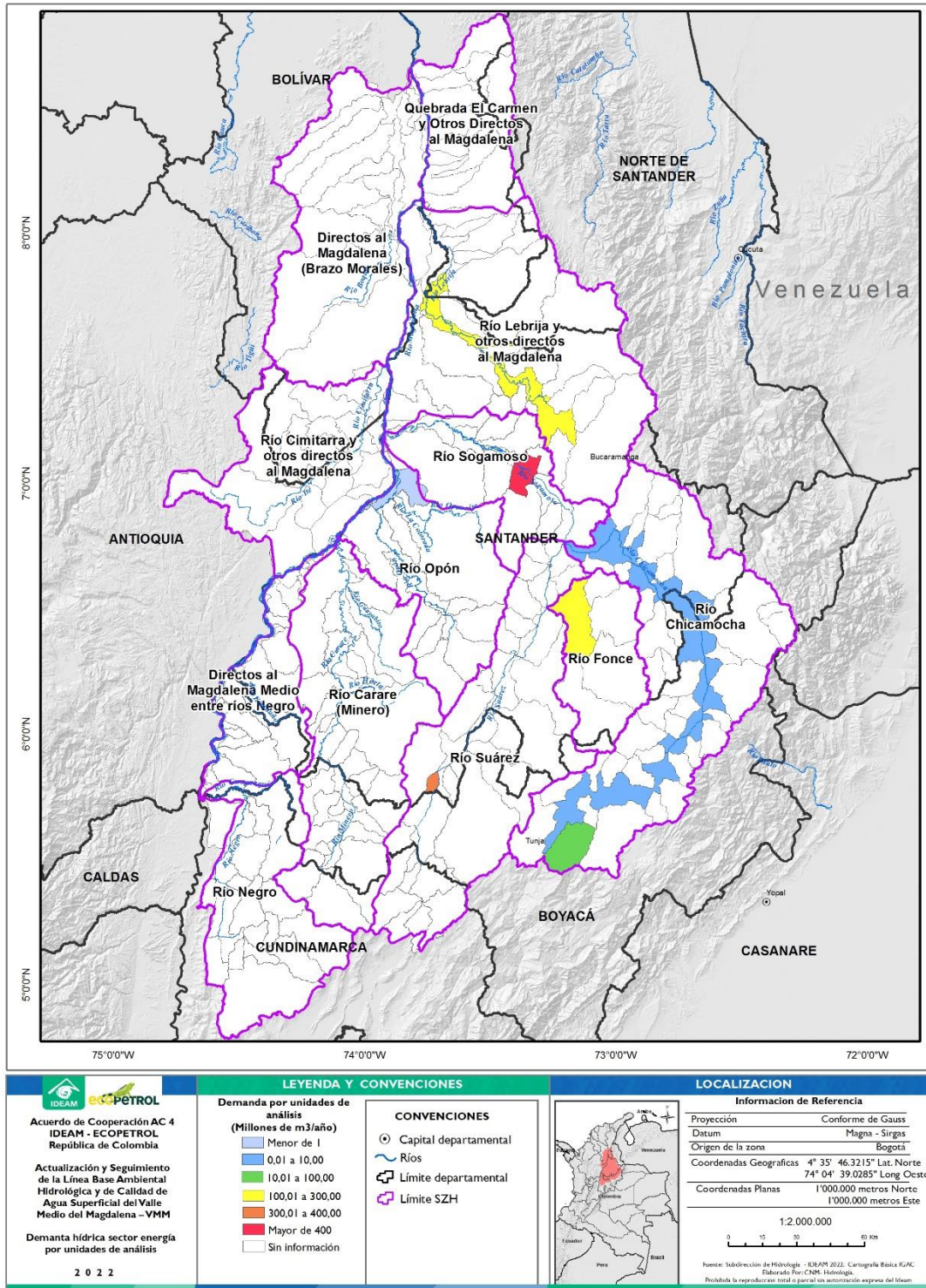


Figura 3.7.. Demanda hídrica para el sector energético por unidades de análisis

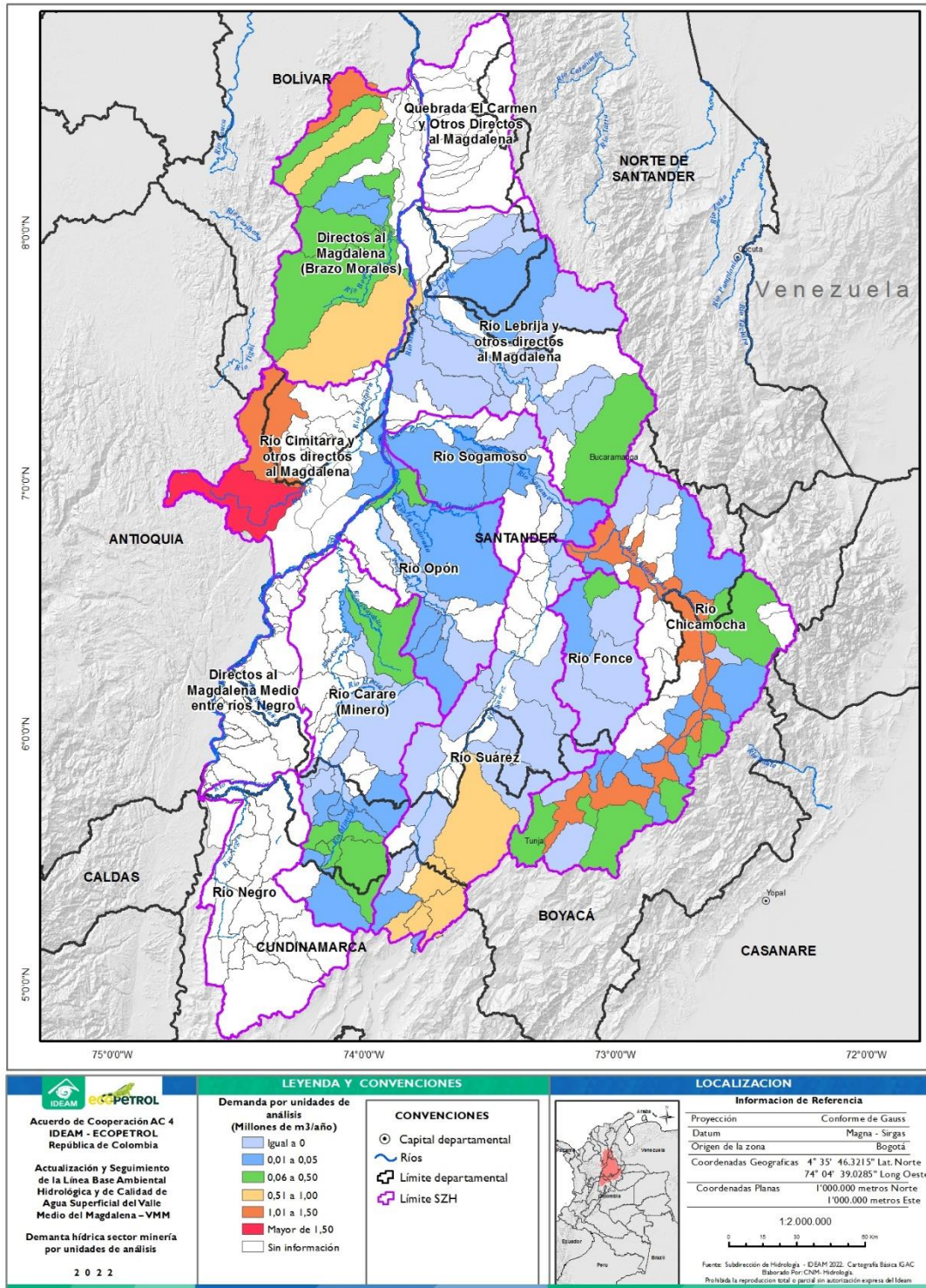


Figura 3.8.. Demanda hídrica para el sector minero por unidades de análisis

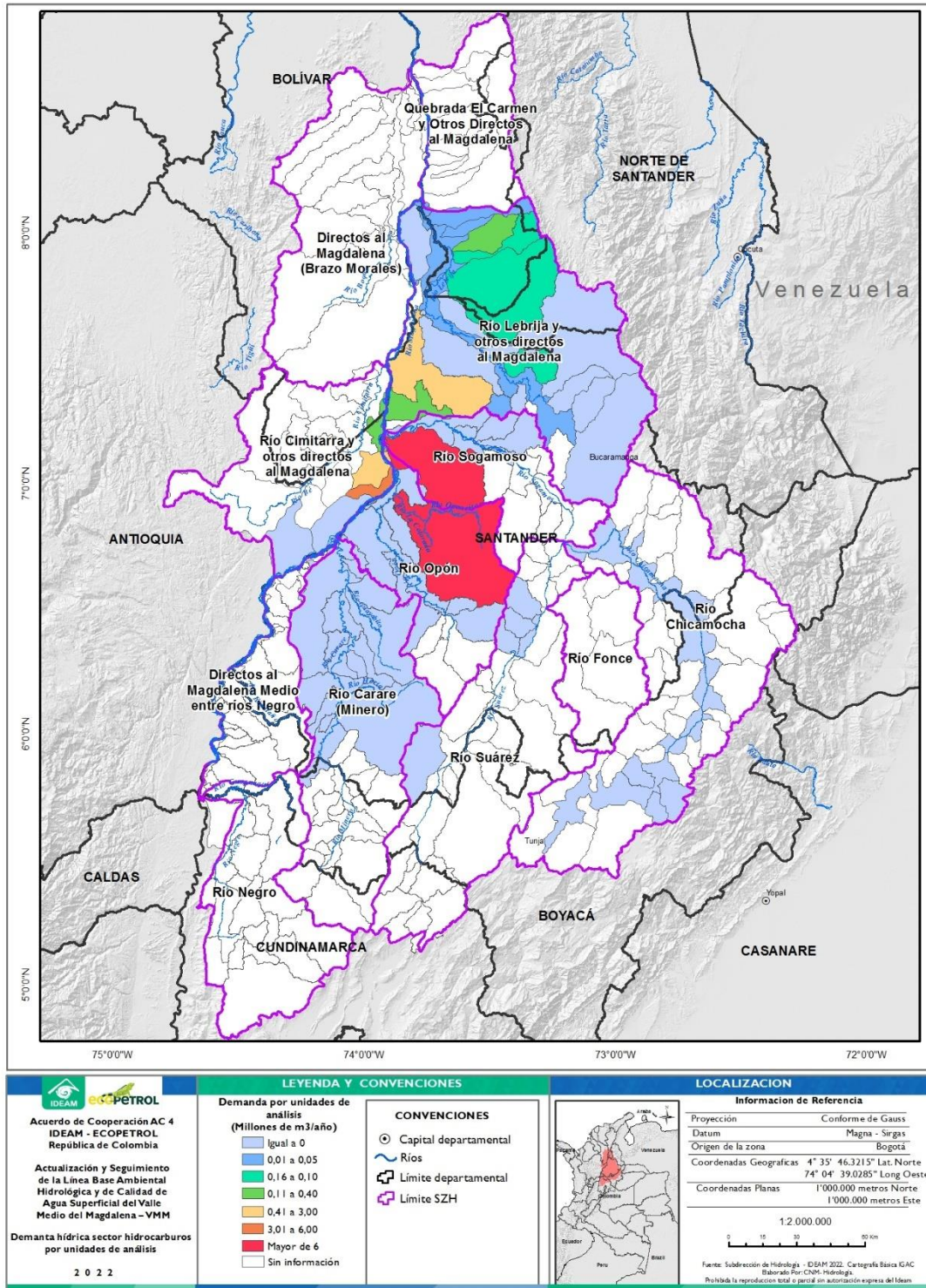


Figura 3.9. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos por unidades de análisis

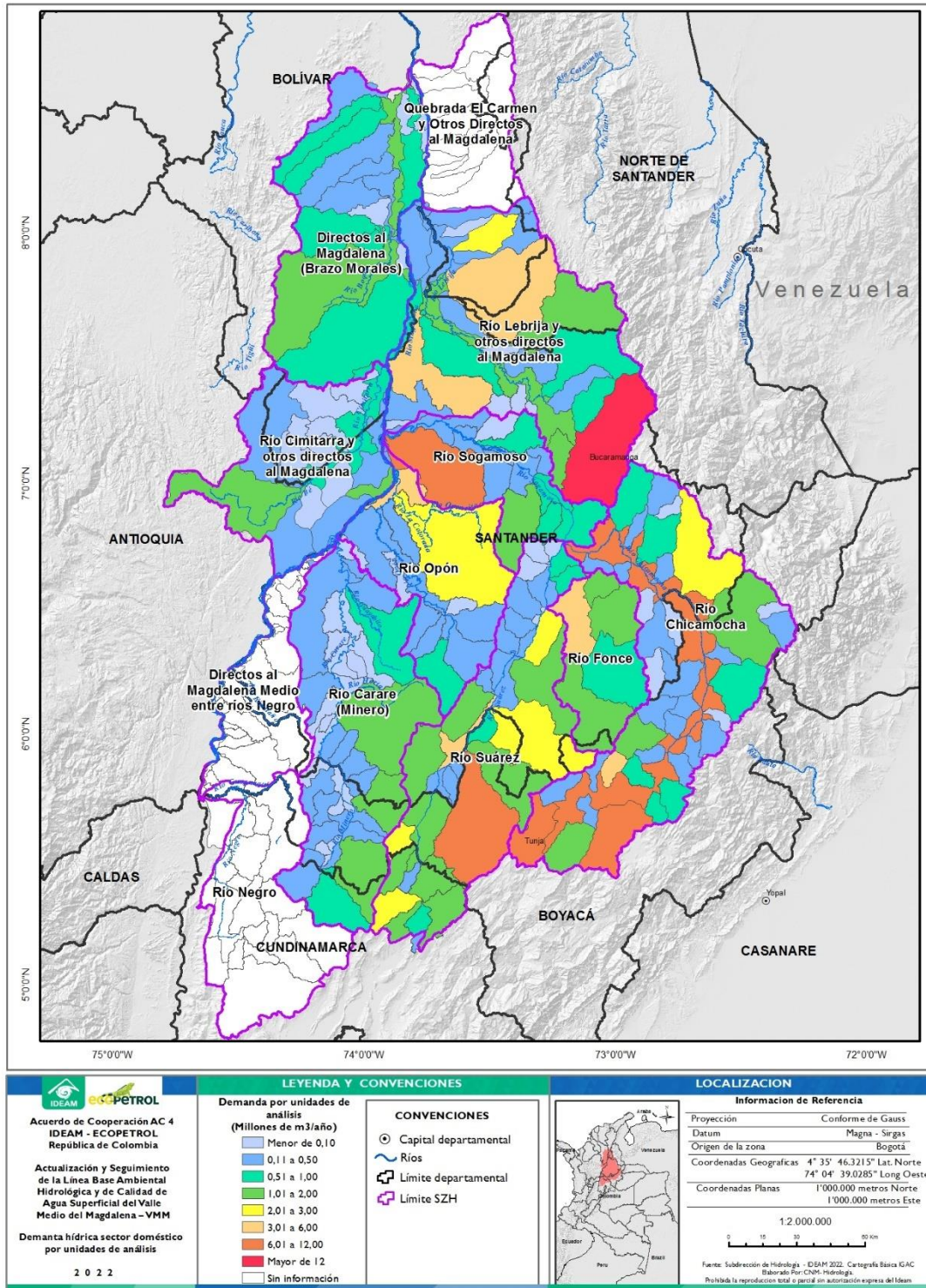


Figura 3.10. Demanda hídrica para el sector doméstico por unidades de análisis

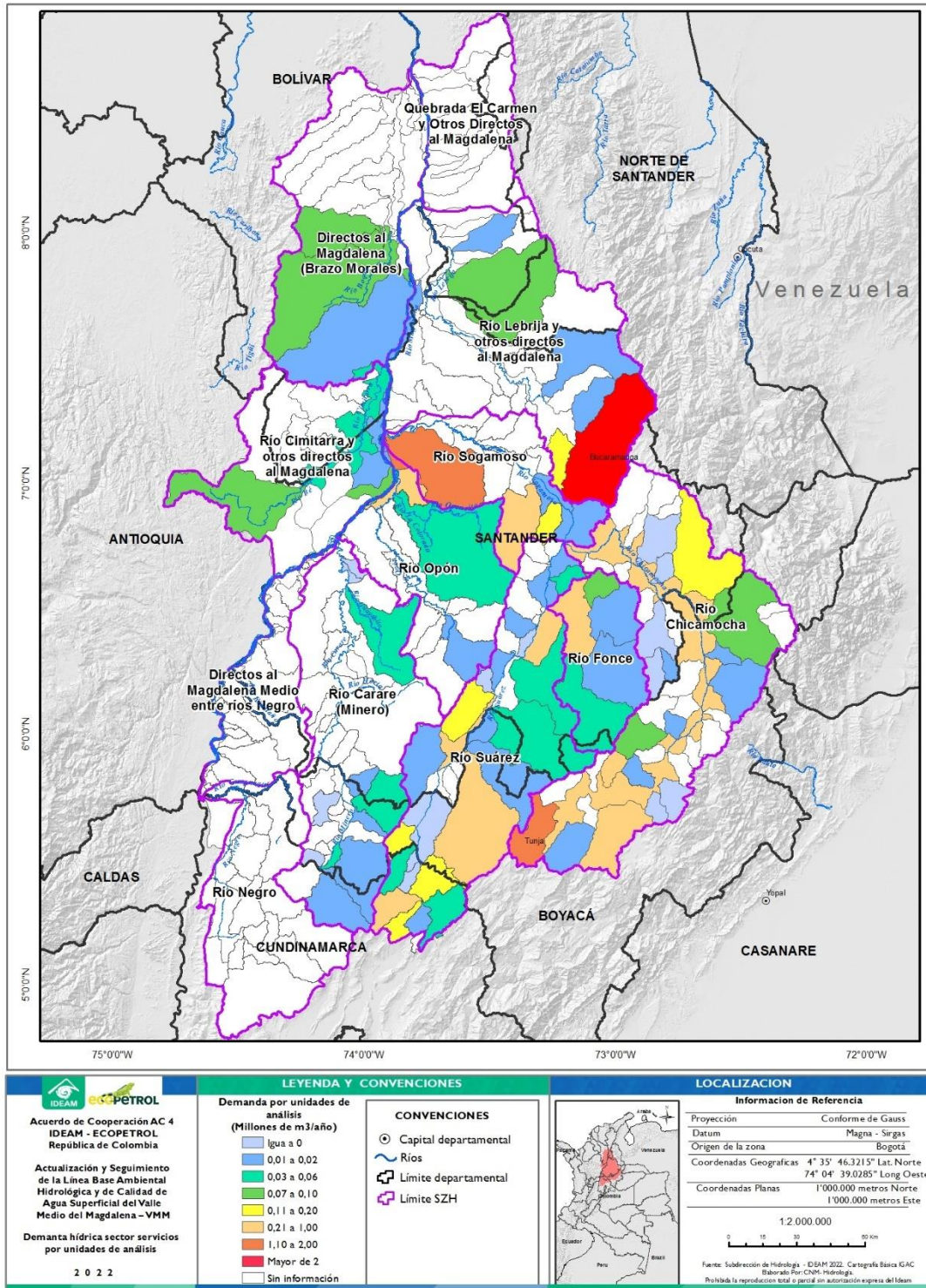


Figura 3.11. Demanda hídrica para el sector servicios por unidades de análisis

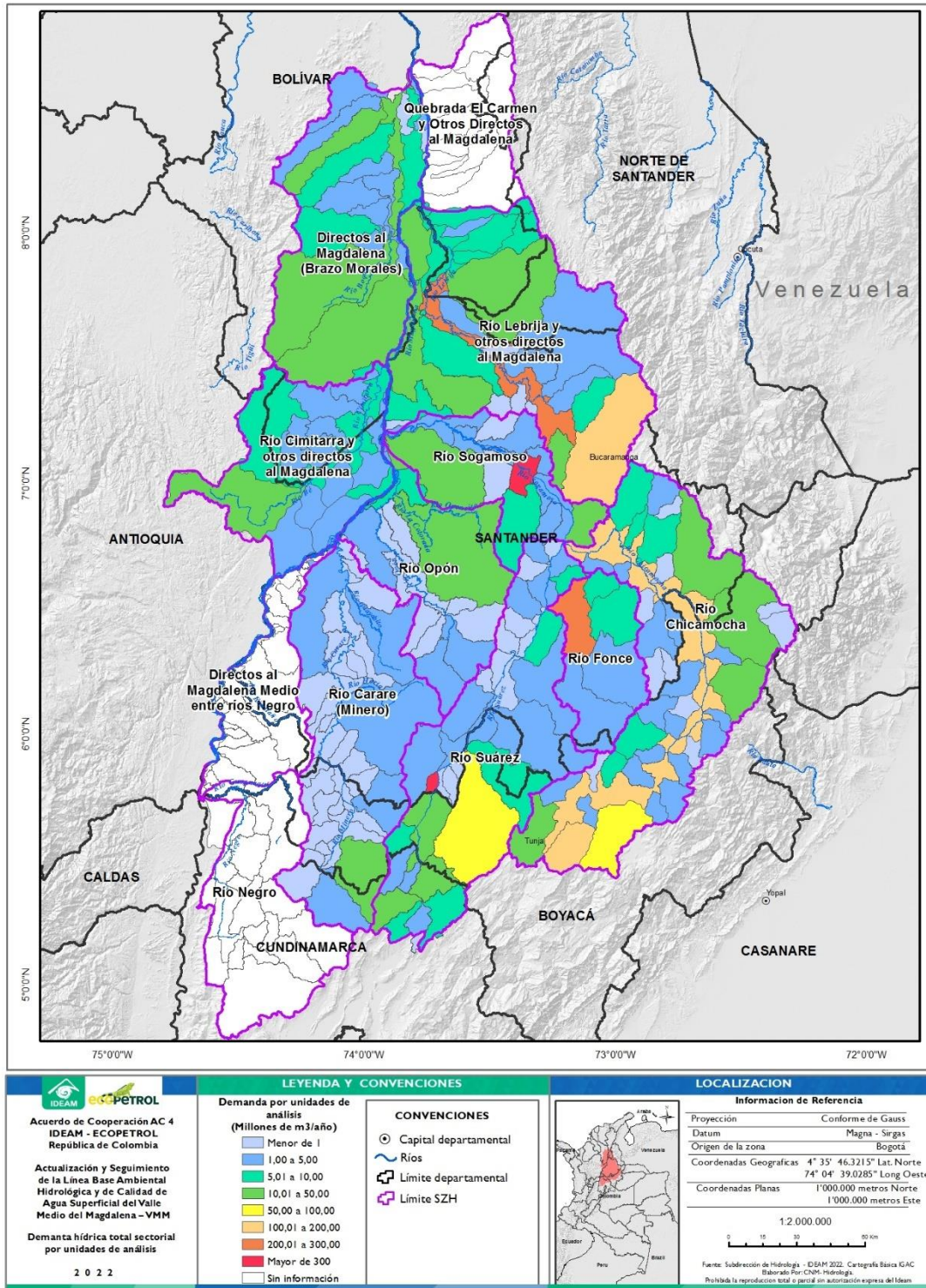


Figura 3.12. Demanda hídrica total sectorial por unidades de análisis

4. Evaluación de la calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena

La evaluación de la calidad del agua incorpora la caracterización de las condiciones de calidad de los cuerpos de agua y el análisis de las variables físico - químicas indicativas de su estado, según el tipo de presión ejercida y las condiciones naturales en las áreas de estudio e influencia, para generar una línea base de la calidad del agua por subzona hidrográfica de estudio y unidades hidrográficas de análisis. Asimismo, se tiene como propósito el acercarse a la interrelación entre las características del recurso hídrico y la coherencia entre las diferentes variables, que permitan la correlación e interpretación de los índices asociados a la calidad del agua, en diferentes condiciones hidrológicas, bajo el referente de un análisis integrado.

Como elementos clave se recopila la información generada y procesada por el IDEAM y las Autoridades Ambientales para llevar a cabo evaluaciones de calidad del agua, enfocadas hacia un trabajo de integración de datos y de interpretación, que alimenta la línea base en el Valle Medio del Magdalena (VMM); la evaluación incluye -a partir de la definición de objetivos y alcances-, un análisis de las fuentes de información disponible (existente – secundaria o primaria levantada durante el proyecto), basado en un marco conceptual y metodológico, teniendo como pilar el Estudio Nacional del Agua (ENA) y la Evaluación Regional del Agua (ERA).

El análisis incorpora las fuentes de información, los métodos y tratamiento de la misma, con base en la definición del marco de análisis donde se determina la disponibilidad final de datos de acuerdo con la resolución espacio-temporal de la misma, para concluir en la caracterización de los procesos de alteración o presión por vertimientos puntuales y de las condiciones de la calidad del agua. Como parte de la construcción de la línea base, se integró esencialmente la proveniente de la Red de Calidad del IDEAM y de los registros o reportes provenientes de Autoridades Ambientales Regionales.

Finalmente, se presentan los resultados de la evaluación, condicionada por la disponibilidad de información, los cuales se basan en la interpretación de los indicadores y variables complementarias o aquellas que no incorporan los índices, y en el desarrollo de los planteamientos

tanto conceptuales como metodológicos, y que tienen sus propios alcances o limitaciones derivados también de la información disponible.

Como lo citan los lineamientos conceptuales de las ERA (IDEAM, 2013), la calidad de las aguas no puede conceptualmente separarse de la cantidad, disociarse ni entenderse de forma separada, teniendo en cuenta que la acción humana influye el régimen natural del ciclo hidrológico, generando variaciones espacio-temporales tanto en términos de cantidad del agua, como en las condiciones de calidad, modificaciones que trata de advertir la siguiente evaluación de la calidad del agua en el VMM.

4.1. Objetivos y alcances de la evaluación de la calidad de agua

4.1.1. Objetivos

El objetivo de la evaluación de la calidad agua comprende conocer la calidad de los principales cuerpos hídricos de la zona, estimando su estado actual como resultado de la interacción de procesos naturales y antrópicos, en los sistemas hídricos localizados en el Valle del Medio Magdalena – VMM, Tramo del río Magdalena entre las desembocadura de los ríos Carare – Minero y Lebrija y en las Áreas de Estudio: SZH de los ríos Opón, Sogamoso y Lebrija, estudiando la influencia que sobre éstas tienen, los ríos Chicamocha, Suárez, Fonce, Carare, Brazo Morales y Cimitarra (Zonas de Influencia).

Los objetivos específicos consisten en:

- Identificar los escenarios temporales y espaciales para la evaluación de la calidad del agua, asociados a la variabilidad del régimen hidrológico.
- Caracterizar el estado actual de las presiones sobre los sistemas hídricos por uso de agua y carga contaminante proveniente de sectores usuarios del recurso en las unidades de análisis.
- Caracterizar las condiciones actuales de la calidad de agua en las corrientes y cuerpos de agua en las unidades de análisis.
- Realizar análisis aplicando el cálculo de los índices de la calidad del agua y de alteración potencial, y demás indicadores que permitan interpretar la influencia que ejercen los diferentes sectores usuarios del recurso.

4.1.2. Alcance

El alcance de la evaluación de la calidad del agua tuvo un enfoque a escala regional, con un tratamiento de la información que incorpora datos representativos verídicos, medidos, reduciendo en la medida estimaciones presuntivas acorde con la disponibilidad de información, de tal forma que:

- Se adelanta la evaluación en unidades hídricas o hidrográficas de análisis de menor jerarquía a las Subzonas hidrográficas (SZH) y en las corrientes o cuerpos de agua principales o representativos de estas.
- El análisis del estado actual (línea base), como primera etapa de evaluación, corresponde al año 2019 o a años antecedentes cuando existen vacíos de información o una baja cobertura espaciotemporal de la información disponible; se complementó con los resultados de los monitoreos que adelanta el IDEAM en la red de referencia establecida en el marco del convenio con ECOPEPETROL.
- Las variables de análisis comprenden las constituyentes de los índices de calidad (ICA – IACAL) y de contaminantes, sustancias o elementos específicos que se identifiquen como representativos del área de estudio o que indiquen algún nivel o señal de alerta.
- El análisis de presión en las áreas de estudio responde a cálculos o estimaciones cuantitativas y en las zonas de influencia, a una descripción cualitativa y cuantitativa con base en información disponible secundaria ya calculada, con el fin de identificar los factores que caracterizan la calidad del recurso, aguas arriba de las áreas de estudio.

4.2. Aspectos conceptuales

Las consideraciones conceptuales tienen como principal referente la evaluación técnica de la calidad del agua que se viene implementando en los ENA y las ERA, especialmente a través de los índices de calidad y su interrelación con la oferta y la demanda. Como parte del proceso aplicable al entendimiento funcional de los sistemas hídricos, la calidad del agua dependerá por un lado de su condición o base natural y por otro, a los procesos de alteración de origen antrópico o natural en las diferentes unidades hidrográficas objeto de estudio.

Teniendo en cuenta las interacciones entre los componentes de la evaluación del agua y la conceptualización sentada en los ENA y en las ERA, el marco conceptual mantiene las siguientes dos líneas de análisis:

- Las condiciones de calidad, que se relacionan con las características físico-químicas, y microbiológicas y de cantidad de los cuerpos de agua, las cuales a su vez se vinculan con la aptitud para diferentes usos y con el índice de calidad del agua (ICA);
- Los procesos de alteración, que se relacionan con los procesos antrópicos (contaminación) que modifican las condiciones de calidad de esos cuerpos de agua, los cuales se vinculan con las cargas contaminantes vertidas puntualmente y con el índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL).

4.2.1. Modelo conceptual

Para efectos de dimensionar conceptualmente el alcance de la evaluación del estado de la calidad del agua, se plantea a manera de definición, los siguientes términos adaptados del glosario hidrológico internacional (OMM, 2012):

Estado de la calidad del agua: descripción cualitativa y cuantitativa de las condiciones actuales de la calidad del agua, a través de parámetros (indicadores o variables) e índices, en un sistema hídrico caracterizado por procesos tanto naturales como antrópicos, respecto a un año o periodo de referencia dado para la adopción de una decisión.

La calidad del agua: vista como el conjunto de una serie de parámetros (indicadores o variables) organolépticos, físico-químicos, microbiológicos e hidrobiológicos característicos de un cuerpo de agua dado, para que éste reúna aquellas condiciones necesarias para su funcionamiento ecosistémico y su aprovechamiento para los usos determinados conforme a la Ley.

Tal como lo definen los lineamientos para las ERA, el modelo básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos es el ciclo hidrológico y su balance de agua, donde interaccionan los diferentes componentes; esa interdependencia entre componentes del ciclo hidrológico puede conceptualizarse desde la perspectiva del tema de calidad como se describe a continuación.

- Conceptualización relación Calidad – Cantidad (Oferta). La evaluación de la calidad del agua depende de la interrelación con las características del régimen hídrico y de la administración de la oferta para cubrir la demanda de agua por parte de los usuarios presentes y futuros. Esta demanda, como el análisis de calidad, tiene una base común cual es la destinación del recurso, sea para su aprovechamiento o como receptor de vertimientos, por lo tanto, la clasificación resultante o la asignación de usos, opera en ambos sentidos, así

el cuerpo de agua se emplee en sólo uno de ellos. La aptitud (“disponibilidad”) del agua por calidad dependerá entonces del régimen hidrológico y sus variaciones, como de las presiones que reciba, principalmente las ejercidas antrópicamente por demanda y contaminación.

Por lo tanto y considerando lo contemplado en la guía de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), una significativa proporción de las variaciones de la calidad del agua de un cuerpo de agua (lótico) puede estar relacionada con las variaciones de su caudal. Los efectos de los cambios de caudal en las concentraciones y cargas de sustancias son numerosos, y pueden interactuar entre sí. Un incremento de caudal generalmente conduce a:

“

- Una dilución de los contaminantes que ingresan con el agua residual
- Un incremento en los sólidos en suspensión procedentes de la escorrentía superficial y de la perturbación de los sedimentos del fondo
- Una liberación de los materiales adsorbidos por los sedimentos o precipitados (por ejemplo, fosfatos, metales pesados)
- Un incremento en la demanda de oxígeno bioquímico causado por la agitación de las sustancias reductoras del lecho del río
- Una disminución de la relación entre agua subterránea y escorrentía superficial en el caudal del río que generalmente conduce a una disminución del pH
- Un lavado de los microorganismos bénticos, y una reducción en la concentración de los microorganismos acuáticos y en el tiempo de residencia
- Una atenuación de los efectos ocasionados por las súbitas entradas de contaminantes
- Una reducción de la absorción de la radiación solar y la disminución asociada de la actividad fotosintética
- Una mayor turbulencia y una mejor aireación ”

Los períodos de estiaje generalmente conducen a efectos contrarios a los que se originan por los incrementos de caudal. Además, los períodos de poca agua a menudo van acompañados por una variación diurna relativamente alta en las características de la calidad del agua, como el Oxígeno Disuelto (déficit), el Dióxido de Carbono, el pH y la Temperatura.

- Conceptualización relación Calidad – Demanda. La incorporación de la demanda en un análisis integral con la oferta y la calidad del agua es fundamental, ya que la oferta limita la capacidad de carga de los sistemas hídricos y a su vez la calidad del agua limitaría su demanda. Por lo tanto, el balance hídrico visto desde la cantidad de agua remanente después de suplir las necesidades del hombre está condicionado a la disponibilidad por calidad.

El modelo conceptual para la evaluación de la calidad del agua entonces, parte el ciclo hidrológico y de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), teniendo como referente el balance hídrico (interdependencia entre componentes) de una unidad hidrográfica de análisis; a partir de aquí, se desarrollan las dos líneas temáticas ya mencionadas, como ejes mutuamente vinculados para la evaluación, contando con los sistemas y redes de monitoreo tanto a nivel nacional como regional, tal como se aprecia en la Figura 4.13.

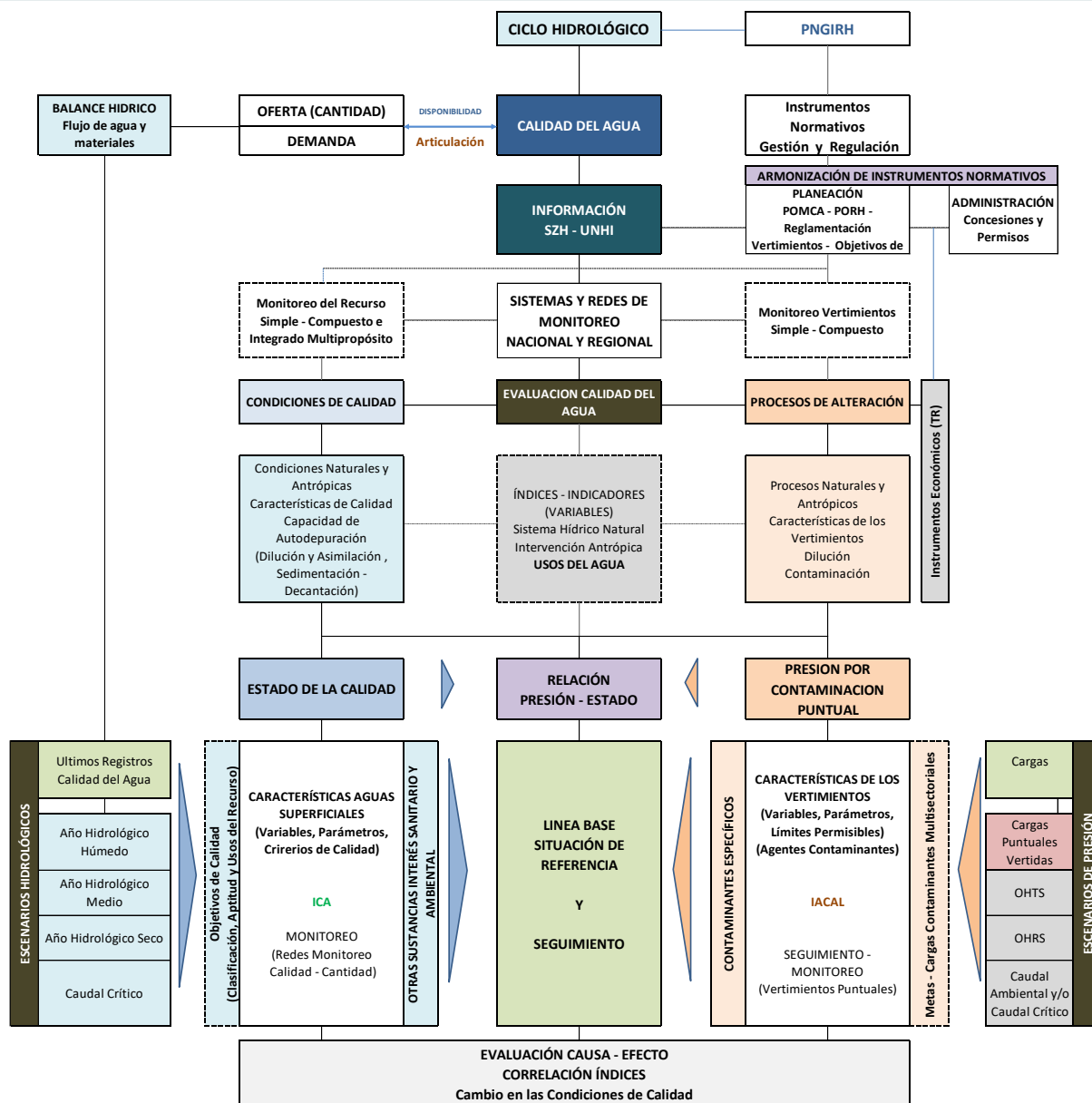


Figura 4.13. Esquema sintético del modelo conceptual para la evaluación de la calidad de agua en el VMM

A continuación, se describen los elementos más importantes de este modelo conceptual:

Condiciones de calidad. La OMM menciona que existe una estrecha relación entre las características cuantitativas de una masa de agua y su calidad; desafortunadamente, estas relaciones son muy complejas, y sólo en muy contadas ocasiones se dispone de los datos necesarios para definir las.

En los lineamientos ERA (IDEAM, 2013), se entiende como fundamental la definición que se adopte del concepto calidad del agua, teniendo en cuenta que existen distintas interpretaciones. Se puede entender la calidad, desde un punto de vista funcional, como la capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella.

Procesos de alteración de calidad del agua. Las alteraciones de la calidad del agua tienen origen en los procesos naturales del ciclo hidrológico y su interacción con el medio natural o procesos relacionados con actividades antrópicas. Los contaminantes antropogénicos se han dispersado ampliamente en el ambiente y están “emergiendo” en las aguas superficiales y subterráneas, como resultado de emisiones industriales, la ineficiente disposición de residuos sólidos, la aplicación de agroquímicos y pesticidas en la agricultura y otras actividades antrópicas.

Los lineamientos del Ideam definen cuatro conceptos aplicables a las alteraciones de su calidad:

- La presión ambiental definida en el ENA (IDEAM, 2011a) como “la contribución potencial de cada agente social o actividad humana (población, industria, agricultura, minería) a las alteraciones del medioambiente por consumo de recursos naturales, generación de residuos (emisión o vertimiento) y transformación del medio físico. Es decir, es la capacidad de generar un impacto ambiental.”
- La afectación potencial referida a “la posibilidad de generar un grado de alteración debido a una presión ambiental; por ejemplo, un vertimiento puede generar distintos impactos ambientales en función de diversos factores: la fragilidad del medio receptor, la concentración de presión ambiental en el área (existencia de muchos vertimientos) y la capacidad de recuperación del medio receptor.
- Procesos naturales (IDEAM, 2011a), definidos como aquellos que implican contacto y disolución de los componentes minerales de las rocas sobre las cuales el agua, en sus diferentes estados de agregación -sólido, líquido y gaseosos-, actúan como agente meteorizante, además de intervenir como disolvente de los gases presentes en la atmósfera.

Procesos contaminantes: en el Glosario Hidrológico Internacional se define contaminación como “Introducción en el agua de sustancias no deseables, no presentes normalmente en la misma, por ejemplo, microorganismos, productos químicos, residuos o vertidos que la hacen inadecuada para el uso previsto (OMM, 2012)”

- Sectores usuarios: es imprescindible dimensionar y contextualizar la localización de los usuarios generadores de vertimientos, analizar la presión que pueden ejercer sobre la calidad del

agua en un área determinada por el tipo de uso, la carga contaminante que vierten y los impactos que generan sobre las condiciones de calidad en los cuerpos de agua.

Los usos del recurso definidos en la norma tienen concordancia con los sectores; sin embargo, es necesario precisar por cada uno de esos sectores asociados al uso, las particularidades en cuanto a las características de los vertimientos que conllevará una clasificación, que inclusive, tendría que armonizarse con la agrupación de usuarios prevista para el establecimiento de metas de cargas. Así que, los procesos contaminantes están determinados por el vertimiento de elementos, sustancias o compuestos a un cuerpo de agua y por su influencia negativa sobre la aptitud del agua para satisfacer determinados usos (objetivos de calidad).

Una clasificación sectorial, puede tener como base o referencia el CIU y/o lo contemplado en la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales. Así mismo, un determinante del monitoreo y de la evaluación de la presión son las características y/o caracterización de los vertimientos. Como instrumento no sólo económico, sino para el conocimiento de las aguas residuales, la tasa retributiva se ha posicionado como aquel instrumento por medio del cual se dispone de la información sobre cargas de materia orgánica y sólidos en suspensión, que se están vertiendo en las regiones.

4.2.2. Indicadores componente calidad del agua

En términos generales, un indicador es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar qué tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de alerta sobre la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron (OECD, 2001). La OMM define a una variable hidrológica, como el valor resultante de una medición hidrológica que varía en el espacio y en el tiempo (OMM, 2012).

Los indicadores de calidad hídrica pretenden responder a preguntas básicas sobre qué se debe saber del agua, de interés para la toma de decisiones e información pública en general. En términos generales la evaluación del agua debe responder a preguntas relacionadas con la situación actual o estado del agua en las cuencas y unidades hídricas donde las Autoridades Ambientales deben realizar gestión integral del agua.

Se contemplaN, los preceptos establecidos para los indicadores de estado de la calidad del agua (ICA) y de presión por contaminación puntual (IACAL), mencionando que la calidad de diferentes tipos de agua se ha evaluado a partir de variables físicas, químicas y microbiológicas, sea individualmente o en forma grupal (índices).

4.3. Aspectos metodológicos

El marco metodológico se fundamenta en los propósitos y alcances del convenio Ecopetrol-IDEAM, y consecuentemente, en el modelo conceptual a partir del cual, se plantea un procedimiento general, que, de acuerdo con el enfoque, responda a expectativas técnicas a nivel nacional y regional.

4.3.1. Procedimiento y metodología general

La metodología plantea cuatro fases, con un soporte transversal representado por un sistema espacio-temporal de la información, que se enfocará en identificar los diferentes elementos que permitan caracterizar y evaluar cuantitativa o cualitativamente las condiciones y la alteración potencial del estado de la calidad del agua. Se contemplan las siguientes fases:

- **PRIMERA FASE: DEFINICIÓN MARCO GENERAL DE ANÁLISIS:** busca sentar las bases conceptuales, procedimientos y métodos aplicables a la información disponible, de acuerdo con los alcances previstos, delimitando el análisis a partir de la definición del horizonte espacial (unidades hidrográficas e hídricas – delimitación o configuración de la red hídrica objeto de evaluación) y del horizonte temporal (escenarios hidrológicos) para la construcción del estado del arte de las dos líneas de acción señaladas, a partir del proceso de recopilación, análisis preliminar, organización y procesamiento de la información disponible. Esta fase incluye la selección de indicadores, con base en las características de la presión en cada área de estudio.
- **SEGUNDA FASE: CARACTERIZACIÓN:** busca consolidar las líneas de información pertinente sobre calidad de las fuentes hídricas y vertimientos puntuales, identificando, describiendo y priorizando las redes de calidad del agua y los sectores, de tal forma que permita la caracterización de los cuerpos de agua principales, dentro de los horizontes temporales definidos.
- **TERCERA FASE: ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE LOS SISTEMAS HÍDRICOS:** secuencialmente se aborda la estimación de la calidad hídrica y de las presiones que la

alteran, para la situación actual (año o periodo de línea base) y para la etapa de seguimiento, partiendo del procesamiento de la información y aplicando igualmente los índices, complementados con otras variables de interés (denominadas complementarias).

- **CUARTA FASE: ANÁLISIS INTEGRADO:** relacionando el resultado de los índices para diferentes escenarios hidrológicos y realizando análisis específicos que se deriven de la interpretación de resultados, se concluirá con análisis integrados que permitan establecer una relación PRESIÓN – ESTADO, y que apunten hacia la apreciación de la disponibilidad hídrica por calidad, teniendo como marco, la aptitud para los diferentes usos del recurso.

El esquema de la Figura 4.14 presenta el detalle metodológico de las cuatro fases mencionadas anteriormente.

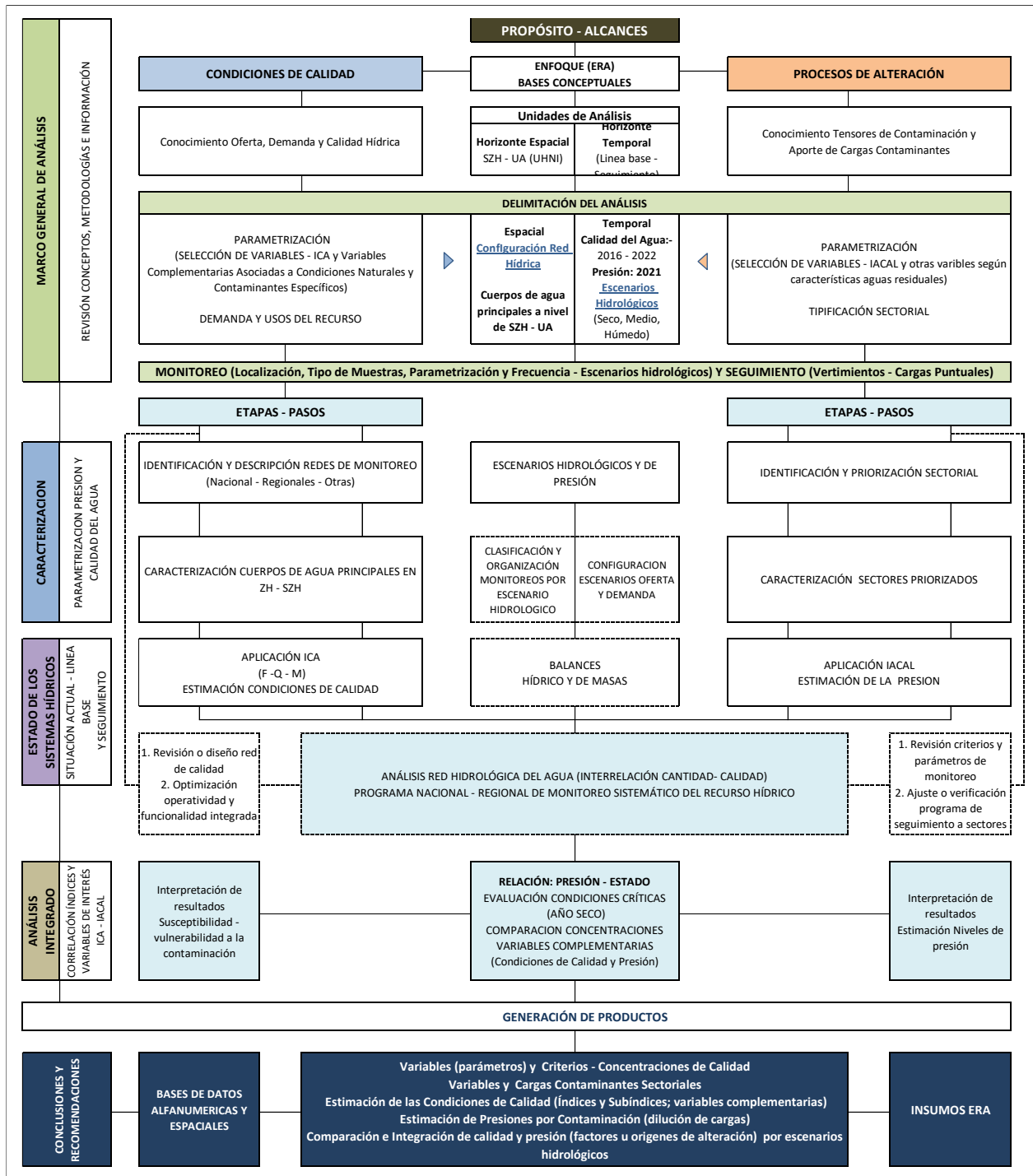


Figura 4.14. Esquema metodológico para la evaluación de la calidad de agua en el VMM

4.3.2. Indicadores



Los protocolos para el cálculo e interpretación del ICA (IDEAM, 2011b) y el IACAL (IDEAM, 2011c) se constituyen en la herramienta técnica que contiene los procedimientos concernientes a la evaluación de la calidad del agua, a partir de la obtención de indicadores agregados para una interpretación que facilite el entendimiento sobre el estado del recurso. Para el caso del ICA, se contemplará estimaciones para 5, 6 y 7 variables, según disponibilidad de la información.

El Índice de Calidad del Agua en Corrientes Superficiales (ICA) es un indicativo de las condiciones de calidad física, química y microbiológica de las aguas corrientes superficiales. El indicador permite identificar problemas de contaminación en un punto determinado, para un intervalo de tiempo específico.

El ICA corresponde al valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de variables, registradas en una estación o punto de monitoreo en un tiempo determinado. La fórmula de cálculo del indicador es:

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \text{ Ecuación 16.}$$

Donde:

ICA_{njt} = es el índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación o punto de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en variables

I_{ikjt} = es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación o punto de monitoreo j, registrado durante la medición en el momento k, del periodo de tiempo t.

W_i = Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

n = Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador.

El cálculo del ICA incluye la ponderación de cinco (5), seis (6) y siete (7) variables: oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, sólidos totales en suspensión, pH, coliformes fecales y la relación NT/PT. Las variables consideradas y la ponderación correspondiente se presentan en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29. Variables y ponderaciones para la estimación del ICA de cinco, seis y siete variables

Variable	Unidad de medida	Ponderación 5 variables	Ponderación 6 variables	Ponderación 7 variables
Oxígeno disuelto, OD.	% Saturación	0.2	0.17	0.16

Variable	Unidad de medida	Ponderación 5 variables	Ponderación 6 variables	Ponderación 7 variables
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/l	0.2	0.17	0.14
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/l	0.2	0.17	0.14
NT/PT	-	N/A	0.17	0.14
Conductividad eléctrica, CE.	pS/cm	0.2	0.17	0.14
pH	Unidades de pH	0.2	0.15	0.14
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	N/A	N/A	0.14

Los valores optativos que puede llegar a tomar el índice han sido clasificados en categorías, de acuerdo con ellos se califica la calidad del agua de las corrientes superficiales, al cual se le ha asociado un color como señal de alerta (Tabla 4.30).

Tabla 4.30. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA

CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	CATEGORÍAS DE VALORES	SEÑAL DE ALERTA
Muy mala	0,00 – 0,25	Rojo
Mala	0,26 – 0,50	Naranja
Regular	0,51 – 0,70	Amarillo
Aceptable	0,71 – 0,90	Verde
Buena	0,91 – 1,00	azul

Por otra parte, el Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL) es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la razón existente entre la carga anual de cada una de las 5 variables fisicoquímicas que se estima recibe una unidad hidrográfica y la oferta hídrica superficial, para año medio y año seco, de esta misma unidad, estimada a partir de una serie de tiempo.

La base de cálculo general tiene como origen los lineamientos ERA desarrollados por el IDEAM (IDEAM, 2013) y la hoja metodológica del Instituto. El índice se calcula a partir de la siguiente formulación y su categorización se ilustra en la Tabla 4.31.

$$IACAL_{jt-añomed} = \frac{\sum_{i=1}^n catiacal_{ijt-añomed}}{n} \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde:

$IACAL_{jt}$ Es el Índice de alteración potencial de la calidad del agua de una subzona hidrográfica j durante el período de tiempo t, evaluado para un escenario de oferta hídrica dado.

$catiacal_{ijt}$ Es la categoría de clasificación de la amenaza por la potencial alteración de la calidad del agua que representa el valor de la estimación de la carga de la variable de calidad i que se puede estar vertiendo a la subzona hidrográfica j, durante el período de tiempo t dividido por la oferta hídrica propia de un escenario hidrológico dado.

n Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5.

Tabla 4.31. Categorización IACAL

Rangos $IACAL$	Categoría de clasificación	Calificación de la presión
$1,0 \leq IACAL \leq 1,5$	1	Baja
$1,5 < IACAL \leq 2,5$	2	Moderada
$2,5 < IACAL \leq 3,5$	3	Media-Alta
$3,5 < IACAL < 4,5$	4	Alta
$4,5 \leq IACAL \leq 5,0$	5	Muy Alta

El cálculo de cada uno de los $iacal_{ijt}$ se realiza mediante la siguiente fórmula general:

$$iacal_{ijt} = \frac{C_{ijt}}{O} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Donde:

$iacal_{ijt}$ Son las estimaciones de las cargas de la variable de calidad i que se puede estar vertiendo a la subzona hidrográfica j, durante el período de tiempo t ponderado por la oferta hídrica estimada para un escenario hidrológico dado.

C_{ijt} Es la carga de la variable de calidad i que se puede estar vertiendo a la subzona hidrográfica j durante el período de tiempo t .

O la oferta hídrica estimada para un escenario hidrológico dado.

4.3.3. Fuentes de información

Las fuentes de información obedecen tanto a las de carácter nacional, como regional a nivel institucional, y las de aquellas provenientes de entidades u organismos presentes en el área de estudio; asimismo, a los registros de origen de acuerdo con la naturaleza o tipo de la información, según las líneas temáticas definidas conceptualmente y los alcances fijados.

En términos de monitoreo (condiciones de calidad), las fuentes de información corresponden a los registros de calidad de agua disponibles a partir de las redes o programas establecidos por el IDEAM y las Autoridades Ambientales en el horizonte o resolución espacio temporal definida; con relación a la presión, las bases de datos de cargas contaminantes validada con los usuarios del programa de tasas retributivas principalmente, y complementados con otra información proveniente de los registros de vertimientos existentes sobre los principales sectores (usuarios) que generan y vierten aguas residuales en las áreas de estudio, teniendo como soporte de cálculo los datos disponibles en las autoridades ambientales. Lo anterior complementado con información utilizable y proveniente de las otras fuentes de información.

Las entidades que remitieron finalmente información utilizable para el proyecto fueron a nivel nacional: el IDEAM, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la Superintendencia de Servicios Públicos, y a nivel regional: las Autoridades Ambientales Regionales representadas por la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ), Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) y el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), de las cuales se destaca la información proveniente de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS), Programas de Ordenación del Recurso Hídrico (PORH) y de tasas retributivas, incluyendo registros de vertimientos.

4.3.4. Métodos de análisis



El procesamiento de la información aborda un trabajo en función de un análisis sistemático en la medida de lo posible, de tal forma que permita, por un lado, brindar el soporte de la interpretación de los resultados de los índices y por otro, aportar al cumplimiento de objetivos como:

- consolidar un inventario y caracterización del estado y comportamiento del recurso hídrico en términos de calidad.
- facilitar los procesos de evaluación de la calidad del recurso hídrico, que propicien análisis frente a la interpretación de su estado actual.

Teniendo en cuenta que los datos que alimentan los índices deben obedecer al mismo escenario espacio-temporal (escenarios hidrológicos de interés) en lo posible y de acuerdo con la disponibilidad de información, se requiere entonces tratar la información bajo este panorama, con el soporte que permita identificar los periodos o las épocas durante las cuales se adelanta la evaluación.

Para estos efectos se recurre a métodos y técnicas como:

- Interpretación o análisis integrado de la información de presiones y de calidad bajo premisas de monitoreo sistemático en diferentes escenarios hidrológicos, en la medida de las posibilidades logísticas.
- Análisis contemplando la clasificación de los sistemas hídricos y la parametrización definida a partir de los índices de calidad y contaminantes específicos priorizados, y de los criterios de calidad.
- Obtención de información bajo procedimientos analíticos acreditados o reconocidos para su validación bajo estándares homologables con la calidad suficiente que permite con la mayor certeza aplicar los índices de calidad.
- Cálculo e interpretación de los índices de calidad y su correlación.
- Interpretación o análisis integrado del índice de calidad e indicador de presión.
- Manejo de los instrumentos y herramientas técnicas y metodológicas disponibles y concernientes a la temática de la calidad del agua, así como el procesamiento de información hidrológica para la estimación de la oferta hídrica y la generación de escenarios hidrológicos de los monitoreos de calidad del agua. Selección de indicadores (variables).

- La selección de los indicadores que precisan de análisis se determinará por los elementos vinculantes entre la calidad del agua y los procesos de su alteración, así como por principios de priorización y gradualidad.

Con base en las fases y alcances del estudio, el tratamiento de la información contempla:

- Validación de la información: en términos de la caracterización de la presión se consideran las cargas a facturar como parte del programa de tasas como válidos, toda vez que han surtido sus propios procesos de verificación. Por otra parte, en términos de caracterización de las condiciones de calidad, se contempla una serie de criterios por fuente de información, que incluye la incorporación de:
 - Monitoreos (datos) que incluyan las variables seleccionadas para la evaluación.
 - Análisis (muestras o datos) reportados por el IDEAM y los reportados por las Autoridades Ambientales o en dado caso por laboratorios con acreditación.
 - Puntos o estaciones que complementan y/o converjan con la red de calidad del IDEAM, integrando las diferentes bases de datos, efectuando una exclusión de aquellos puntos que no cuentan con georreferenciación consistente, y la identificación de valores atípicos, generalmente por concentraciones anómalas según las características de cada variable y localización del punto de monitoreo respectivo.

Con base en el marco conceptual y teniendo presente las áreas de estudio definidas, se aborda a continuación el análisis de la información disponible, desagregándolo por líneas temáticas y por etapas en respuesta al procedimiento planteado, así como secuencialmente por cada SZH.

- Clasificación de los monitoreos de calidad del agua por escenarios hidrológicos. El criterio de condición (seca, húmeda, normal o media) es fundamental para la interpretación de la variabilidad de las condiciones de calidad del agua. Está construido a partir de los datos promedio mensuales de precipitación y de los registros de caudales en las estaciones o puntos de monitoreo del IDEAM; se proyectan sobre una condición promedio multianual mensual, es decir, que, sobre los doce valores mensuales multianuales, se estima el valor con probabilidad de excedencia del 25% (para la condición alta o húmeda) y del 75% (para la condición baja o seca), se asume entre el 75% y el 25 % de los datos una condición

normal. El porcentaje de excedencia está evaluado sobre los valores multianuales, por lo que no tiene en cuenta la variabilidad hidrológica.

Los escenarios de evaluación tal como se plantea, incluyen un abanico de posibilidades, las cuales tienen aplicabilidad según el tipo de evaluación que se pretende adelantar, bajo diferentes condiciones tanto hidrológicas como de presión. Si bien las condiciones de año medio precisamente deben reflejar un comportamiento “promedio”, a efectos de observar condiciones críticas de calidad para el uso del recurso, el escenario seco, corresponderían al más representativo; esto, sin dejar de lado épocas húmedas que pueden reflejar efectos por cargas distribuidas (contaminación difusa).

Teniendo en cuenta que las campañas de monitoreo pueden abarcar un periodo de tiempo que supere la programación durante un solo mes, la clasificación del monitoreo se definirá como de transición entre la época durante la cual se iniciaron los muestreos y el mes de terminación de los mismos.

- Procesamiento y espacialización de la información: se sintetiza la información, aplicando para el efecto, una serie de ayudas basadas en hojas de cálculo para tabulación y graficación y con las herramientas de Sistemas de Información Geográfica, derivando para cada área de estudio en particular, la definición del horizonte y de las unidades de análisis.

La delimitación del análisis respecto a las redes de monitoreo de calidad hídrica se tratará con base en la configuración de la red hídrica (topología) que se obtenga como respuesta a la identificación de los cuerpos de agua correspondientes a los principales a nivel de SZH y de unidades de análisis (UA – unidades de análisis subsiguientes a las SZH), así como de otros de interés contemplados en los POMCA.

Con respecto a los puntos o estaciones de monitoreo, se busca caracterizar la calidad del agua bajo condiciones de referencia (o naturales del agua) y de presión, a escala regional (se descartan puntos o estaciones ubicadas con criterios locales). También la revisión funcional de los puntos de monitoreo contemplará la localización de aquellos que se adoptaron en los POMCA, teniendo en cuenta las UHNI (unidades de análisis - UA), al aporte que cada unidad le entrega a la corriente principal o desembocaduras, para efectos de priorización.

- Identificación y selección de variables: el reconocimiento de las variables a procesar durante la evaluación, parte de aquellas monitoreadas en las diferentes campañas a nivel nacional y regional (disponibilidad de la información), teniendo como referentes las

constitutivas de los índices. Además de la DQO, DBO, SST, OD, NT, PT, Conductividad y el pH, se relacionan otras variables monitoreadas como la Turbidez, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno amoniacal, Fósforo Reactivo Disuelto, Sulfatos, Sólidos Totales, Coliformes Totales y Fecales o E. Coli, Hierro, Manganeso, Grasas y/o Aceites, HTP y algunos metales. La identificación de sustancias potencialmente contaminantes de acuerdo con la caracterización sectorial permitirá dar respuesta a posibles evidencias de contaminación conforme a la tipología de las aguas residuales presentes en las áreas de estudio.

- Evaluación - caracterización de la Presión por cargas puntuales: consolida la línea base de vertimientos, identificando los sectores - usuarios del recurso hídrico que vierten residuos líquidos de manera puntual, adelantando una caracterización de los mismos en términos de la estimación de cargas en Ton/año sobre las variables de interés asociadas al IACAL; esto, como insumo para el posterior cálculo de la presión o de la alteración potencial de la calidad del agua. Como métodos a emplear se han identificado:
 - Cálculo de carga: Caudal - Q (demandado no consuntivo * factor de retorno – perdidas) * Concentración típica – media en vertimientos
 - Cálculo de cargas a partir de cargas estimadas en el programa de tasas retributivas (DBO – SST). No se tendrán en cuenta aquellos usuarios que se incluyen en el programa y sobre los cuales se hacen descuentos por captar y verter en la misma fuente.
 - Adopción de cargas ya estimadas para ENA y POMCA como las vertidas por los sectores – usuarios identificados, salvo la de origen poblacional, como insumo para la estimación de la presión.
 - Cálculo de cargas de origen poblacional o doméstico: a partir del censo 2018 y proyecciones a 2019 o registros de centros poblados en los POMCA de las áreas de estudio; aplicación de factores de vertimiento teóricos o medidos producto de los ejercicios realizados a nivel regional.
 - Cálculo de cargas sectoriales: a partir de información de producción o sacrificio consignada en los POMCA o en estadísticas nacionales - regionales, aplicación de factores de vertimiento teóricos.

- No se incluirán vertimientos directos al río Magdalena, aunque correspondan a usuarios que estén localizados en las áreas de estudio, a efectos de establecer la presión en las SZH.

Aplicación factores de carga/vertimiento por PPC, producción o concentraciones típicas: en la Tabla 4.32 se aprecia a manera de ejemplo, los factores a emplear en algunos de los sectores presentes en el área de estudio, para complementar el cálculo de todas las variables que conforman la caracterización de la presión.

Tabla 4.32. Factores de vertimiento para algunos sectores y actividades presentes en las áreas de estudio

DETERMINACIÓN DE VERTIMIENTO SECTORES GENERADORES DE VERTIMIENTOS PUNTUALES (INTERRELACIÓN: PARÁMETRO / DBO)		FACTORES DE CARGA/VERTIMIENTO						REFERENCIAS Y SOPORTE TÉCNICO
		DBO	VALOR	AGUA RESIDUAL CRUDA				
CLASE	DESCRIPCIÓN CLASE	UNID	R	DQO	SST	NT	PT	A.R. CRUDA
1011	Procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos (vacunos)	Kg/t carne	10	1,74	0,80	0,070	0,005	Referencia base aplicada: REF1 Otras: REF2: DQO/DBO = 2.5 / REF3: 6.4 KgDBO/t).
1011	Procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos (aves)	Kg/t carne	17	1,76	0,75	0,070	0,005	Referencia base aplicada: REF1 REF 2: 6,94 Kg SST/1000 aves y 13,61 Kg DBO/1000 aves Otras: Para nutrientes se asume mismos factores de vacunos por asociación y similitud de los otros factores
3330144	Cría de ganado porcino	Kg/t peso vivo	2,5	3,00	3,00	0,040	0,008	Referencia base aplicada: REF 3
3700	Evacuación y tratamiento de aguas residuales	mg/l	220	2,0 – 2,14	1,00	0,182	0,036	Referencia base aplicada: REF 4 y 6
3700	Evacuación y tratamiento de aguas residuales	kg/hab-día	0,05	0,11	0,05	0,009	0,002	Referencia base aplicada: REF 5 (valor sugerido para DBO). Otras: REF 4: Se aplico relaciones para demás parámetros.

DETERMINACIÓN DE VERTIMIENTO GENERADORES PUNTUALES PARÁMETRO / DBO)	FACTORES DE SECTORES DE VERTIMIENTOS (INTERRELACIÓN: DBO)	FACTORES DE CARGA/VERTIMIENTO		REFERENCIAS Y SOPORTE TÉCNICO
		AGUA CRUDA	RESIDUAL	
NOTAS	FUENTE	No REFERENCIA		
	(IDEAM, 2011c) (WHO, 1993)	REF: 1		
	(Restrepo, 1997)	REF: 2		
	(Ministerio del medio ambiente, 2002)	REF: 3		
	(Metcalf & Eddy INC, 1995).	REF: 4		
	(Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).	REF: 5		
	Resolución. 631 de 2015 de MINAMBIENTE	REF: 6		

- Criterios para la destinación del agua: la identificación de los usos por demanda o destinación del recurso asociada a la calidad del agua permite disponer de un soporte para su evaluación, con base en los criterios y estándares para su utilización o conservación. Se reconoce que el análisis de calidad en el país va ligado a estos, por lo tanto, con el fin de interpretar los datos, se acude a la norma o en caso de no contar con criterios para algunas variables y usos del recurso, a otras referencias técnicas complementarias.

Teniendo en cuenta que los criterios de calidad son muy variados, se apela al orden de prioridad de los usos establecidos para la norma, ya que los valores límite para conceptuar sobre la disponibilidad del agua son en general para esos casos, los más restrictivos. La selección entonces corresponde a los valores contemplados para consumo humano, usos agropecuarios y uso para preservación de flora y fauna.

De acuerdo con la normatividad, tanto ambiental como sanitaria, y con referencias técnicas complementarias, se adelantó la siguiente consolidación que se ilustra en la siguiente tabla, y que opera como fundamento del análisis de calidad del agua (Tabla 4.33).

Tabla 4.33. Criterios de calidad por usos del recurso para variables más representativas

CLASE (Destinación del recurso)	CRITERIOS DE CALIDAD															
	P H	OD	DB O	SS T	CT	CF	G/ A	NH 3	NO 2 ⁻	NO 3 ⁻	PO 4 ⁻	Fe tot al	M n	Cd	Hg	Pb
	U N	mg/l	mg/ l	mg /l	NMP	NMP	mg /l	mg /l	mg/ l	mg /l	mg/ l	mg /l	mg /l	mg /l	mg /l	mg /l
1. 1	CONSUMO HUMANO (DESINFECCIÓN)	6, 5		≤5		≤1.00 0	≤1.00 0		≤1	≤1				0,0 1	0,00 2	0,0 5

CLASE (Destinación del recurso)	CRITERIOS DE CALIDAD																
	P H	OD	DB O	SS T	CT	CF	G/ A	NH 3	NO 2 ⁻	NO 3 ⁻	PO 4 ⁻	Fe tot al	M n	Cd	Hg	Pb	
	U N	mg/l	mg/ l	mg/ l	NMP	NMP	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	mg/ l	
		8,5															
1.2	CONSUMO HUMANO (TTO CONVENCIONAL)			≤5				≤1	≤1					0,01	0,002	0,005	
2	PRESERVACIÓN DE FLORA Y FAUNA		4 - 5							≤5	≤0,1						
3.1	AGRÍCOLA (SIN RESTRICCIONES)					≤1.000						5	0,2	0,01			
3.2	AGRÍCOLA (CON RESTRICCIONES)											5	0,2	0,01			
4	PECUARIO					100 - 1.000											
5.1	RECREATIVO (CONTACTO IRIO)		70%Sat.		≤1.000												
6	PESCA Y ACUICULTURA		4 - 5			100 - 1.000				≤5	≤0,1						
7	ESTÉTICO			≤60													
8	DILUCIÓN Y ASIMILACIÓN (transporte aguas residuales)			≤60			≤100										
VALORES RESTRICTIVOS MÁS		6,5 - 8,5	4 - 5	≤5	≤60	≤1.000	100 - 1.000	≤100	≤1	≤1	≤5	≤0,1	5	0,2	0,01	0,002	0,005

Nota: Referencias consultadas:

- ✓ Decreto.1076/15 - Minambiente
- ✓ ALVARO SALAZAR ARIAS; 1987 - Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia - AINSA; Contaminación de Recursos Hídricos, Modelos y Control (2da ed.)
- ✓ RAS: valor medio de la concentración media contemplada por el RAS (4 - 6 mg DBO/l)
- ✓ GUÍA TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE REUSO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MUNICIPALES - Minambiente (CEPIS 1998)



- ✓ MESOCA - MAVDT (GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS DE CALIDAD)
- ✓ Resolución 631/15 -Minambiente
- ✓ Resolución 2115 de 2007, MPS-MAVDT
- Definición de umbrales para la evaluación de la calidad del agua: la selección de valores que generen una señal de afectación (inadmisibilidad) o alteración de la calidad del agua, es importante para disponer de una base técnica que permita adelantar el análisis y la evaluación de calidad complementaria a los resultados del ICA, con base en criterios de calidad del agua según sus usos o en categorizaciones de la calidad del agua según las curvas funcionales del ICA u otras referencias técnicas. A continuación, se consolidan los valores críticos o más restrictivos por cada variable monitoreada en relación con los diferentes usos del agua, que a partir de su excedencia, indicarían una limitación para la admisibilidad del recurso o una peligrosidad, conforme a los valores permisibles disponibles en la norma u otras referencias técnicas complementarias, de tal forma que dicha parametrización, permita en alguna medida fundamentar el análisis de efectos asociados principalmente a factores antrópicos en una unidad de análisis dada.

Tabla 4.34. Umbrales para la evaluación de la calidad del agua

VARIABLE	UNIDAD	CRITERIOS DE ADMISIBILIDAD PARA USO DEL AGUA			VALORES LÍMITE (Umbrales)
		VALOR MAS RESTRICTIVO	REFERENCIA	DESTINACIÓN USO	
pH	und	6,5 - 8,5	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	6,3 - 8,7
COND.	µS/cm	1000	Res/2115	AGUA POTABLE	218
OD	mg/L	4 - 5	Dec/1076	PRESENVACIÓN FLORA Y FAUNA	
%SAT	%	70%	Dec/1076	RECREATIVO	NO DETERMINABLE
DBO	mgO ₂ /L	≤5	RAS	CALIDAD DE LA FUENTE	
DQO	mgO ₂ /L				20
SST	mg/L	≤60	MESOCA	ESTETICO; DILUCIÓN /ASIMILACIÓN	256
CT	NMP	≤1.000	Dec/1076	CONSUMO HUMANO (Desinfección)	
CF	NMP	≤1.000	Dec/1076	AGRICULTURA (CONSUMO HUMANO: Se asume 1000 como Máximo posible en relación con CT)	390
G/A	mg/L	≤10	Res/631	VALOR MAS RESTRICTIVO	

VARIABLE	UNIDAD	CRITERIOS DE ADMISIBILIDAD PARA USO DEL AGUA			VALORES LÍMITE (Umbrales)
		VALOR MAS RESTRICTIVO	REFERENCIA	DESTINACIÓN USO	
NH3	mg N-NH3/L	≤1	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
NO ₂ ⁻	mg NO2-N/L	≤1	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
NO ₃ ⁻	mg NO3-N/L	≤5	MESOCA	PRESERVACIÓN FLORA Y FAUNA (Adoptado de uso acuicultura)	
PO ₄ ⁻	mg PO4-P/L	≤0,1	MESOCA	PRESERVACIÓN FLORA Y FAUNA (Adoptado de uso acuicultura)	
Fe total	mg/L	5	Dec/1076	USO AGRÍCOLA	
Mn	mg/L	0,2	Dec/1076	USO AGRÍCOLA	
Cd	mg/L	0,01	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
Hg	mg/L	0,002	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
Ag	mg/L	0,05	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
Pb	mg/L	0,05	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
Fenoles	mg/L	0,002	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
SO ₄	mg/L	400	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
Cr	mg/L	0,05	Res/2115	AGUA POTABLE	
Ni	mg/L	0,2	Dec/1076	AGRICOLA	
Cu	mg/L	0,2	Dec/1076	AGRICOLA	
Zn	mg/L	2	Dec/1076	AGRICOLA	
Al	mg/L	5	Dec/1076	AGRICOLA	
HTP	mg/L	10	Res/631	SECTOR HIDROCARBUROS	
As	mg/L	0,05	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	
CN-	mg/L	0,2	Dec/1076	CONSUMO HUMANO	

Tabla 4.35. Criterios adoptados para establecer valores de excedencia para umbrales para la evaluación de la calidad del agua

VARIABLE	UNIDADES	CRITERIO ADOPTADO COMO VALOR DE EXCEDENCIA
pH	und	ICA: Valores límite de condiciones de frontera
CONDUCT	µS/cm	ICA + 2115: valores con subcategorización muy mala (> 218). Valores menores comparativamente con agua potable no indicarían afectación o degradación, por lo tanto, se adopta el valor del límite inferior de la categoría señalada.
OD	mg/L	Decreto 1076 y la clasificación pisos térmicos para Colombia: 4 para aguas cálidas (Pisos térmicos cálidos y templados (< 2.000.m.s.n.m.) y 5 para aguas frías (>2.000.m.s.n.m.)
%SAT	%	Resultado ICA ≤ 0,7
DBO	mgO2/L	RAS: TABLA C.2.1. (Valor medio de la concentración media: 4 - 6 mg DBO/l)

VARIABLE	UNIDADES	CRITERIO ADOPTADO COMO VALOR DE EXCEDENCIA
		ACUERDO CAS_OC 068/2006 y ACUERDO CDMB_OC 1075/ 2006
DQO	mgO2/L	Resultado ICA \leq 0,71
SST	mg/L	ICA: valores con subcategorización muy mala ($>$ 256). Las concentraciones normales o promedio fluctúan entre los 200 y 360 mg/l inclusive en sectores de baja presión, por lo tanto, se adopta el valor del límite inferior de la categoría señalada.
CT	NMP	Dec1076: $>$ 1.000
CF	NMP	Dec1076: $>$ 1.000
G/A	mg/L	Res 631: $>$ 10
NH3	mg N-NH3/L	Dec1076: $>$ 1
NO ₂ ⁻	mg NO2-N/L	Dec1076: $>$ 1
NO ₃ ⁻	mg NO3-N/L	MESOCA - MAVDT (Guía metodológica para el establecimiento de objetivos de calidad): $>$ 5
PO4 ⁻	mg PO4-P/L	MESOCA - MAVDT (Guía metodológica para el establecimiento de objetivos de calidad): $>$ 0,1
Fe total	mg/L	Dec1076: $>$ 5
Mn	mg/L	Dec1076: $>$ 0,2
Cd	mg/L	Dec1076: $>$ 0,01
Hg	mg/L	Dec1076: $>$ 0,002
Ag	mg/L	Dec1076: $>$ 0,05
Pb	mg/L	Dec1076: $>$ 0,05
Fenoles	mg/L	Dec1076: $>$ 0,002
SO4	mg/L	Dec1076: $>$ 400
Cr	mg/L	Res 2115: $>$ 0,05
Ni	mg/L	Dec1076: $>$ 0,2
Cu	mg/L	Dec1076: $>$ 0,2
Zn	mg/L	Dec1076: $>$ 2
Al	mg/L	Dec1076: $>$ 5
HTP	mg/L	Res 631: $>$ 10
As	mg/L	Dec1076: $>$ 0,05
CN-	mg/L	Dec1076: $>$ 0,2

Dec: directo

Tabla 4.36. Notas técnicas sobre la selección de umbrales para la evaluación de la calidad del agua

NOTAS TÉCNICAS CRITERIOS APLICADOS PARA SELECCIÓN DE UMBRALES	
<p>Selección de referencias para determinar los umbrales</p>	<p>Con base en las diferentes variables monitoreadas en el área de estudio, se selecciona en primera instancia los criterios de calidad como referente de valores que permiten la admisibilidad o utilización del agua para las diferentes necesidades antrópicas y para la preservación hidrobiológica; en segunda instancia, se recurre al análisis de las curvas de calidad del agua del ICA por cada variable, de tal forma que respalde el análisis en el evento de no disponer de una referencia normativa o que en sí la curva aporte elementos para considerarlos como señal de alarma.</p>

Criterios derivados de las curvas o ecuaciones del ICA	Clasificación del valor como alarma conforme a resultado subíndice, aplicando mismas categorías ICA a partir de calificación regular ($\leq 0,7$) o muy mala $\leq 0,25$
Criterios derivados de los valores asignados para la admisibilidad del recurso para la destinación del recurso	Considerando que en el área de estudio se demanda agua para todos los usos del agua normados y que una forma de establecer valores límite en la calidad del agua de tal forma que no se presenten restricciones de uso o conservación del recurso en cualquier momento y localización, se tomarán los valores más restrictivos por variable para todos los usos de los cuales se disponga de reglamentación. En el caso de no disponer de referentes normativos, se apelará a otras referencias de tal forma que se disponga de algún parámetro que se pueda aplicar a efecto de la evaluación pretendida.
Criterio adoptado como valor de excedencia	Para aquellas variables donde se disponga tanto de curva ICA a nivel de subíndice como de criterio de calidad, se adoptará uno o la complementación entre los dos criterios, para expresar en la tabla la decisión adoptada
Semáforo para los subíndices ICA	Para indicar el nivel de criticidad por subíndices ICA, se apelará a los mismos rangos y colores establecidos para el ICA

- Comparación entre umbrales: señales de afectación y variabilidad histórica de la calidad del agua

En la siguiente tabla se presenta un comparativo entre los umbrales asociados a los usos del agua (señales de afectación) y los determinados a partir de las condiciones históricas de aquellas variables que han tenido un monitoreo representativo objeto de un análisis estadístico, y que indicarían comportamientos atípicos o anómalos; sin embargo, para la evaluación general de la calidad del agua, el principal referente corresponde al umbral definido como señal de afectación y se complementará con los umbrales cuyos valores aparecen en rojo, correspondientes a los estadísticos mencionados anteriormente.

Tabla 4.37. Valores de percentiles asumidos para determinación de umbrales históricos para la evaluación de la calidad del agua

VARIABLE	UN	SEÑAL DE AFECTACIÓN	PERCENTIL 85														
			OPON		SOGAMOSO		CHICAMOCHA	SUAREZ		LEBRIJA					TRAMO MAGDALENA		
			OPÓN	LA COLORADA	SOGAMOSO	CÑO SAN SILVESTRE		SUAREZ	FONCE	ORO	VETAS	SURATÁ	LEBRIJA	SAN ALBERTO	CARARE	MAGDALENA	CIMITARRA
pH	und	6,3 - 8,7	7,36	6,94	7,31	5,92	7,26	7,56	7,21	7,43	7,68	8,08	7,27	7,41	7,46	7,42	7,07
COND.	µS/cm	218	263	174	197	36	577	294	101	118	187	160	278	151	327	196	157
OD	mg/L	4 - 5	4,80	3,70	6,50	5,10	3,80	7,00	6,90	6,70	6,30	5,90	4,90	5,30	5,00	5,10	3,70
%SAT	%	ICA ≤ 0,7	61,0	46,0	47	67	49	59	54	80	71	68	66	75	65	66	47
DQO	mgO2/L	20	87	53	68	32	87	58	33	32	12	21	81	65	160	82	32
SST	mg/L	256	1903	1107	1369	11	606	488	280	80	129	235	1011	586	2202	616	240
NH3	mg N-NH3/L	1	0,11	0,11	0,31	0,14	4,00	0,33	0,19	2,80	0,13	0,28	6,84	0,26	0,18	0,20	0,17
NO ₂ ⁻	mg NO2-N/L	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,12	0,03		0,46	0,01	0,01	0,30	0,01	0,04	0,06	0,01
NO ₃ ⁻	mg NO3-N/L	5	0,78	0,68	0,70	0,21	1,70	0,60	0,41	0,89	0,20	0,23	1,88	0,48	0,90	1,12	0,52
PO ₄ ⁻	mg PO4-P/L	0,1	0,07	0,09	0,18	0,03	0,27	0,05	0,04	0,41	0,10	0,05	1,00	0,18	0,10	0,07	0,08
SO ₄	mg/L	400	29,8	80,8	95	6	150	36	9	8,8	36	16	29,5	7	58,9	20,3	13,5

Nota: Los valores en rojo corresponden a aquellos históricos que superan el criterio de calidad

- Evaluación (caracterización) de la Calidad del agua: consolida la línea base y el seguimiento al estado de la calidad del agua, identificando las fuentes hídricas de referencia del estado natural del recurso y receptoras de vertimientos puntuales, adelantando una caracterización de las mismas en términos de las unidades de medición sobre las variables de interés asociadas al ICA y otras variables de interés ambiental incluyendo las sustancias de interés sanitario. Como métodos a emplear se han identificado:

- Para la etapa de línea base se expresaron los resultados por escenario hidrológico identificado y para la etapa de seguimiento se expresaron los resultados por campaña de monitoreo realizada, indicando el escenario hidrológico correspondiente.
- Cálculo ICA: No de variables (5 y 6 a nivel Nacional – 7 a nivel Regional). Para la línea base, cuando se disponga de dos (2) o más registros por punto de monitoreo para un mismo escenario hidrológico, se realizará un promedio a partir de los valores de los ICA's obtenidos, de tal forma que se disponga de un solo descriptor, para su espacialización (oficialización de resultados), proceso que también atenderá a los escenarios hidrológicos que sean representativos por el grado de cobertura (número de puntos) de los respectivos monitoreos.
- Selección de variables complementarias, dependiendo de la información disponible y su representatividad según tipo de presión.
- Establecimiento de parámetros para catalogar la calidad del agua por variables seleccionadas y/o priorizadas contrarrestando los resultados con la definición de umbrales basados en criterios de calidad del agua para su destinación o en las curvas funcionales del ICA.
- Análisis Integrado presión – estado: se dió un enfoque de flujo de materiales, teniendo en cuenta que las unidades de medida de las variables que conforman los índices (ICA – IACAL) en su gran mayoría se expresan en términos de concentraciones, bajo las mismas unidades que permitirían una comparación y una correlación entre índices, asociando la capacidad de dilución y asimilación de las fuentes receptoras a partir de la oferta estimada por unidad hidrográfica, tal como se expresa en la Figura 4.15. La aproximación a la correlación entre índices se efectuará tomando los resultados del ICA hacia la desembocadura de las corrientes principales a nivel de unidades subsiguientes a la SZH con los del IACAL, y teniendo como referencia además los resultados del ICA sobre la corriente principal a nivel de SZH.

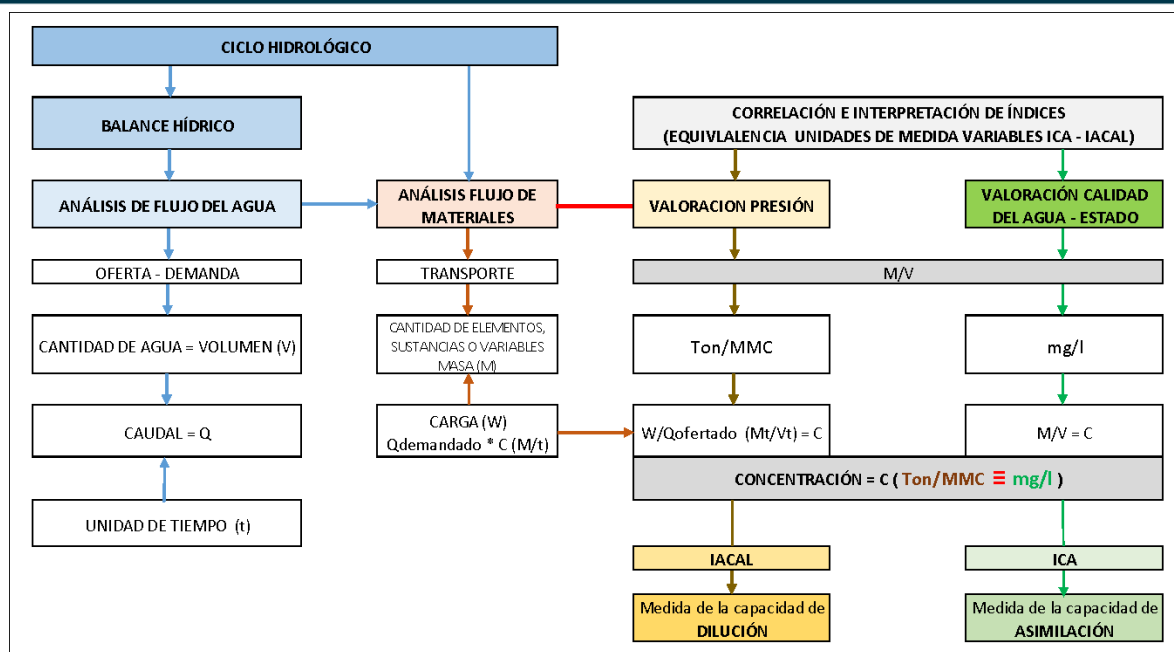


Figura 4.15. Análisis integrado basado en enfoque análisis flujo de agua - materiales para la evaluación de la calidad de agua en el VMM.

4.4. Análisis de la información para la evaluación de la calidad del agua

En los siguientes numerales se presenta la información disponible para la evaluación de la calidad del agua en las tres subzonas hidrográficas (Ríos Opón, Sogamoso, Lebrija) y Tramo Río Magdalena), las unidades de análisis, los escenarios hidrológicos considerados para el cálculo de los indicadores, la caracterización de los procesos de alteración de la calidad del agua y de las condiciones de calidad.

4.4.1. Información disponible

La información para la estimación de cargas para la subzona hidrográfica del río Opón y Sogamoso se soporta en el registro de cada sujeto pasivo para el año 2021 en jurisdicción de la CAS con presencia en la cuenca y conforme a los tramos establecidos en el acuerdo de metas de cargas contaminantes No 373 del mismo año. Asimismo, en registros de vertimientos disponibles de usuarios a los cuales se les cobre la tasa, y que complementaron la caracterización de las aguas residuales aportadas a la cuenca.

La información para la estimación de cargas en el río Lebrija se soporta en el registro de cada sujeto pasivo para el año 2021 en jurisdicción tanto de la CAS como de la CDMB y en los registros de vertimientos disponibles de usuarios objeto de cobro de tasa.

No se dispuso de información proveniente de otras fuentes, como por ejemplo del sector privado o productivo; por lo tanto, la estimación de cargas dependió de la priorización establecida por las Autoridades Ambientales y de su disponibilidad de datos.

La información de presiones ejercidas sobre el tramo del río Magdalena corresponde entonces a la disponible de las subzonas hidrográficas de los ríos Opón, Sogamoso y Lebrija; para las zonas de influencia, a nivel descriptivo, se acude a la identificación de los tipos de demanda o usos del recurso identificados.

Para la determinación del estado de la calidad del agua en las subzonas hidrográficas Opón Sogamoso y Lebrija, se recibió la información reportada por la red nacional del IDEAM durante los años 2019 al 2022 y de los monitoreos realizados para la formulación de los POMCA durante los años 2016 y 2017. Para la cuenca del río Lebrija, se contó además con la información regional generadas por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y por el Área Metropolitana de Bucaramanga en el año 2019, año del cual, no se tiene la misma cobertura de los puntos seleccionados en los diferentes planes de ordenación, puesto que las redes se han enfocado en la cuenca alta.

Para la determinación del estado de la calidad del agua del tramo río Magdalena se dispuso de la información 2019 a 2022 generada por la red nacional del IDEAM.

4.4.2. Resolución espacial y temporal para el análisis de la información

El horizonte espacial corresponde a cada una de las subzonas hidrográficas (SZH) priorizadas como áreas de estudio, escalando la evaluación a nivel de UHNI (unidades de análisis - UA), de tal forma que se obtuvieran resultados a esos dos (2) niveles de zonificación; con respecto a los cuerpos de agua, se contemplan sus corrientes principales, teniendo como ejes hídricos los ríos Opón, Sogamoso, Lebrija y el tramo del río Magdalena comprendido entre las desembocaduras de los ríos Carare y Lebrija, sin descartar otros cuerpos de agua de interés contemplados principalmente en los POMCA. Las unidades de análisis para las tres (3) subzonas de estudio priorizadas se ilustran en la Tabla 4.38, en la cual se ha organizado la zonificación en sentido del flujo de agua (desde la cabecera de cuenca hasta su desembocadura al río Magdalena). En la caracterización de las

condiciones de calidad, se podrá apreciar la topología de las redes de drenaje consideradas y los puntos de referencia para la evaluación de la calidad del agua.

Tabla 4.38. Unidades de análisis (UA) para las subzonas hidrográficas Opón, Sogamoso y Lebrija

SZH	SUBZONA HIDROGRÁFICA	UA	UNIDAD DE ANÁLISIS
2314	Río Opón	231408	Río Opón entre San Joaquín y La Tablona
		231407	Río Quiratá
		231409	Quebradas La Aragua y La Colorada
		231412	Río La Verde
		231406	Quebrada Negra de Armas
		231405	Río Blanco
		231404	Directos al río Opón entre Vereda La Honda y Ciénaga del Opón
		231403	Quebrada la India
		231402	Complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras
		231411	Complejo Ciénaga del Opón
		231410	Río La Colorada
		231401	Complejo Humedal Juan Esteban
2401	Río Suárez	2401	Río Suárez
2402	Río Fonce	2402	Río Fonce
2403	Río Chicamocha	2403	Río Chicamocha
2405	Río Sogamoso	240506	Quebrada La Betuliana y otros directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso
		240507	Directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)
		240505	Quebrada Zapatoca
		240504	Río Chucurí
		240508	Quebradas Aguablanca y Pujaman
		240512	Hidrosogamoso
		240503	Quebrada La Putana
		240509	Río Sucio

SZH	SUBZONA HIDROGRÁFICA	UA	UNIDAD DE ANÁLISIS
		240510	Quebradas Caño Corazones y Payoa
		240511	Río Sogamoso entre Hidrosogamoso y Cayumba
		240501	Río Sogamoso entre Cayumba y el río Magdalena
		240502	Complejo Ciénaga San Silvestre
2319	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	231923	Río de Oro
		231920	Río Negro
		231922	Quebrada La Angula
		231921	Río Salamaga
		231924	Río Cachirí
		231903	Caño Cuatro
		231902	Quebrada Doradas
		231904	Quebrada La Tigra
		231905	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte media)
		231906	Quebrada La Platanala
		231907	Quebrada La Musanda
		231912	Quebrada El Salado
		231911	Quebrada Trece (Q. Nariño)
		231909	Quebrada La Gómez
		231910	Quebrada Lebrija
		231908	Quebrada La Santa
		231901	Río Lebrija medio directos
		231913	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte baja)
		231914	Quebrada Torcoroma
		231915	Quebrada La Huila (Quebrada El Cacao)
231916	Quebrada Caimán		
231917	Quebrada Tisquirama - Ciénaga Doña María		
231918	Ciénaga Guacamaya, Ciénaga El Roble, Ciénaga La Doncella		
231919	Río Lebrija bajo directos		

La evaluación de la calidad del agua en el tramo del río Magdalena incluye puntos de monitoreo localizados sobre su cauce y en las desembocaduras de los afluentes principales, correspondientes a los ríos Carare, Opón, Sogamoso, Cimitarra y Lebrija.

Con relación a la resolución temporal, la etapa de líneas base o de estado de las condiciones de calidad, comprendió el año de referencia (2019) complementado con la información disponible de los años 2016, 2017 y 2020; la etapa de seguimiento incluyó datos de los años 2021 y 2022. También hace parte del horizonte temporal, la clasificación de los monitoreos basada en los diferentes escenarios hidrológicos identificados.

4.4.3. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos

En las Tabla 4.39 a Tabla 4.42, se ilustra el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Opón, Sogamoso, Lebrija y Tramo Magdalena respectivamente, considerando las tres épocas y diferenciándolas colorimétricamente así: época seca: rojo; época normal-media: verde y época húmeda: azul.

Tabla 4.39. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua río Opón

SZH / ESTACIÓN – PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO OPÓN													RANGO CAUDALES (m³/s)			Q MEDIOS (m³/s)
	HORIZONTE TEMPORAL MENSUAL												SEC O	MEDIO	HÚMED O		
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D					
PTE.FERROCARRIL [23147020]	Red	Red	Red	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Blue	Blue	Green	<70,1	70,1 - 112,8	>112,8	93,5	
AYACUCHO [23147040]	Red	Red	Red	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Blue	Blue	Green	<48,0	48,0 - 79,18	>79,18	63,8	
SZH - 2314	Red	Red	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Blue	Blue	Green	Red					

Tabla 4.65. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua zonas de influencia y cuenca río Sogamoso

SZH / ESTACIÓN – PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO SOGAMOSO												RANGO CAUDALES (m³/s)			Q MEDIOS (m³/s)
	HORIZONTE TEMPORAL												SEC O	MEDIO	HÚMEDO	
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D				
PTE.NACIONAL [24017590]	Red	Red	Green	Green	Blue	Green	Red	Green	Blue	Blue	Green	<20,2	20,2 - 47,3	>47,3	33,5	



SZH / ESTACIÓN - PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO SOGAMOSO													RANGO CAUDALES (m³/s)			Q MEDIOS (m³/s)
	HORIZONTE TEMPORAL												SECO	MEDIO	HÚMEDO		
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D					
SAN GIL [24027010]													<63,0	63,0 - 115,5	>115,5	88,5	
PAZ DE RIO [24037510]													<34,2	34,2 - 48,4	>48,4	40,5	
CAPITANEJO [24037390]													<49,5	49,5 - 101,8	>101,8	75,91	
JORDAN EL [24037360]													<88,4	88,4 - 163,4	>163,4	125,15	
SZH - 2405																	

Tabla 4.66. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua río Lebrija

SZH / ESTACIÓN - PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO LEBRIJA													RANGO CAUDALES (m³/s)			Q MEDIOS (m³/s)
	HORIZONTE TEMPORAL												SECO	MEDIO	HÚMEDO		
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D					
PUENTE PANEGA [23197270]													<1,88	1,88 - 3,31	>3,31	2,59	
CAFE MADRID [23197290]													<13,39	13,39 - 19,72	>19,72	17,38	
EL HOYO [23197410]													<15,2	15,2 - 26,46	>26,46	22,12	
SAN RAFA EL [23197370]													<70,47	70,47 - 107,96	>107,96	94,22	
SZH - 2319																	
SITIO NUEVO R-11 [23187280] - Magdalena													2928,46	2928,46 - 4247,02	4247,02	3604,26	

Tabla 4.42. Escenarios hidrológicos para la clasificación de los monitoreos de calidad del agua

SZH / ESTACIÓN - PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO TRAMO RIO MAGDALENA													RANGO CAUDALES (m³/s)			Q MEDIOS (m³/s)
	HORIZONTE TEMPORAL												SECO	MEDIO	HÚMEDO		
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D					
STA. ROSA [23127060]													147,37	147,37 - 332,93	332,93	240,49	
SZH - 2314 - OPOP																	
SZH - 2405 - SOGAMOSO																	
SITIO NUEVO R-11 [23187280]													2928,46	2928,46 - 4247,02	4247,02	3604,26	



SZH / ESTACIÓN - PUNTO DE MONITOREO	ESCENARIOS HIDROLÓGICOS CUENCA RÍO TRAMO RIO MAGDALENA															
	HORIZONTE TEMPORAL												RANGO CAUDALES (m ³ /s)			Q
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	SECO	MEDIO	HÚMEDO	MEDIOS (m ³ /s)
SZH - 2319 - LEBRIJA																

4.4.4. Caracterización de procesos de alteración de la calidad del agua

En esta etapa se caracteriza la línea base de vertimientos líquidos puntuales, identificando y priorizando los sectores – usuarios, con el fin de calcular y/o estimar las cargas contaminantes, como insumo para la evaluación de la presión. Las presiones ejercidas sobre la calidad del agua están dadas por el aporte de esas cargas contaminantes, en escenarios temporales y espaciales y en función de la oferta considerada para tal fin.

Es importante destacar que, en las ERA, su marco conceptual relaciona los procesos de alteración con las metas globales de descontaminación, por lo tanto, el programa de tasas retributivas por medio del cual se han priorizado los agentes contaminantes de mayor importancia, se constituye en el pilar para la determinación de la presión por cargas puntuales en la cuenca, así, solo estén asociadas a la DBO y los SST.

Por lo tanto, la clasificación de los usuarios y las caracterizaciones o características de los vertimientos, complementan el análisis y permiten inferir o determinar las cargas para las otras variables del IACAL.

4.4.5. Caracterización de las condiciones de calidad

La caracterización de las condiciones de calidad del agua comprende la selección de variables e indicadores, el análisis de la destinación del recurso hídrico, descripción de redes hídricas y de monitoreo, topología de la red hídrica, clasificación de los monitoreos de calidad del agua por escenarios hidrológicos, caracterización de indicadores y variables complementarias.

4.5. Resultados de la alteración potencial de la calidad del agua

El análisis de la información y los resultados se presentan de manera general para las zonas de estudio, discriminando a nivel de SZH, la evaluación de la alteración de la calidad del agua en las tres áreas priorizadas (Cuencas de los ríos Opón, Sogamoso y Lebrija). La evaluación detallada a

nivel de unidades de análisis subsiguientes (UA), se presentan por cada una de las subzonas hidrográficas de interés en los anexos 1 a 4.

El contenido de los anexos responde a la siguiente estructuración y alcances: **1. PRESIONES SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA**

1.1. Caracterización procesos de alteración de la calidad del agua

1.1.1. Demanda del agua

1.1.2. Sectores usuarios que generan vertimientos puntuales

1.1.3. Estimación de cargas puntuales

1.2. Evaluación de la alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

La relación de los usos del agua determina la tipificación de los vertimientos de residuos líquidos, sean de carácter puntual o distribuido, los cuales a su vez presionan de manera directa por el aporte de cargas que pueden llegar a ser contaminantes, o de manera indirecta a través de la escorrentía (contaminación difusa), que se puede llegar a evidenciar especialmente en época de lluvias o húmeda. El análisis de los resultados de monitoreos en fuentes receptoras, tienen su fundamento en las actividades que demandan agua, de tal forma que puede dar explicación al comportamiento de la calidad del agua.

En la Tabla 4.68. Usos del agua – demanda hídrica en las zonas de estudio Tabla 4.68 se pueden apreciar los usos del agua en las diferentes SZH, tipos de demanda que permiten identificar los potenciales sectores – usuarios de interés que generan presión puntual y los usos asociados a la presión distribuida o difusa como son las actividades agropecuarias y mineras-

Tabla 4.68. Usos del agua – demanda hídrica en las zonas de estudio

CÓDIGO SZH	NOMBRE DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA	AGRÍCOLA CULTIVO	AGRÍCOLA	AGRÍCOLA POSTCOSECHA	AGRÍCOLA	DOMÉSTICO RURAL	DOMÉSTICO URBANO	ENERGÍA EMBALSE	ENERGÍA PCH	ENERGÍA	TERMOELÉCTRICA	HIDROCARBUROS	INDUSTRIA	MINERÍA	PECUARIO	SACRIFICIO	SERVICIOS
2312	Río Carare (Minero)	X	X	X		X	X						X	X	X	X	X
2314	Río Opón	X	X			X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
2317	Río Cimitarra y otros directos al Magdalena	X				X	X				X		X	X	X	X	X
2319	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	X	X		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X
2320	Directos al Magdalena (Brazo Morales)	X	X		X	X	X						X	X	X	X	X

2405	Río Sogamoso	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
------	--------------	---	---	--	---	---	---	---	--	--	---	---	---	---	---	---

PCH: pequeña central hidroeléctrica

4.5.1. Sectores – usuarios que generan vertimientos puntuales

Como se evidencia por la demanda del agua, se presentan diferentes tensores de contaminación según el tipo de actividades que generan los principales vertimientos o tipos de aguas residuales, que, para el caso de las áreas de estudio, se han priorizado desde la región, los siguientes de carácter puntual que efectiva y representativamente están vertiendo al recurso, destacando que en general, las cabeceras municipales son las que vierten las cargas contaminantes más representativas.

- Cuenca del río Opón: aguas residuales municipales, cría y sacrificio de animales (asociado a la localización de las cabeceras- alcantarillados municipales), sector de hidrocarburos en el área del municipio de Barrancabermeja, del cual no se dispuso de información y/o vierten directamente al río Magdalena, por lo que no son objeto de cuantificación para la presión ejercida sobre la cuenca.
- Cuenca del río Sogamoso: aguas residuales municipales, cría y sacrificio de animales (asociado a la localización de las cabeceras- alcantarillados municipales), sector de hidrocarburos en el área del municipio de Barrancabermeja, y el sector palmero, localizado hacia la cuenca baja.
- Cuenca del río Lebrija: Aguas residuales municipales, sacrificio de animales (asociado o no a la localización de las cabeceras- alcantarillados municipales), cultivo de palma para aceite, cría de ganado, cría de aves de corral, procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos.

4.5.2. Evaluación de la alteración potencial de la calidad del agua

Los resultados del IACAL se exponen a nivel de las tres (3) SZH de estudio, por cada variable constitutiva del índice, de tal forma que se pueda observar la potencial alteración que ejercen sobre cada uno de los sectores entre sus desembocaduras.

La cuantificación de las cargas vertidas para las cinco variables establecidas son requerimiento para la determinación del IACAL. Los cálculos fueron efectuados por cada uno de los usuarios y sectores a partir de la base de información de tasas retributivas (sujetos pasivos) y los vertimientos reportados en el marco de este instrumento; se tuvo como principal referente para las correlaciones entre variables la producción per cápita, particularmente de DBO, para aguas residuales de origen doméstico e igualmente las correlaciones cuando se trata de vertimientos sectoriales reportados.



- Cargas puntuales.

En la Tabla 4.69, se ilustran los resultados obtenidos por cada área de estudio y el total que percibe el tramo.

Tabla 4.69. Cargas puntuales vertidas por las tres (3) subzonas hidrográficas

SZH	DBO	DQO	SST	NT	PT
	(Ton/Año)	(Ton/Año)	(Ton/Año)	(Ton/Año)	(Ton/Año)
OPÓN	3.048,79	6.508,56	3.021,96	557,29	110,19
SOGAMOSO	791,14	1652,24	704,75	133,48	26,41
LEBRIJA	13.749,22	29.083,75	10.233,23	3.426,01	593,16
TOTAL	17.589,15	37.244,55	13.959,94	3.559,49	729,76

Según los cálculos efectuados, se destaca que la representatividad sectorial en las áreas de estudio está liderada por las cabeceras y centro poblados municipales, que aportan aproximadamente el 96% de las cargas, tomando como indicador base la DBO.

En la siguiente figura se aprecia la proporción de cargas por unidad de análisis donde se reportó presión puntual, notándose que claramente en la cuenca del río Lebrija se percibe la mayor cantidad de cargas generadas en las áreas de estudio con el 77,5%, seguida por la cuenca del río Opón con un 18% y la cuenca del río Sogamoso con un 4,5%.

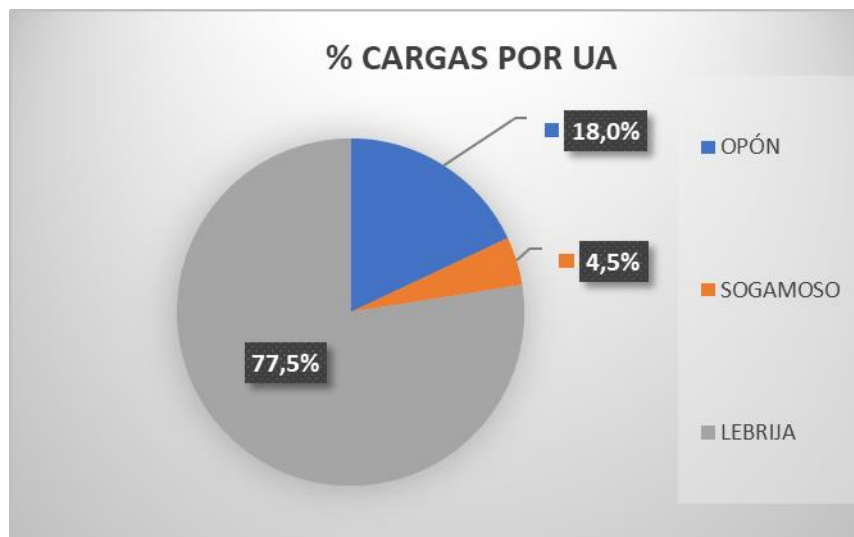


Figura 4.16. Porcentaje de cargas vertidas por unidad de análisis

A continuación, se pueden distinguir las cargas vertidas durante el año 2021 en las áreas de estudio, por cada una de las variables constitutivas del IACAL.

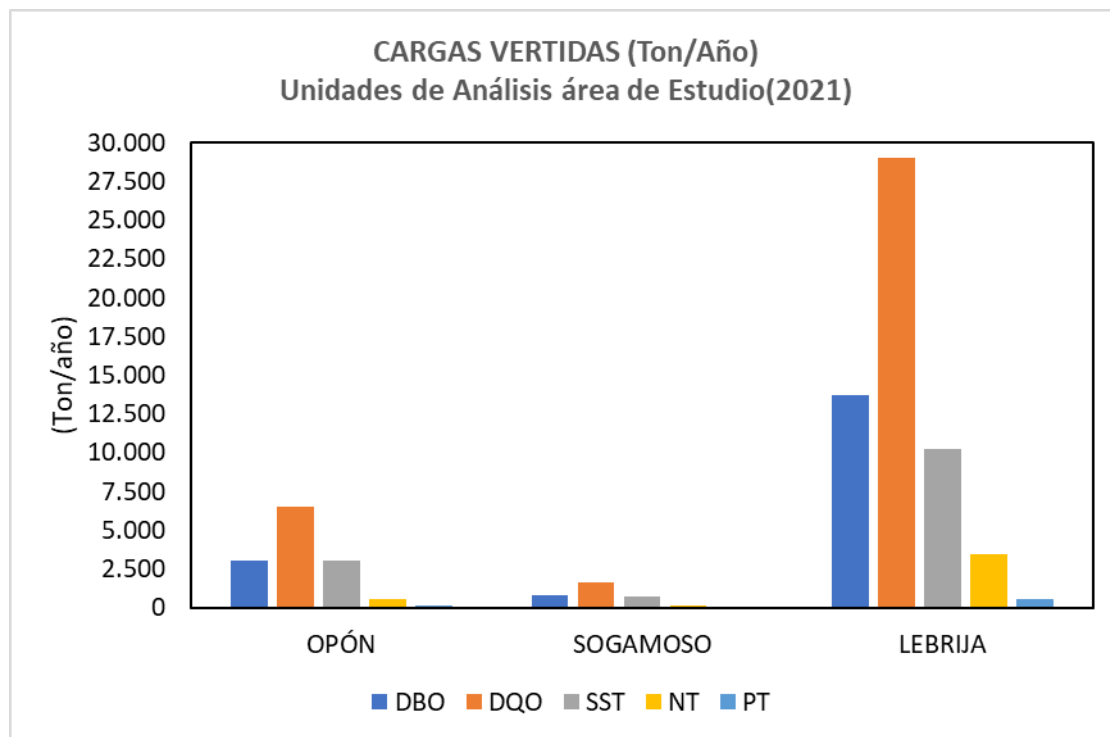


Figura 4.17. Cargas vertidas en las áreas de estudio

- IACAL

Los resultados para las tres (3) SZH y los dos (2) años hidrológicos evaluados, se aprecian en las Figura 4.18 y Figura 4.19, donde se puede observar su espacialización y en la Tabla 4.70, se pueden observar los descriptores de presión discriminados por cada variable constitutiva del IACAL.

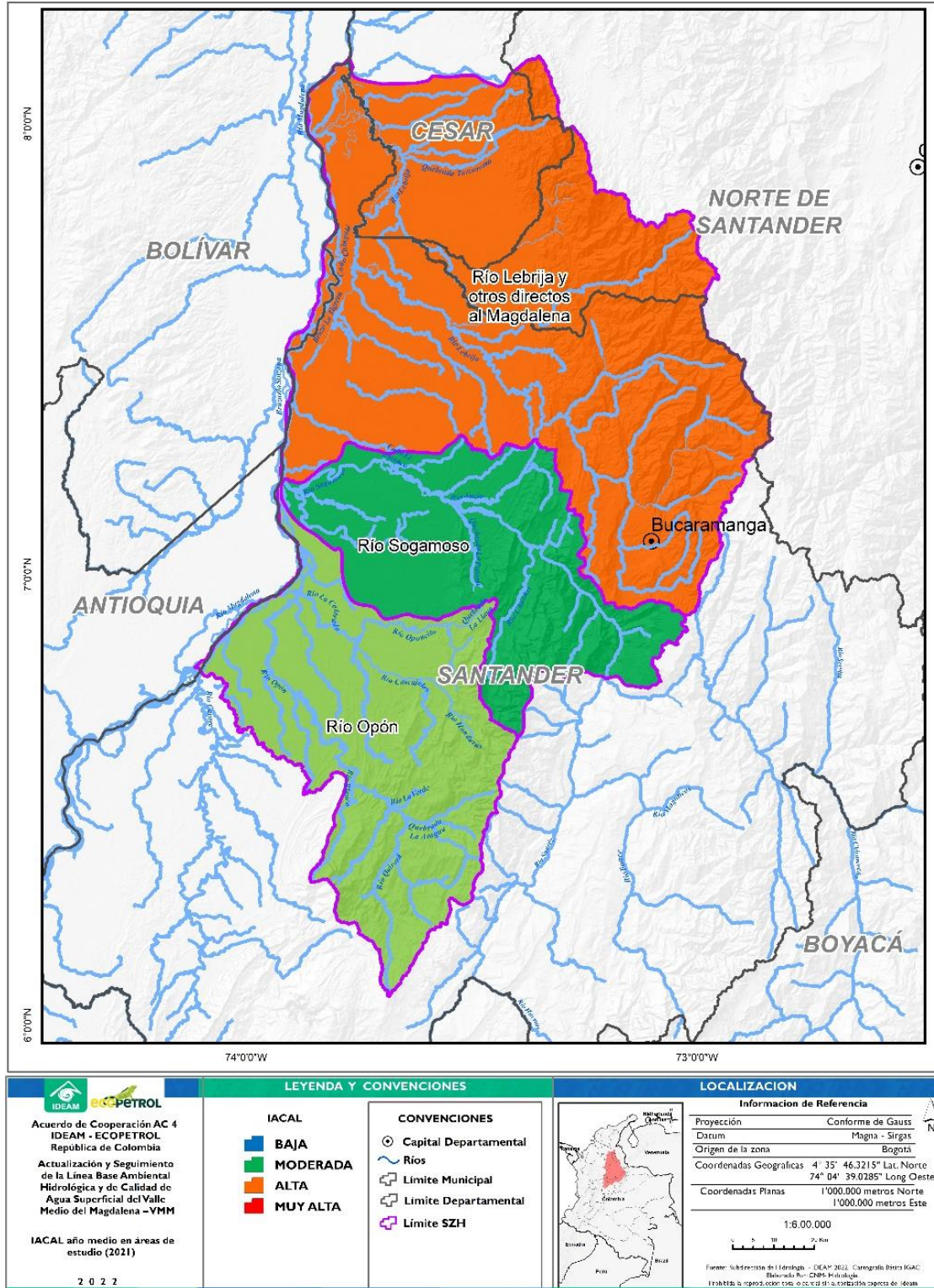


Figura 4.18. IACAL año normal en áreas de estudio (2021)

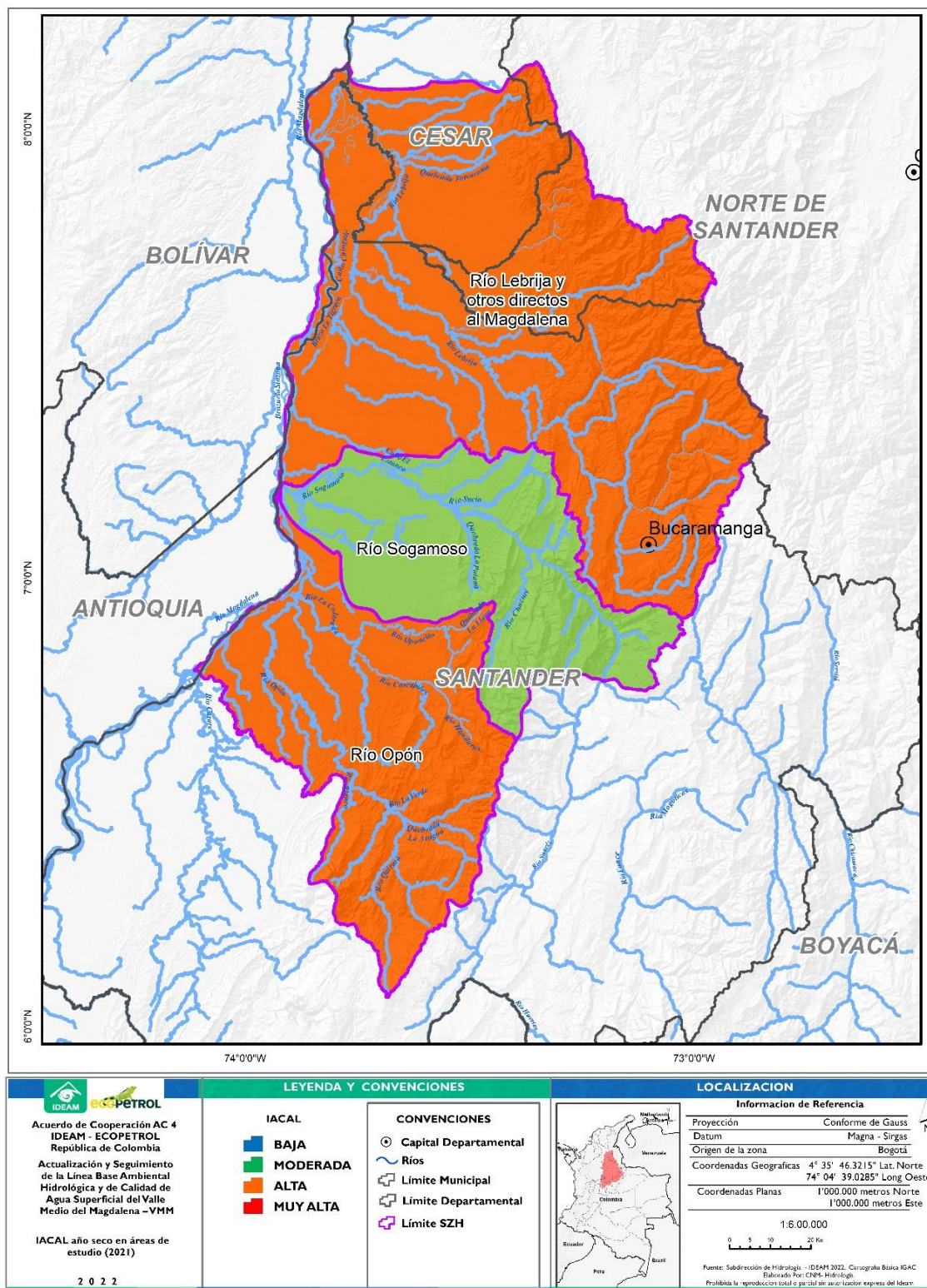


Figura 4.19. IACAL año seco en áreas de estudio (2021)

Tabla 4.70. IACAL por SZH estudiada

UNIDAD DE ANÁLISIS	AÑO HIDROLÓGICO	DBO		DQO-DBO	SST	NT	PT	IACAL	
		Carga / Oferta	Descriptor	Descriptor	Descriptor	Descriptor	Descriptor	Promedio Categoría	Descriptor
LEBRIJA	SECO	3,94	ALTA	ALTA	ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	4,4	ALTA
OPÓN		1,11	MEDIA ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	ALTA	ALTA	3,6	ALTA
SOGAMOSO		0,70	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	MODERADA	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	2,8	MEDIA ALTA
LEBRIJA	MEDIO	1,95	ALTA	ALTA	MEDIA ALTA	ALTA	ALTA	3,8	ALTA
OPON		0,58	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	MODERADA	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	2,8	MEDIA ALTA
SOGAMOSO		0,34	MODERADA	MEDIA ALTA	BAJA	MEDIA ALTA	MODERADA	2,2	MODERADA

Se observa que la SZH del río Lebrija, le aporta la mayor presión al río Magdalena, acentuada en época seca, pero manteniendo un índice con una categoría alta respecto a la época normal o media, quizá evidenciando que en época crítica se dispone de caudales que evitan una alteración de la calidad del agua mayor. Es de resaltar que estas presiones por variable constituyente del IACAL, no se reflejarán en el monitoreo de la calidad del agua, por cuanto el último punto de referencia se localiza aguas arriba de la desembocadura del río Lebrija.

En orden de presión sobre el tramo del río Magdalena, se localiza la cuenca del río Opón, cuya desembocadura se localiza en el sector alto del tramo, y también ejerce una alta presión en época seca, pero se reduce a media – alta en año medio o normal. La cuenca del río Sogamoso reporta entonces la menor presión comparada con las tres (3) áreas de estudio, categorizándose como media-alta en época crítica y moderada en año medio.

Con respecto a las variables, los SST ejercerían una menor presión, especial y comparativamente durante época normal; en cuanto a la materia orgánica, aunque se denotan diferencias entre la DQO y la DBO, necesariamente no señalarían que desde el sector industrial o productivo se esté incidiendo sobre la alteración de la calidad del agua. La mayor incidencia que se nota con respecto a los nutrientes en la cuenca del río Lebrija, puede obedecer a que se dispone de un tratamiento parcial de unas cabeceras municipales, que reduce en mayor proporción la materia orgánica.

Las concentraciones estimadas “al cierre de las cuencas”, teniendo como indicador la DBO, se señalan en la tabla, de tal forma que se cuente con un referente de la dilución carga/oferta, por cada año hidrológico.

4.6. Resultados de la evaluación de las condiciones de la calidad del agua

El análisis de la información y los resultados generales se presentan por cada una de las subzonas hidrográficas de interés (áreas de estudio), incluyendo para el caso de la cuenca del río Sogamoso, sus zonas de influencia (ríos Chicamocha, Suárez y Fonce). La evaluación de la calidad del agua se puede consultar de manera detallada en los anexos 1 a 4.

El contenido de los anexos responde a la selección de las variables, los puntos de monitoreo de calidad del agua, resultados del ICA y variables complementarias, resultados de las condiciones de calidad de línea base y resultados de seguimiento y a la evaluación presión-estado.

El proceso de evaluación considera dos etapas tal como se expuso en los aspectos metodológicos: la de establecimiento de línea base y la de seguimiento. Para el efecto, este numeral contiene inicialmente la caracterización de la calidad del agua donde se consolidan los registros de monitoreos correspondientes a las dos etapas referidas, con una organización de la información que se basa en la topología de la red hídrica, la clasificación de los monitoreos acorde con los escenarios hidrológicos identificados, así como en los puntos y variables monitoreadas.

Como parte de la caracterización del estado de la calidad del agua, se identifican las redes hídricas monitoreadas en los diferentes puntos de afluencia de las corrientes principales y los factores de degradación para posteriormente proceder a realizar un análisis integrado. La definición de variables (básicas) a considerar está en función del ICA, y la de variables complementarias, en función de las sustancia o elementos analizados en las diferentes campañas que se realizaron a nivel nacional, buscando a su vez, contar de referencias normativas en función de criterios ambientales y/o sanitarios.

En la Tabla 4.71 se presenta un resumen de los resultados, indicando el número de registros obtenidos para los tres (3) ICAS calculados, las variables complementarias analizadas y los escenarios hidrológicos identificados, tanto para la línea base, como para la fase de seguimiento.

Tabla 4.71. Síntesis de los resultados del ICA y variables complementaria monitoreadas

SZH	Resultados ICA	ICA 5 Var	ICA 6 Var	ICA 7 Var	Variabes Complementarias	Clasificación monitoreos
-----	----------------	--------------	--------------	--------------	--------------------------	-----------------------------

Río Opón	No de Registros	64	64	50	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Nitrógeno amoniacal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC	Normal
	BUENA	3	2	2		Seca
	ACEPTABLE	34	28	23		Húmeda
	REGULAR	20	22	17		Transición Seca -
	MALA	7	12	8		Normal Transición Húmeda - Normal
Río Sogamoso	No de Registros	91	90	44	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Nitrógeno amoniacal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC, G/A	Normal
	BUENA	7	3	2		Húmeda
	ACEPTABLE	44	28	28		Húmeda y Seca en zonas de influencia
	REGULAR	28	37	12		
	MALA	12	22	2		
Río Lebrija	No de Registros	167	154	126	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Nitrógeno amoniacal, Nitritos, Nitratos, NTK; Fosfatos, Sulfatos, Hg, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, As, CN-, Mn, Fe, THC, G/A	Normal
	BUENA	27	4			Húmeda
	ACEPTABLE	84	65	40		Transición Seca -
	REGULAR	37	69	68		Normal Transición Húmeda -
	MALA	19	16	18		Normal Transición Normal - Húmeda
Tramo Río Magdalena	No de Registros	27	24		COT, Turbiedad, ST, Nitrógeno amoniacal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC,	Normal
	BUENA					Seca
	ACEPTABLE	2				Húmeda
	REGULAR	16	8			
	MALA	9	16			

Var: variables

En cuanto a las redes de monitoreo de carácter regional – nacional, La CDMB, la AMB y el IDEAM, disponen de emplazamientos de redes o puntos de monitoreo a diferentes escalas o niveles de seguimiento de acuerdo con sus funciones u objetivos; la información de la CAS obedece básicamente a los programas de monitoreo adelantados en el marco de la formulación de los POMCA. La descripción que se presenta como parte de la evaluación obedece fundamentalmente a una integración de puntos, que responden tanto al alcance nacional, como regional, respetando los criterios o aspectos metodológicos definidos.

La revisión funcional de los sistemas hídricos conforme a los niveles de análisis determinados como alcance de la evaluación y de los puntos de monitoreo que se han contemplado, se soportó en la zonificación definida (SZH y Unidades de Análisis) y en los criterios para la priorización de los puntos que obraran en el marco de la presente evaluación, así:

- Los localizados sobre el cuerpo de agua principal a nivel de SZH;

- Al aporte de calidad que cada unidad de análisis le entrega a las corrientes principales de cada SZH o tramo del Magdalena, a través de su curso principal y de otras fuentes de diferente orden de importancia a nivel regional;
- A zonas de no intervención (límites de las zonas de conservación) que servirán de referencia para caracterizar condiciones naturales;
- y a puntos aguas abajo de vertimientos representativos o en zonas medias de las corrientes.

En los anexos al documento se pueden consultar la clasificación de los diferentes monitoreos según el mes y año de ejecución de las campañas, así como la fuente de la información. Los resultados que se exponen a continuación corresponden a una síntesis de lo más importante o representativo. En los anexos de la caracterización y resultados del ICA por cada SZH se señalan (valores en rojo), aquellos parámetros que reportan un valor que se categoriza en un nivel inferior a calidad ACEPTABLE o que sobrepasaría los límites de los criterios de calidad más restrictivos establecidos en la norma o en referencias técnicas para usos múltiples del recurso (ver tabla umbrales para la evaluación de la calidad del agua en métodos de análisis de los aspectos metodológicos), de tal forma que se identifiquen aquellas variables que requieren ser advertidas, para su vinculación con factores de contaminación y/o para toma de acciones específicas. También se señala (casillas sombreadas), los valores asumidos y correspondientes a los límites de cuantificación.

Las condiciones de calidad del agua correspondiente a la etapa de línea base se presentan por cada escenario hidrológico, exponiendo los resultados de las diferentes variables monitoreadas, por un lado, en las zonas altas (de nacimiento o referencia) y afluentes, y por otro lado, el comportamiento evidenciado en la corriente principal; para la etapa de seguimiento, se exponen los resultados de manera conjunta, tanto para los afluentes, como para la corriente principal.

En la parte final y de acuerdo con los resultados obtenidos, se presenta el comportamiento general por cada SZH y para el tramo del río Magdalena.

4.6.1. Subzona hidrográfica del río Opón

La red integrada IDEAM – CAS está conformada por 28 puntos, constituyéndose en una red básica para la caracterización y evaluación (Figura 4.20).



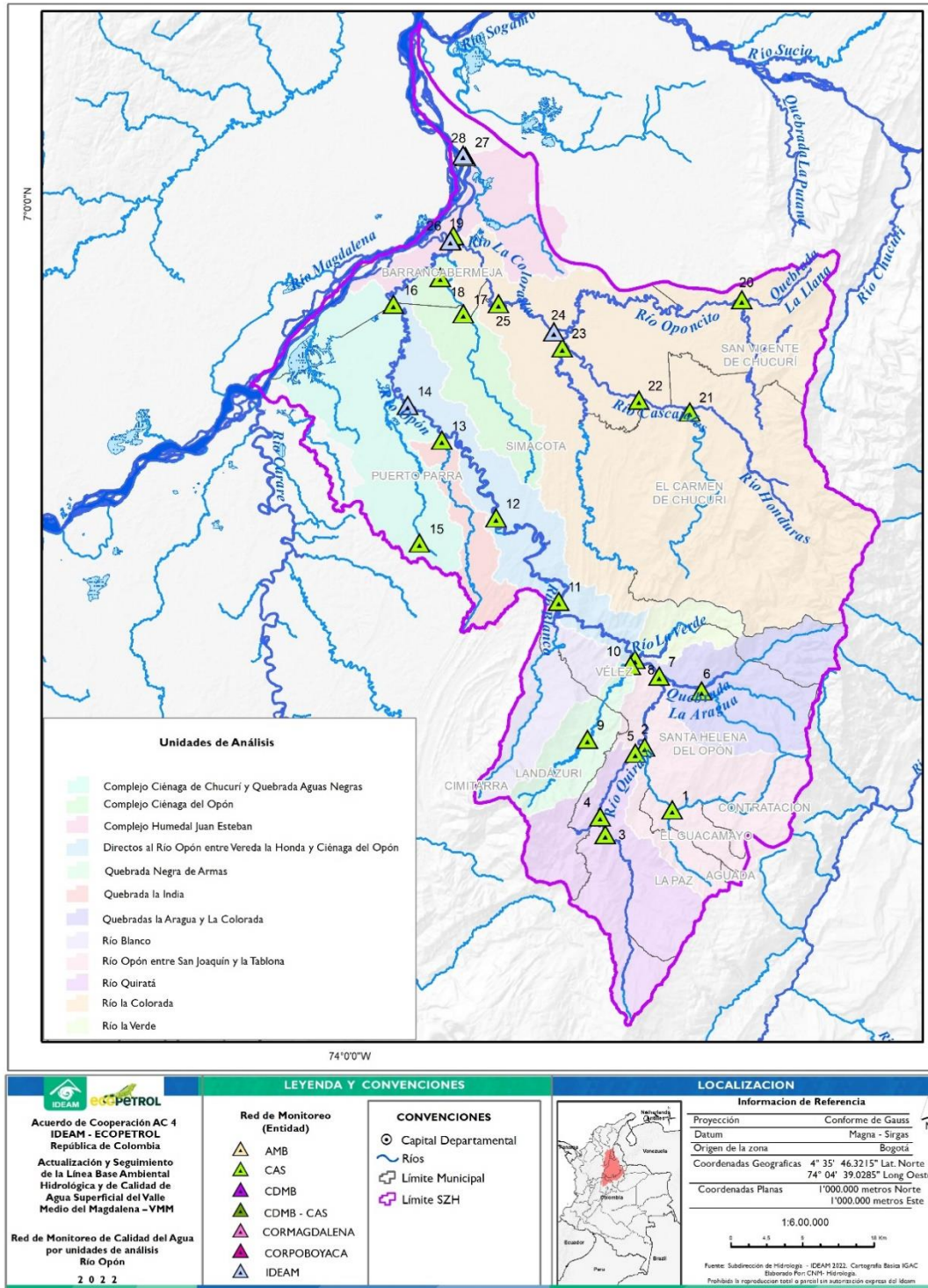


Figura 4.20. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Opón

4.6.1.1. Síntesis del estado de las condiciones de calidad (línea base)

La Figura 4.21 muestra la distribución espacial del ICA en la época normal.

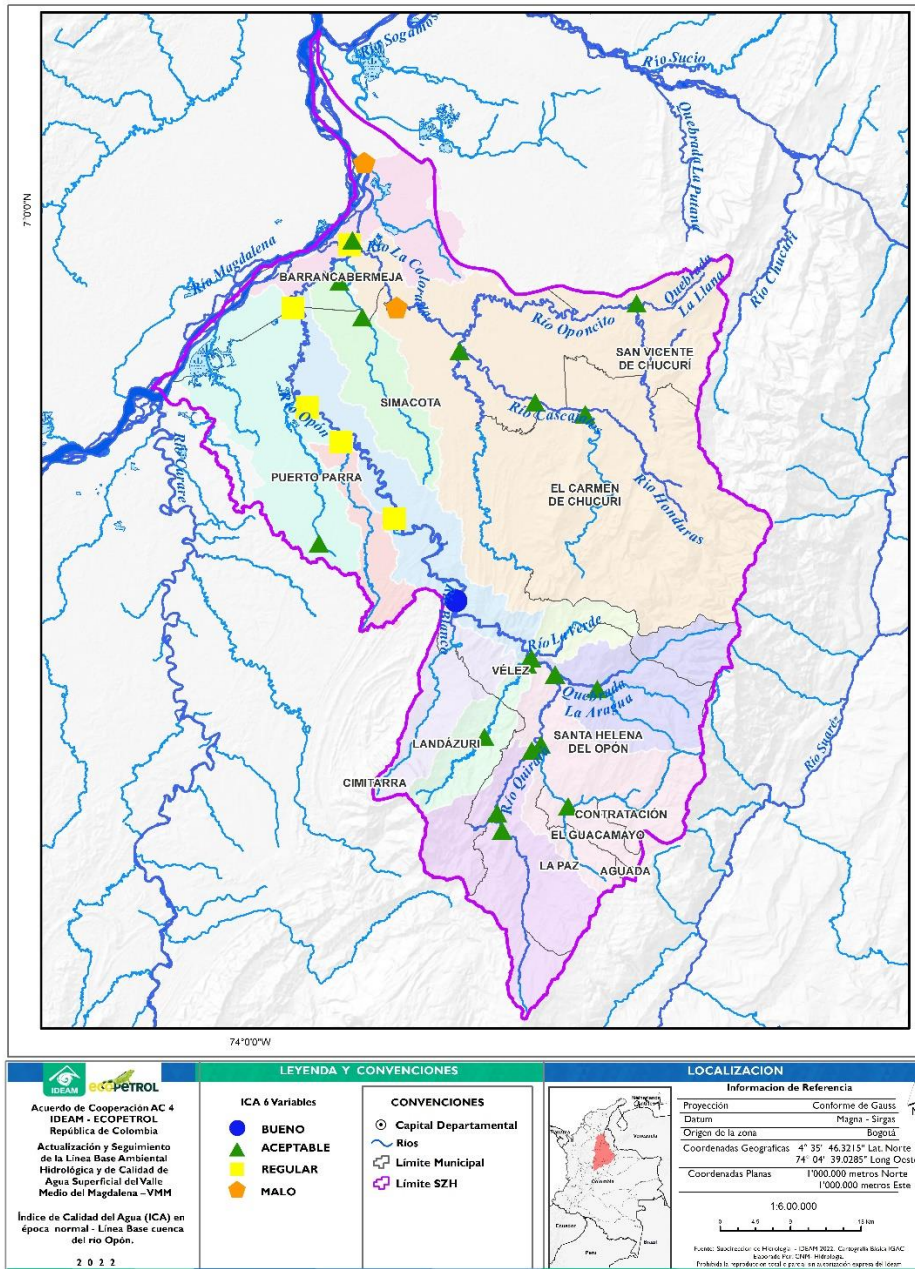


Figura 4.21. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Opón durante la etapa de línea base en época normal

Zonas altas (de nacimiento) y afluentes. Las zonas altas reportan calidad que tiende a aceptable, así como también en la mayoría de los afluentes donde no se percibe influencia de presiones antrópicas y en algunos casos su categorización de regular obedece a diferentes condiciones. En la cuenca baja del río la Colorada, si se denotan presiones por materia orgánica, patógenos y sólidos, que reducen la calidad del agua en estos cuerpos de agua, a mala. En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados (Tabla 4.72).

Corriente principal río Opón. En el río Opón se observa un comportamiento estable desde aguas arriba hasta la cuenca baja, reportándose calidad regular predominantemente, debido a la presencia de altas conductividades, materia orgánica, patógenos y sólidos en suspensión, salvo hacia su desembocadura donde se denota una calidad mala debido a la reducción de oxígeno disuelto y presencia de patógenos (Tabla 4.72).

Tabla 4.72. Resultados del ICA en corriente principal del río Opón en época normal (línea base)

CÓDIGO UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		DESCRIPTOR	DESCRIPTOR
					ICAFQ_6	ICAFQ_7
231408	Río	Dibita	Desembocadura a río Oponcito	1	ACEPTABLE	ACEPTABLE
231404	Río	Opón	A la altura del Caño San Pedro	12	REGULAR	MALA
231402	Río	Opón	Pte Ferrocarril	14	REGULAR	
231410	Río	Opón	Aguas abajo Ciénaga del Opón	19	REGULAR	REGULAR
231401	Río	Opón	Aguas abajo desembocadura río La Colorada	26	ACEPTABLE	ACEPTABLE
231401	Río	Opón	Desembocadura	27	MALA	MALA

4.6.1.2. Seguimiento a las condiciones de calidad

Los resultados se aprecian en la Figura 4.22 donde se puede observar la variación temporal del ICA en el río Opón. De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales la calidad del agua en la cuenca fluctúa significativamente según las características de cada afluente al río Opón, reflejándose la influencia de las presiones aguas abajo. El efecto de los nutrientes y los patógenos permiten evidenciar una categorización del ICA más crítico en la medida que se analizan 6 y 7 (consultar en los anexos) variables, siendo esta última la condición más crítica.

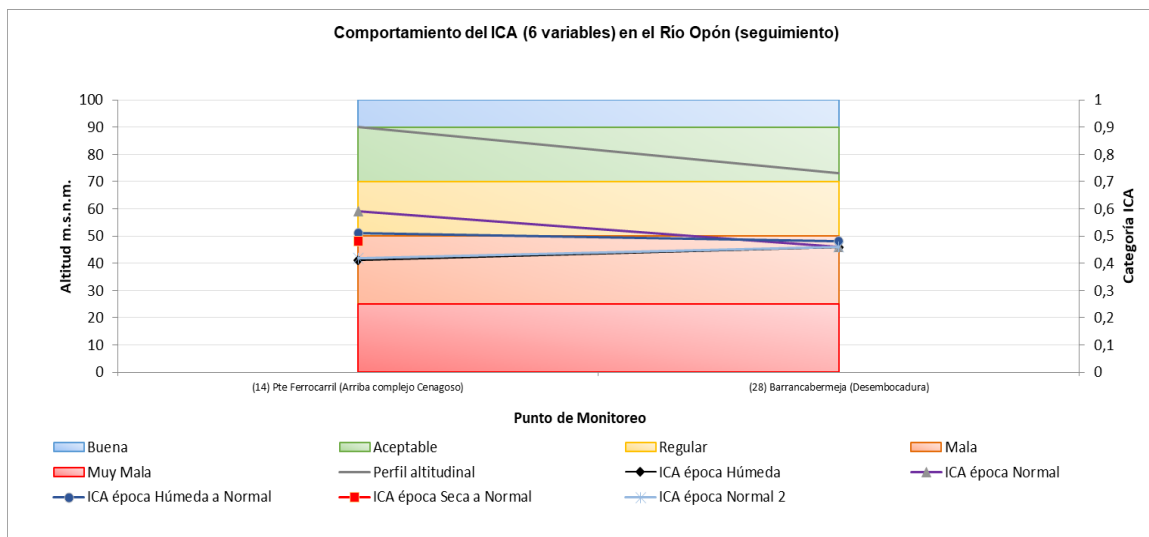


Figura 4.22. Resultados del ICA – 6 variables den corriente principal río Opón durante la etapa de seguimiento

Se denota que, en época normal, la disponibilidad de caudales mayores, amortiguan el efecto del aporte de los diferentes elementos o sustancias de origen antrópico a la cuenca, aunque en condiciones húmedas, se identifican posibles incrementos en el aporte de materia orgánica y nutrientes, asociados probablemente con cargas distribuidas o escorrentía natural.

4.6.2. Subzona hidrográfica del río Sogamoso

La red integrada IDEAM – CAS está conformada por 24 puntos de monitoreo sobre la cuenca del río Sogamoso (Figura 4.23).

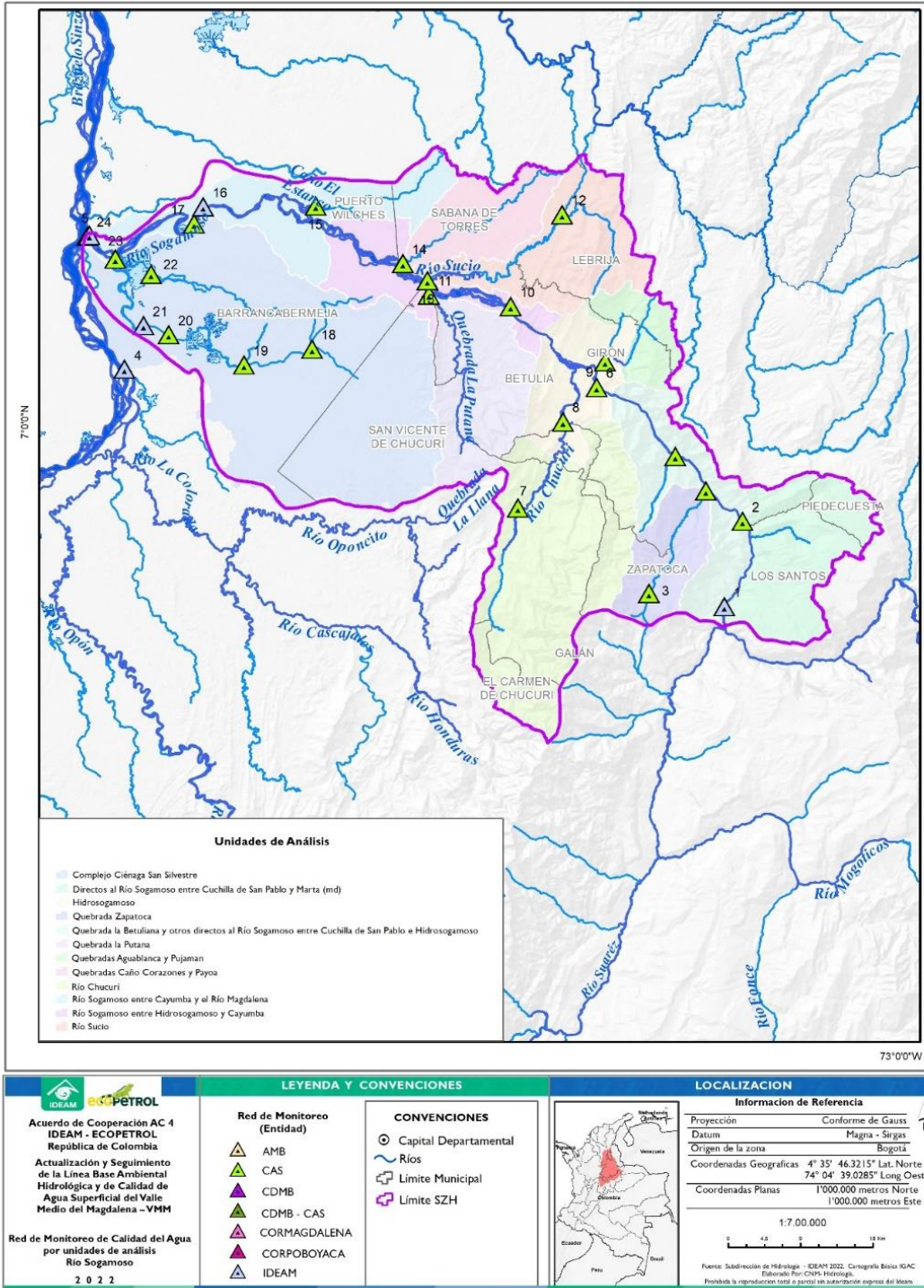


Figura 4.23. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Sogamoso



4.6.2.1. Síntesis del estado de las condiciones de calidad (línea base)

La Figura 4.24 muestra la distribución espacial del ICA en la época normal.

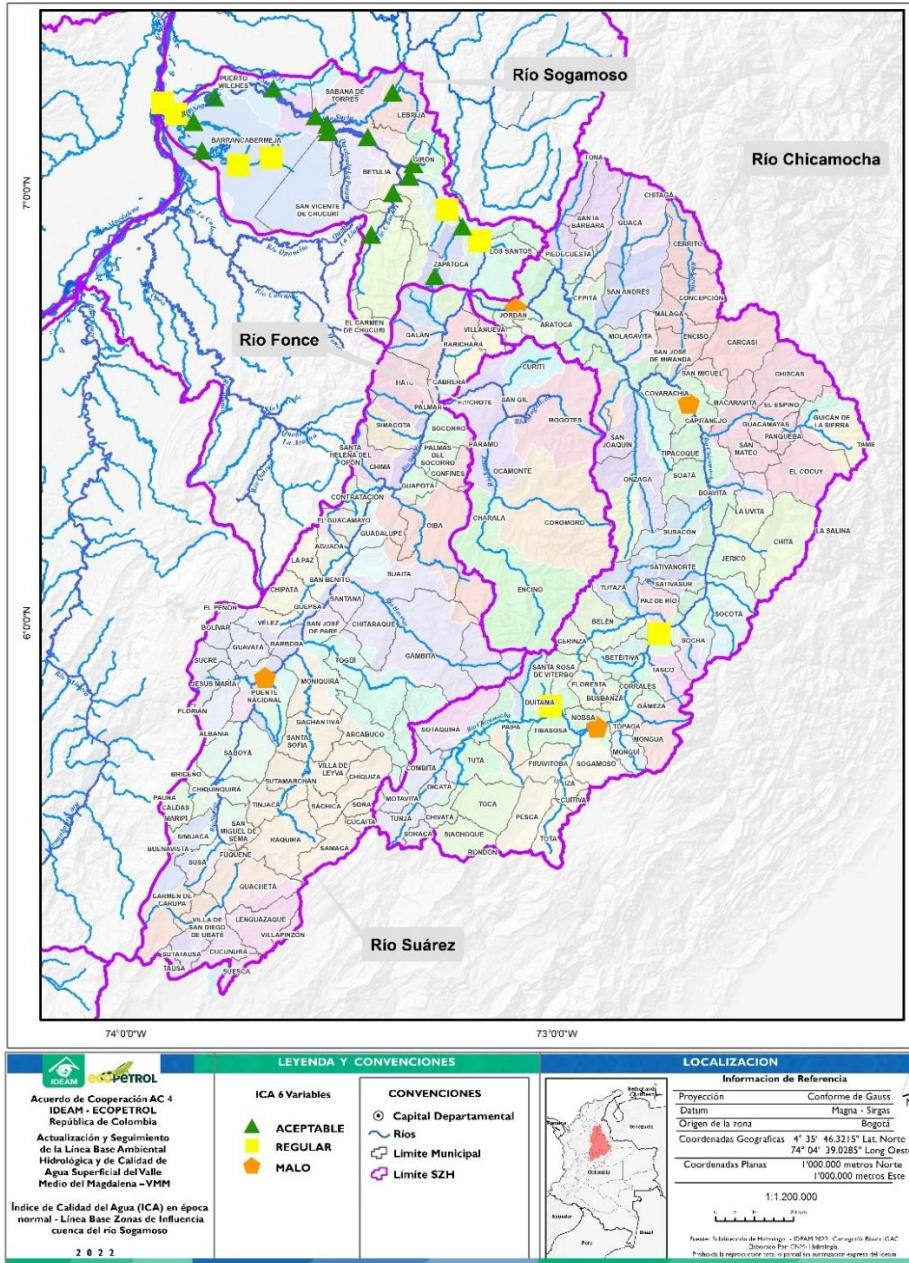


Figura 4.24. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Sogamoso durante la etapa de línea base en época normal.

Zonas altas (de nacimiento) y afluentes. Las zonas altas reportan calidad aceptable, así como también en la mayoría de los afluentes donde no se percibe influencia de presiones antrópicas, salvo en la quebrada Betuliana que reporta en su desembocadura una categorización regular; esta calidad del agua hacia el complejo ciénaga de San Silvestre obedece a diferentes condiciones asociadas posiblemente con características naturales. En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados.

Corriente principal río Sogamoso. En el río Sogamoso se observa un comportamiento estable desde aguas arriba hasta la cuenca baja, considerando que en la parte alta se refleja la influencia de la calidad de los ríos Chicamocha y Suárez reportándose calidad regular, se recupera por el aporte de sus afluentes y se deteriora hacia la desembocadura por efecto de las características naturales y de presión antrópica. En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados.

Tabla 4.73. Resultados del ICA en corriente principal del río Sogamoso en época normal (Línea Base)

CÓDIGO UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		DESCRIPTOR	DESCRIPTOR
					ICAFQ_6	ICAFQ_7
240506	Río	Sogamoso	Pte vía Nacional	2	REGULAR	REGULAR
240512	Río	Sogamoso	Límite San Mateo	6	ACEPTABLE	ACEPTABLE
240511	Río	Sogamoso	La Putana	10	ACEPTABLE	ACEPTABLE
240501	Río	Sogamoso	Corregimiento Pto Sogamoso	17	ACEPTABLE	ACEPTABLE
240501	Río	Sogamoso	Puerto Wilches	24	REGULAR	

4.6.2.2. Seguimiento a las condiciones de calidad

Los resultados se aprecian en la Figura 4.25 donde se puede observar la variación temporal del ICA en el río Sogamoso. De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales la calidad del agua del río Sogamoso está condicionada por la calidad de los ríos Chicamocha y Suárez, la cual mejora a medida que aguas abajo le aportan sus afluentes con sus características de calidad aceptables. Se observa la influencia de las presiones propias de la cuenca hacia su desembocadura. El efecto de los nutrientes y los patógenos permiten evidenciar una categorización del ICA más

crítico en la medida que se analizan 6 y 7 variables, sin evidenciar un efecto claro de los coliformes que afecten la tendencia de la calidad del agua.

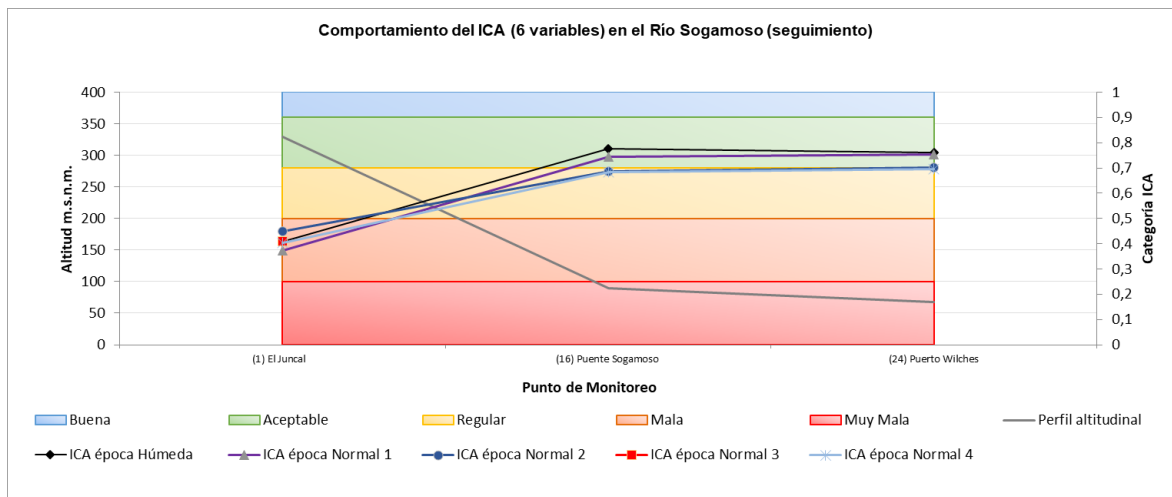


Figura 4.25. Resultados del ICA – 6 variables en las zonas de influencia del río Sogamoso durante la etapa de seguimiento

Se denota que, el efecto del embalse de Topocoro tiene un efecto sobre la calidad del agua dado que no se registran cambios significativos en la calidad del agua entre escenarios monitoreados o variabilidades aguas abajo.

4.6.3. Subzona hidrográfica del río Lebrija

La red integrada IDEAM – CAS – AMB - CDMB, está conformada por 64 puntos (Figura 4.26).

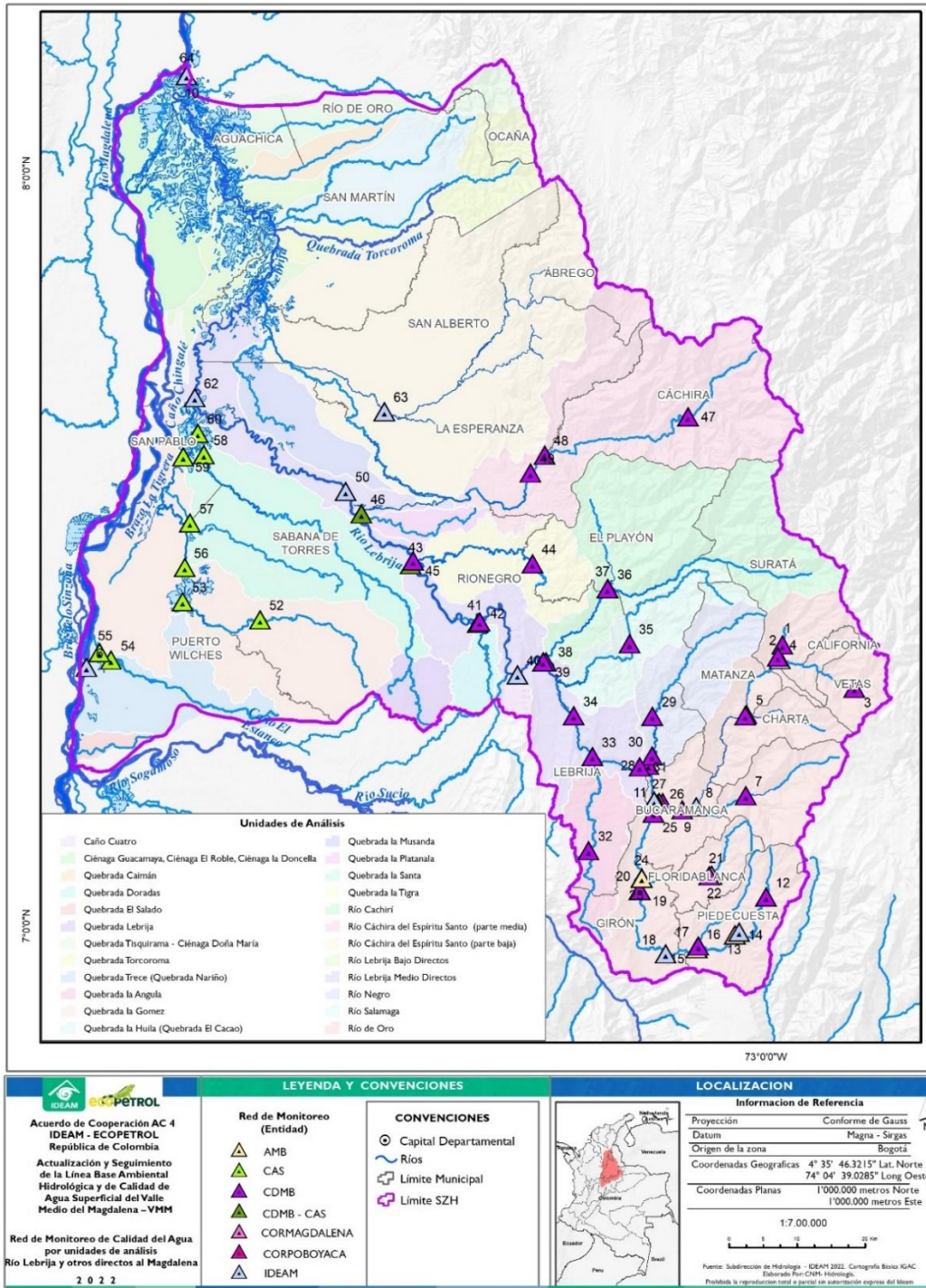


Figura 4.26. Red integrada IDEAM-CAS para la subzona hidrográfica del río Lebrija



4.6.3.1. Síntesis del estado de las condiciones de calidad (línea base)

La Figura 4.27 muestra la distribución espacial del ICA en la época normal. Los resultados de las épocas adicionales pueden consultarse en el anexo 3.

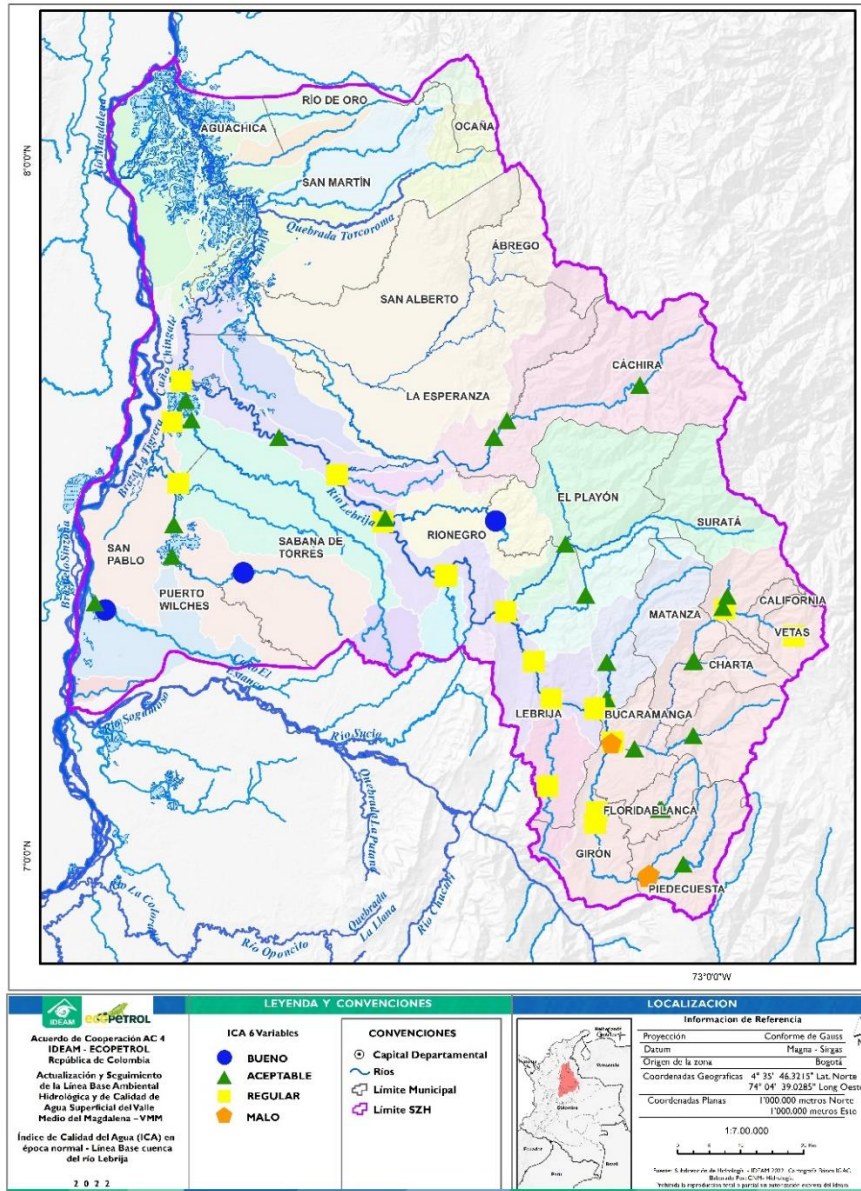


Figura 4.27. Comportamiento del ICA – 6 variables en la subzona hidrográfica del río Lebrija durante la etapa de línea base en época normal

Zonas altas (de nacimiento) y afluentes. Las zonas altas reportan calidad entre aceptable y regular, debido en este último caso a la presencia de altas conductividades, sólidos y patógenos principalmente. La cuenca del río Suratá (nacimiento río Lebrija), se ve influenciada por la presencia de patógenos, nutrientes y la conductividad que caracteriza su calidad como regular.

En el caso del río de Oro, el otro afluente de importancia en la cuenca alta del río Lebrija, por las altas presiones antrópicas que recibe, registra una calidad mala. Los restantes afluentes fluctúan entre una calidad aceptable y regular, siendo este último caso, donde se presentan concentraciones significativas de patógenos.

Corriente principal río Lebrija. En el río Lebrija se observa el efecto en su parte alta del río de Oro, por altas presiones antrópicas generadas en el área metropolitana de Bucaramanga; hasta aguas arriba del embalse bocas - hidroeléctrica las Palmas, la calidad del agua es mala, pero aguas abajo se comienza a recuperar reportando un comportamiento estable con reportes de calidad regular por efecto de variables típicas de aguas residuales municipales: materia orgánica, nutrientes y patógenos, característica que se mantienen hasta su desembocadura. En la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados.

Tabla 4.74. Resultados del ICA en corriente principal del río Lebrija época normal Línea Base

COD UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		DESCRIPTOR ICAFAQ_6	DESCRIPTOR ICAFAQ_7
231923	Río	Surata	Uña de Gato	1	ACEPTABLE	REGULAR
231923	Río	Lebrija	Bocas	28	REGULAR	MALA
231901	Río	Lebrija Alto	Embalse	31	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija Alto - Medio	Conchal	34	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija Medio	Vanegas	39	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija	A. Arriba Qda. Doradas	41	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija	A. Arriba Qda. La Tigra	43	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija	A. Arriba Qda. La Platanala	46	REGULAR	REGULAR
231901	Río	Lebrija	Aguas abajo Estación San Rafael	51	ACEPTABLE	ACEPTABLE

4.6.3.2. Seguimiento a las condiciones de calidad

Los resultados se aprecian en la Figura 4.28 donde se puede observar la variación temporal del ICA en el río Lebrija. De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales se denota la

diferencia de calidad del agua entre los diferentes sectores de la cuenca durante la etapa de seguimiento; en la cuenca alta donde se presentan altas presiones la calidad tiende a ser mala, observándose una significativa recuperación en la cuenca media, y a medida que se aproxima al río Magdalena.

Con el ICA de 7 variables se alcanza a percibir el efecto de los patógenos que incide negativamente en el índice. No se presentan patrones claros que permita diferenciar la calidad en los diferentes escenarios monitoreados (ver anexo 3).

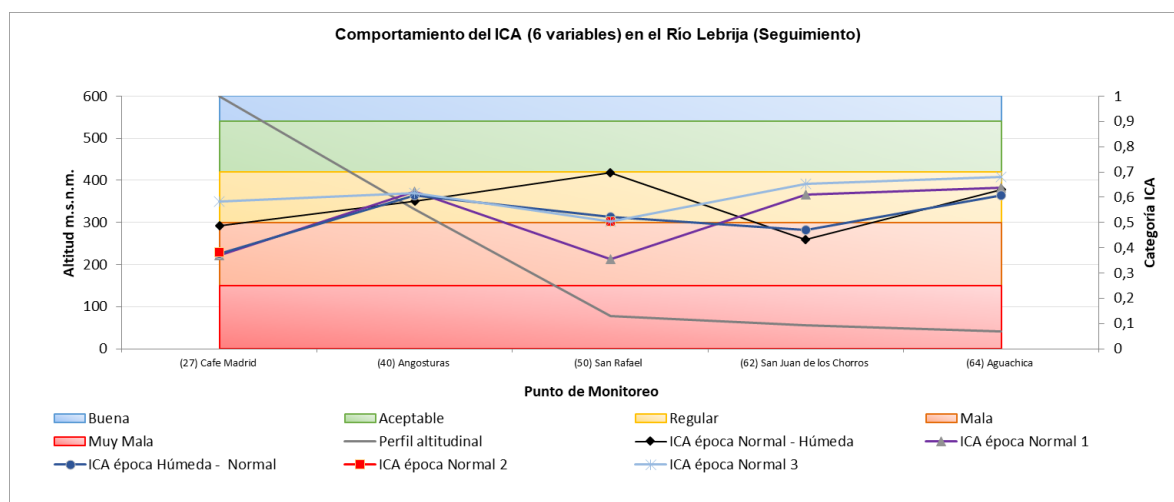


Figura 4.28. ICA – 6 variables cuenca del río Lebrija durante la etapa de seguimiento

4.6.4. Tramo del río Magdalena

El IDEAM dispone de un programa nacional de monitoreo que busca evaluar las condiciones de calidad del agua en zonas priorizadas, principalmente por presencia de influencia antrópica, registrando el monitoreo en diez (10) puntos (Tabla 4.75).

Tabla 4.75. Red hídrica y puntos de monitoreo tramo del río Magdalena

Tipo C.A.	Cuerpo de Agua	Estación	No Punto	Punto de Monitoreo
Río	Carare	STA. ROSA [23127060]	1	Aguas arriba Caño santa rosa
Río	Carare	PUERTO PARRA	2	Desembocadura al río Magdalena
Río	Opón	BARRANCABERMEJA	3	Desembocadura al río Magdalena

Tipo C.A.	Cuerpo de Agua	Estación	No Punto	Punto de Monitoreo
Río	Magdalena	BARRANCABERMEJA [23157030]	4	Aguas abajo desembocadura río Opón
Río	Sogamoso	PUERTO WILCHES	5	Desembocadura al río Magdalena
Río	Magdalena	PTO.WILCHES [23187010]	6	Aguas abajo desembocadura río Sogamoso
Río	Cimitarra	SAN PABLO	7	Desembocadura al río Magdalena
Río	Magdalena	SAN PABLO - AUT [23207040]	8	Aguas abajo desembocadura río Cimitarra
Río	Magdalena	SITIO NUEVO R-11 [23187280]	9	Aguas arriba desembocadura río Lebrija
Río	Lebrija	AGUACHICA	10	Desembocadura al r río Magdalena

4.6.4.1. Síntesis del estado de las condiciones de calidad (línea base)

Las condiciones de calidad del agua correspondiente a la etapa de línea base se presentan a continuación. En el anexo 4, se puede consultar la determinación del ICA para 5 y 6 variables conforme a la clasificación de los monitoreos y a la disponibilidad de información (Tabla 4.76).

Tabla 4.76. Resultados del ICA en tramo del río Magdalena (Línea Base)

Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		Escenario_ Hidrológico	DESCRIP ICAFQ_6
Río	Carare	STA.ROSA [23127060]	1	Normal	REGULAR
Río	Carare	STA.ROSA [23127060]	1	Normal	MALA
Río	Carare	STA.ROSA [23127060]	1	Húmedo	REGULAR
Río	Magdalena	BARRANCABERMEJA [23157030]	4	Húmedo	MALA
Río	Sogamoso	PUERTO WILCHES	5	Húmedo	REGULAR
Río	Carare	STA.ROSA [23127060]	1	Seco	MALA
Río	Carare	STA.ROSA [23127060]	1	Seco	MALA
Río	Magdalena	BARRANCABERMEJA [23157030]	4	Seco	MALA

La calidad del agua en el tramo del río Magdalena registró características mala durante la etapa de línea base, esencialmente aguas abajo del río Carare durante épocas seca y húmeda producto al parecer del comportamiento aguas arriba del río Carare; en época húmeda se percibiría arrastre principalmente de materia orgánica, considerando comparativamente que en época seca los sólidos y los nutrientes reportan señales de alerta con la misma categorización, y que la conductividad tiende a ser menor.

4.6.4.2. Seguimiento a las condiciones de calidad

Los resultados se aprecian en la Figura 4.29 donde se puede observar la variación del ICA. Solo se reportan cuatro campañas, dado que en la última campaña sólo hay un dato de monitoreo.

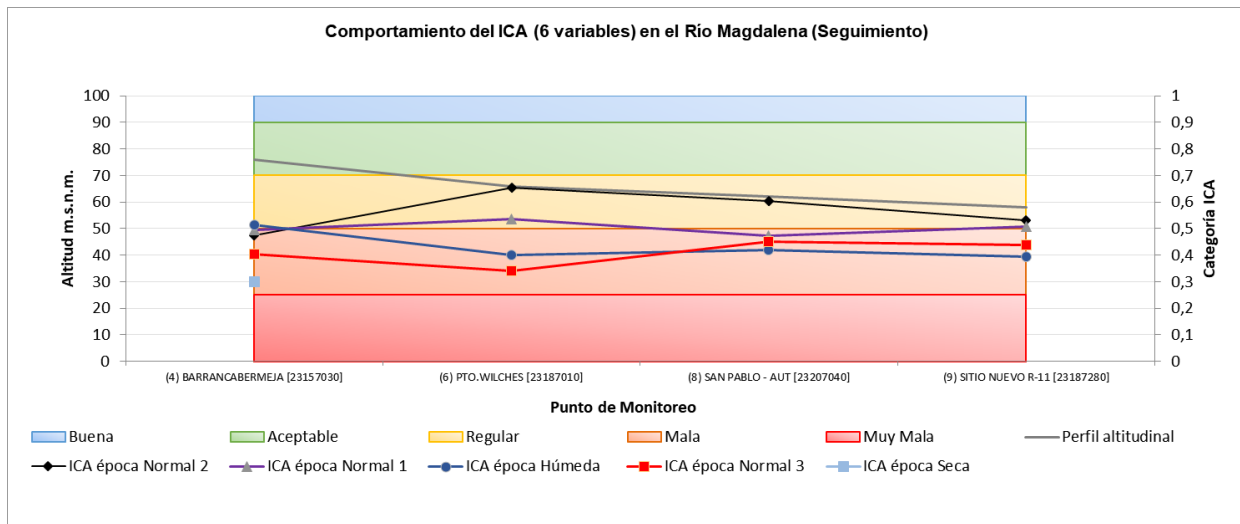


Figura 4.29. Resultados del ICA – 6 variables en tramo río Magdalena durante la etapa de seguimiento

La calidad de agua mala se denota en las desembocaduras de los ríos Opón y Carare tanto en época normal como húmeda, tendiente entre regular y mala en el Cimitarra, y en las de los ríos Sogamoso y Lebrija entre regular y aceptable. Las bajas condiciones de calidad son inducidas por niveles significativos de conductividad en el río Carare; descenso en las concentraciones de oxígeno en todos los afluentes durante la primera campaña - época normal, con menor descenso durante época húmeda en los río Opón, Cimitarra y Lebrija; concentraciones críticas de DQO en la desembocadura del río Opón en época normal, en Carare época húmeda, con un descenso en sus valores para todos los afluentes durante las jornadas de monitoreo; la incidencia de valores representativos de SST se observan en las desembocaduras de los ríos Opón y Carare en los diferentes escenarios hidrológicos. La relación de nutrientes que pueden estar relacionados con aportes naturales como antrópicos, ejercen un marcado efecto sobre la categorización del índice de una manera generalizada.

La calidad del agua tiende a mala en todo el tramo del río y durante los diferentes escenarios hidrológicos monitoreados, se observa una condición de calidad inducida por niveles significativos de SST y por la relación de nutrientes, no solo proveniente de los afluentes en algunos casos, sino de las mismas características del río Magdalena aguas arriba del río Carare; la calidad mejora a regular cuando los niveles de conductividad y materia orgánica no son tan importantes.

4.7. Análisis integrado (Evaluación Presión – Estado)

Se contempla para las dos etapas de evaluación consideradas -línea base y seguimiento- un análisis correlacionando los factores de presión con sus efectos sobre la calidad del agua, en la medida de lo posible y conforme a la disponibilidad de la información, señalando los resultados relevantes de acuerdo con las señales de alerta o afectación encontradas. Para el tramo sobre el río Magdalena solo se contempla este análisis para la etapa de seguimiento, debido a la disponibilidad de información.

El análisis se adelanta a través de una “correlación” entre el IACAL y el ICA, tomando como referencia la calidad del agua que cada uno de los afluentes (puntos de monitoreo hacia la desembocadura) le entrega a las corrientes principales.

El desarrollo de la evaluación presión – estado, se expondrá tomando como referencia los resultados en el tramo del río Magdalena, sobre los cuales se citarán aspectos relevantes de cada una de las tres (3) cuencas seleccionadas como áreas prioritarias de estudio: ríos Opón, Sogamoso y Lebrija; en la Tabla 4.77 se presenta una síntesis de la relación ICA - IACAL, a nivel del tramo.

Tabla 4.77. Relación IACAL – ICA áreas de estudio

CÓDIGO UA	Cuerpo de Agua (Desembocaduras)	Punto	Época	ICA	IACAL (Año Seco)	IACAL (Año Normal)
2312	Río	Carare	2	Normal	MALA	
		Carare	2	Normal	REGULAR	
		Carare	2	Húmeda	MALA	
2314	Río	Opón	3	Normal	ALTA	MEDIA -ALTA
	Río	Opón	3	Húmeda		
	Río	Magdalena	4	Normal		

CÓDIGO UA	Cuerpo de Agua (Desembocaduras)		Punto	Época	ICA	IACAL (Año Seco)	IACAL (Año Normal)
	Río	Magdalena	4	Húmeda	REGULAR		
	Río	Magdalena	4	Seca	MALA		
2405	Río	Sogamoso	5	Normal	ACEPTABLE	MEDIA -ALTA	MODERADA
	Río	Sogamoso	5	Normal	REGULAR		
	Río	Sogamoso	5	Húmeda	ACEPTABLE		
	Río	Magdalena	6	Normal	MALA		
	Río	Magdalena	6	Normal	REGULAR		
	Río	Magdalena	6	Húmeda	MALA		
2317	Río	Cimitarra	7	Normal	MALA		
		Cimitarra	7	Normal	REGULAR		
		Cimitarra	7	Húmeda	REGULAR		
Río	Magdalena	8	Normal	MALA			
Río	Magdalena	8	Normal	REGULAR			
Río	Magdalena	8	Húmeda	MALA			
Río	Magdalena	9	Normal	MALA			
Río	Magdalena	9	Normal	REGULAR			
Río	Magdalena	9	Húmeda	MALA			

DEMANDA DE AGUA (USOS):

- **Opón:** la presión por uso doméstico se da principalmente por las cabeceras de los municipios de Santa Helena (río Opón entre San Joaquín y la Tablona), Carmen de Chucurí (río la Colorada) y Barrancabermeja (hacia la desembocadura); presencia del sector de hidrocarburos en el río la Colorada e industrial en límites con el río Magdalena. La presión por uso agropecuario que está presente en toda la cuenca, salvo en las unidades de análisis de quebrada Negra de Armas y río Blanco donde no se registra actividad agrícola significativa.
- **Sogamoso:** las cuencas de los ríos Chicamocha y Suárez reportan todo tipo de demanda que presiona la calidad del agua del río Sogamoso, destacándose que el sector de Hidrocarburos y palmero característico de la cuenca baja del Sogamoso no está presente. La presión por uso doméstico principalmente se registra por las cabeceras de los municipios de Betulia (Quebrada La Betuliana y otros directos al



río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso), Los Santos (Directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)), Zapatoca (Quebrada Zapatoca), San Vicente de Chucurí (Río Chucurí) y Barrancabermeja hacia la desembocadura (Complejo Ciénaga San Silvestre); uso agropecuario que está presente en toda la cuenca.

- **Lebrija:** la presión por uso doméstico se da principalmente en las cabeceras de los municipios, destacándose los mayores núcleos poblacionales localizado en la unidad del río de Oro, en donde a través de sus sistemas de alcantarillado reciben aportes de carácter industrial y del sacrificio animal; desde la cabecera de la cuenca, se registran las cabeceras de Piedecuesta, Floridablanca, Bucaramanga, Girón, Suratá, Vetas, Matanza, Charta, California y Tona (río de Oro); Río Negro y centros poblados (río Negro); Lebrija y centros poblados (quebrada La Angula); El Playón (río Cachirí); Puerto Wilches (quebrada La Trece); Sabana de Torres y centros poblados (quebrada La Gómez). Presencia del sector de hidrocarburos en cuenca media y baja y en afluentes localizados en jurisdicción de la CAS (para caracterizarlas a mayor detalle desde el aporte de cargas contaminantes); presencia del sector palmero - extractoras de aceite en la cuenca baja (quebrada la Trece - la Gómez); la industria se localiza eminentemente en la unidad del río de Oro; también se ha identificado demanda para actividades asociadas al cultivo del café que se hace necesario caracterizarlas desde el aporte de cargas contaminantes. La presión por uso agropecuario que está presente en toda la cuenca; el uso minero se localiza en la cuenca del río de Oro (minería de oro predominantemente) y en la cuenca del río de Cáchira del Espíritu Santo.

- **PRESIÓN (CARGAS PUNTUALES):**

- **Opón:** las cargas significativas las aporta el sector municipal, generándose una presión moderada en complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras en condiciones hidrológicas secas y muy altas en el complejo Humedal Juan Esteban en condiciones secas

y normales. A nivel de SZH, su capacidad de dilución se ve reflejada por un IACAL entre medio-alto y alto, considerando la muy alta presión que se evidencia en la cuenca baja.

- **Sogamoso:** Las cargas significativas las aporta el sector municipal, generándose una presión media - alta sobre la quebrada la Betuliana, río Chucurí y complejo ciénaga de San Silvestre en las diferentes condiciones hidrológicas; en el área directos entre cuchilla de San Pablo y Marta pasa de una presión media - alta en condiciones medias a presión alta en época seca; la quebrada Zapatoca es la que percibe mayor presión pasando de alta en época normal a muy alta en condiciones secas. A nivel de SZH, su capacidad de dilución se ve reflejada por un IACAL entre moderado y medio-alto, destacando que las cargas se generan en diferentes unidades y en la cuenca baja, la presión ejercida por la cabecera de Barrancabermeja (alrededor del 10% de la población) en la correspondiente área de drenaje, no es condicionante a la respuesta del indicador.
- **Lebrija:** las cargas significativas las aporta el sector municipal, generándose una presión muy alta sobre el río de Oro y sus afluentes en las diferentes condiciones hidrológicas; en las quebradas la Angula y La Trece pasa de una presión alta en condiciones medias a presión muy alta en época seca; en el río Negro se mantiene en presión alta en las dos condiciones hidrológicas; en el río Salamaga pasa de moderada a media alta y en la quebrada La Gómez de baja a moderada en época seca, mientras que el río Cachiri se mantiene con una presión moderada en los dos escenarios hidrológicos. A nivel de SZH, su capacidad de dilución se percibe baja por un IACAL alto, destacando que las cargas vertidas en el río de Oro, son condicionantes a la respuesta del indicador.

- **CALIDAD DEL AGUA-ICA:**

La calidad de agua tiende a mala en todo el tramo del río Magdalena y durante los diferentes escenarios hidrológicos monitoreados, condición de calidad inducida por niveles significativos de SST y por la relación de nutrientes, no solo proveniente de los afluentes en algunos casos, sino de las mismas características del río Magdalena aguas arriba del río Carare; la calidad tiende a mejorar cuando la presión de los afluentes se reduce con el incremento de la oferta, así como cuando los

reportes o niveles de conductividad y materia orgánica no son tan importantes. No se logra establecer patrones de diferenciación entre escenarios hidrológicos, que en el caso de época húmeda no mejora por dilución, posiblemente por efecto de cargas distribuidas.

- **Opón:** La calidad el agua fluctúa entre regular y mala, salvo en las zonas altas o en aquellas unidades donde no se presentan presiones significativas. En el sector bajo tanto del río la Colorada como del Opón se reporta una tendencia marcada a calidad mala, donde la oferta no tiene al parecer la capacidad de asimilar las cargas que se vierten, principalmente por efecto de la materia orgánica, SST y nutrientes, que pueden estar relacionados también con aportes naturales, incrementados en la desembocadura al río Magdalena por la actividad antrópica de origen doméstico.
- **Sogamoso:** la calidad el agua en la cuenca alta es mala influenciada por la calidad de los ríos Chicamocha y Suárez. Agua abajo el río Sogamoso se recupera gracias a la calidad el agua de los afluentes, fluctuando entre regular y mala, salvo en las zonas altas o en aquellas unidades donde no se presentan presiones significativas y se reporta calidad aceptable. En el sector bajo se reporta una tendencia marcada a calidad entre aceptable y regular evidenciándose que la oferta tiene al parecer la capacidad de asimilar las cargas que se vierten, principalmente por efecto de la materia orgánica, SST y nutrientes, que pueden estar relacionados también con aportes naturales, incrementados en la desembocadura al río Magdalena por la actividad antrópica de origen doméstico e industrial en baja medida. También se observan fluctuaciones en la conductividad que inciden en la respuesta del índice. No obstante, las condiciones descritas, las concentraciones de oxígeno en los sectores bajos son aceptables y no se observan diferencias marcadas entre escenarios hidrológicos, posiblemente por la regulación que ejerce el embalse.
- **Lebrija:** la calidad de agua aceptable se denota en los sectores altos de las diferentes unidades de análisis, que se reduce a regular en las partes medias de los afluentes de la cuenca del río de Oro y en las desembocaduras de los afluentes como la Angula, Doradas, Negro, Cachirí, posiblemente con efectos de la escorrentía en época húmeda; la calidad se torna mala durante las diferentes condiciones hidrológicas en las desembocaduras de los

afluentes principales del río de Oro. Las bajas condiciones de calidad en los sectores altos y medios son inducidas por concentraciones significativas de conductividad y la relación de nutrientes que pueden estar relacionados también con aportes naturales; en los sectores bajos y de desembocaduras se incrementa el efecto por valores significativos de DQO, SST, Nutrientes y patógenos. Las condiciones monitoreadas durante la fase de seguimiento en general obedecerían a un escenario normal o de año medio, llamando la atención la mala calidad el agua en el río San Alberto, que posiblemente obedece a condiciones naturales dados los contenidos de materia orgánica, sólidos y a la relación de nutrientes.

No obstante, las condiciones descritas, las concentraciones de oxígeno en los sectores medio y bajos del río Lebrija son aceptables y no se observan diferencias marcadas entre escenarios hidrológicos, evidenciándose la recuperación de la corriente de agua, debida, por un lado, a la calidad el agua de los afluentes y por otro a su propia capacidad de asimilación.

La calidad del agua hacia la desembocadura del río Lebrija tiende a regular, reflejo de la alta presión que reporta en la estimación del IACAL.

- **CALIDAD DEL AGUA-ICA-SST:**

Los valores significativos que superan el umbral de calidad se reportan de manera generalizada en todo el tramo del río Magdalena, salvo durante la segunda campaña - época normal. El contenido de sólidos parece ser característico desde aguas arriba del río Carare, manteniéndose esta característica con tendencia al incremento de las concentraciones hacia aguas abajo.

- **Opón:** los valores significativos generalizados en buena medida superan los umbrales de calidad o históricos en algunos casos y que se correlacionan con los valores de turbiedad. En época seca tienden a reducirse y la mayoría de la materia asociada es de carácter volátil o de origen orgánico, tal como lo manifiesta el tipo de presión ejercida.
- **Sogamoso:** los valores significativos que en buena medida superan los umbrales de calidad o históricos, se presentan sobre la corriente principal por influencia de los ríos Suárez y Chicamocha, especialmente por éste último, correlacionándose con los valores de turbiedad, que mejoran a medida que se desciende en la cuenca.

- **Lebrija:** los valores significativos que en buena medida que superan el umbral de calidad que afectan la corriente principal del río Lebrija, se aportan desde la cuenca del río de Oro, principalmente por el aporte doméstico; en la cuenca baja, las quebradas La Santa y La Gómez, estarían aportando concentraciones de interés a través de la quebrada La Chocóa. Las concentraciones de SST se correlacionan con los altos valores con turbiedad.

- **CALIDAD DEL AGUA-DQO:**

Los valores significativos que superan el umbral de calidad se reportan en correspondencia con los SST y con el aporte generalizado de los afluentes al tramo del río Magdalena.

- **Opón:** de manera generalizada sin observarse mayores diferencias entre escenarios hidrológicos, se superan los umbrales de calidad del agua e inclusive los históricos; se observan concentraciones altas en el río la Colorada y parte baja del río Opón tal como se manifiesta los resultados del IACAL. Las condiciones pueden estar influenciadas por el aporte natural de materia orgánica y se correlacionan con los contenidos significativos de COT.
- **Sogamoso:** deal igual que en la subzona hidrográfica del río Opónse superan los umbrales de calidad del agua; se observan en el río Sogamoso concentraciones altas en la parte alta y en la desembocadura posiblemente por efecto del aporte de las SZH localizadas aguas arriba, la quebrada Zapatoca y por las características principalmente del complejo ciénaga de San Silvestre tal como se manifiestan los resultados del IACAL. Las condiciones pueden estar influenciadas por el aporte natural de materia orgánica y se correlacionan con los contenidos significativos de COT. Se denotan reducciones de las concentraciones en el sector bajo como indicador de la recuperación que se presenta.
- **Lebrija:** se superan los umbrales de calidad del agua en las fuentes receptoras de vertimientos principalmente los municipales en las cuenca del río de Oro y quebrada la Angula, tal como se manifiesta también por los resultados del IACAL; en las desembocaduras de las quebradas La Santa y La Gómez, se reportan concentraciones de interés en sus sectores de desembocadura, posiblemente también por influencia de poblaciones localizadas aguas arriba, Las condiciones pueden estar influenciadas por el

aporte natural de materia orgánica y se correlacionan con los contenidos significativos de COT.

- **CALIDAD DEL AGUA-OD:**

Las concentraciones reportadas inferiores al umbral de calidad se reportan solo en el sector alto del tramo del río Magdalena solo durante la primera campaña - época normal, para la cual no se podría indicar en términos generales que las concentraciones de DQO estén ejerciendo presión sobre el oxígeno, respondiendo el río Magdalena con su capacidad de dilución - asimilación.

- **Opón:** las concentraciones de oxígeno disuelto en general son aceptables, salvo algunos casos en los que no se observa alguna correlación directa con los tensores de contaminación puntual, por lo que en la mayoría de los casos, las condiciones monitoreadas, pueden ser atribuibles a presencia de elementos que de manera natural demandan oxígeno.
- **Sogamoso:** las concentraciones de oxígeno disuelto en general son aceptables, salvo algunos casos en los que se observa descensos importantes aguas abajo del embalse de Topocoro (valores inferiores al umbral histórico y de calidad del agua) y su recuperación aguas abajo. No se identificó un patrón que permita aclarar la causalidad de variaciones de oxígeno más que efectos de desembalsamiento o a elementos que de manera natural ejercen demanda.
- **Lebrija:** las concentraciones inferiores al umbral de calidad se observan predominantemente en las desembocaduras de los afluentes del río de Oro y en la afluencia de este al río Lebrija, especialmente en su sector alto; en los otros sectores de la cuenca, el oxígeno disuelto en general es aceptable, incluida la corriente del río Lebrija, evidenciándose su recuperación aguas debajo de la influencia del río de Oro y la quebrada la Angula.

- **CALIDAD DEL AGUA-NUTRIENTES:**

Se evidencia la presencia de Nitrógeno Amoniacal (aguas residuales frescas) en el tramo del río Magdalena, por concentraciones llamativas durante época húmeda; los nitratos y nitritos no reportan valores que superen los umbrales de calidad y sus concentraciones se mantienen a lo largo

del tramo sin que se llegue a identificar un patrón claro de incremento por efecto de los afluentes; con respecto a los fosfatos se tiene una tendencia similar.

- **Opón:** no se presenta una tendencia clara y diferenciada entre escenarios hidrológicos, sin embargo, en época seca tienden a incrementarse en la parte baja y en alguna medida por vertimientos de origen doméstico. No se puede evidenciar de manera clara efectos de escorrentía por aporte de cargas de tipo distribuidas, que influyan de forma representativa y atribuibles a condiciones asociadas a contaminación difusa, o inclusive a las aguas servidas especialmente de origen doméstico.
- **Sogamoso:** las formas de nitrógeno no reportan valores que llamen la atención, así como para los fosfatos. No se puede evidenciar de manera clara efectos de escorrentía por aporte de cargas de tipo distribuidas, que influyan de forma representativa y atribuibles a condiciones asociadas a contaminación difusa, o inclusive a las aguas servidas especialmente de origen doméstico.
- **Lebrija:** en términos generales, las formas de nitrógeno no reportan valores que llamen la atención (salvo NH_3), aunque en correlación con la DQO y los SST, los nutrientes aportados por vertimientos domésticos especialmente por la cuenca del río de Oro son representativos, al superarse significativamente el umbral de calidad y en algunos casos el histórico para nitrógeno amoniacal; también se evidencia este tipo de presión en el río Negro, Salamaga y Cachirí.

Para los fosfatos, llama la atención el efecto que se percibe desde la cuenca del río de Oro, hasta el sector medio – bajo del río Lebrija, superándose el umbral de calidad, que para este parámetro sí se estaría reflejando la presión por cargas domésticas estimada en el IACAL.

No se puede evidenciar de manera clara efectos de escorrentía por aporte de cargas de tipo distribuidas, que influyan de forma representativa y que sean atribuibles a condiciones asociadas a contaminación difusa; no se observan patrones claros, aunque en algunos casos, las concentraciones se incrementan en épocas húmedas o de transición con la normal, lo que podría indicar aporte por cargas distribuidas por eventos sectorizados y dependientes de condiciones particulares.

- SUSTANCIAS DE INTERÉS SANITARIO

No se reportan concentraciones de interés para las variables monitoreadas (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn,) en el tramo del río Magdalena. Valores significativos que superan el umbral de calidad se localizan a la altura de Barrancabermeja para Aluminio, durante los diferentes escenarios hidrológicos monitoreados.

- **Opón:** no se reportan concentraciones de interés para las variables monitoreadas (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn,). Para el Al, se supera el umbral de calidad, indicando posible influencia de vertimientos de origen antrópico, que pueden estar asociados a coagulantes u otros factores que precisan monitoreo focalizado en el río la Colorada específicamente. La afectación por presencia de CF y CT es representativa y bien importante de manera generalizada en la cuenca, aunque se incrementa en la cuenca baja por presión antrópica, sobrepasando los umbrales de calidad.
- **Sogamoso:** no se reportan concentraciones de interés para las variables monitoreadas (Cd, Cr, Ni, Cu, Zn,). Para el Plomo y Aluminio, en algunos casos se supera el umbral de calidad en la cuenca alta, sin que se puedan asociar de manera clara a factores localizados desde las SZH aguas arriba. La afectación por presencia de CT es representativa y bien importante en la cuenca alta y baja - alta superando el umbral de calidad, que puede estar correlacionada con arrastre de materia orgánica; no obstante, a nivel fecal sobre el río Sogamoso solo se evidencia superación del umbral de calidad en la cuenca alta, posiblemente por efecto de las SZH localizadas aguas arriba con presencia de presión antrópica.
- **Lebrija:** no se reportan concentraciones de interés para las variables monitoreadas (Cd, Cr, Ni, Al, Zn,); para el Plomo y Mercurio, se detectaron algunos valores durante la etapa de línea base que superaron el umbral de calidad en la cuenca del río Vetas y Cobre en el río Suratá, posiblemente por efecto de la actividad minera. Algún valor representativo de Hidrocarburos se detectó en la quebrada La Gómez en su cuenca media. Durante la fase de seguimiento no se han detectado concentraciones de interés o críticos. La afectación por presencia de CT y CF es representativa y bien importante en la cuenca alta superando de

manera muy crítica los umbrales de calidad, en correlación con el aporte de materia orgánica de origen antrópico que se ha indicado. También se registran algunas evidencias de patógenos en la quebrada La Angula. A nivel fecal sobre el río Lebrija se evidencia superación del umbral de calidad de manera consistente, predominantemente por efecto de las cuencas localizadas aguas arriba con presencia de presión antrópica.

- **OTRAS VARIABLES:**

Para el hierro y manganeso se reportan algunos valores que superan el umbral de calidad en los escenarios hidrológicos monitoreados a la altura de Barrancabermeja, que pueden dejar entrever la influencia de vertimientos y/o de aportes que naturalmente incrementan sus contenidos, en el tramo del río Magdalena.

- **Opón:** para el hierro y manganeso se reportan algunos valores que superan el umbral de calidad en escenarios hidrológicos entre normal y húmedo, que pueden dejar entrever la influencia de vertimientos y/o de aportes que naturalmente incrementan los contenidos por efecto de escorrentía. Con respecto a los hidrocarburos, no se observa incidencia por vertimientos
- **Sogamoso:** para el hierro y manganeso se reportan algunos valores que superan el umbral de calidad durante los mismos eventos en que se registró presencia de Pb y Al. Con respecto a los hidrocarburos, no se observa incidencia por vertimientos.
- **Lebrija:** para el hierro y manganeso se reportan algunos valores que superan el umbral de calidad en las cuencas de los ríos Suratá y Vetás.

4.8. Conclusiones generales

4.8.1. Factores que alteran la calidad del agua - presión por contaminación

Con base en los resultados del IACAL, la condición más crítica se observa en la cuenca del río Lebrija con una presión alta en los diferentes escenarios hidrológicos, seguido del río Opón con una presión alta durante época seca, y luego el río Sogamoso con una presión media-alta durante este mismo escenario hidrológico. Frente a las cargas estimadas en estos tres (3) afluentes, sea

producto de un balance de masas o por la capacidad de amortiguamiento del mismo río, no se observan patrones de afectación particulares que ameriten establecer diferenciaciones o factores de afectación que llamen la atención o que generen situaciones críticas en la calidad del río Magdalena. Respecto a la presión por cargas distribuidas, se podría indicar teniendo presente las limitaciones de información, que no se logra evidenciar alguna tendencia clara en el comportamiento de nutrientes asociados a contaminación difusa, enfocada en los resultados de época húmeda, aunque algunas concentraciones de materia orgánica podrían indicar efecto de la escorrentía, especialmente a la altura de Puerto Wilches.

Opón: la caracterización sectorial realizada en general, permitió identificar como usuarios y sector prioritario el municipal o el de prestación del servicio público de alcantarillados (15 usuarios), con el posible funcionamiento de sistemas de tratamiento, diagnosticándose que se vierten prácticamente aguas crudas.

Con base en los resultados del IACAL, la condición más crítica se observa en la cuenca baja, unidad del complejo humedal Juan Esteban; en condiciones más críticas (época seca), se manifiesta una muy alta presión que repercute en categorizar la SZH con una alta presión. Sobre el río Opón – corriente principal, el comportamiento frente a la presión refleja una tendencia lógica de acumulación de cargas y de caudales en su último tramo, luego de recibir los aportes del río la Colorada, pero frente a las cargas puntuales se observaría un buen efecto de dilución, esto sin contar con las cargas que aporta la cabecera de Barrancabermeja, localizada ya en la desembocadura en el río Magdalena.

Respecto a la presión por cargas distribuidas, se podría indicar teniendo presente las limitaciones de información, que no se logra evidenciar alguna tendencia clara en el comportamiento de nutrientes o patógenos asociados a contaminación difusa, enfocada en los resultados de época húmeda, aunque la presencia de coliformes fecales en partes altas y medias de la cuenca, podrían señalar según sus concentraciones que puede estar existiendo incidencia del sector pecuario y doméstico rural. Producto del monitoreo en los diferentes escenarios hidrológicos, al momento de caracterizar las mismas masas de agua con respecto al transporte de las cargas puntuales, se podría indicar que no se percibe un aumento durante época húmeda, lo que podría indicar que en términos

generales no se presenta incidencia sobre la calidad del agua, por parte de los sectores que generan cargas distribuidas (sector agropecuario o doméstico rural).

Sogamoso: la caracterización sectorial realizada en general, permitió identificar como usuarios y sector prioritario el municipal o el de prestación del servicio público de alcantarillados (5 usuarios), con el posible funcionamiento de sistemas de tratamiento, diagnosticándose que se vierten prácticamente aguas crudas.

Con base en los resultados del IACAL, la condición más crítica se observa en la cuenca de la quebrada Zapatoca con una muy alta presión, seguida del área de drenaje directos entre cuchilla de San Pablo y Marta (alta presión), y con un IACAL medio-alto en el complejo Ciénaga San Silvestre, la quebrada la Betuliana y el río Chucurí; a nivel se SZH, se alcanza a reportar una presión media-alta en época seca, la cual se reduce a moderada en época normal. Sobre el río Sogamoso – corriente principal, el comportamiento frente a la presión refleja una tendencia de recuperación por un lado por el efecto de dilución que aguas abajo va aportando la acumulación de caudales y por otro por el efecto del embalse de Topocoro; esto sin contar con las cargas que aporta la cabecera de Barrancabermeja, localizada ya en la desembocadura en el río Magdalena.

Respecto a la presión por cargas distribuidas, se podría indicar teniendo presente las limitaciones de información, que no se logra evidenciar con claridad aportes de nutrientes o patógenos asociados a contaminación difusa, enfocada en los resultados de época húmeda. Producto del monitoreo en los diferentes escenarios hidrológicos, al momento de caracterizar las mismas masas de agua con respecto al transporte de las cargas puntuales, se podría indicar que no se percibe un aumento durante época húmeda, lo que podría indicar que en términos generales no se presenta incidencia sobre la calidad del agua, por parte de los sectores que generan cargas distribuidas (sector agropecuario o doméstico rural).

Lebrija: la caracterización sectorial realizada en general, permitió identificar como usuarios y sector prioritario el municipal o el de prestación del servicio público de alcantarillados (130 usuarios), con el posible funcionamiento de sistemas de tratamiento, diagnosticándose que se vierten prácticamente aguas crudas.

Con base en los resultados del IACAL, la condición más crítica se observa en la cuenca alta, unidad del río de Oro; en condiciones más críticas (época seca) y también en condiciones normales, se manifiesta una muy alta presión que repercute en categorizar la SZH con una alta presión. Sobre el río Lebrija – corriente principal, el comportamiento frente a la presión refleja una tendencia de reducción aguas abajo, luego de recibir los aportes de los diferentes afluentes, de la misma forma que frente a la respuesta ante las cargas puntuales, observándose un buen efecto de dilución - asimilación, hasta la desembocadura en el río Magdalena.

Respecto a la presión por cargas distribuidas, se podría indicar teniendo presente las limitaciones de información, que no se logra evidenciar alguna tendencia clara en el comportamiento de nutrientes o patógenos asociados a contaminación difusa, enfocada en los resultados de época húmeda, aunque la presencia de coliformes fecales en zonas con baja influencia por vertimientos puntuales domésticos o municipales de centros o cabeceras pobladas, podrían señalar según sus concentraciones que puede estar existiendo incidencia del sector pecuario y doméstico rural. Producto del monitoreo en los diferentes escenarios hidrológicos, al momento de caracterizar las mismas masas de agua con respecto al transporte de las cargas puntuales, se podría indicar que no presentan patrones que se estén generando presiones visibles, por parte de los sectores que generan cargas distribuidas (sector agropecuario o doméstico rural).

4.8.2. Condiciones de calidad del agua

El tramo del río Magdalena en general, responde a condiciones naturales o intrínsecas presentes en toda las zonas de influencia y que influyen negativamente en la categorización de la calidad del agua, sumada a la baja influencia antrópica, proveniente al parecer desde aguas arriba del tramo; las condiciones que pueden responder a la manifestación de concentraciones significativas de conductividad principalmente, de SST y DQO, SST; la relación de nutrientes amerita un señalamiento particular, por cuanto sus resultados (con el de la conductividad), hacen que, en varios casos, que la calidad llegue a categorizarse como mala, aunque la tendencia se inclina a una calidad regulas del río Magdalena indiferentemente del escenario hidrológico que se analice.

Opón: la cuenca en general, responde a condiciones naturales o intrínsecas que influyen negativamente en la categorización de la calidad del agua, y sumada a la influencia antrópica aunque sea baja, hacen significativa la manifestación de concentraciones de DQO, SST, conductividad y la relación de nutrientes, variables que hacen, en varios casos, que la calidad llegue a categorizarse como mala.

Sogamoso: el río Sogamoso en general, responde a condiciones inducidas por la calidad de los ríos Chicamocha y Suárez además de sus condiciones naturales o intrínsecas que influyen en la categorización de la calidad del agua; la baja influencia antrópica, permite contar con calidad del agua entre aceptable y regular, que para este caso, puede ser atribuible a la conductividad y la relación de nutrientes y en menor medida a la DQO y SST, variables que son representativas en las zonas de influencia.

Lebrija: la calidad del agua en la cuenca en general, responde a dos condiciones: la natural o intrínseca que influyen negativamente en la categorización de la calidad del agua, debida a la manifestación de concentraciones significativas de conductividad y la relación de nutrientes, con una menor influencia de materia orgánica y de sólidos suspendidos todavía con menor injerencia, que hacen, en varios casos, que la calidad llegue a categorizarse como mala, y generalizadamente con una categoría regular, salvo en las zonas altas de los afluentes.

Las condiciones de calidad del tramo el río Magdalena, más que alteradas por los afluentes que aportan sus aguas durante el tramo de estudio, salvo características particulares como la conductividad del río Carare y Cimitarra, los sólidos del Opón, y que todos los afluentes aporten ciertos contenidos de materia orgánica, se mantienen en razón a la misma calidad que provendría aguas arriba de la zona de influencia estudiada.

La relación de nutrientes influencia desfavorablemente la categorización del índice, casi que, en todos los casos, no podría llegar a considerarse de manera directa como contaminación; caso contrario, los coliformes, especialmente los fecales como indicador visible de contaminación por patógenos producto de la actividad antrópica y probablemente de la actividad ganadera producto de la escorrentía, se constituye en un factor a tener presente.

Con respecto a las variables complementarias representativas, la presencia del COT y de Coliformes Totales en concentraciones significativas, caracterizan el tramo y sus afluentes.

La presencia de aluminio en la cuenca del río Carare, así como de hierro y manganeso, parecen impactar el río Magdalena a la altura de Barrancabermeja, punto de monitoreo donde se detectaron valores superiores al umbral de calidad, lo que requiere de una atención sobre su origen. También se detectó en una ocasión Plomo en el río Carare, que llama la atención por superar el umbral de calidad.

En la cuenca del **río Opón**, la presencia de aluminio en la cuenca del río la Colorada, requiere de una atención sobre su origen, el cual al parecer obedece a presiones de tipo antrópico. Con respecto a los coliformes totales, estos reflejarían arrastre de suelo o escorrentía, correlacionados con el aporte de materia orgánica y también de materia fecal, aunque como se mencionó, no se observan diferentes tendencias entre los escenarios hidrológicos analizados, cuál era el propósito, al tenerse como un indicador fundamental para analizar la variabilidad de las condiciones de calidad por efecto de la precipitación o escorrentía, conforme a la clasificación de los monitoreo (análisis hidrológico) establecida para tal fin.

En la cuenca del **río Sogamoso**, la presencia de aluminio en la cuenca baja del río Chicamocha y una serie de reportes a la altura del Juncal (parte alta del río Sogamoso), requiere de una atención sobre su origen, sumada a algún reporte de Níquel, y concentraciones significativas de hierro y manganeso. Con respecto a los coliformes totales, no reflejarían arrastre de suelo o escorrentía en la cuenca del río Sogamoso, correlacionados con el aporte de materia orgánica y también de materia fecal, al no observarse diferentes tendencias entre los escenarios hidrológicos analizados, cuál era el propósito, al tenerse como un indicador fundamental para analizar la variabilidad de las condiciones de calidad por efecto de la precipitación o escorrentía, conforme a la clasificación de los monitoreos (análisis hidrológico) establecida para tal fin.

En la cuenca del **río Lebrija**, durante los periodos de evaluación de línea base, se identificó la presencia de algunos valores de aluminio, cromo, cianuro, plomo y mercurio en la cuenca del río Vetás, y en la del río Suratá cobre, cromo y plomo, lo cual, requiere de una atención sobre su origen, que al parecer obedece a presiones de tipo antrópico por minería del oro, principalmente.

Con respecto a los coliformes totales, estos reflejarían arrastre de suelo o escorrentía, correlacionados en alguna proporción con el aporte de materia orgánica y también de materia fecal, que aunque como se mencionó, no se observan diferentes tendencias entre los escenarios hidrológicos analizados, cuál era el propósito, al tenerse como un indicador fundamental para analizar la variabilidad de las condiciones de calidad por efecto de la precipitación o escorrentía, conforme a la clasificación de los monitoreos (análisis hidrológico) establecida para tal fin.

La verificación de la calidad del agua en términos de su comparación con los umbrales de calidad o históricos, que en principio son herramientas para corroborar si el efecto de los vertimientos (puntuales o no) o las características naturales, ponen en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para sus diferentes usos, arrojó las siguientes conclusiones, indicando que para el tramo del río Magdalena, no se superaron en el mayor número de ocasiones:

Opón: indica que se superan en reiteradas ocasiones; estos umbrales, en principio son herramientas para corroborar si el efecto de los vertimientos (puntuales o no) o las características naturales, ponen en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para sus diferentes usos.

Sogamoso: indica que en algunos casos se superan más debido a condiciones naturales que por presión antrópica; estos umbrales, en principio son herramientas para corroborar si el efecto de los vertimientos (puntuales o no) o las características naturales, ponen en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para sus diferentes usos.

Lebrija: Indica que se superan en reiteradas ocasiones; estos umbrales, en principio son herramientas para corroborar si el efecto de los vertimientos (puntuales o no) o las características naturales, ponen en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para sus diferentes usos.

ASPECTOS DE INTERÉS:

- Se destaca que la representatividad sectorial en las áreas de estudio está liderada por las cabeceras y centro poblados municipales, que aportan aproximadamente el 96% de las cargas, tomando como indicador base la DBO.

- El oxígeno disuelto aguas abajo del embalse de Topocoro, reportó reducciones drásticas en algunos monitoreos.
- El pH, los sulfatos, el Arsénico, el Zinc y los Nitratos, en general no reportaron valores por fuera de los umbrales de evaluación o concentraciones que llamen la atención.
- No se identificaron tendencias diferenciadas de manera marcada entre los escenarios hidrológicos evaluados, aunque si permitieron identificar ciertas condiciones atribuibles a las características esperadas en cada época por la variabilidad de caudales y su efecto de dilución de cargas puntuales o de arrastre de elementos ante eventos de lluvia. También los resultados se pueden atribuir a que un número significativo de monitoreo, se adelantaron durante épocas de transición.
- Sistemáticamente, se identificó una serie de puntos de monitoreo donde la calidad es mala o donde algunas variables reportan valores que superan, especialmente, el umbral de calidad establecido, lo que ameritaría un seguimiento más detallado.
- Tanto los niveles de conductividad como la relación de nutrientes, que podrían estar más asociados a condiciones naturales en todas las áreas de estudio, tornan al ICA hacia una categoría mala o regular, cuando por causas de origen antrópico, la calidad del agua podría llegar a clasificarse entre regular y aceptable. Esta situación podría corroborarse en los casos de revisar los indicadores que reflejan el impacto antrópico por cargas puntuales, como el oxígeno disuelto, que, salvo efectos locales, no reportó condiciones críticas.
- Los Sólidos Suspendidos Totales, al parecer también son característicos de condiciones naturales, especialmente aguas arriba de la cabecera del río Sogamoso; sin embargo, se logra percibir la influencia de las aguas residuales municipales. Es de revisar, el tema de sedimentos y procesos erosivos en las áreas de estudio, como factor o factores que influyen en la valoración de la calidad del agua.
- La materia orgánica es rica en las áreas de estudio, que, sumada al aporte de las aguas residuales domésticas, también se torna en un factor que incide sobre la categorización del ICA.

- Si bien se percibe el efecto de los nutrientes aportados por las aguas residuales de origen doméstico, en general, salvo efectos locales por nitrógeno amoniacal, los nitritos y los nitratos, no reportan valores por fuera de los umbrales de calidad.
- Sin duda alguna, los patógenos por las mediciones realizadas, indican que es el factor antrópico más relevante; salvo en algunas zonas altas, los criterios de admisibilidad del recurso permitirían realizar un uso con ciertos niveles de seguridad.
- Los vertimientos realizados directamente al río Magdalena no se tuvieron en cuenta como insumo para el cálculo del IACAL, así como usuarios de las tasas retributivas a los cuales se les hace descuento por captar y verter en la misma fuente. Como excepción, las cargas de la cabecera de Barrancabermeja se sumaron a la presión sobre las cuencas de los ríos Opón y Sogamoso, de acuerdo con las áreas de drenaje correspondientes.
- De acuerdo con la disponibilidad de información, se calculó el ICA para 5, 6, y 7 variables, evidenciándose sobre los mismos puntos evaluados, el efecto crítico que tienen la relación de nutrientes y los coliformes fecales, sobre la categorización de los índices.
- La resolución del estudio, considerando las unidades subsiguientes a las SZH, permitió acercarse al nivel de análisis requerido a escala regional o a proporcionar a cada una de las Autoridades Ambientales Regionales una evaluación integral, aplicable como insumo a las ERA por cada cuenca priorizada.
- Aunque de manera directa no es propósito del ICA, registrar de alguna forma las causas que influyen en sus resultados, la evaluación apoyándose en la identificación de las presiones a nivel de unidad de análisis en los resultados del IACAL, dio cuenta de factores que está generando degradación en la calidad del agua.
-

LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES: se resaltan los siguientes aspectos como aquellos más relevantes, anotando que los índices tratan de reflejar condiciones promedio en los diferentes escenarios hidrológicos, y, por lo tanto, la planeación de los monitoreos podría direccionarse hacia el cubrimiento de tal condición, es decir, a obtener valores medios que caractericen la dinámica tanto de los vertimientos, como de la misma fuente receptora, en un

contexto regional. Por lo tanto, los resultados del ICA no son concluyentes, aunque si marcan ciertas tendencias y reflejan condiciones críticas de la calidad de los cuerpos de agua en ciertos sectores y producto de la agregación y/o acumulación de cargas y caudales.

Todavía se acude a métodos presuntivos para el cálculo de las cargas y hace falta revisar con mayor detalle tanto el efecto del tratamiento de las aguas (con muy baja cobertura), como la caracterización de algunos sectores, que pueden o no estar vertiendo directamente a las fuentes de agua o indirectamente a los sistemas de alcantarillado o al suelo. Se requiere entonces mayor información y análisis, así como de la definición de metodologías para los monitoreos que reduzcan incertidumbres y limitaciones que vayan de la mano con la definición de un abanico de objetivos, conforme a los requerimientos normativos, de gestión y de los usuarios, especialmente los vinculados a la potabilización del agua, y que permitan igualmente, identificar necesidades de programación, coordinación, complementación y de inversión.

Otra desventaja puede recaer en algunos límites de cuantificación, que no permiten observar de manera clara las tendencias teniendo como referencia los umbrales de calidad del agua, o que finalmente se utilizan para poder efectuar el cálculo del ICA.

Se tenía como propósito establecer una línea base para el año 2019, sin embargo vacíos de información que se detectaron tanto para el componente de calidad como el de presiones, conllevaron a realizar complementaciones de información desde el año 2016 y 2017 en relación con la caracterizaciones de fuentes hídricas, una vez se seleccionaron los cuerpos de agua de interés con base en la zonificación hidrográfica tanto a nivel nacional como regional; para el componente de presiones, se acudió finalmente a los registros del año 2021, haciéndolo coincidir con el inicio de la fase de seguimiento.

Comparando los registros de usos identificados en el componente de demanda con los sectores – usuarios generadores de vertimientos puntuales, se denotan diferencias que requieren ser suplidas o aclaradas en el contexto regional, de tal manera que armonizando los diferentes instrumentos y mecanismos con que se cuentan, se pueda tener de registros robustos y unificados, que no solo den cuenta de variables como la DBO y los SST, sino de aquellas de interés de acuerdo con las características sectoriales de los vertimientos. Si bien, los esfuerzos deben enfocarse hacia los

usuarios que mayor presión generan como quedó demostrado con la representatividad de las actividades generadoras de aguas residuales domésticas o municipales, otras requieren de cierta atención como los centros de sacrificio, el beneficio del café y la palma, y el sector de hidrocarburos, de tal forma que permitan diferenciar efectos regionales de los locales. También amerita un capítulo aparte, pero integrador, la minería, con pocos registros puntuales pero que quizá esté influyendo en aportes distribuidos, como el sector agropecuario, los cuales deben ser objeto de análisis particulares.

El ICA de 6 variables se tomó como eje de la evaluación, puesto que se dispone de la mayor información para su cálculo y dispone de la trazabilidad para su interpretación tanto a nivel nacional como regional; sin embargo, a nivel regional, considerando los patógenos como la variable más importante quizá, deberá ser objeto de atención especial.

4.9. Propuesta de medidas generales con respecto a las necesidades de monitoreo de la calidad del agua a nivel regional y nacional en las áreas de estudio del VMM

El programa nacional de monitoreo, soportado en la red básica del IDEAM emplazada en el VMM necesita de mayor suficiencia para cubrir las expectativas y necesidades a nivel regional, pero respondiendo a requerimientos de armonización para el doble propósito, surgidos a partir de la zonificación hidrográfica y del seguimiento de la calidad que una unidad hidrográfica de análisis entrega aguas abajo. Por lo tanto, debe darse una complementariedad recíproca e intensificar la observación en cuencas y puntos críticos, con miras a establecer procesos que permitan mejorar el conocimiento sobre las dinámicas y tendencias de la calidad del agua, en correlación con factores de oferta, demanda y de presión. Lo anterior amerita la integración de esfuerzos en todos sentidos, donde la coordinación institucional y la solidaridad entre los niveles nacional y regional es vital. La inclusión permanente de variables que permitan alimentar los índices y la misma discusión sobre la selección, valoración, ponderación de estas, como de otras que resulten importantes producto de la caracterización de las presiones, son tareas que se tienen que abordar, de tal forma

que el monitoreo sea conto – efectivo y en este momento coyuntural donde la actualización normativa en materia de criterios de calidad es perentoria. La revisión de los límites de cuantificación en función de los criterios de admisibilidad para la destinación del recurso y para su conservación y protección, es tan importante como el poder establecer parámetros para todas las variables de interés, de tal forma que a nivel regional se cuente con las mismas directrices.

Caso muy especial concierne a los patógenos, como quizá el contaminante de mayor importancia en el país y en el VMM, por lo que representa en términos de la salubridad en el país y que amerita estrategias claras tendientes a su control y monitoreo.

La práctica del monitoreo nacional y regional llevada hasta ahora, se ha realizado con mayor frecuencia en estaciones de tendencia ubicadas en cuerpos de agua lóticos principales, siendo importante en el valle incluir monitoreo en cuerpos de agua lénticos, involucrando la dimensión de integración en profundidad.

La incorporación de nuevas variables en la caracterización del agua superficial, para generar información de la evolución de la calidad, mejorando la comprensión de los sistemas, conllevaría en el corto plazo a tener en cuenta sistemática y consistentemente variables como: sólidos volátiles (para determinar por diferencia la fracción inorgánica); DBO y análisis microbiológicos. La revisión histórica de datos podría conllevar a reducir frecuencias en el análisis de variables que no han reportado valores críticos o que llamen la atención respecto a los umbrales tanto históricos, como de calidad del agua, e incluso a eliminarlas, basándose en un análisis de tensores de contaminación característicos de una unidad de análisis dada.

En la medida que se disponga de cierta información, la correlación interparamétrica puede surgir como un mecanismo para reducir costos de monitoreo y hacer más expeditos los resultados y su interpretatividad.

Si bien la evaluación presentada en este documento se circunscribe a cuerpos superficiales lóticos y a las variables seleccionadas que dan cuenta de factores convencionales de contaminación puntual, no implica que el alcance del monitoreo solo se dé bajo esta medida; otras sustancias, los cuerpos de agua lénticos y la contaminación difusa por cargas distribuidas de diverso origen, deben atenderse con la identificación y el rigor necesario.

La intensidad del monitoreo debe responder a las características de criticidad de las cuencas, la identificación de zonas y puntos prioritarias debería soportarse principalmente en intereses regionales, pero sin perder la perspectiva del contexto nacional para el caso del IDEAM. La información multianual y análisis basados en metodologías como las desarrolladas para la presente evaluación, pueden servir para dicho propósito, así como los análisis previamente desarrollados por el Instituto.

Los programas institucionales regionales de monitoreo deben aportar con la medición de variables que garanticen el cálculo de los índices y el seguimiento a indicadores asociados a los tensores de contaminación propios de cada cuenca (SZH) o unidad de análisis, dando precisamente prioridad al contexto regional sobre el local. Si bien las Autoridades Ambientales tienen unas funciones u obligaciones que recaen sobre condiciones locales, el esfuerzo debe dirigirse en sentido de monitorear cuerpos de agua principales, siendo los usuarios un actor fundamental para disponer de datos a otro nivel.

Es importante que los programas de monitoreo tengan en cuenta los resultados y conceptos de la presente evaluación, complementándose con un monitoreo interinstitucional coordinado y en puntos de mutuo interés, de tal forma que permitan reunir la información con la rigurosidad que demanden las metodologías, pero sobre todo, los propósitos de los mismos, para lo cual su desarrollo debe contemplar prioritariamente los objetivos (el para qué) y los demás interrogantes que surgen a la par, como el dónde, el cuándo, el por qué, cada cuánto, con qué, quiénes, cuántas veces, con cuáles métodos o técnicas, qué medir.

Las diferentes limitaciones, deben cubrirse de tal manera que la evaluación de estado, dinámica y tendencias cuente con el monitoreo mínimo de los cuerpos de agua y vertimientos, que permita disponer de resultados en todos los puntos y sectores de interés, y durante los diferentes escenarios hidrológicos de manera permanente y anualizada, siendo el propósito de intensificar la frecuencia un aspecto de análisis y de coordinación entre las partes, especialmente a nivel regional.

Priorizar el seguimiento a la problemática por patógenos en el origen (vertimientos puntuales y distribuidos) y el monitoreo en las fuentes receptoras, debe ser una meta común, estableciendo una

política y estrategia que permita reducir la presión y los efectos ambientales, sanitarios y económicos que representa.

El disponer de criterios definitivos para sentar las bases de evaluación de calidad en el tiempo es esencial para la toma de decisiones. Aquí la actualización de los criterios de calidad para la destinación del recurso, las técnicas analíticas, la integración normativa e institucional, deben contribuir a la unidad, que permita la trazabilidad en la aplicación de metodologías y técnicas que permitan la estandarización de la información.

Respecto a la incidencia de la conductividad eléctrica y de la relación de los nutrientes en el índice, la atención de la “problemática” que pueden llegar a representar, debe cobrar la importancia correspondiente, sopesando las medidas de control que se puedan llegar a implementar y la priorización en el monitoreo que se amerite.

Afinar la metodología de clasificación de los monitoreos es otra una tarea a emprender, no solo para poder correlacionar de mejor manera la información, sino para efectos de la programación de las campañas. Así mismo la medición del caudal y la referenciación de las condiciones hidrológicas antecedentes al monitoreo, no pueden obviarse, así como el registro de las condiciones o el tiempo en el momento de los monitoreos, de tal forma que apoyen la interpretación de los resultados.

Es de significativa consideración la optimización de recursos para el monitoreo, para lo cual se puede aportar con la selección de las variables de mayor interés, en una categorización de cuencas asociadas a presiones y en otro plazo o periodo de tiempo, a la correlacionabilidad interparamétrica. Si es de aceptación que el punto de cierre de las SZH sea el comparable con las presiones estimadas, además de disponer del referente de la calidad de agua que se entrega a la unidad hídrica subsiguiente, deben abordarse estrategias que permitan capturar de esta forma la información requerida.

Las presiones se van acumulando cuenca abajo, así como la oferta, por lo tanto, es un aspecto para considerar en aquellas cuencas que se encuentran influenciadas por otras aguas arriba. Un análisis en sentido del flujo de agua, que para el caso nacional sería las SZH y regional las unidades subsiguientes, es imprescindible para acercarse a estimaciones realísticas considerando además dentro de la integridad del ciclo hidrológico, la reducción que sobre la oferta ejerce la demanda, y

de esta manera, apreciar los efectos en relación con la valoración de la alteración potencial de la calidad del agua, de tal forma que se puedan correlacionar con los resultados de los monitoreos.

Con el objetivo de complementar y llevar a cabo un monitoreo sistemático y periódico de mayor cobertura a la calidad del agua superficial a través de las redes de monitoreo, es deseable ampliar la cobertura geográfica, la frecuencia temporal de visitas y el número de variables a determinar, máxime si se pretende dinamizar y evolucionar la interpretabilidad de los resultados de calidad hacia el modelamiento. Dicha ampliación o en dado caso una optimización que no necesariamente amerita “una ampliación”, debe responder a priorizaciones de acuerdo con la capacidad institucional y con niveles de presión.

Aunque el monitoreo está supeditado de manera relevante a limitaciones administrativas, se pueden buscar caminos para contrarrestarlas; la gestión por diferentes vías podrá brindar el soporte que permita realizar muestreos de cantidad y calidad del agua en épocas de aguas bajas, medias y altas conforme a las directrices del protocolo de monitoreo del agua, en las desembocaduras de los principales tributarios, con la adopción de acciones por parte de Autoridades Ambientales Regionales y entes territoriales.

Los puntos críticos para considerar se pueden apreciar en la Tabla 4.78. La selección se basó en criterios como la categorización del ICA con resultados del descriptor con calidad mala, en alguno de los casos (de 5 a 7 variables) y considerando los diferentes escenarios hidrológicos monitoreados, de los cuales se tomaron las calificaciones más críticas; así mismo, en los valores que sobrepasaron los umbrales de calidad o concentraciones que llaman la atención, sobre las diferentes variables medidas.

Tabla 4.78. Identificación puntos críticos para el monitoreo en el VMM

UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo	de	Esc. Hidrol	IC	IC	IC	NO2	N-NH3	PO4	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Al	CN-	Mn	Fe	G/A	THC
						A5	A6	A7															
231410	Río	La Colorada (Brisas Oponcito)	La Tempestuosa -Taguales	20	Seca / Normal																		
231410	Río	Sucio	Afluencia a rio Cascajales	21	Seca / Normal																		



UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		Esc. Hidrol	IC	IC	IC	NO2	N-NH3	PO4	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Al	CN-	Mn	Fe	G/A	THC
						A5	A6	A7															
231410	Río	Cascajales	Aguas abajo río Sucio	22	Seca / Normal																		
231410	Río	la Colorada	Limite Tenerife-Vizcaina	25	Seca / Normal																		
231401	Río	Opón	Desembocadura	27	Seca / Normal																		
231404	Río	Opón	A la altura del Caño San Pedro	12	Normal																		
231410	Río	Opón	Aguas abajo Ciénaga del Opon	19	Normal																		
231401	Río	Opón	Barrancabermeja	28	Normal / Húmedo					X	X												
231410	Río	La Colorada	Ayacucho [23147040]	24	Húmedo / Normal					X	X						X				X		X
231402	Río	Opón	Pte Ferrocarril [23147020]	14	Normal / Seco / Húmedo				X	X	X												
240301	Río	Chicamocha	Pte Chámeza [24037290]	7	Normal				X	X	X						X			X	X		
240301	Río	Chicamocha	Paz de Río [24037510]	8	Normal				X	X	X						X				X		
240301	Río	Chicamocha	Capitanejo [24037390]	9	Normal / Seco / Húmedo				X	X	X				X		X	X		X	X		
240129	Río	Suarez	Pte Nacional [24017590]	1	Normal				X	X	X												
240301	Río	Chicamocha	El Jordán [24037360]	10	Normal / Seco / Húmedo				X	X	X						X			X	X		
240116	Río	Suarez	San Benito	2	Húmedo																		
240506	Qda	Betuliana	Desembocadura	5	Normal																		
240301	Río	Chicamocha	San Rafael [24037190]	6	Normal				X	X	X												



UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo	de	Esc. Hidrol	IC	IC	IC	NO2	N-NH3	PO4	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Al	CN-	Mn	Fe	G/A	THC
						A5	A6	A7															
240506	Río	Sogamoso	El Juncal [2405700149]	1	Normal / Húmedo				X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X		
240501	Río	Sogamoso	Puente Sogamoso [24067020]	16	Húmedo					X	X							X			X		X
231923	Río	Vetas	Puente Panega [23197270]	4	Normal				X	X		X		X	X	X	X	X		X	X		
231923	Río	Surata	La Playa	5	Normal / Húmedo				X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X		
231923	Río	Charta	La Playa	6	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	Tona	Pte Tona	7	Normal / Húmedo					X		X	X	X	X	X	X	X		X	X		
231923	Río	Surata	Zaragoza - Bosconia	9	Normal / Húmedo				X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
231923	Río	Surata	Bavaria	10	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	De Oro	Rasgón	12	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	De Oro	RO-O-2PA	15	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	De Oro	RO-P-6A	16	Normal / Húmedo				X							X		X		X	X	X	
231923	Río	Hato	La Batea	17	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	De Oro	Palo Gordo [23197690]	18	Normal / Húmedo				X	X	X							X			X		
231923	Río	De Oro	Bahondo	20	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	Frio	La Esperanza	22	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	Frio	Caneyes	23	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	Frio	RF-G-01	24	Normal / Húmedo				X		X					X		X		X	X		



UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		Esc. Hidrol	IC	IC	IC	NO2	N-NH3	PO4	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Al	CN-	Mn	Fe	G/A	THC
						A5	A6	A7															
231923	Río	De Oro	Puente Nariño	25	Normal / Húmedo				X	X													
231923	Río	De Oro	RO-B-01	26	Normal				X						X		X		X	X			
231923	Río	Lebrija	Bocas	28	Normal / Húmedo				X	X													
231920	Río	Negro	La Virgen	29	Normal / Húmedo					X													
231920	Río	Negro	Brisas	30	Normal / Húmedo					X													
231901	Río	Lebrija Alto	Embalse	31	Normal / Húmedo				X	X													
231922	Qda	Angula	El Aguila	32	Normal / Húmedo				X	X													
231922	Qda	Angula	Palmas	33	Normal / Húmedo				X	X													
231901	Río	Lebrija Alto - Medio	Conchal	34	Normal / Húmedo				X	X													
231921	Río	Salamaga	El Bambu	35	Normal / Húmedo					X													
231924	Río	Cachiri	Las Olas	36	Normal / Húmedo					X													
231924	Río	El Playonero	Balsas	37	Normal / Húmedo					X													
231924	Río	Cáchira Sur	Vanegas	38	Normal / Húmedo				X	X													
231901	Río	Lebrija Medio	Vanegas	39	Normal / Húmedo				X	X													
231909	Qda	La Gómez	Cuenca media	52	Normal / Seco																	X	X
231923	Río	Vetas	Puente Panega	4	Húmedo / Normal				X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		
231923	Río	Surata	Uña de Gato	1	Normal / Húmedo				X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
231923	Río	Surata	Pánaga (Puente Panega)	2	Normal / Húmedo				X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		



UA	Cuerpo de Agua		Punto de Monitoreo		Esc. Hidrol	IC	IC	IC	NO2	N-NH3	PO4	Hg	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Al	CN-	Mn	Fe	G/A	THC
						A5	A6	A7															
231923	Río	Vetas	Borrero	3	Normal / Húmedo				X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
231923	Río	Surata	RSA-B-01	11	Húmedo				X						X				X	X			
231901	Río	Lebrija	San Rafael [23197370]	50	Húmedo / Seco / Normal				X	X	X												
231911	Cño	Negro	Aguas abajo Cnga Yariri	55	Seco / Normal																		
231923	Río	Lebrija	Café Madrid [23197290]	27	Normal / Húmedo				X	X	X												
231901	Río	Lebrija	Angosturas [23197400]	40	Normal / Húmedo				X	X	X												
231913	Río	San Alberto	El Hoyo [23197410]	63	Normal / Húmedo					X	X												
231901	Río	Lebrija	San Juan de los Chorros [2319700096]	62	Normal / Húmedo				X	X	X												
	Río	Magdalena	Barrancabermeja [23157030]	4	Normal / Seco / Húmedo				X	X	X							X		X	X		
231229	Río	Carare	Sta. Rosa [23127060]	1	Seco / Normal / Húmedo				X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X		
231235	Río	Carare	Puerto Parra	2	Normal / Húmedo						X												X
231703	Río	Cimitarra	San Pablo	7	Normal																		
231401	Río	Opón	Barrancabermeja	3	Normal					X	X												< 1
231911	Río	Magdalena	Pto. Wilches [23187010]	6	Normal / Normal					X	X												X
231909	Río	Magdalena	San Pablo - AUT [23207040]	8	Normal / Húmedo					X													
232002	Río	Magdalena	Sitio Nuevo R-11 [23187280]	9	Normal / Húmedo					X	X												



Otra medida importante respecto a mejorar la caracterización de vertimientos, corresponde a la presencia del sector de hidrocarburos especialmente en cuenca media y baja y en afluentes localizados en jurisdicción de la CAS entre otras áreas, al aporte de carga que la demanda para actividades de sacrificio generan y vierten efectivamente a cuerpos de agua, como de las asociadas al cultivo del café y la palma, recalcando finalmente, que es imprescindible el monitoreo de caudales en el momento de la recolección de muestras, con el fin de corroborar en alguna medida, las condiciones de cantidad sobre las cuales se realizará el análisis de calidad del agua.

5. Indicadores hídricos

En este capítulo se presentan los indicadores hídricos obtenidos según la estrategia de modelación adoptada y explicada en el capítulo 2. Además, se presenta la estimación del componente hídrico del caudal ambiental para las unidades de análisis. Por último, se muestran los resultados del índice de uso del agua para las unidades de análisis.

5.1. Oferta Hídrica Total Superficial

La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) se define cómo el volumen de agua por cantidad de tiempo que escurre por la superficie en un espacio definido. Es el agua que integra los sistemas de drenaje superficial, representado en el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora, y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lénticos (IDEAM, 2013). Para determinar la OHTS se definen unidades de análisis, que en el caso del acuerdo AC 04 corresponden a un nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas (ver numeral 1.5) y una resolución temporal anual. La OHTS está determinada por el ciclo hidrológico en cada unidad de análisis, por lo tanto, es el ciclo hidrológico y su distribución espacio – temporal la que define los aspectos conceptuales de la OHTS.

5.1.1 Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija

A continuación, se caracteriza el estado de la OHTS con la información proveniente de la modelación hidrológica en los tramos, subcuencas modeladas y unidades de análisis.

5.1.1.1. Variación espacio-temporal de los caudales

Dentro de la SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena [2319] se reportan un gran rango de caudales. Esto se debe a la acumulación del flujo de escorrentía que se genera en la cuenca y que ha sido estimada en otros estudios en el rango entre 800 y 1000 mm/año, lo que equivale aproximadamente a 9621 Mm³ (IDEAM, 2019) (Duque Gardeazabal, 2021). No obstante, dentro de la SZH existen variaciones de la escorrentía y en consecuencia del caudal registrado en estaciones. En la Tabla 5.1 se muestran los valores del caudal medio anual multianual y del volumen anual multianual que se estimó en algunos de los tramos de importancia dentro de la SZH.

Tabla 5.1 Caudales anuales multianuales en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	Q (m ³ /s)
Rch 1	Río Lebrija Desembocadura Magdalena	216.4
Rch 93	Río de Oro Desembocadura en río Lebrija	17.5
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo Desembocadura en río Lebrija	22.8
Rch 121	Quebrada La Gomez Desembocadura en la ciénaga de Paredes	16.8
Rch 51	Río Cachirí Desembocadura en el río Lebrija	17.2
Rch 52	Quebrada la Santa Desembocadura en ciénaga La Tigra	10.1

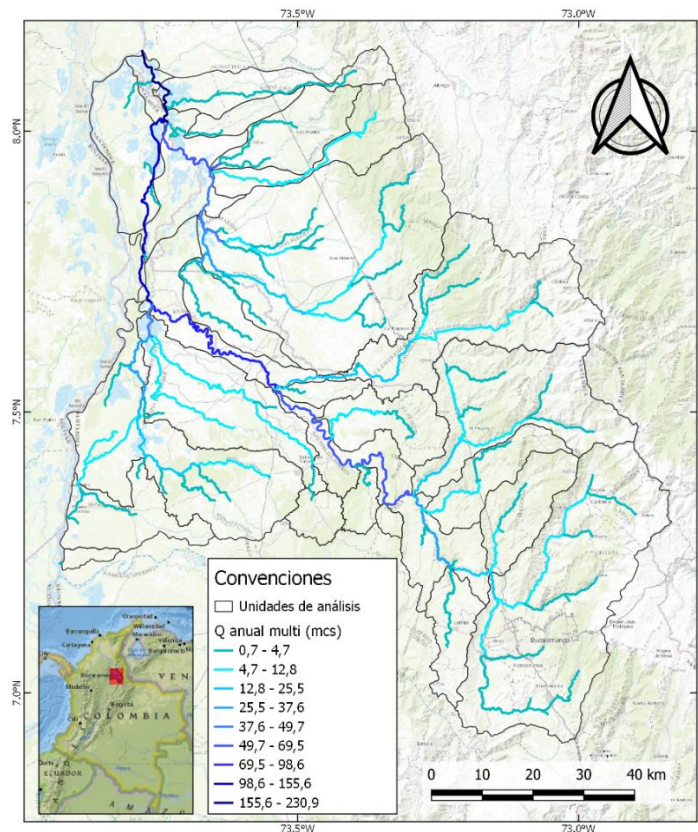


Figura 5.1 Caudal anual multianual en los canales simulados para la SZH del río Lebrija

En el Figura 5.1 se puede ver la ubicación de las estaciones y con la indicación del valor del caudal anual multianual registrado. Es claro que a medida que se acumula el flujo la cantidad del caudal va aumentando debido a que no se identificaron zonas donde se infiltrara el caudal por el lecho del río. Sin embargo, es bueno resaltar que considerando el tamaño de las subcuencas del río Cáchira este transporta bastante agua (en comparación con los demás canales de la SZH).

Con respecto a la variación intraanual de los caudales, se debe resaltar que todos los canales de la cuenca presentan un ciclo bimodal con periodos altos en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. En la Figura 5.2 se muestra esa variación para el canal del río Lebrija que desemboca en el río Magdalena. Este comportamiento concuerda y es producto del régimen climatológico de la zona, que ya ha sido identificado y estudiado anteriormente (Arias, y otros, 2021). En algunos canales el veranillo de mitad de año es más marcado que en otras zonas, dicho veranillo en otras subcuencas no reduce su caudal drásticamente en dicho veranillo (principalmente en algunas subcuencas del sur occidente y en algunas del nororiente).

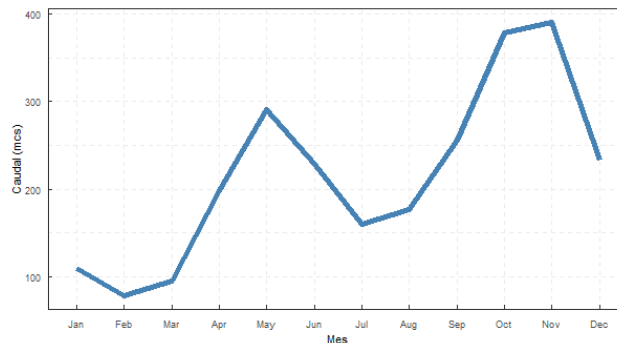


Figura 5.2 Variación intraanual de los caudales para el canal del río Lebrija que desemboca directamente al río Magdalena

Por otra parte, la variación inter-anual debe estudiarse debido a que su origen es la variabilidad climática, y recientes estudios alertan sobre la importancia de su caracterización con propósitos de gestión (Arias, y otros, 2021). De los fenómenos océano atmosféricos que más influye sobre la región del VMM, el ENSO (El Niño Southern Oscillation) es quizás el más importante y estudiado. Sus efectos radican en una intensificación o decaimiento de los valores promedio mensuales de lluvia y caudal. Se presenta a continuación esa variación que, al igual que con la oferta anual y la variación estacional se realiza sobre los registros de las estaciones de caudal.

Tomando en cuenta la importancia de estos fenómenos, se ha desarrollado a partir de las simulaciones una caracterización de esa variabilidad mensual de los caudales. Para cada canal simulado se determinó el coeficiente de variación (CV), de cada mes con las series de tiempo de los caudales mensuales. Igualmente se hallaron y plasmaron en las gráficas los percentiles 0 %, 10%, 50%, 90% y 100% de la misma variable con lo que se pudo evidenciar los rangos de cambio de la variable. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo del análisis realizado para todas las estaciones. Se puede ver también en las imágenes los valores registrados para el año de 1992, un año considerado de afectación debido al fenómeno de El Niño, en el que se evidencia que los caudales en muchos de los meses se encontraron cercanos a los mínimos del periodo de estudio. En este caso particular solo los meses de enero y diciembre registraron valores de caudal cercanos al valor mediano de esos meses. Los meses de marzo-abril y agosto-septiembre son para este caso los meses con mayor CV y por tanto los meses donde más probablemente se presenten caudales alejados del promedio multianual (superan el 40% que ya se considera alto).

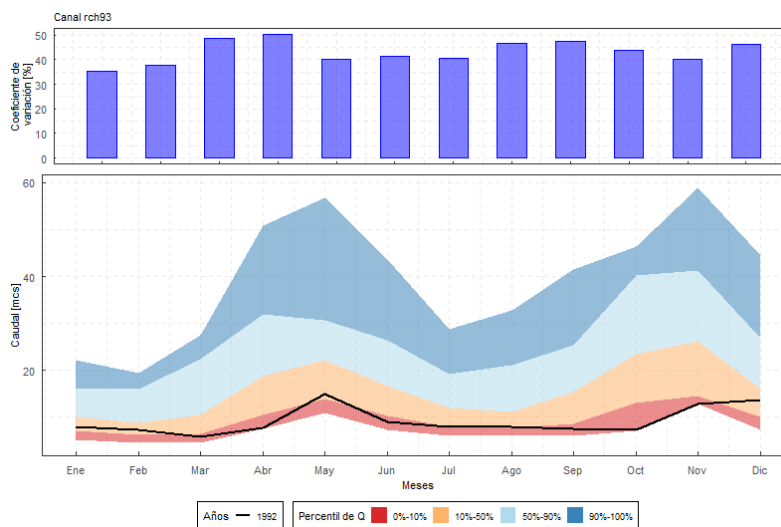


Figura 5.3 Variabilidad de los caudales simulados clasificados por mes para la desembocadura del río de Oro en la SZH del río Lebrija

5.1.1.2. Variación espacio- temporal de la escorrentía en las unidades de análisis

Se describe a continuación la escorrentía y los volúmenes generados en cada unidad de análisis definida para presentar los resultados, así como en las subcuencas utilizadas para la modelación. Se debe hacer la aclaración que los valores que se post-procesaron de los resultados arrojados por

el aplicativo SWAT fueron los correspondientes a la “*producción de agua*” (WYLD), debido a que el aplicativo integra varios flujos que terminan aportando al flujo superficial que llega a los canales. Esto es concordante con la definición de OHTS porque, aunque cierta cantidad de este flujo se ha infiltrado, corresponde al flujo que vuelve a salir a la superficie en un periodo corto de tiempo y termina concentrándose en flujos en cauces y/o almacenándose en cuerpos lénticos.

En la Figura 5.4 se muestra la escorrentía en las subcuencas modeladas, aquellas que se encuentran en la zona sur oriental tienen una menor escorrentía y las del sur occidente las de mayor valor. Se resalta que algunas subcuencas del nororiente, en la zona del río Cáchira y específicamente en el río San Alberto, presentan una alta escorrentía en comparación con sus alrededores (los valores individuales y archivos geográficos se anexan a este documento). Con respecto a la oferta en términos de volumen, se muestra en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.5 los valores para las 24 unidades de análisis en conjunto con la escorrentía ponderada para la cada unidad. Se puede ver que a mayor área de la unidad es mayor el valor de la OHTS, siendo la parte baja del río Cáchira la que tiene mayor volumen. El total de la oferta hídrica en volumen anual es de 7461.4 Mm³.

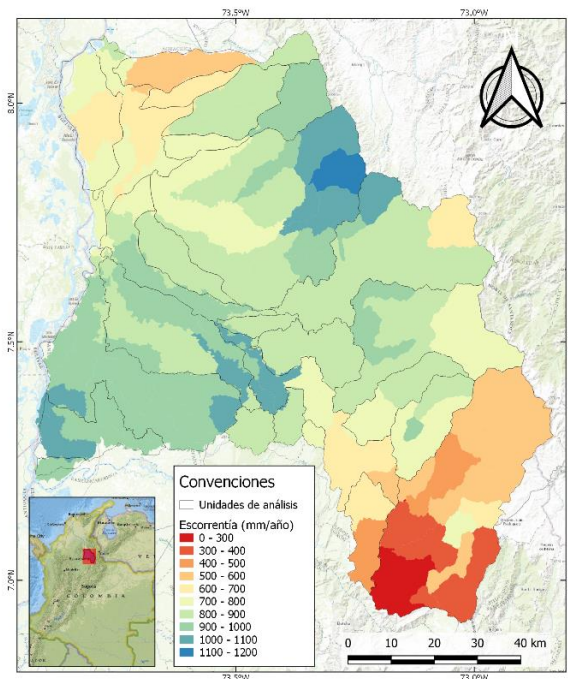


Figura 5.4 Escorrentía simulada en las subcuencas de la SZH del río Lebrija

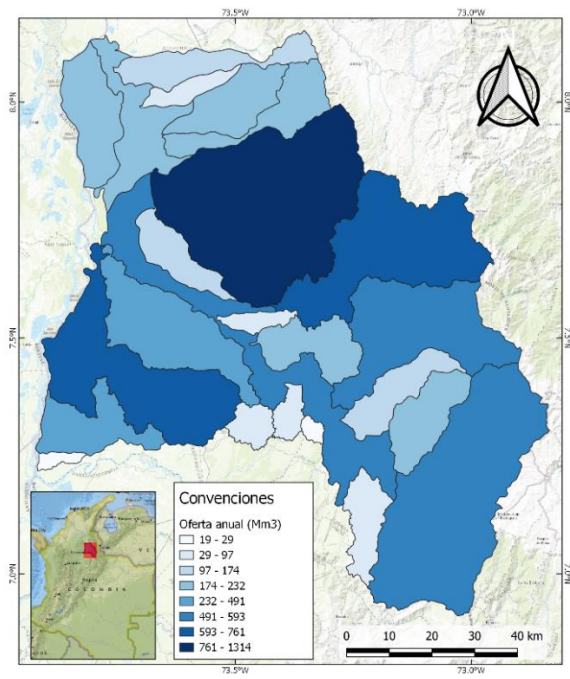


Figura 5.5 Oferta hídrica superficial anual simulada en las unidades de nivel subsiguiente

Tabla 5.2 Valores de oferta hídrica para las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija

Código	Corriente asociada	Oferta (Mm ³)	Código	Corriente asociada	Oferta (Mm ³)
231901	Río Lebrija medio directos	553.0	231913	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte baja)	1175.1
231902	Quebrada Doradas	61.8	231914	Quebrada Torcoroma	169.2
231903	Caño Cuatro	19.5	231915	Quebrada La Huila (Quebrada El Cacao)	140.2
231904	QUEBRADA LA TIGRA	220.2	231916	Quebrada Caimán	45.6
231905	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte media)	717.8	231917	Quebrada Tisquirama - Ciénaga Doña María	139.0
231906	QUEBRADA PLATANALA LA	58.4	231918	Cga Guacamaya, Cga El Roble, Cga La Doncella	205.6
231907	QUEBRADA MUSANDA LA	137.0	231919	Río LEBRIJA BAJO DIRECTOS	198.9
231908	Quebrada La Santa	504.9	231920	Río Negro	190.2
231909	Quebrada La Gómez	792.5	231921	Río Salamaga	154.9
231910	Quebrada Lebrija	70.3	231922	Quebrada La Angula	94.1
231911	Quebrada Trece (Q. Nariño)	270.9	231923	Río de Oro	555.0
231912	Quebrada El Salado	28.6	231924	Río Cachirí	547.6

Con respecto a la variación de la escorrentía, se puede ver que ésta se relaciona directamente con el régimen climatológico de lluvias, el cual es bimodal. Los picos de escorrentía se corresponden con las épocas de lluvia de mayo y octubre (exceptuándose las unidades de la 231916 a la 231919 que presentan el primer pico en el mes de junio). Existen algunas unidades donde el veranillo de mitad de año no es tan marcado como el que se ve de ejemplo en la Figura 5.6, que se ubican en la parte norte de la SZH.

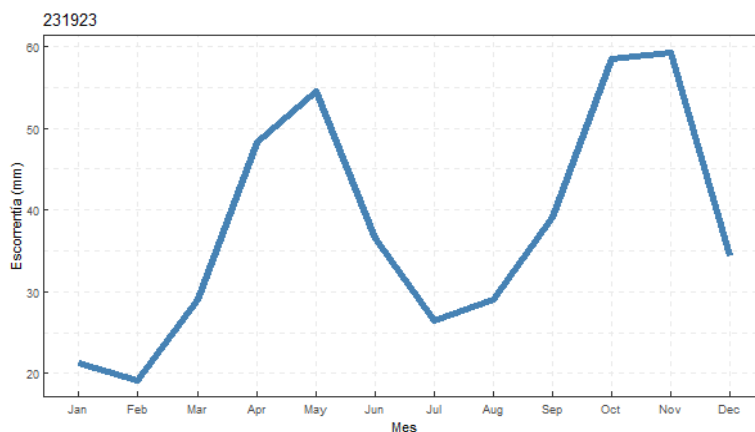


Figura 5.6 Variación intraanual mensual multianual para la unidad del río de Oro en la SZH del río Lebrija

Igualmente, la escorrentía mensual cambia dependiendo de la posición, lo que se representa en la Figura 5.7. Se puede confirmar lo mencionado anteriormente sobre el ciclo bimodal de la cuenca, aunque en la parte suroriental, que corresponde a la parte alta de la cuenca, se puede ver que los aumentos de los meses de mayo y noviembre no son tan notorios. Se resalta que en la zona del río San Alberto al nororiente se presentan escorrentías muy altas en mayo y octubre, que contrastan con lo que ocurre en otras corrientes que bajan de la cordillera como lo son el río Cachira y el Cachira sur. La zona noroccidental es bastante seca en los meses de febrero y marzo pero en las temporadas lluviosas mantiene unos niveles similares a otras subcuencas. En la zona suroccidental se presentan niveles altos de escorrentía durante la mayor parte del año, sobre todo en octubre.

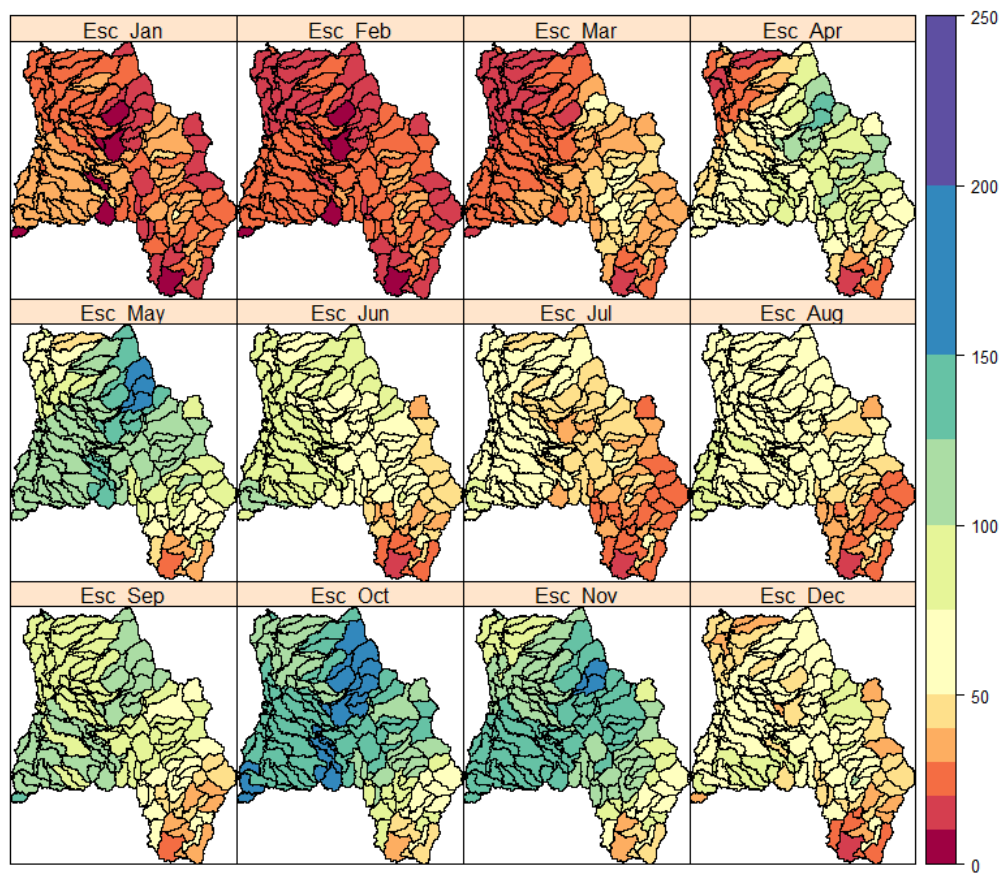


Figura 5.7 Variación espacial de la escorrentía mensual multianual en milímetros

Con respecto a la variabilidad interanual se debe resaltar que para las unidades de nivel subsiguiente que se encuentran al suroccidente, sin importar el año, en los meses de enero y febrero siempre se presentan valores muy bajos. En la Figura 5.8, se puede ver lo mencionado y que por el contrario los meses de julio y agosto tienen grandes variaciones dependiendo del año consultado. Se ha de resaltar que a mayor variabilidad haya en un mes es un indicativo de que pueden existir mayores cambios en la tendencia de la disponibilidad de agua que se presenta en la zona en un año particular. Lo anterior está influenciado por las condiciones oceano atmosféricas que influyen sobre la región y que se estudian a través de pronósticos estacionales.

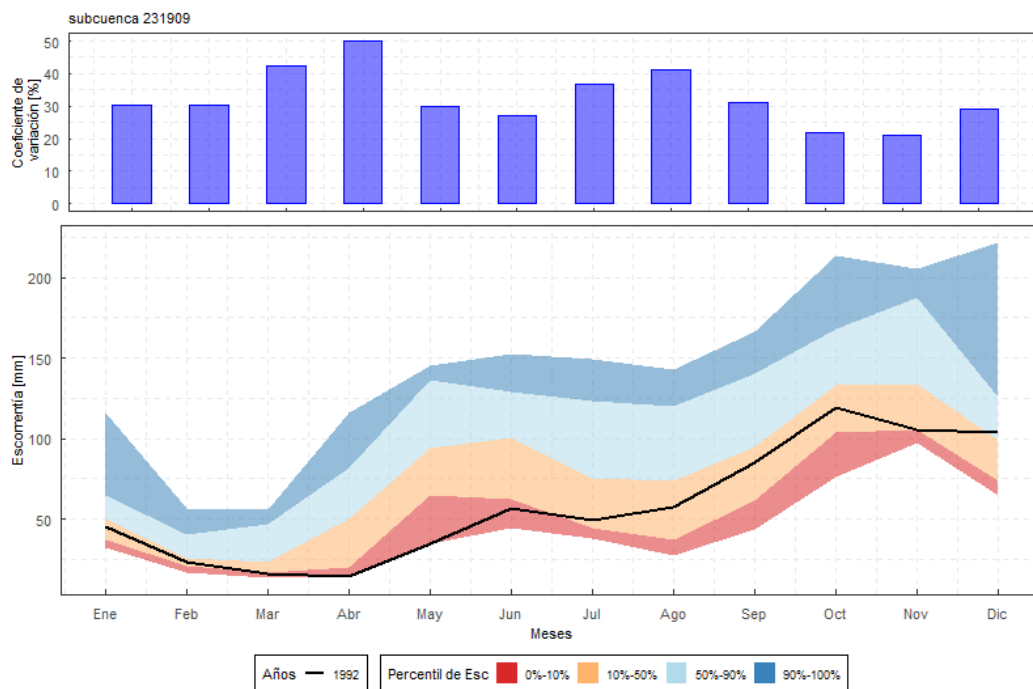


Figura 5.8 Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de la Quebrada La Gómez en la SZH del río Lebrija

5.1.2. Resultados en la subzona hidrográfica del río Opón

5.1.2.1. Variación espacio – temporal de los caudales

En la subzona hidrográfica del río Opón producto de la modelación hidrológica se obtuvieron los caudales en 52 tramos de río asociados a la red principal del drenaje de la subzona. A partir de estos resultados se reconoció la variabilidad espacial de estos caudales en toda la extensión de la

subzona. Existe un rango muy variado de caudales en los principales ríos, el caudal medio anual multianual va desde aproximadamente 1.5 m³/s hasta cerca de 161 m³/s estimados sobre el río Opón en su desembocadura al río Magdalena. La distribución espacial de los tramos de río y de los caudales medios anuales multianuales es presentado en la Figura 5.9.

En la Figura 5.9 es evidente el efecto de acumulación de caudales que se produce en tramos contiguos hacia aguas abajo de un mismo río, por esto las corrientes principales como el río Opón y el río La Colorada toman valores cada vez más altos hasta la desembocadura en el río Magdalena.

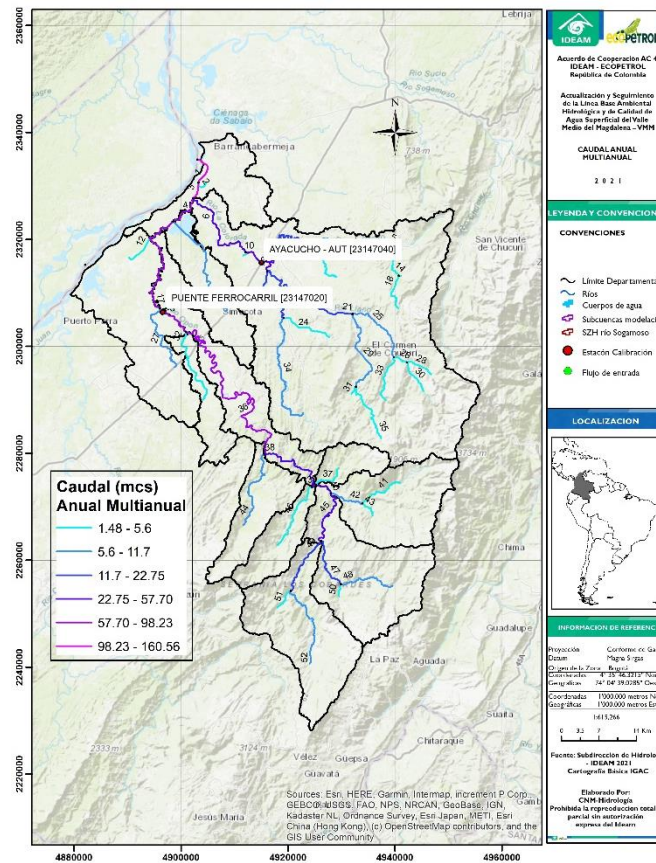


Figura 5.9 Caudal anual multianual en los cauces de la SZH del río Opón

En cuanto a la variación intra-anual de los caudales, se evidenció que en la totalidad de los cauces se presenta un ciclo bimodal con dos periodos de altas afluencias en los bimestres abril – mayo y octubre – noviembre. Las más bajas afluencias en el periodo intra-anual se presentan en general en

el trimestre diciembre-enero-febrero. El comportamiento hidrológico evidenciado es producto del régimen climatológico de la zona, siendo coincidentes con los picos de precipitación que se presentan en la región. Los valores mensuales multianuales y el valor anual multianual de las corrientes principales de la SZH del río Opón son presentados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Opón

Cauce	Corriente	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AA
1	Río Opón desembocadura al río Magdalena	28.0	41.6	90.5	165.6	223.3	166.5	122.5	151.2	228.1	285.1	256.9	108.2	155.6
6	Río La Colorada, desembocadura al río Opón	8.4	12.1	30.4	57.0	77.1	57.5	40.4	51.5	79.0	101.4	94.1	39.3	54.0
9	Río Oponcito	2.1	3.6	9.1	15.8	20.7	15.4	10.5	13.6	21.0	27.8	26.1	10.8	14.7
11	Río La Colorada hasta la estación Ayacucho	7.5	11.5	28.0	52.3	69.7	51.9	37.2	47.2	72.0	92.3	84.6	35.2	49.1
23	Río Opón hasta estación punete Ferrocarril	15.2	24.4	46.8	83.1	108.0	81.3	63.2	73.8	109.1	132.4	116.3	50.6	75.4
27	Quebrada Aguas Negras	1.3	1.7	3.7	7.2	9.5	6.8	4.5	6.0	9.8	12.9	11.4	4.9	6.6
37	Río Verde	0.5	0.8	1.7	3.2	4.2	3.0	2.6	3.1	4.5	5.3	4.4	1.8	2.9
40	Quebrada Aragua	9.1	14.9	27.1	49.8	64.6	48.6	39.3	45.1	64.4	77.2	66.0	28.4	44.5
44	Río Blanco	1.6	2.7	5.0	8.3	10.3	8.0	6.3	7.2	10.7	13.0	11.8	5.2	7.5
46	Quebrada Negra de Armas	1.2	2.1	4.0	6.7	8.1	6.2	4.6	5.4	8.0	9.6	8.6	3.9	5.7
49	Río Quirará	3.6	6.0	9.7	19.1	24.9	20.0	15.2	16.4	23.3	27.0	23.5	10.7	16.6

Adicionalmente, a partir de los caudales simulados se hizo la caracterización de la variabilidad mensual de estos. Para ello se estimaron para cada mes, partiendo de las series de tiempo de caudales mensuales: los percentiles 0%, 10%, 50%, 90% y 100 y el coeficiente de variación (CV). En la Figura 5.10 se presenta a modo de ejemplo el análisis para los caudales del tramo del río Opón que desemboca en el río Magdalena en el cual se tiene la cuantificación de toda la oferta de la SZH.

El río opón en su desembocadura para el año 1983 considerado un año de baja afectación por el fenómeno del niño, se registraron caudales mayoritariamente por debajo de la mediana de los caudales históricos allí estimados, tan solo el mes de abril estuvo levemente por encima del percentil 50%. En el mes de noviembre se alcanzó el valor mínimo histórico. Adicionalmente, los

meses de enero, febrero y diciembre son los meses con mayor coeficiente de variación ($CV > 40\%$), por lo que es precisamente en estos meses en los que pudiese esperarse tener valores alejados del promedio mensual multianual.

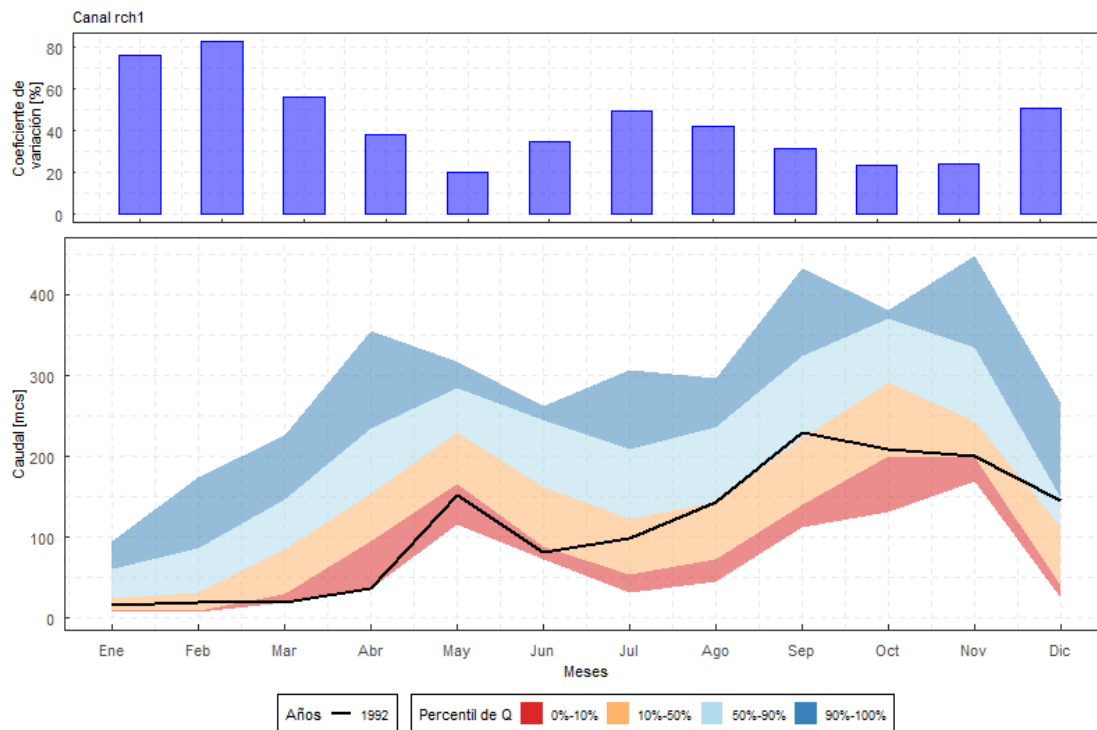


Figura 5.10 Variabilidad interanual de los caudales del río Opón

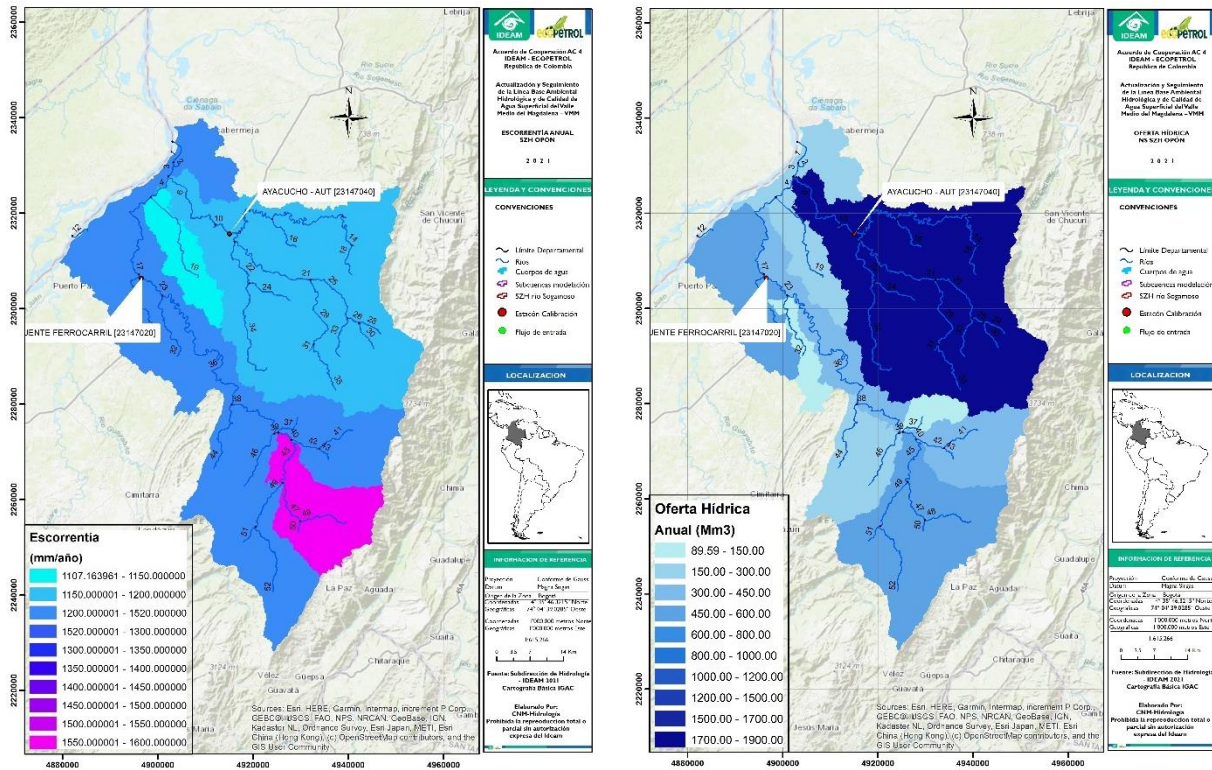
Adicionalmente, se aprecia que en el mes de septiembre considerado un mes de transición hacia el segundo bimestre de altas afluencias del año ha llegado a tener afluencias inclusive superiores a las del mes de octubre, probablemente bajo el efecto de la incidencia de un fenómeno de La Niña en la región. Los diagramas de variabilidad interanual fueron realizados para la totalidad de los tramos de río modelados y los resultados se encuentran en los anexos del presente documento.

5.1.2.2. Variación espacio – temporal de la escorrentía

La escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente la SZH del río Opón fluctúa entre los 1,100 y 1,600 mm/año, destacándose la cuenca del río *Opón entre San Joaquín y La Tablona* con una escorrentía anual promedio de 1588. Esta cuenca de nivel subsiguiente se encuentra localizada en sur de la SZH, lugar en el que se presentan las mayores precipitaciones de

toda la SZH superando los 3,000 mm/año. En cuanto a la cuenca con la menor escorrentía, esta corresponde a la cuenca del *Complejo de la Ciénaga del Opón* en la que se contabilizó una escorrentía media de 1,107 mm/año. En general son las cuencas localizadas al sur de la SZH las que presentan mayor escorrentía. En la Figura 5.11 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual en la SZH del río Opón.

La oferta hídrica en volumen es estimada como el producto de la escorrentía por el área de cada cuenca de primer nivel subsiguiente. Los resultados anuales multianuales en millones de metros cúbicos (Mm³) también son presentados en la Figura 5.11. En volumen es la cuenca de del río La Colorada la que aporta un mayor volumen en un año promedio en la SZH del río Opón.



a) Escorrentía (mm)

b) Volumen (Mm³)

Figura 5.11 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis

El volumen total estimado para la SZH del río Opón es de 5,466 Mm³ lo cual es un 17 % inferior a la oferta estimada mediante el balance hídrico de largo plazo en el ENA 2018 para esta SZH en el escenario de año medio (6,575 Mm³)(IDEAM, 2019) . Las diferencias entre el volumen anual multianual estimado para el ENA y la esorrentía obtenida mediante el modelo SWAT radican en la metodología de la estimación, puesto que la estimación del ENA se realiza mediante un balance hídrico de largo plazo, en escalas temporales y espaciales mucho menos detalladas que las utilizadas para la modelación en SWAT. Las agregaciones espacio-temporales realizadas para el balance hídrico de largo plazo pueden generar una sobreestimación de la esorrentía en una SZH, pues se obvia procesos hidrológicos que pueden tener relevancia para una SZH específica. En la Tabla 5.4 se presenta el detalle de la esorrentía y volumen anual multianual para las 12 cuencas de nivel subsiguiente.

Tabla 5.4 Oferta hídrica (esorrentía y Volumen) anual multianual en unidades espaciales de análisis

Código	Cuencas de nivel subsiguiente	AA_mm/año	AA_Mm ³
2314-01	Complejo Humedal Juan Esteban	1206.6	236.1
2314-02	Complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras	1266.2	505.2
2314-03	Quebrada la India	1294.1	134.6
2314-04	Directos al Río Opón entre Vereda La Honda y Ciénaga del Opón	1273.2	384.3
2314-05	Río Blanco	1436.3	244.8
2314-06	Quebrada Negra de Armas	1468.8	182.3
2314-07	Río Quiratá	1482.5	525.7
2314-08	Río Opón entre San Joaquín y La Tablona	1453.7	540.8
2314-09	Quebradas La Aragua y La Colorada	1325.0	366.1
2314-10	Río La Colorada	1082.9	1775.7
2314-11	Complejo Ciénaga del Opón	1193.8	229.7
2314-12	Río La Verde	1203.6	88.9

En cuanto a la variación mensual multianual de la esorrentía, se observó que esta coincide con el régimen climatológico de la precipitación, presentando sus picos en los meses de mayo y octubre y teniendo un comportamiento bimodal. En todas las cuencas los valores más bajos de esorrentía corresponden a los meses del trimestre diciembre-enero-febrero y en los meses de junio-julio-

agosto, siendo el primer trimestre el que presenta las escorrentías más bajas del año. Las tablas con los valores medios mensuales multianuales de escorrentía son anexadas al presente informe.

La variabilidad interanual fue evaluada de la misma manera en que fueron evaluados los caudales en el capítulo anterior. A partir de los estadísticos determinados fue posible evidenciar que en general para las cuencas de esta SZH, en los meses en los que se observó las escorrentías más bajas se identificaron las mayores variabilidades estos son: enero, febrero, julio, agosto y diciembre. Estas altas variabilidades pueden ser interpretadas como un indicativo de que puede existir mayores fluctuaciones en la disponibilidad del recurso en estos meses y pueden deberse a la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática. En la Figura 5.12 se presenta como ejemplo la variabilidad de la cuenca del Río La Colorada. Las demás gráficas se encuentran en los anexos del documento.

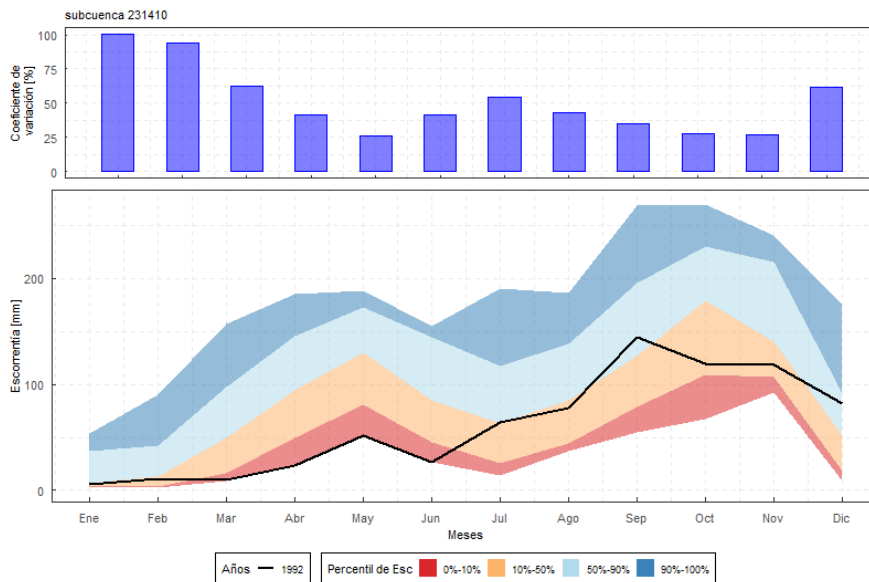


Figura 5.12 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca del río La Colorada

5.1.3. Resultados en la subzona hidrográfica del río Sogamoso

5.1.3.1. Variación espacio – temporal de los caudales

La modelación hidrológica semidistribuida de la SZH del río Sogamoso contempló la estimación de la oferta hídrica de 65 tramos de río o cauces, los cuales fueron utilizados para la revisión de la variabilidad hidrológica espacial y temporalmente. El rango de caudales en esta SZH es aún más

amplio que el que se obtuvo para la SZH del río Opón, esto debido a que esta subzona corresponde a la parte baja de la Zona Hidrográfica del Río Sogamoso y está constituida a partir de la confluencia de dos grandes ríos el Chicamocha y el río Suárez.

La modelación hidrológica de esta SZH debido a la construcción y entrada en operación del embalse de Topocoro y la hidroeléctrica del río Sogamoso en el año 2014, fue abordada en dos escenarios/etapas. En el primer escenario/etapa se ajustó el modelo para las condiciones previas al año 2014 lo que supuso resultados para una condición natural de flujo. El segundo escenario para el periodo 2014-2019 en el cual los caudales resultado de la primera etapa fueron ajustados con base en la información de generación y vertimientos reportada por ISAGEN a XM y adicionalmente contemplando las afluencias de los río aguas abajo del sitio de presa. De este modo, se obtuvieron las series de caudal para el periodo 1983-2019, en los tramos del río Sogamoso.

Los caudales medios anuales multianuales para los río de la SZH varían entre 0.5 y 517 m³/s . La distribución espacial de los tramos de río en los que se obtuvieron resultados y sus caudales medios anuales multianual resultado de la modelación son presentados en la Figura 5.13. Cabe resaltar que gran parte de los caudales transitados por el cauce principal del río Sogamoso provienen de los registros de caudal de los ríos afluentes que aguas arriba lo conforman (Suarez, Fonce y Chicamocha).

El cauce principal del río Sogamoso desde el ingreso al área delimitada como SZH, ya tiene el tránsito de un caudal medio anual multianual de un poco más de 440 m³/s y es evidente el efecto de acumulación de caudales que se produce en los tramos del río contiguos hacia aguas abajo, hasta alcanzar su desembocadura al río Magdalena un caudal medio anual multianual de aproximadamente 515 m³/s.

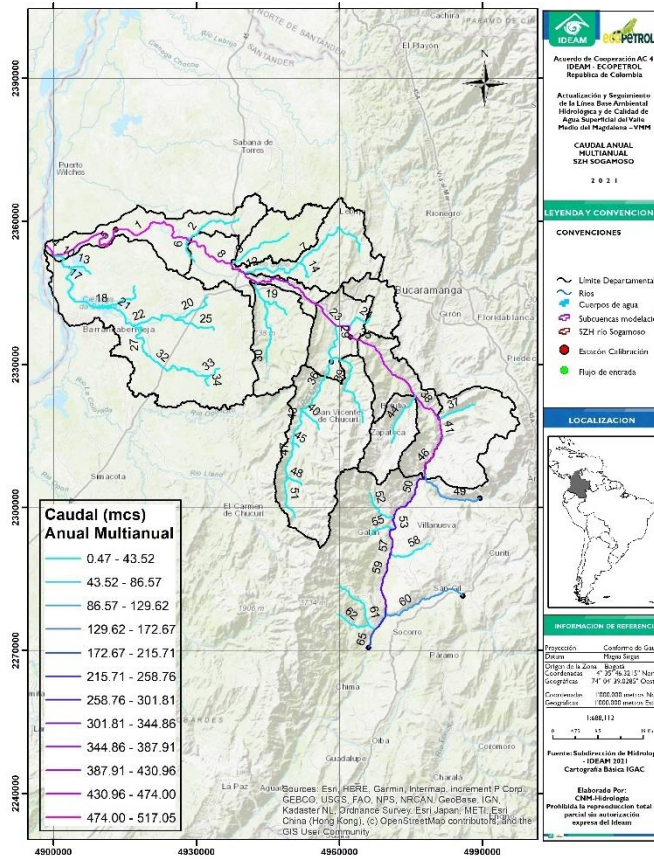


Figura 5.13 Caudales anuales multianuales en los cauces de la SZH del río SOGAMOSO

La variación intra-anual de los caudales presenta un ciclo bimodal con dos periodos de altas afluencias en los bimestres abril – mayo y octubre – noviembre, los cuales coinciden con los picos de precipitación que se presentan en la región. Las más bajas afluencias en el periodo intra-anual se presentan en general en los bimestres enero-febrero y julio-agosto, en este último bimestre se presenta una reducción más marcada de las afluencias respecto a lo evidenciado en la SZH del río Opón. Los valores mensuales multianuales de caudal en m³/s y el valor anual multianual de las corrientes principales de la SZH del río Sogamoso son presentados en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Sogamoso



Cauce	Corriente	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AA
1	Río Sogamoso hasta estación PTE SOGAMOSO	223.9	242.5	329.2	556.0	706.0	515.8	398.5	396.3	495.7	719.3	699.3	427.8	475.9
2	Quebrada Cayumba	0.4	0.3	0.6	2.0	3.2	2.2	1.1	1.6	3.1	5.0	4.5	1.7	2.2
4	Río Sogamoso en desembocadura al Magdalena	231.2	246.4	335.6	568.9	744.9	557.0	419.7	415.7	528.9	775.9	759.8	462.5	503.9
9	Caño Corazones	0.8	0.7	1.2	3.7	5.7	3.7	1.9	2.5	5.1	8.9	8.3	3.6	3.8
12	Río Sucio	1.2	1.0	1.4	3.5	5.9	3.4	1.8	2.0	4.0	9.6	10.3	4.2	4.0
16	Quebrada La Putana	1.1	1.1	1.7	4.5	6.8	4.1	2.3	3.0	6.3	10.9	10.1	3.8	4.6
21	Quebrada La Vizcaína	4.4	3.5	6.6	14.5	25.7	20.9	11.2	11.9	23.4	38.3	37.2	17.6	17.9
22	Quebrada Zarzal	1.6	1.2	2.2	5.0	9.2	7.4	3.8	4.2	9.0	15.1	14.7	6.5	6.7
24	Quebrada Pujaman y Aguablanca	0.4	0.4	0.6	1.0	1.3	0.7	0.5	0.6	1.0	2.5	2.7	1.1	1.1
35	Río Sogamoso hasta estación EL TABLAZO	200.1	214.6	324.4	563.6	677.9	485.3	382.5	367.0	448.1	688.4	660.7	375.3	449.0
36	Río Chucurí	2.0	3.9	8.5	15.0	16.9	10.3	7.7	10.7	16.5	23.6	20.0	7.7	11.9
39	Quebrada el Ramo	0.7	0.6	1.0	2.0	3.1	2.1	1.3	1.4	2.4	5.4	5.3	2.2	2.3
44	Quebrada Zapatoaca	0.2	0.3	0.4	1.0	1.5	1.0	0.8	1.0	1.9	3.6	3.1	0.8	1.3

En cuanto a la escala interanual se hizo la caracterización de la variabilidad mensual de los caudales al igual que en los demás cauces a partir de la estimación de los percentiles 100%, 90%, 50%, 10%, 0% y los coeficientes de variación para cada mes. En la Figura 5.14 se presenta cada uno de los estadísticos estimados y se imprime los valores mensuales multianuales del año 1983 considerado un año medio con una leve influencia del fenómeno del niño al comienzo de este, para el tramo de río correspondiente a la desembocadura del río Sogamoso al río Magdalena.

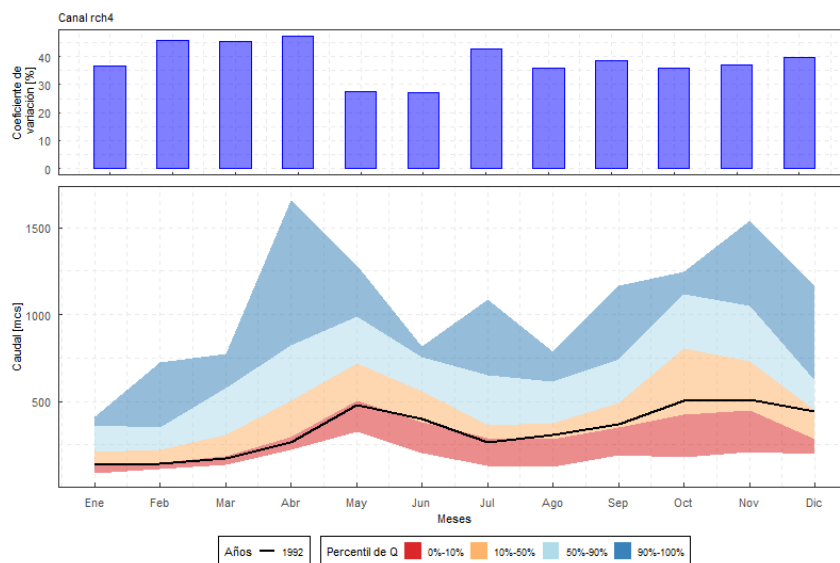


Figura 5.14 Variabilidad interanual de los caudales del río Sogamoso

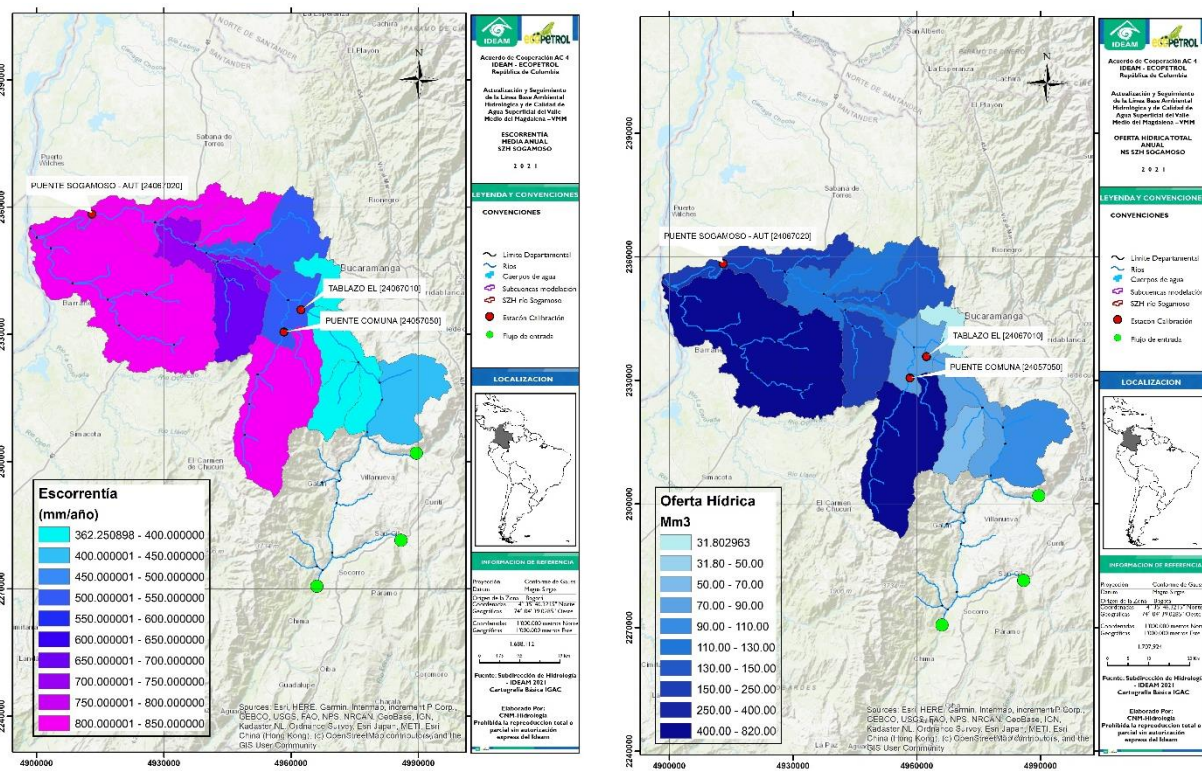
El coeficiente de variación para los meses de febrero, marzo, abril, julio y diciembre es superior al 40% lo cual se considera alto, por lo que probablemente en estos meses se presenten valores alejados del promedio mensual multianual correspondiente a cada uno de ellos. Para el año 1983 los caudales fueron significativamente superiores a la mediana en los meses de altas afluencias y en los meses de julio, agosto y septiembre, fue en los que se pudo percibir los efectos del fenómeno de variabilidad climática que se presentó, pues los valores registrados se encuentran por abajo de la mediana.

5.1.3.2. Variación espacio – temporal de la escorrentía

En lo que respecta a la escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente la SZH del río Sogamoso, esta varía en el rango entre los 360 y 850 mm/año, destacándose las cuencas de la parte baja de la SZH y la cuenca del río Chucurí en la que se presentan las mayores escorrentías anuales promedio. La cuenca con la menor escorrentía corresponde a la cuenca de la quebrada Aguablanca y Pujaman en la que se contabilizó una escorrentía media de 362 mm/año. En la Figura 5.15 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual en la SZH del río Sogamoso.



La oferta hídrica anual multianual en volumen estimada como el producto de la escorrentía por el área de cada cuenca de primer nivel subsiguiente, es presentada en la Figura 5.15 en millones de metros cúbicos (Mm³). En volumen es la cuenca del complejo de la Ciénaga de San Silvestre la que aporta un mayor volumen anual en la SZH del río Sogamoso.



a) Escorrentía (mm)

b) Volumen (Mm³)

Figura 5.15 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis río Sogamoso

El volumen total estimado para la SZH del río Sogamoso es de 2,357 Mm³, lo cual es inferior a la oferta estimada mediante el balance hídrico de largo plazo en el ENA 2018 para esta SZH en el escenario de año medio (3,575 Mm³)(IDEAM, 2019), lo cual es justificado por las mismas razones expuestas en la SZH del río Opón. En la Tabla 5.6 se presenta el detalle de la escorrentía y volumen anual multianual para las 12 cuencas de nivel subsiguiente.

Tabla 5.6 Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades de análisis Sogamoso.

Código	Cuenca Nivel Subsiguiente	AA_mm	AA_Mm3
2405-01	Río Sogamoso entre Cayumba y el Río Magdalena	824.4	220.5
2405-02	Complejo Ciénaga San Silvestre	862.7	847.2
2405-03	Quebrada La Putana	675.8	155.0
2405-04	Río Chucurí	851.2	437.5
2405-05	Quebrada Zapatoca	309.7	41.7
2405-06	Quebrada La Betuliana y otros directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso	311.2	69.0
2405-07	Directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)	245.2	63.0
2405-08	Quebradas Aguablanca y Pujaman	337.5	29.6
2405-09	Río Sucio	545.0	135.4
2405-10	Quebradas Caño Corazones y Payoa	823.8	124.8
2405-11	Río Sogamoso entre Hidrosogamoso y Cayumba	712.2	118.8
2405-12	Hidrosogamoso	501.7	84.3

La variación mensual multianual de la escorrentía se relaciona directamente con el régimen climatológico bimodal de la precipitación en esta región. Se presenta un régimen bimodal con sus picos en los meses de mayo y octubre. En toda la SZH del río Sogamoso los valores más bajos de escorrentía se presentan en los meses enero y febrero.

Respecto a la variabilidad interanual evaluada a través de los percentiles 100,90,50,10 y 0% y de los coeficientes de variación para cada mes se evidenció que en general para las cuencas de esta SZH, en los meses febrero, marzo, agosto y diciembre se tienen las mayores variabilidades. En la Figura 5.16 se presenta como ejemplo la variabilidad de la cuenca *Directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta*.

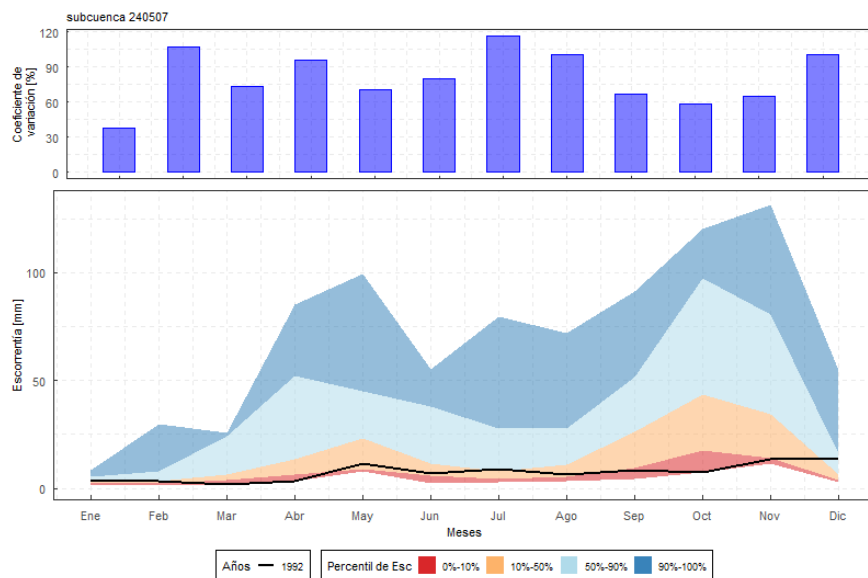


Figura 5.16 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca 2405-07

5.2. Índice de regulación hídrica e índice de aridez

Los índices hidroclimáticos analizados con base en los resultados de la modelación hídrica son el índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de aridez (IA).

El IRH corresponde a la medición de la respuesta de la cuenca a los impulsos de lluvia a escala diaria y refleja la capacidad de la cuenca aferente de atenuar los picos de caudal. Por esta razón es importante caracterizar su valor para los tramos y subcuencas que se modelaron. Su cálculo se basa en la relación de dos áreas bajo la Curva de Duración de Caudales (CDC) (IDEAM, 2019).

El IA muestra la propensión de una zona a tener suficiencia o insuficiencia de disponibilidad de agua para el sostenimiento de los ecosistemas. Existen muchas formulaciones, pero en varios estudios del IDEAM se ha utilizado la relación entre la energía atmosférica no consumida en evaporación de agua y la energía disponible para esa evaporación (IDEAM, 2019). Esto se representa con la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

A continuación, se presentan los resultados para las subzonas hidrográficas analizadas.

5.2.2. Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija

5.2.2.1 Índice de Regulación Hídrica (IRH)

En la Figura 5.17 se muestra la CDC, para uno de los canales simulados. Se puede ver que para el agua que fluye por dicho canal, la diferencia entre el percentil 70% y el 100% del tiempo no es significativa mientras que el flujo correspondiente al 20% del tiempo si tiene un aumento con respecto a sus predecesores. Los caudales con menor ocurrencia que este percentil crecen rápidamente.

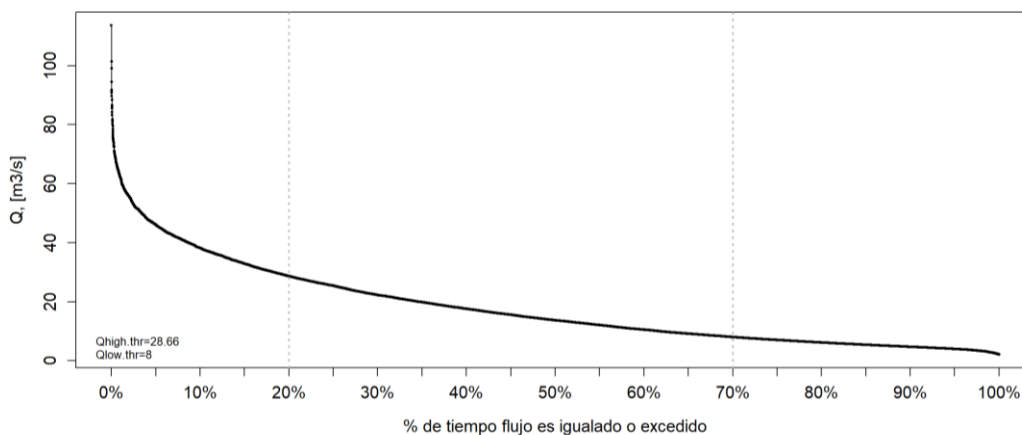


Figura 5.17 CDC diaria de los caudales simulados en la desembocadura del río Cachirí en el río Lebrija

Con los datos calculados para formar la CDC se calculó y clasificó el IRH, que puede verse para algunos canales de importancia en la Tabla 5.7 y en la Figura 5.18 para toda la SZH. Se puede ver que la mayoría de las corrientes tienen una regulación moderada y que varias corrientes que bajan de la cordillera tienen una regulación baja, posiblemente debido a que son cuencas con altas pendientes y con pocas zonas para retener flujos de caudal. Unos cauces de la llanura en la zona occidental se clasifican como regulación alta, que puede ser concordante con las zonas de almacenamiento producidas por la baja pendiente. Se debe resaltar nuevamente que varios de los canales que se encuentran al norte o aguas debajo de las estaciones San Rafael y El Hoyo no cuentan con calibración del tránsito del caudal. Por ejemplo, la zona de ciénagas que se encuentra al norte de la SZH puede generar una mayor retención y regulación de los caudales, aumentando

el IRH; sin embargo, esto no es posible constatarlo con la información producida por la modelación hidrológica de la zona.

Tabla 5.7 Índice de Regulación Hídrica en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	IRH	IRH Clasificación
Rch 1	Río Lebrija Desembocadura Magdalena	0.75	MODERADA
Rch 93	Río de Oro Desembocadura en río Lebrija	0.76	ALTA
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo Desembocadura en río Lebrija	0.71	MODERADA
Rch 121	Quebrada La Gomez Desembocadura en la ciénaga de Paredes	0.77	ALTA
Rch 51	Río Cachirí Desembocadura en el río Lebrija	0.71	MODERADA
Rch 52	Quebrada la Santa Desembocadura en ciénaga La Tigra	0.70	MODERADA

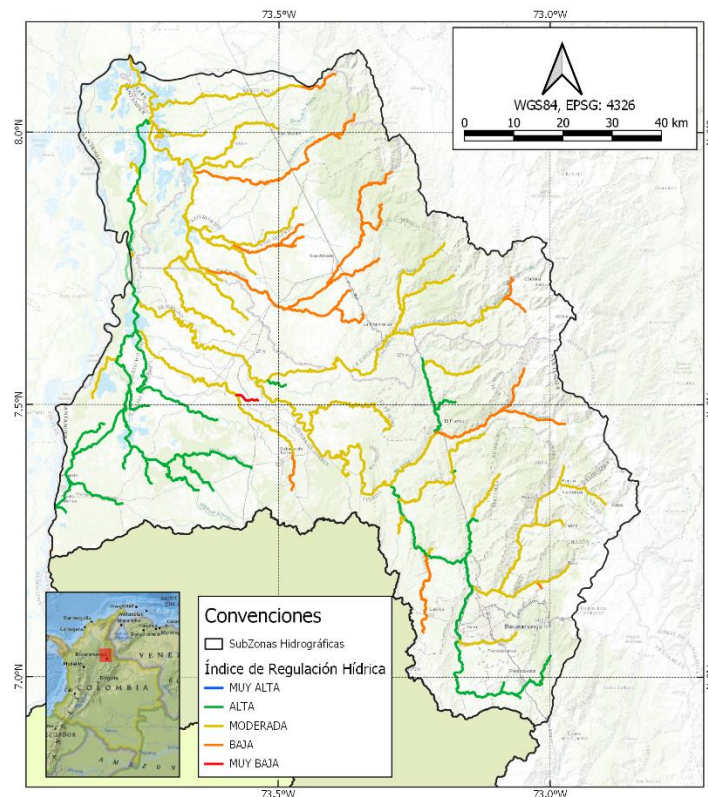


Figura 5.18 Índice de Regulación Hídrica en los canales simulados en la SZH del río Lebrija

Se debe resaltar que la estimación de la regulación ha sido posible únicamente debido a que la modelación hidrológica se realizó a escala diaria y a que tiene en cuenta procesos de tránsito del caudal (calibrados en la mayoría de las subcuencas planteadas en la modelación).

5.2.2.1 Índice de aridez (IA)

A través de los resultados de la modelación realizados con el aplicativo SWAT, se pudo estimar a nivel de subcuenca el índice de aridez para la SZH del río Lebrija. Las series de evapotranspiración potencial y real estimadas en las subcuencas fueron el insumo para calcular el IA, que previamente se llevaron a las unidades de análisis de nivel subsiguiente para hacer el cálculo en esos polígonos. En la Figura 5.19 se puede ver que la SZH tiene la mayor parte clasificada en “moderados de agua”, y existen algunas zonas con índices “moderados a deficitarios de agua”. En la parte alta, correspondiente al área del río de oro, se encuentra también el río Vetas, el Surata y el páramo de Santurbán; allí se registra un índice en la categoría de “moderados de agua”. En el ENA 2018 se estimaba que la zona sur se clasificaba como excedentes de agua, probablemente a que la precipitación en esa zona está un poco sobreestimada por el producto satelital usado.

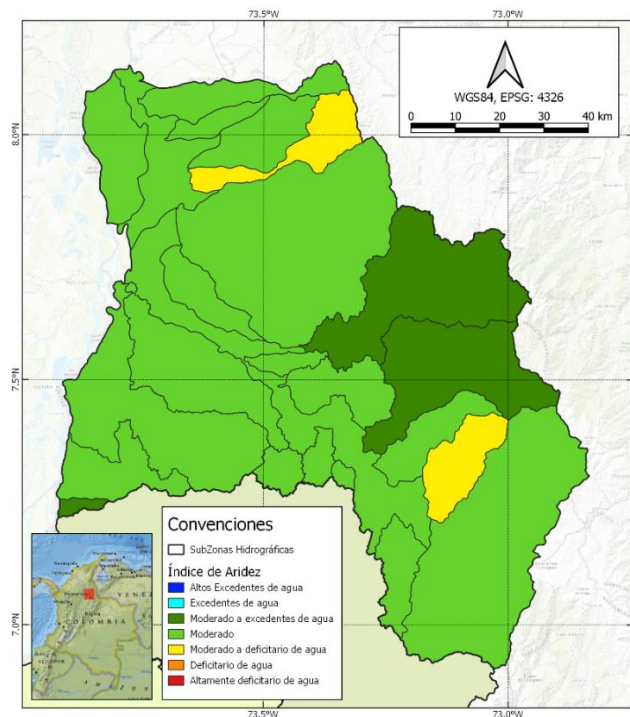
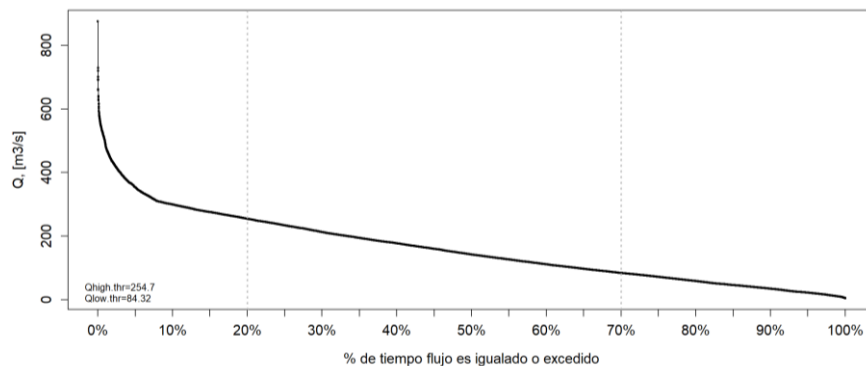


Figura 5.19 Índice de aridez en las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija

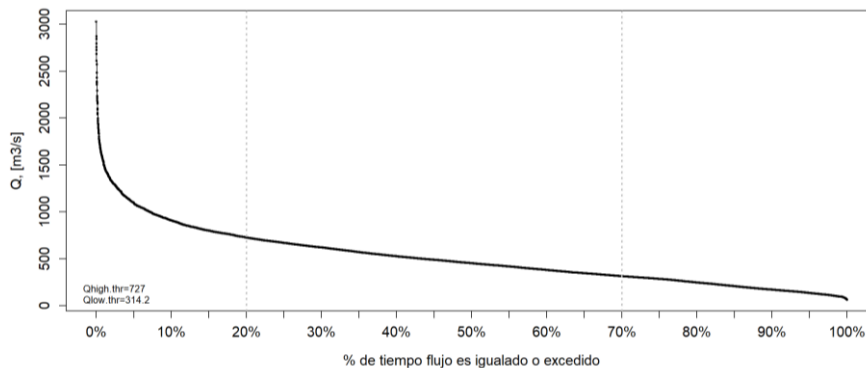
5.2.2. Resultados en las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

5.2.2.1 Índice de Regulación Hídrica (IRH)

En la Figura 5.20 se presenta la Curva de duración de caudales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón en las cuales se puede apreciar las diferencias en las pendientes y en la forma en que se genera el escurrimiento en cada una de las SZHs.



a) Tramo del río Opón en su desembocadura



b) Tramo del río Sogamoso en su desembocadura

Figura 5.20 Curvas de duración de caudal en tramos de ríos Opón y Sogamoso

Se generó la CDC para cada uno de los tramos modelados en las dos SZHs, con los valores obtenidos se calculó el IRH y se categorizó según los rangos presentados en la Tabla 5.8. Los valores de IRH obtenidos y la categoría asignada de algunos de los principales ríos de la SZH del río Sogamoso son presentados en la Tabla 5.9.

Tabla 5.8 Clasificación IRH de los ENA

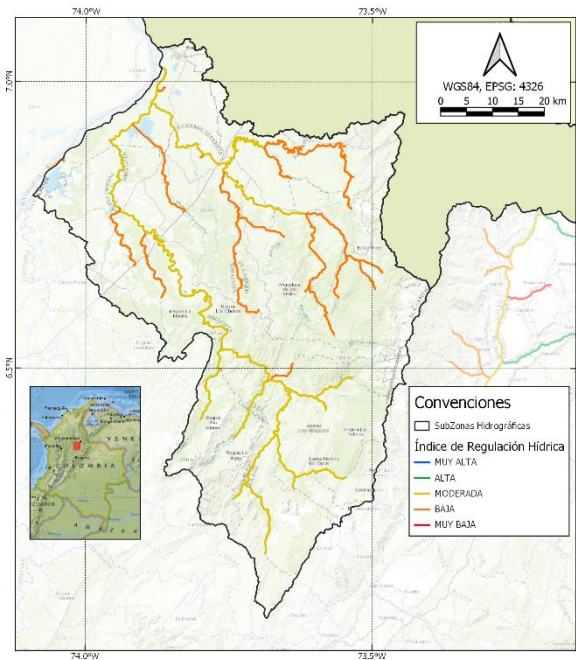
Categoría ENA	Rango
Muy Alta	> 0.85
Alta	0.75 – 0.85
Moderada	0.65 - 0.75
Baja	0.50 - 0.65
Muy Baja	< 0.50

Tabla 5.9 IRH en cauces principales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón

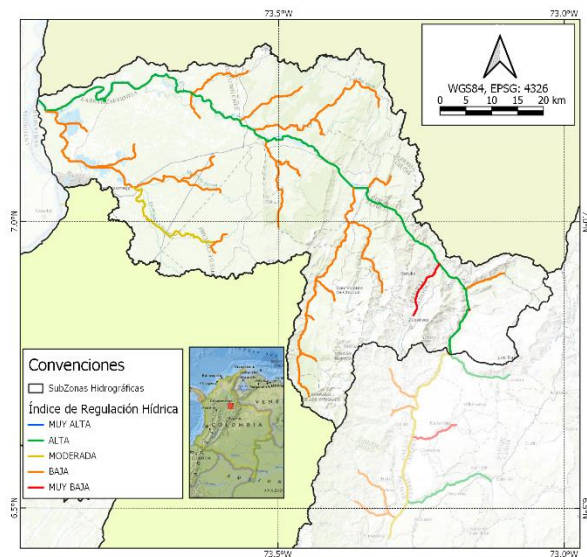
Cauce	Corriente	IRH	Clasificación
SZH río Sogamoso			
1	Río Sogamoso hasta estación PTE SOGAMOSO	0.76	ALTA
2	Quebrada Cayumba	0.58	BAJA
4	Río Sogamoso en desembocadura al Magdalena	0.76	ALTA
9	Caño Corazones	0.60	BAJA
12	Río Sucio	0.55	BAJA
16	Quebrada La Putana	0.58	BAJA
21	Quebrada La Vizcaína	0.64	BAJA
22	Quebrada Zarzal	0.61	BAJA
24	Quebrada Pujaman y Aguablanca	0.58	BAJA
35	Río Sogamoso hasta estación EL TABLAZO	0.77	ALTA
36	Río Chucurí	0.63	BAJA
39	Quebrada el Ramo	0.60	BAJA
44	Quebrada Zapatoca	0.46	MUY BAJA
SZH río Opón			
1	Río Opón desembocadura al río Magdalena	0.68	MODERADA
6	Río La Colorada, desembocadura al río Opón	0.66	MODERADA
9	Río Oponcito	0.65	MODERADA
11	Río La Colorada hasta la estación Ayacucho	0.66	MODERADA
23	Río Opón hasta estación punete Ferrocarril	0.68	MODERADA
27	Quebrada Aguas Negras	0.62	BAJA
37	Río Verde	0.63	BAJA
40	Quebrada Aragua	0.68	MODERADA
44	Río Blanco	0.67	MODERADA

46	Quebrada Negra de Armas	0.67	MODERADA
49	Río Quiratá	0.67	MODERADA

La categoría ALTA obtenida para la cuenca del río Sogamoso hasta la desembocadura en el río Magdalena y la categoría MODERADA obtenida para el río Opón en su desembocadura, son coincidentes con la clasificación obtenida para estas SZHs en el más reciente Estudio Nacional del Agua, y también coinciden con lo reportado en los Planes de Ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas elaborados por la CAS para ambas SZHs. En la Figura 5.21 se presenta la distribución espacial del IRH en las dos SZH modeladas. Como es de esperarse las cuencas de montaña o cabecera son las que presentan los IRH más bajos, a medida que se acumula el flujo se obtiene valores de IRH más altos.



a) SZH del río Opón



b) SZH del río Sogamoso

Figura 5.21 Comportamiento espacial del IRH en las SZHs de Interés

5.2.2.2 Índice de Aridez (IA)

En la Figura 5.22 se presentan los índices de aridez obtenidos para cada una de las SZHs. En la SZH del río Opón las cuencas de nivel subsiguiente asociadas al río La Colorada presentan IA de

“moderados a excedentes de agua”, al igual que las cuencas en proximidades o asociadas al río Opón al sur y occidente de la SZH. Por su parte, la SZH del río Sogamoso, presenta IA que la categorizan mayoritariamente como una región con disponibilidad moderada de agua, con una zona clasificada como “moderado a excedentes de agua”.

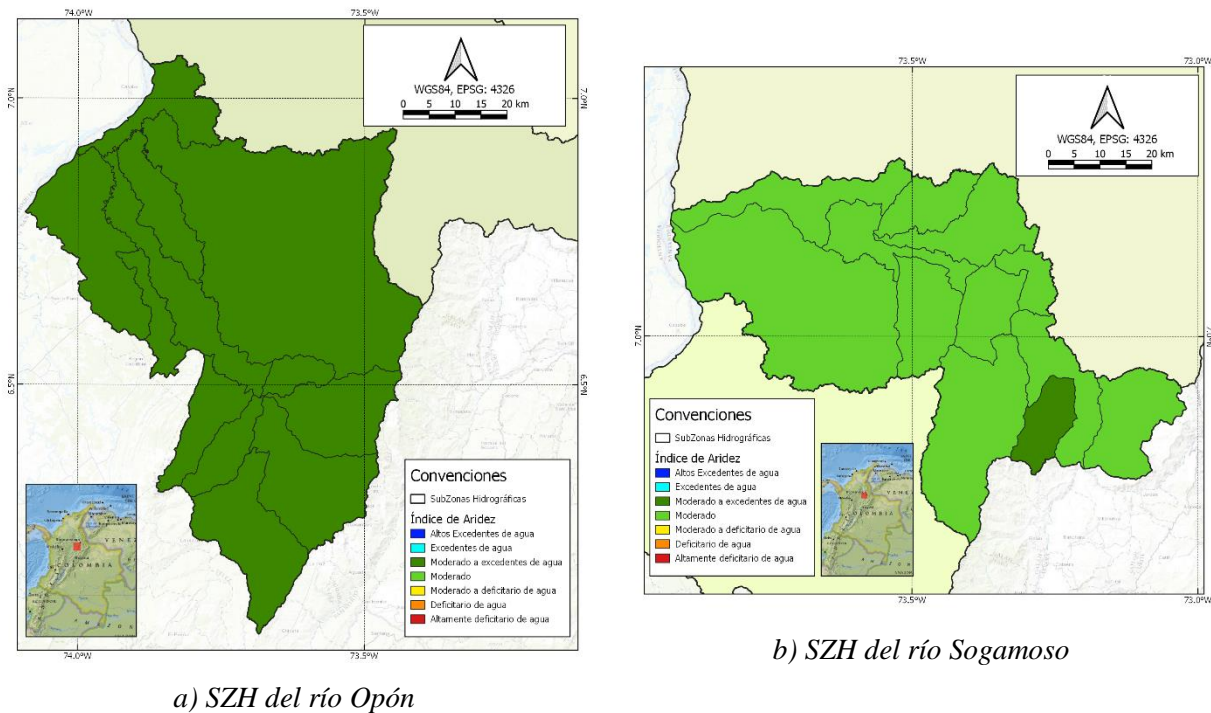


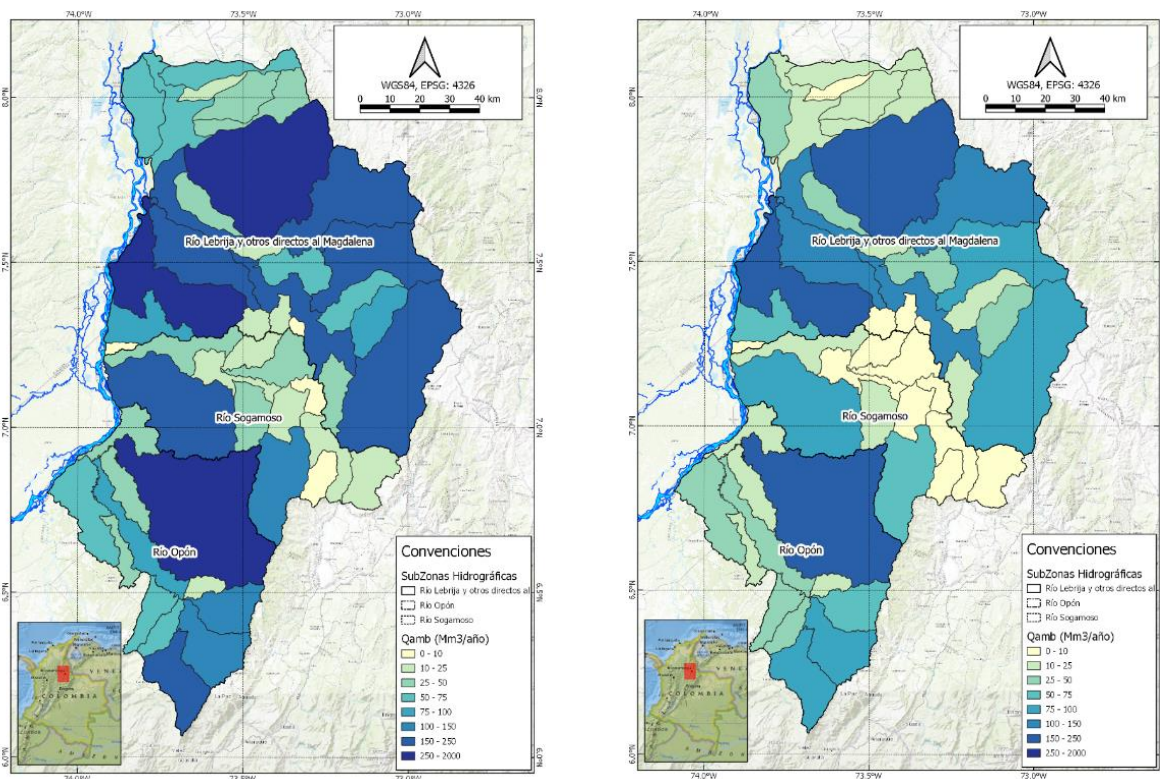
Figura 5.22 Índice de Aridez en las cuencas de nivel subsiguiente de las SZH de interés

5.3. Caudal ambiental

El caudal ambiental corresponde 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.

Para definir el componente hidrológico del caudal ambiental en las unidades de análisis, se utiliza la metodología adoptada en el Estudio Nacional del Agua aplicada a los resultados de la modelación hidrológica. Según este método, se consideran las curvas 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. Para la estimación del caudal ambiental en año seco, se asume que el caudal ambiental corresponde al porcentaje estimado en condiciones promedios de la oferta hídrica total superficial. Como puede verse en la Figura 5.23a, 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 5.10. De manera similar se hallaron los valores estimados para el caudal ambiental de año seco, que pueden verse en la Figura 5.23b. Se observa que en algunas zonas hay una reducción sustancial del volumen necesario para conservar las funciones de los ecosistemas.



a) para año normal

b) para año seco

Figura 5.23 Caudal ambiental por la metodología IDEAM-ENAs para año normal y año seco

Tabla 5.10 Valores del caudal ambiental en cada una de las unidades de análisis de nivel subsiguiente

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

5.4. Índice de uso del agua (IUA)

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, Estudio Nacional del Agua, 2014) el IUA es la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales. Es un indicador de la presión de los recursos hídricos debido a los usos. La expresión que define el IUA es (Ecuación 19):

$$IUA = \left(\frac{D_h}{O_h} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

D_h : Demanda hídrica sectorial

O_h : Oferta hídrica superficial disponible (esta última resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental).

Para la interpretación de los valores, se usan los rangos y categorías definidas en la Tabla 5.11

Tabla 5.11. Interpretación del índice de uso del agua. ENA 2014

Rango IUA	Categoría	Significado
> 100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta
50.01 – 100	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 – 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 – 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1.0 – 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: ENA 2014

El índice de uso del agua se estima para dos escenarios: condiciones promedio y año seco. De esta forma se estiman las variables que definen la oferta hídrica superficial disponible (oferta hídrica total superficial y caudal ambiental) en estas dos condiciones.

Las definiciones de estas condiciones se encuentran consignadas en los documentos de “Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua” (IDEAM, 2013), y el “Estudio Nacional del Agua 2018” (IDEAM, 2019). Se define año hidrológico seco como los caudales mínimos mensuales de las series de caudales medios mensuales; los cuales se identifican con el año típico seco.

Para este estudio se realizó una modificación a la interpretación de las definiciones para cambiar la metodología de cálculo. Se definió que los años típicos se identificaran con el promedio móvil de 12 intervalos de la serie continua de caudales mensuales. El intervalo de tiempo que dé como resultado el valor mínimo y máximo se asigna al año seco y húmedo respectivamente.

Para hacer frente al cambio en la definición de los años típicos seco y húmedo, se realizó el siguiente procedimiento. Se usaron las series de escorrentías y caudales equivalentes a las cuales se les aplicó el siguiente procedimiento para cada unidad de análisis por separado:

1. Se realizó un promedio móvil de 12 intervalos sobre las series, indicando en cada intervalo centrado cual fue el volumen para el intervalo al que pertenece; intervalo que representa un año diferente al año calendario y al año hidrológico.
2. Se halló el menor y el mayor volumen que se generó en cada unidad de análisis dentro de toda la serie del promedio móvil para así identificar el intervalo central del año seco y del

año húmedo; se guardó el intervalo de inicio y fin para cada una de las unidades de análisis por separado.

3. Se extrajo el intervalo identificado, se transformó a volumen si fuera necesario, y se sumó ese volumen para hallar el dato anual; con esto se halló la oferta o el valor de la escorrentía para los años típicos.

Se debe aclarar que las modificaciones al cálculo de las variables mencionadas solo aplican para el estudio realizado en el convenio AC4 IDEAM-ECOPETROL. En cada caso de estudio la metodología halla periodos de datos de igual longitud, pero de diferente inicio y fin. Lo anterior garantiza que se pueda dilucidar diferencias locales entre casos de estudio. Los datos de escorrentías y caudales equivalentes usados para realizar las clasificaciones fueron obtenidos de las simulaciones del aplicativo SWAT.

La Tabla 5.12 muestra los resultados consolidados de las variables que determinan el IUA y el valor calculado del IUA para las unidades de análisis en año medio. La Tabla 5.13 muestra los resultados consolidados de las variables que determinan el IUA y el valor calculado del IUA para las unidades de análisis en año seco.

De la Figura 5.24 a Figura 5.29 muestran los mapas de las variables que intervienen en el IUA y el mapa de IUA para las unidades de análisis.

Tabla 5.12. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año medio.

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO MEDIO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	PORCENTAJE QAMB AÑO MEDIO	OFERTA DISPONIBLE AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	IUA AÑO MEDIO
Río Opón	231401	Complejo Humedal Juan Esteban	7,50	267,0	4,87	153,6	57,5%	113,4	6,6%
	231402	Complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras	1,17	629,1	10,71	337,8	53,7%	291,3	0,4%
	231403	Quebrada la India	0,33	163,9	2,80	88,3	53,9%	75,6	0,4%
	231404	Directos al río Opón entre Vereda La Honda y Ciénaga del Opón	0,93	430,8	7,58	239,0	55,5%	191,8	0,5%
	231405	Río Blanco	0,56	293,1	5,36	169,0	57,7%	124,1	0,5%
	231406	Quebrada Negra de Armas	0,36	216,1	3,99	125,8	58,2%	90,3	0,4%
	231407	Río Quiratá	1,00	657,1	10,27	323,9	49,3%	333,2	0,3%
	231408	Río Opón entre San Joaquín y La Tablona	1,06	669,0	10,56	333,0	49,8%	335,9	0,3%
	231409	Quebradas La Aragua y La Colorada	0,56	445,8	8,44	266,2	59,7%	179,7	0,3%
	231410	Río La Colorada	13,94	2169,8	29,38	926,5	42,7%	1243,3	1,1%
	231411	Complejo Ciénaga del Opón	0,66	266,2	4,55	143,5	53,9%	122,7	0,5%
	231412	Río La Verde	0,20	104,2	1,93	60,9	58,4%	43,4	0,5%
Río Lebrija y otros directos al Magdalena	231901	RÍO LEBRIJA MEDIO DIRECTOS	220,35	569,6	10,67	336,5	59,1%	233,1	94,5%
	231902	QUEBRADA DORADAS	0,55	59,8	1,05	33,0	55,2%	26,8	2,1%

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO MEDIO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	PORCENTAJE QAMB AÑO MEDIO	OFERTA DISPONIBLE AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	IUA AÑO MEDIO
	231903	CAÑO CUATRO	0,55	19,1	0,33	10,3	53,7%	8,9	6,3%
	231904	QUEBRADA LA TIGRA	2,06	211,6	3,57	112,5	53,2%	99,1	2,1%
	231905	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte media)	3,86	711,9	12,51	394,6	55,4%	317,2	1,2%
	231906	QUEBRADA LA PLATANALA	0,47	56,6	1,02	32,2	56,9%	24,4	1,9%
	231907	QUEBRADA LA MUSANDA	2,87	152,3	2,80	88,4	58,1%	63,9	4,5%
	231908	Quebrada La Santa	7,48	491,4	8,75	275,9	56,1%	215,6	3,5%
	231909	Quebrada La Gomez	12,94	760,5	14,97	472,0	62,1%	288,5	4,5%
	231910	Quebrada Lebrija	0,51	78,0	0,88	27,9	35,8%	50,1	1,0%
	231911	Quebrada Trece (Q. Nariño)	5,03	266,6	5,22	164,6	61,7%	102,0	4,9%
	231912	Quebrada El Salado	0,10	29,3	0,30	9,6	32,7%	19,7	0,5%
	231913	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte baja)	22,33	1314,0	25,57	806,5	61,4%	507,6	4,4%
	231914	Quebrada Torcoroma	6,09	231,6	4,82	152,0	65,6%	79,6	7,7%
	231915	Quebrada La Huila (Quebrada El Cacao)	9,19	219,5	4,21	132,8	60,5%	86,7	10,6%
	231916	Quebrada Caimán	4,08	54,9	1,16	36,6	66,5%	18,4	22,2%
	231917	Quebrada Tisquirama - Ciénaga Doña María	7,98	161,1	3,45	108,7	67,5%	52,4	15,2%
	231918	Cga Guacamaya, Cga El Roble, Cga La Doncella	13,06	217,4	4,65	146,6	67,4%	70,8	18,4%
	231919	RÍO LEBRIJA BAJO DIRECTOS	6,39	225,7	5,00	157,6	69,8%	68,1	9,4%
	231920	Río Negro	7,30	196,4	3,58	112,9	57,5%	83,4	8,8%
	231921	Río Salamaga	3,28	173,9	3,01	94,8	54,5%	79,1	4,1%
	231922	Quebrada La Angula	12,20	97,3	1,55	48,7	50,1%	48,6	25,1%

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO MEDIO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	PORCENTAJE QAMB AÑO MEDIO	OFERTA DISPONIBLE AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	IUA AÑO MEDIO
	231923	Río de Oro	114,37	592,6	9,94	313,4	52,9%	279,2	41,0%
	231924	Río Cachirí	3,76	570,4	8,86	279,4	49,0%	291,0	1,3%
Río Sogamoso	240501	Río Sogamoso entre Cayumba y el río Magdalena	1,60	226,2	2,59	81,8	36,1%	144,4	1,1%
	240502	Complejo Ciénaga San Silvestre	36,29	809,3	13,41	422,9	52,3%	386,4	9,4%
	240503	Quebrada La Putana	0,71	154,3	1,91	60,2	39,0%	94,1	0,8%
	240504	Río Chucurí	5,23	422,0	6,93	218,6	51,8%	203,4	2,6%
	240505	Quebrada Zapatoca	2,81	52,7	0,73	23,0	43,6%	29,7	9,4%
	240506	Quebrada La Betuliana y otros directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso	3,02	87,2	1,49	47,0	53,9%	40,3	7,5%
	240507	Directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)	36,30	104,8	1,71	53,9	51,4%	51,0	71,2%
	240508	Quebradas Aguablanca y Pujaman	1,73	31,8	0,30	9,6	30,2%	22,2	7,8%
	240509	Río Sucio	4,18	135,4	1,55	48,9	36,1%	86,5	4,8%
	240510	Quebradas Caño Corazones y Payoa	0,60	122,0	1,77	55,8	45,8%	66,2	0,9%

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO MEDIO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	PORCENTAJE QAMB AÑO MEDIO	OFERTA DISPONIBLE AÑO MEDIO (Mm ³ /año)	IUA AÑO MEDIO
	240511	Río Sogamoso entre Hidrosogamoso y Cayumba	1,35	123,3	1,30	41,0	33,2%	82,4	1,6%
	240512	Hidrosogamoso	1.850,10	88,2	1,17	36,9	41,8%	51,3	3606,4%

Tabla 5.13. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año seco.

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO SECO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO SECO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO SECO (Mm ³ /año)	OFERTA DISPONIBLE AÑO SECO (Mm ³ /año)	IUA AÑO SECO
Río Opón	231401	Complejo Humedal Juan Esteban	7,50	151,3	2,76	87,0	64,2	11,7%
	231402	Complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras	1,17	360,3	6,13	193,4	166,8	0,7%
	231403	Quebrada la India	0,33	88,8	1,52	47,8	40,9	0,8%
	231404	Directos al río Opón entre Vereda La Honda y Ciénaga del Opón	0,93	233,8	4,11	129,7	104,1	0,9%
	231405	Río Blanco	0,56	182,9	3,34	105,5	77,4	0,7%
	231406	Quebrada Negra de Armas	0,36	135,2	2,50	78,7	56,5	0,6%
	231407	Río Quiratá	1,00	420,4	6,57	207,2	213,2	0,5%
	231408	Río Opón entre San Joaquín y La Tablona	1,06	415,7	6,56	206,9	208,7	0,5%
	231409	Quebradas La Aragua y La Colorada	0,56	267,0	5,05	159,4	107,6	0,5%
	231410	Río La Colorada	13,94	1269,8	17,19	542,2	727,6	1,9%
	231411	Complejo Ciénaga del Opón	0,66	141,7	2,42	76,4	65,3	1,0%

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO SECO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO SECO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO SECO (Mm ³ /año)	OFERTA DISPONIBLE AÑO SECO (Mm ³ /año)	IUA AÑO SECO
	231412	Río La Verde	0,20	62,6	1,16	36,5	26,0	0,8%
Río Lebrija y otros directos al Magdalena	231901	RÍO LEBRIJA MEDIO DIRECTOS	220,35	318,3	5,96	188,0	130,2	169,2%
	231902	QUEBRADA DORADAS	0,55	30,6	0,54	16,9	13,7	4,0%
	231903	CAÑO CUATRO	0,55	9,6	0,16	5,1	4,4	12,5%
	231904	QUEBRADA LA TIGRA	2,06	107,3	1,81	57,0	50,2	4,1%
	231905	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte media)	3,86	353,8	6,22	196,1	157,7	2,4%
	231906	QUEBRADA LA PLATANALA	0,47	30,2	0,55	17,2	13,0	3,6%
	231907	QUEBRADA LA MUSANDA	2,87	89,9	1,65	52,2	37,7	7,6%
	231908	Quebrada La Santa	7,48	308,1	5,49	173,0	135,2	5,5%
	231909	Quebrada La Gomez	12,94	494,9	9,74	307,1	187,7	6,9%
	231910	Quebrada Lebrija	0,51	31,6	0,36	11,3	20,3	2,5%
	231911	Quebrada Trece (Q. Nariño)	5,03	163,7	3,20	101,0	62,6	8,0%
	231912	Quebrada El Salado	0,10	15,2	0,16	5,0	10,2	1,0%
	231913	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte baja)	22,33	772,4	15,03	474,1	298,4	7,5%
	231914	Quebrada Torcoroma	6,09	127,1	2,64	83,4	43,7	13,9%
	231915	Quebrada La Huila (Quebrada El Cacao)	9,19	117,7	2,26	71,2	46,5	19,7%
	231916	Quebrada Caimán	4,08	24,7	0,52	16,4	8,3	49,5%
	231917	Quebrada Tisquirama - Ciénaga Doña María	7,98	76,3	1,63	51,4	24,8	32,2%
231918	Cga Guacamaya, Cga El Roble, Cga La Doncella	13,06	109,1	2,33	73,6	35,6	36,7%	

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO SECO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO SECO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO SECO (Mm ³ /año)	OFERTA DISPONIBLE AÑO SECO (Mm ³ /año)	IUA AÑO SECO
	231919	RÍO LEBRIJA BAJO DIRECTOS	6,39	114,9	2,54	80,2	34,7	18,4%
	231920	Río Negro	7,30	99,2	1,81	57,0	42,1	17,3%
	231921	Río Salamaga	3,28	86,5	1,49	47,1	39,3	8,3%
	231922	Quebrada La Angula	12,20	42,5	0,68	21,3	21,2	57,5%
	231923	Río de Oro	114,37	270,0	4,53	142,8	127,2	89,9%
	231924	Río Cachirí	3,76	269,9	4,19	132,2	137,7	2,7%
Río Sogamoso	240501	Río Sogamoso entre Cayumba y el río Magdalena	1,60	117,0	1,34	42,3	74,7	2,1%
	240502	Complejo Ciénaga San Silvestre	36,29	452,1	7,49	236,2	215,9	16,8%
	240503	Quebrada La Putana	0,71	66,0	0,82	25,8	40,3	1,8%
	240504	Río Chucurí	5,23	217,0	3,56	112,4	104,6	5,0%
	240505	Quebrada Zapatoca	2,81	21,6	0,30	9,4	12,2	23,0%
	240506	Quebrada La Betuliana y otros directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso	3,02	37,1	0,63	20,0	17,1	17,6%
	240507	Directos al río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)	36,30	45,4	0,74	23,3	22,0	164,7%
	240508	Quebradas Aguablanca y Pujaman	1,73	9,4	0,09	2,8	6,6	26,3%

SUBZONA HIDROGRÁFICA	CODIGO	NOMBRE CUENCA	DEMANDA TOTAL (Mm ³ /año)	OFERTA TOTAL AÑO SECO (Mm ³ /año)	CAUDAL AMBIENTAL AÑO SECO (m ³ /s)	DEMANDA ECOSISTEMAS (QAMB) AÑO SECO (Mm ³ /año)	OFERTA DISPONIBLE AÑO SECO (Mm ³ /año)	IUA AÑO SECO
	240509	Río Sucio	4,18	38,3	0,44	13,8	24,4	17,1%
	240510	Quebradas Caño Corazones y Payoa	0,60	45,3	0,66	20,7	24,6	2,4%
	240511	Río Sogamoso entre Hidrosogamoso y Cayumba	1,35	56,8	0,60	18,9	37,9	3,5%
	240512	Hidrosogamoso	1.850,10	31,6	0,42	13,2	18,4	10066,3%

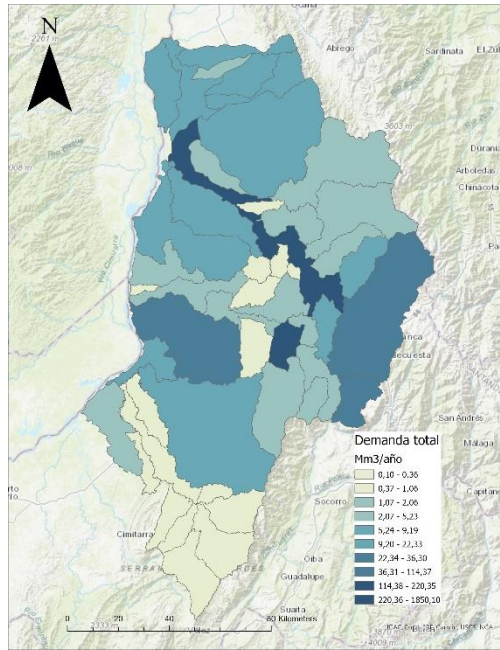
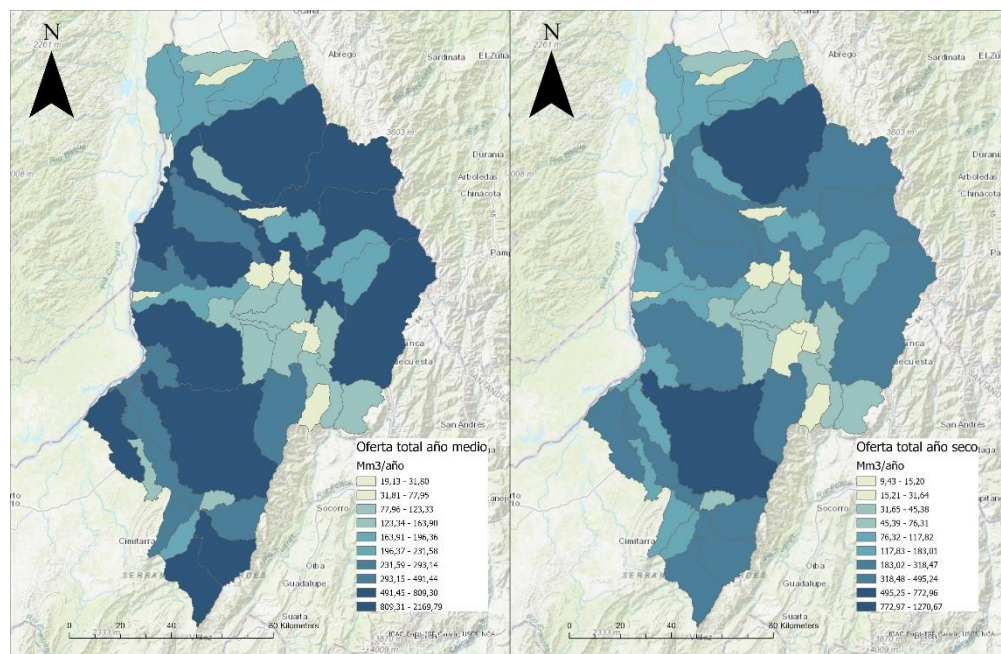


Figura 5.24 Demanda total en las unidades de análisis para el año de referencia (2019) (en millones de metros cúbicos / año).



Año medio

Año seco

Figura 5.25 Oferta total en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).

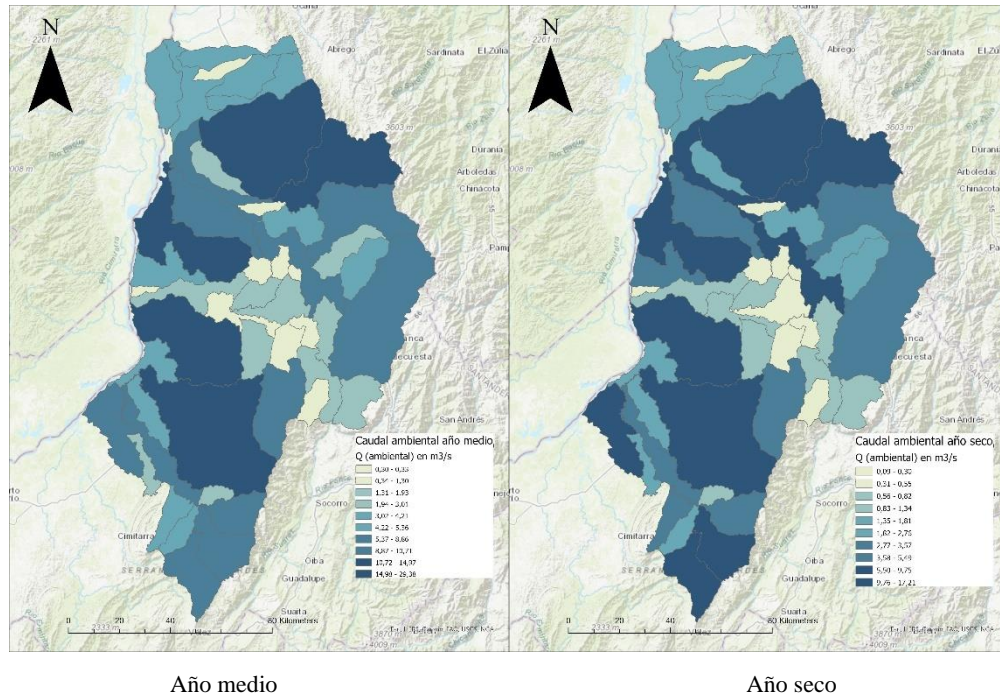


Figura 5.26 Caudal ambiental en las unidades de análisis (en m³/s).g

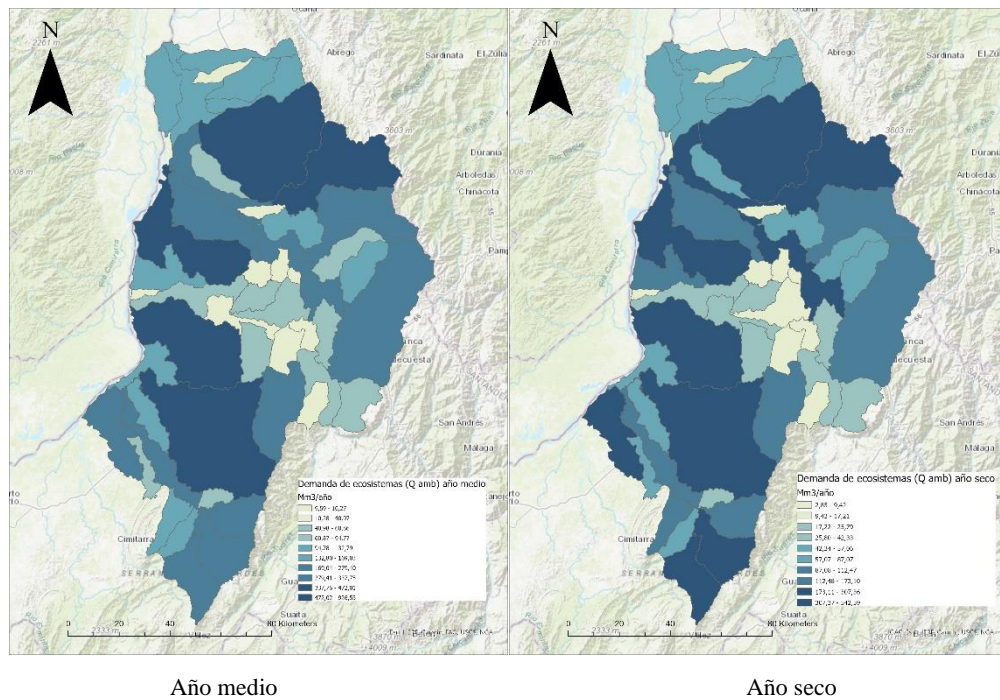


Figura 5.27 Demanda de los ecosistemas (Qamb) en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).

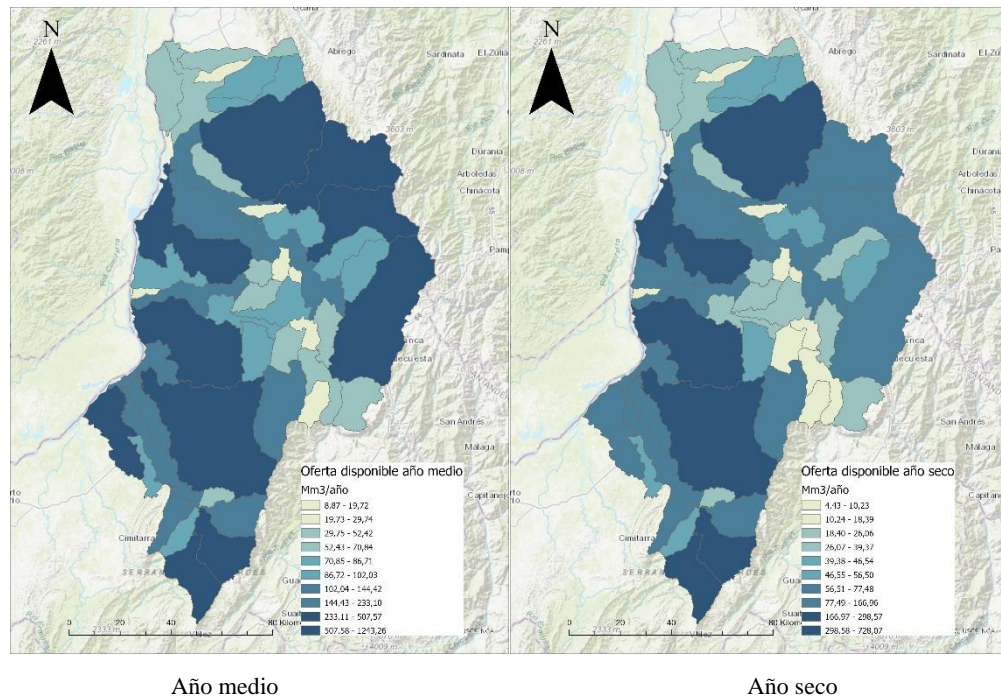


Figura 5.28 Oferta disponible en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).

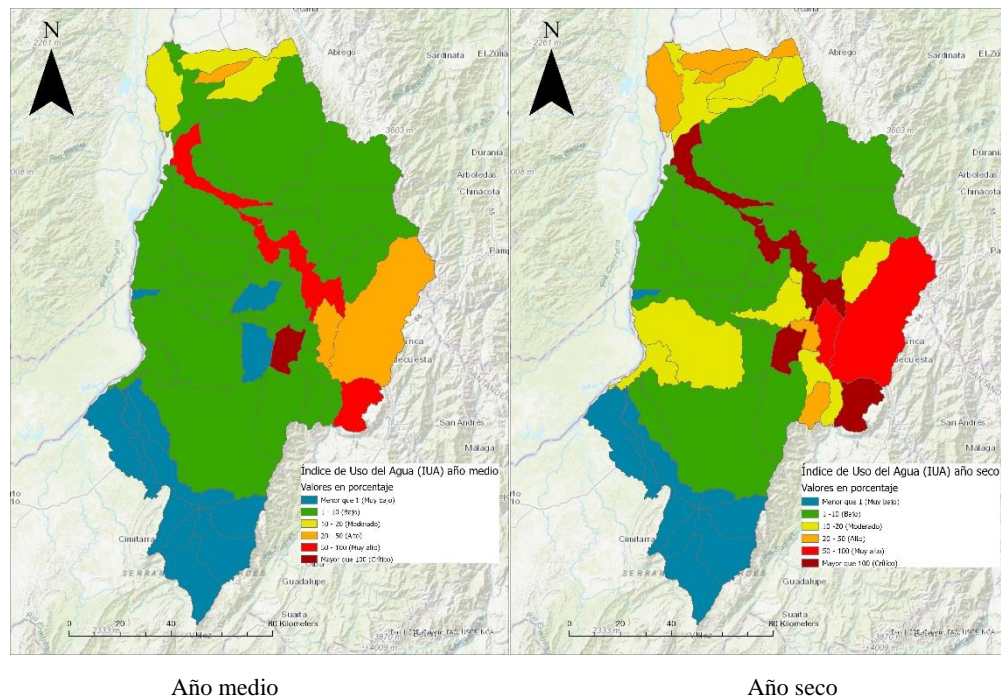


Figura 5.29 Índice de uso del agua (IUA) en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos / año).

6. Bibliografía

- Abbaspour, K. (2019). *SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. Zürich, Suiza: 2w2e institute.
- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal*, 1340-1352.
- Arias, P., Garreaud, 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.
- 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. C., White, M. J., Srinivasan, R., . . . Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- 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.
- Arora, V. (2002). The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of hydrology*, 164-177.
- Beck, H., Van Dijk, A., de Roo, A., Dutra, E., Fink, G., Orth, R., & Schellenkens, J. (2017). Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2881–2903.
- Beven, K. (2012). *Rainfall runoff modelling: the primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- DANE. (2014). Censo Nacional Agropecuario. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- DANE, (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda- CNPV, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata
- DANE. (2020). Encuesta de Sacrificio de Ganado ESAG. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-sacrificio-de-ganado/encuesta-de-sacrificio-de-ganado-esag-historicos>
- DANE. (2021). DANE - - Estadísticas por tema Construcción. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion>

- Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). Soil and water assessment tool (SWAT) model: current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423-1431.
- Duque Gardeazabal, N. (2021). *INFORME DEL ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA PARA ZONA DEL VALLE MEDIO DEL MAGADALENA*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Duque-Gardeazabal, N., & Fuentes, C. (2019). Using R to easily and efficiently predict the uncertainty in simulations of environmental models. *hydrolatinoamerican young researchers journal*, 17-20.
- Federación Nacional de Cafeteros, & Cenicafe. (2015). Beneficio del café en Colombia - Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café.
- Flügel, W. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 423-436.
- 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.
- GWP. (2000). *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Obtenido de <http://www.la-wetnet.org/lasmiradasdelagua/descargas/GIRH.pdf>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 96-99.
- IDEAM. (2008). *Mapa de cobertura de la tierra Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).
- IDEAM (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. 362 páginas. ISBN: 978-958-8067-32-2©. Diciembre de 2010, Colombia
- IDEAM (2011a). Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Agua (Versión 1.00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del Agua Superficial. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2011b). Hoja metodológica del indicador Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (Versión 1.00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores

de Calidad del Agua Superficial. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua - ERA*. Bogotá D.C.: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua-ERA*. Bogotá.
- IDEAM. (2013). *Zonificación hidrográfica de Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua ENA 2018*. Bogotá.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *IEEE International Conference on Neural Network*, (págs. 1942-1948).
- Kolokytha, E., Oishi, S., & Teegavarapu, R. S. (2017). *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*. Singapore: Springer Nature. doi:10.1007/978-981-10-2051-3
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.
- Moriasi, 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.
- Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 1763-1785.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. College Station, Texas: Texas A&M University System.
- OMM – Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas Vol I y II*. N°168 (6 ed.). Ginebra. 654 páginas. ISBN 978-92-63-30168-0. 2011, Suiza.
- OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. ISBN 978-92-63-03385-8.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environmental Modelling and Software*, 1543-1556.
- Rogelis, M. C., & Werner, M. G. (2013). Spatial Interpolation for Real-Time Rainfall Field Estimation in Areas with Complex Topography. *Journal of Hydrometeorology*, 85-104.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 1569-1578.

- Téllez Guío, P. (2020). *PROPUESTA DE CONTROLES DE CALIDAD PARA LAS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DEL AÍRE MEDIADAS EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES Y AUTOMÁTICAS*. Bogotá D.C.: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- UNESCO. (2006). *2o Informe sobre El Desarrollo de los Recursos Hidricos del Mundo: "El Agua una responsabilidad compartida"*. Obtenido de www.unesdoc.unesco.org/images/0014/001144409s.pdf.