

LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

Acuerdo de Cooperación Ecopetrol - Ideam
AC No. 4 (3034153)



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

Acuerdo de Cooperación Ecopetrol - Ideam
AC No. 4 (3034153)

Gustavo Francisco Petro Urrego
Presidente de Colombia

Francia Márquez
Vicepresidenta de Colombia

María Susana Muhamad González
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Sandra Patricia Vilardy Quiroga
Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental

Francisco Javier Canal Albán
Viceministro de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Consejo Directivo

María Susana Muhamad González
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Francisco Javier Canal
Viceministro de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Sebastián Camilo Carranza Tovar
Director de Cambio Climático y Gestión del Riesgo

Ferney Camacho
Director de Infraestructura - Ministerio de Transporte

Paola Ricaurte Ayala
Asesora de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Departamento Nacional de Planeación (DNP)

Sandra Liliana Moreno Mayorga
Directora de la Dirección Técnica Geoadministrativa - Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

Hecney Alexcevíth Acosta
Director general - Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam

Ghisliane Echeverry Prieto
Directora general

Juan Fernando Acosta Mirkow
Secretario general

Fabio Andrés Bernal Quiroga
Subdirector de Hidrología

Elizabeth Patiño Correa
Subdirectora de Estudios Ambientales

Raymond Jiménez Arteaga
Subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental (e)

Tc. Jorge Giovanni Jiménez Sánchez
Subdirector de Meteorología

My. Diana Carolina Rueda Dimate
Jefe de Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

César Augusto Sánchez Waldron
Jefe de Oficina Asesora de Planeación

Juan David García Castaño
Jefe de Oficina de Informática

Gilberto Antonio Ramos Suárez
Jefe de Oficina Asesora Jurídica

María Eugenia Patiño Jurado
Jefe de Oficina de Control Interno

Alexis Tigreros
Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Edición

Juan José Montoya Monsalve (IDEAM)
Juan Bernardo Carrasco Leal (ECOPETROL)
Ana Karina Campillo Pérez (IDEAM)
María Costanza Rosero Mesa (IDEAM)

Coordinación técnica

Juan José Montoya Monsalve

Coordinación editorial

Andrés Felipe Tapiero Ríos

Edición cartográfica

Sonia Cristina Bermúdez Arias
Natalia Melo Jiménez

Corrección de estilo

Paola Sánchez Cepeda

Diseño editorial y diagramación

Sonia Güiza Ariza

ISBN (en línea): 978-958-5489-27-1

Cítese como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam. (2023). *Línea base ambiental hidrológica y de calidad del agua del Valle Medio del Magdalena*. Ideam.

Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam
Noviembre de 2023, Bogotá, D. C., Colombia

Distribución gratuita

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Autores

Ana Karina Campillo Pérez

Ana María Vesga Güiza

Anderson Camilo Sanabria Morera

César Fernando Jiménez González

Claudia María Ávila Laverde

Claudia Nicol Tetay Botía

Consuelo Helena Onofre Encinales

Daniel Orlando García Cárdenas

David Andrés Zamora Ávila

David Garzón Casas

Deisy Yurani Rivera Arias

Diana María Agudelo Echavarría

Edinson Limberto Rodríguez Tarazona

Edwin Salomón Méndez Osorio

Fabio Andrés Bernal Quiroga

Fernando Navas Vera

Fredy Johany Zambrano Becerra

Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco

Gabriela Parada Puig

Hugo Navas Reyes

Jairo Andrés Ríos Becerra

Jenny Andrea Velásquez García

Jessica Ximena Rueda Santoyo

Jorge Andrés Delgado Beltrán

Juan José Montoya Monsalve

Julián David Rojo Hernández

Juliana Ossa Valencia

Laura García Rivas

Laura Johana Rojas

Laura Marcela Lopera Vásquez

Leidy Katherine Parra Guzmán

Leidy Nathalia Lizcano Carreño

Liliana Vanessa Celis

Luz Consuelo Orjuela Orjuela

Marelis del Carmen Genes Díaz

María Alejandra Jiménez

María Costanza Rosero Mesa

Mario Enrique Moreno Castiblanco

Mirovan Sverko Navarrete

Mónica Patricia Ovalle Herazo

Natalia Melo Jiménez

Nelson Andrés Nieto Valencia

Nicolás Duque Gardeazábal

Pablo Vergara Gómez

Raúl Ernesto Celis Ossa

Saúl Horacio Buitrago

Sauljose Rosales Niño

Sebastián Rivera Martínez

Sergio Hernández Ovalle

Sonia Cristina Bermúdez Arias

Tobías Leyva Pinto

Whollman Guillermo Silva

William Mantilla Orduz

William Oswaldo Barrera León

Yesid Eduardo Fandiño Malaver



CONTENIDO

Introducción	20
1. Contexto general y marco de referencia	22
1. 1. Acuerdo de cooperación AC 04	22
1. 2. Marco conceptual. El ciclo hidrológico	23
1. 3. Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua	25
1. 4. Marco institucional y normativo	26
1. 4. 1. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico	26
1. 4. 2. Instrumentos nacionales y regionales para la evaluación del agua	26
1. 4. 2. 1. Instrumentos técnicos	26
1. 4. 2. 2. Instrumentos de planificación	27
1. 4. 2. 3. Instrumentos económicos	27
1. 5. Área de estudio	27
1. 5. 1. Subzona hidrográfica del río Opón	28
1. 5. 2. Subzona hidrográfica del río Sogamoso	30
1. 5. 3. Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena	31
1. 6. Unidades de análisis, escalas y resoluciones	32



2. Estado del recurso hídrico superficial en el Valle Medio del Magdalena	34
2. 1. Monitoreo hidrológico y de calidad del agua de fuentes superficiales	34
2. 1. 1. Monitoreos efectuados en el marco del estudio	35
2. 1. 2. Resultados y análisis de los monitoreos	37
2. 1. 3. Sistema de información hidrológica y de calidad de agua superficial en el Valle Medio del Magdalena	41
2. 2. Evaluación de la oferta hídrica superficial	43
2. 2. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	44
2. 2. 2. Resultados de la modelación de la oferta hídrica superficial	46
2. 2. 2. 1. Variación espacio-temporal de los caudales	46
2. 2. 2. 2. Variación espacio-temporal de la escorrentía	54
2. 3. Caudal ambiental	63
2. 3. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	63
2. 3. 2. Resultados del caudal ambiental	67
2. 3. 2. 1. Caudal ambiental en los tramos analizados según la metodología del Ministerio de ambiente (MADS-Ideam, 2018)	67
2. 3. 2. 2. Caudal ambiental en cuencas de nivel subsiguiente a subzonas hidrográficas	74
2. 4. Evaluación de la demanda de agua	77
2. 4. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	77
2. 4. 2. Resultados de la demanda hídrica superficial	84
2. 5. Evaluación de la calidad del agua	96
2. 5. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	96
2. 5. 1. 1. Procedimiento y metodología general	96
2. 5. 1. 2. Indicadores	97
2. 5. 2. Resultados de la evaluación de la calidad del agua superficial	98
2. 5. 2. 1. Presión sobre el recurso hídrico	98
2. 5. 2. 2. Condiciones de calidad del agua	102
2. 5. 2. 3. Análisis integrado de calidad del agua ICA - IACAL	107
2. 6. Caracterización de la composición isotópica de la precipitación	108
2. 6. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	109
2. 6. 2. Análisis de la composición isotópica de la precipitación	111
2. 6. 3. Consideraciones sobre el funcionamiento de los sistemas de flujo superficial y subterráneo	116
2. 7. Indicadores hídricos	121
2. 7. 1. Índice de regulación hídrica e índice de aridez	121
2. 7. 1. 1. Índice de regulación hídrica (IRH)	122
2. 7. 1. 2. Índice de aridez (IA)	125
2. 7. 2. Índice de uso del agua	121



2. 8. Modelación para pronóstico y alertas tempranas	137
2. 8. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos	137
2. 8. 2. Resultados de la modelación e implementación en la plataforma FEWS	142
2. 8. 3. FEWS Colombia	150
2. 8. 3. 1 Descripción del sistema	151
2. 8. 3. 2 FEWS Colombia versión web	152
3. Fortalecimiento de la capacidad técnica de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) en el monitoreo del recurso hídrico superficial y subterráneo	155
3.1. Estado actual de la red de monitoreo hidrometeorológico y de calidad del agua superficial, y de cantidad y calidad del agua subterránea de la CAS	155
3. 2. Alternativas de mejora de la capacidad regional para el monitoreo integral del agua de la CAS	161
3. 3. Plan de financiamiento del PIRMA	169
3. 4. Fase de implementación del PIRMA en la CAS durante el 2023	174
3.4.1. Componente hidrometeorológico	174
3.4.1.1 Apoyo en el proceso de adquisición e instalación de cuatro estaciones hidrológicas	174
3.4.1.2. Elaboración de la hoja de ruta para la certificación de variables hidrometeorológicas de la CAS	175
3.4.1.3. Taller sobre certificación de variables hidrológicas	176
3.4.2. Componente de calidad del agua superficial	176
3.4.2.1. Capacitación sobre calidad del agua superficial	176
3.4.2.2. Priorización de puntos de monitoreo de la red de calidad del agua	177
3.4.3. Componente de aguas subterráneas	181
3.4.3.1. Capacitación sobre conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas y el uso de la hidrología isotópica en el conocimiento de estas	181
3.4.3.2. Priorización de puntos de monitoreo de la red de aguas subterráneas	181
3.4.3.3. Taller sobre validación de datos provenientes de la red de aguas subterráneas	185
3.4.4. Avances transversales a los componentes hidrometeorológicos, de calidad del agua superficial y de aguas subterráneas	185
3.4.4.1. Cartilla para la verificación del dato proveniente de la red de monitoreo regional de calidad del agua superficial y subterránea de la CAS	185
3.4.4.2. Recopilación de formatos para el monitoreo hidrometeorológico, de calidad del agua y de aguas subterráneas	185
3.4.4.3. Documento con la programación, seguimiento y evaluación del cumplimiento de la operación de la red regional de calidad del agua superficial y de aguas subterráneas	186



4. Boletines de pronóstico y alerta en el Valle Medio del Magdalena	190
4. 1. Generación de información hidrometeorológica y de calidad del agua superficial a través del Centro Regional de Pronóstico y Monitoreo Hidrometeorológico del Valle Medio del Magdalena	190
4. 1. 1. Componente meteorológico para el pronóstico del tiempo	191
4. 1. 2. Componente hidrológico para el pronóstico y alertas	193
4. 2. Componentes del boletín	195
Consideraciones finales	205
Consideraciones acerca del monitoreo del recurso hídrico superficial	205
Consideraciones acerca de la evaluación de la oferta hídrica	206
Consideraciones acerca del caudal ambiental	206
Consideraciones acerca de la evaluación de la demanda del agua	207
Consideraciones acerca de la evaluación de la calidad del agua	208
Consideraciones acerca de la evaluación de la composición isotópica de la precipitación	210
Consideraciones acerca de la modelación para el pronóstico y generación de alertas tempranas	211
Consideraciones acerca del Pirma	213
Referencias	216
Anexos	222





LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Esquema general de acuerdo AC 04 entre el Ideam y Ecopetrol	23
Figura 1. 2. Esquema del ciclo hidrológico.	24
Figura 1. 3. Sistemas de indicadores hídricos para el ENA 2018	25
Figura 1. 4. Localización del área de interés y área de influencia en los componentes de oferta, demanda y calidad	28
Figura 1. 5. Subzona Hidrográfica del río Opón	29
Figura 1. 6. Subzona hidrográfica del río Sogamoso	30
Figura 1. 7. Subzona hidrográfica del río Lebrija	31
Figura 1. 8. Cubrimiento de cuencas con POMCA y cuencas sin POMCA	33
Figura 2. 1. Distribución espacial de los puntos de monitoreo de calidad de agua superficial en las Subzonas Hidrográficas Opón, Sogamoso, Lebrija y Tramo del Magdalena	35
Figura 2. 2. Porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo, a partir del porcentaje de saturación de OD, conductividad eléctrica y concentración de demanda química de oxígeno y carbono orgánico total	38
Figura 2. 3. Porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo, a partir de concentración de sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal, fósforo soluble e hidrocarburos totales	39
Figura 2. 4. porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir concentraciones totales en agua de plomo, manganeso, aluminio y hierro	40
Figura 2. 5. Secciones del Aplicativo AQS: ubicaciones, salidas de campo, visita a ubicación, mediciones en campo, observaciones, muestras y especímenes y salidas de información	42
Figura 2. 6. Etapas de la modelación hidrológica	44
Figura 2. 7. Representación de los procesos hidrológicos en el SWAT. (a) fase terrestre del ciclo hidrológico, (b) fase de tránsito en SWAT	45
Figura 2.8. Caudal anual multianual en los canales simulados	47
Figura 2. 9. Variación intraanual de los caudales en mcs (metros cúbicos/segundo) para el canal del río Lebrija que desemboca directamente al río Magdalena	48



Figura 2. 10. Variabilidad de los caudales en mcs (metros cúbicos/segundo) simulados y clasificados por mes para la desembocadura del río de Oro en la SZH del río Lebrija	49
Figura 2. 11. Variabilidad interanual de los caudales del río Opón	51
Figura 2. 12. Variabilidad interanual de los caudales del río Sogamoso	54
Figura 2. 13. Escorrentía simulada en las unidades de análisis.	55
Figura 2. 14. Variación intraanual mensual multianual para la unidad del río de Oro en la SZH del río Lebrija	57
Figura 2. 15. Variación espacial de la escorrentía mensual multianual en milímetros en la SZH del río Lebrija	58
Figura 2. 16. Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de la Quebrada La Gómez en la SZH del río Lebrija	58
Figura 2. 17. Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca del río La Colorada	60
Figura 2.18. Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de análisis "directos al río Sogamoso, entre Cuchuilla e San Panlo y Marta".	62
Figura 2. 19. Diagrama de flujo de la aplicación de la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá	64
Figura 2. 20. Esquema de cálculo y categorización del IRH y del caudal ambiental	66
Figura 2. 21. Procedimiento para la determinación del caudal ambiental	66
Figura 2. 22. Caudales ambientales y máximos aprovechables por condición hidrológica para el río Sogamoso en el sitio de interés	67
Figura 2. 23. Comparación de los caudales ambientales del río Sogamoso en el sitio de interés con otras metodologías aplicadas en la gestión del recurso hídrico en Colombia	70
Figura 2. 24. Régimen de caudales antes y después del aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado	71
Figura 2. 25. Régimen de caudales antes y después del aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado	73
Figura 2. 26. Caudal ambiental calculado con metodología Ideam-ENA para un año normal	74
Figura 2.27. Caudal ambiental por metodología Ideam-ENA para un año seco	75
Figura 2.28. Conceptos de demanda hídrica	77
Figura 2.29. Distribución porcentual de la demanda anual del agua en las subzonas hidrográficas del área de interés e influencia para el 2019	84
Figura 2.30. Demanda hídrica para el sector agrícola por unidades de análisis	87
Figura 2.31. Demanda hídrica para el sector pecuario por unidades de análisis	88
Figura 2.32. Demanda hídrica para el sector industrial por unidades de análisis	89
Figura 2.33. Demanda hídrica para el sector energético por unidades de análisis	90
Figura 2.34. Demanda hídrica para el sector minero por unidades de análisis	91
Figura 2.35. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos por unidades de análisis	92
Figura 2.36. Demanda hídrica para el sector doméstico por unidades de análisis	93
Figura 2.37. Demanda hídrica para el sector servicios por unidades de análisis	94
Figura 2.38. Demanda hídrica total sectorial por unidades de análisis	95
Figura 2. 39. Cargas vertidas en las áreas de estudio	99
Figura 2.40. IACAL en un año normal en las áreas de estudio (2021)	100
Figura 2.41. IACAL en un año seco en las áreas de estudio (2021)	101
Figura 2.42. Comportamiento del ICA - seis (6) variables durante la etapa de línea base en época normal	104



Figura 2.43. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Magdalena durante la etapa de seguimiento	106
Figura 2.44. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Lebrija durante la etapa de seguimiento	106
Figura 2.45. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Sogamoso durante la etapa de seguimiento	106
Figura 2.46. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Opón durante la etapa de seguimiento	106
Figura 2.47. Puntos de monitoreo isotópico en agua lluvia considerados para el análisis	111
Figura 2.48. Izquierda: totalizador comercial con tubo sumergido instalado en la zona de interés. Derecha: totalizadores instalados en las estaciones climatológicas del Ideam de Remedios (Antioquia) y en Puerto Berrío (Antioquia)	112
Figura 2.49. Variación temporal de la composición isotópica: (a) $\delta^{18}\text{O}$ y (b) $\delta^2\text{H}$ de la estación de Bucaramanga	113
Figura 2.50. Línea meteórica regional de la composición isotópica en el área de interés	114
Figura 2.51. Izquierda: mapa de conductividad para puntos que captan el Grupo Real en el sector de Sabana de Torres y al sur del río Sogamoso. Derecha: mapa de conductividad para puntos que captan los Depósitos Cuaternarios en la mayoría del área de influencia	117
Figura 2.52. Diagrama Piper para las captaciones del Grupo Real y Depósitos Cuaternarios	118
Figura 2.53. Relación entre el HCO_3 y la conductividad eléctrica	119
Figura 2.54. Variación de la composición isotópica del agua subterránea y superficial en el Valle Medio del Magdalena respecto a la línea meteórica mundial	120
Figura 2.55. CDC diaria de los caudales simulados en la desembocadura del río Cachirí en el río Lebrija	122
Figura 2.56. Índice de Regulación Hídrica en los canales simulados en la SZH del río Lebrija	123
Figura 2.57. Curvas de duración de caudal en tramos de los ríos Opón y Sogamoso	124
Figura 2.58. Índice de aridez en las unidades de análisis	126
Figura 2.59. Índice de uso del agua (IUA) en año medio en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos/año)	135
Figura 2.60. Índice de uso del agua (IUA) en año seco en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos/año)	136
Figura 2.61. Localización de las estaciones hidrológicas asociadas al tramo de modelación hidráulica	140
Figura 2.62. Resumen de los modelos, forzamientos y métodos de evaluación de simulaciones hidrológicas a nivel diario y horario en las SZH de los ríos Opón y Sogamoso	141
Figura 2.63. Dinámica fluvial del río Magdalena: Puerto Berrío - Sitio Nuevo	143
Figura 2.64. Análisis de barras aluviales en el río Magdalena: Puerto Berrío - Sitio Nuevo	144
Figura 2.65. Zonificación de la resistencia relativa a la erosión fluvial en el área de interés	146
Figura 2.66. Ortofoto de la zona del levantamiento LiDAR	147
Figura 2.67. Modelo Digital de Terreno con el acople de la batimetría y el levantamiento LiDAR	148
Figura 2.68. Tramos de modelación hidráulica del río Magdalena: (a) parte alta, (b) parte media y (c) parte baja	149
Figura 2.69. Configuración de la cascada de procesos en la plataforma FEWS-Colombia	149
Figura 2.70. Estructura esquemática de un sistema de pronóstico hidrológico y sus enlaces a otros servicios de importancia para el sistema operacional	151
Figura 2.71. Alertas hidrológicas por subzonas para usuarios externos,	



disponibles en FEWS Colombia versión web	153
Figura 2.72. Funcionalidades de consulta y descarga de datos para usuarios externos en FEWS-Colombia versión web	154
Figura 3. 1. Distribución de las estaciones hidrometeorológicas activas de la Red Nacional - Ideam	157
Figura 3. 2. Mapa con los puntos de monitoreo de calidad del agua presentes en la jurisdicción de la CAS	159
Figura 3. 3. Propuesta de diseño para la red de referencia de monitoreo hidrometeorológico de la CAS	163
Figura 3. 4. Diseño de la red hidrometeorológica de referencia CAS	164
Figura 3. 5. Ubicación de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de la calidad del agua superficial del Pirma de la CAS	165
Figura 3. 6. Red de monitoreo regional de aguas subterráneas en la CAS con profundidad de captación inferior a los 40 m	166
Figura 3. 7. Red de monitoreo regional de aguas subterráneas en la CAS con profundidad de captación entre 40 y 185 m	167
Figura 3. 8. Flujo de los datos e información del monitoreo integral del agua en la CAS	168
Figura 3. 9. Estaciones recomendadas para instalar en el 2023	175
Figura 4. 1. Esquema metodológico general de pronóstico de alertas	191
Figura 4. 2. Previsiones de precipitaciones. Imagen canal IR.	192
Figura 4. 3. Herramienta Smartmet. Modelos de pronóstico. Imagen de la derecha: GEM, centro: ICON, izquierda: GFS.	192
Figura 4. 4. Distribución espacial de las estaciones del Ideam	193
Figura 4.5. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas disponibles en el área de interés	194
Figura 4. 6. Sección de presentación del boletín	195
Figura 4. 7. Sección de condiciones meteorológicas actuales. Imagen satelital IR/VIS, imagen de radar y datos de los aeropuertos de Lebrija y Barrancabermeja.	195
Figura 4.8. Sección de pronóstico del estado del tiempo. Mapas de pronóstico de la herramienta Smartmet.	196
Figura 4.9. Sección del comportamiento de la precipitación acumulada del último día meteorológico, desde las 7:00 a. m. del día anterior hasta las 7:00 a. m. del día siguiente.	197
Figura 4.10. Sección del comportamiento de la precipitación del último día meteorológico y las 72 horas anteriores	197
Figura 4.11. Sección del seguimiento a temperaturas máximas y mínimas	198
Figura 4.12. Sección de alertas hidrológicas vigentes	199
Figura 4.13. Sección de seguimiento de los niveles de los ríos	200
Figura 4.14. Sección del estado de los embalses	201
Figura 4.15. Sección iconografía de términos hidrológicos	202
Figura 4.16. Sección de pronóstico de la amenaza por deslizamiento de tierra	203
Figura 4.17. Sección de pronóstico de la amenaza por incendios	204
Figura 5. 1. Porcentajes de uso del agua total por sector, en las subzonas hidrográficas de interés e influencia del acuerdo	208





LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Caudales anuales multianuales en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija	46
Tabla 2. 2. Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Opón.	50
Tabla 2. 3. Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Sogamoso	53
Tabla 2. 4. Valores de oferta hídrica para las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija	56
Tabla 2. 5. Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades espaciales de análisis en la SZH del río Opón	59
Tabla 2. 6. Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades de análisis - Sogamoso	61
Tabla 2. 7. Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en ríos de Colombia (MinAmbiente y ANLA, 2013)	65
Tabla 2. 8. Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés (m ³ /s)	67
Tabla 2. 9. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones húmedas	68
Tabla 2. 10. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones normales	69
Tabla 2. 11. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones secas	69
Tabla 2. 12. Caudales ambientales para el río La Colorada en el tramo de interés (m ³ /s)	70
Tabla 2. 13. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones húmedas	71
Tabla 2. 14. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones normales	72
Tabla 2. 15. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones secas	72



Tabla 2. 16. Caudal ambiental para la quebrada La Gómez (m ³ /s)	73
Tabla 2. 17. Valores del caudal ambiental para cada unidad de análisis del nivel subsiguiente en el VMM	76
Tabla 2. 18. Síntesis de las metodologías de cálculo del uso de agua en los sectores económicos	78
Tabla 2. 19. Fuentes de información disponible	81
Tabla 2. 20. Uso del agua a nivel de subzona hidrográfica	84
Tabla 2. 21. Uso de agua en los sectores económicos presentes en el Valle Medio del Magdalena	85
Tabla 2. 22. Variables y ponderaciones para la estimación del ICA de cinco, seis y siete variables	97
Tabla 2. 23. Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA	98
Tabla 2. 24. Categorización IACAL	98
Tabla 2. 25. Cargas puntuales en toneladas por año vertidas por las tres (3) subzonas hidrográficas	99
Tabla 2. 26. Síntesis de los resultados del ICA y variables complementaria monitoreadas	103
Tabla 2. 27. Resultados del ICA en el tramo del río Magdalena (línea base)	105
Tabla 2. 28. Relación IACAL - ICA áreas de estudio	107
Tabla 2. 29. Información de la línea meteórica para cada estación	113
Tabla 2. 30. Valores ponderados para el $\delta^{18}O$ y δ^2H por cada estación	115
Tabla 2. 31. Clasificación IRH de los ENA	122
Tabla 2. 32. Índice de Regulación Hídrica en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija	123
Tabla 2. 33. IRH en causas principales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón	125
Tabla 2. 34. Interpretación del índice de uso del agua	127
Tabla 2. 35. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año medio	129
Tabla 2. 36. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año seco	132
Tabla 2. 37. Descripción de las imágenes utilizadas en el análisis multitemporal	140
Tabla 2. 38. Relación de caudales en los ríos tributarios del río Magdalena (tramo de estudio)	142
Tabla 2. 39. Caracterización de la resistencia a la erosión fluvial	145
Tabla 3. 1. Variables monitoreadas actualmente en cada SZH	158
Tabla 3. 2. Resultados del Pirma con sus respectivos indicadores verificables	162
Tabla 3. 3. Costos de los resultados del Pirma de la CAS	170
Tabla 3. 4. Costos anualizados de los resultados del Pirma (cifras en millones de pesos)	171
Tabla 3. 5. Fuentes de financiamiento por recursos propios	172
Tabla 3. 6. Usuarios potenciales para el uso de la información hidrológica identificados por la CAS	176
Tabla 3. 7. Red de referencia regional de la calidad del agua superficial del Pirma de la CAS	177
Tabla 3. 8. Hoja de ruta de la implementación de la red de referencia regional de calidad del agua superficial propuesta en el Pirma de la CAS	179
Tabla 3. 9. Concepción de la priorización de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de la calidad del agua del Pirma de la CAS	179
Tabla 3. 10. Priorización de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de calidad del agua superficial del Pirma de la CAS	180



Tabla 3. 11. Puntos seleccionados para la red de monitoreo con profundidad de captación inferior a los 40 m y el año del inicio del monitoreo	182
Tabla 3. 12. Puntos que conforman la red de monitoreo de aguas subterráneas con captación superior a los 40 m de profundidad	183
Tabla 3. 13. Propuesta de formato de seguimiento y evaluación para la implementación del SOMV	188
Tabla 3. 14. Propuesta de formato de seguimiento y evaluación para la implementación del SOMV	188
Tabla 4. 1. Boletines emitidos durante la ejecución del acuerdo de cooperación AC 04	190
Tabla 4. 2. Estaciones utilizadas para el seguimiento de los niveles de los ríos	200





LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

% SAT	Porcentaje de saturación de oxígeno
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
APC	Agencia Presidencial de Cooperación Internacional
AQS	Aquarius Samples
Arima	Modelo autorregresivo integrado de media móvil
ARMA	Modelo autorregresivo de media móvil
ARS	Servicio Agrícola de Investigación
CAM	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena
CAR	Corporación Regional de Cundinamarca
CAS	Corporación Autónoma Regional de Santander
CDC	Curva de duración de caudales
COND	Conductividad eléctrica
COT	Carbono orgánico total
CV	Coefficiente de variación
CVC	Corporación Regional del Valle del Cauca
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
Dihme	Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos del Ideam
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DQO	Demanda química de oxígeno
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



ENA	Estudio Nacional del Agua
ENSO	El Niño Southern Oscillation
ERA	Evaluaciones Regionales del Agua
FEWS	Flood Forecasting and Early Warning System
Fonam	Fondo Nacional Ambiental
GEM	Global Environmental Multiscale Model
GFS	Global Forecast System
GIRH	Gestión Integral del Recurso Hídrico
GLOH20 -MSWEP	Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
GLOH20 -MSWX	Multi-Source Weather
GR4H	Hourly Rainfall-Runoff model four parameters
GR4J	Journy Rainfall-Runoff model
GR5H	Hourly Rainfall-Runoff model five parameters
GSMAP	Global Satellite Mapping of Precipitation
GWP	Global Water Partnership
HCT	Hidrocarburos totales
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System
HRU	Unidad de respuesta hidrológica
IA	Índice de aridez
Ical	Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua
ICA	Índice de calidad del agua en corrientes superficiales
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic Model
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés
IRH	Índice de Regulación Hídrica
IUA	Índice de Uso del Agua
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LCA	Laboratorio de Calidad Ambiental del Ideam
LiDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGA	Metodología General Ajustada
MML	Matriz de Marco Lógico
MP	Metales pesados
OD	Oxígeno disuelto
OHTS	Oferta Hídrica Total Superficial
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OSPA	Oficina de Servicio de Pronósticos y Alertas del Ideam



PIRMA	Programa Institucional Regional del Monitoreo del Agua
PNGIRH	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico
PNMRH	Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico
POI	Plan operativo integrado
Pomca	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
PORH	Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos Municipales
Q	Caudal
QLL	Caudal a banca llena
Qmax	Caudal máximo
Qmin	Caudal mínimo
RFmerge	Merging of satellite datasets with ground observations using Random Forests (RF)
SGR	Sistema General de Regalías
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
SOMV	Sistema de Observación, Medición y Vigilancia
SSE	Sistema de Seguimiento y Evaluación
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
SZH	Subzona hidrográfica
TEMP	Temperatura
TIN	Red irregular de triángulos
Tr	Período de retorno
TURB	Turbidez
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
UNEP	United Nations Environment Program
Unesco	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
VMM	Valle Medio del Magdalena
WRF	Weather Research & Forecasting Model





INTRODUCCIÓN

La evaluación y el conocimiento de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, es un proceso continuo y sistemático necesario para una adecuada gestión integral de estos recursos y para la toma de decisiones. Estas actividades se encuentran consagradas en la normatividad colombiana, la cual le asigna responsabilidades a nivel nacional al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (en adelante, Ideam), mientras que, a nivel regional les 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. En búsqueda de esa estandarización surgieron las Evaluaciones Regionales del Agua (en adelante, ERA), como un proceso de evaluación del agua en las regiones, a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. El objetivo es que estas se constituyan en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en las áreas

de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que las integran. Se busca generar 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 presentaron los elementos conceptuales necesarios para abordar la estimación y análisis de la oferta, demanda, calidad y el riesgo del agua en las regiones, en coherencia con lo abordado en el Estudio Nacional del Agua. A partir de estos conceptos y procedimientos, las autoridades ambientales deben realizar continuamente la evaluación del agua, teniendo en cuenta los factores naturales y antrópicos regionales en el área de su jurisdicción, 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 el abastecimiento humano, la agricultura, la ganadería, las actividades industriales y de producción de hidrocarburos; por lo tanto, es pertinente la evaluación integral de dichos recursos para su adecuado manejo.

En este contexto de generación de conocimiento, el Ideam y Ecopetrol firmaron el acuerdo de cooperación AC N.º 4 3034153 2020, con objeto de hacer una “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 N.º 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 el 22 de enero de 2014 y con un plazo de diez (10) años; esto es, hasta el 22 de enero de 2024.

Este documento se construye con el objeto de presentar los resultados del estudio. De cada temática se resumen los aspectos conceptuales y metodológicos. Los resultados y análisis se presentan en tablas, gráficos y mapas, apoyados por textos que resaltan los resultados, las conclusiones y la importancia de estos. Está soportado, a su vez, en otros documentos que presentan de forma detallada y extensa los conceptos, las metodologías, los análisis y los resultados de cada componente temático, los cuales se anexan al final del documento.

El texto se estructura en seis capítulos, incluyendo la introducción y la bibliografía. En el primer capítulo se presenta el contexto general del acuerdo de cooperación entre el Ideam y Ecopetrol; se determinan los marcos de referencia conceptuales, metodológicos, institucionales y normativos; se describe la zona de estudio, y se introducen las escalas de análisis espaciales y temporales. El segundo capítulo trata del estado del recurso hídrico superficial en el Valle Medio del Magdalena, y aborda el monitoreo hidrológico y de calidad del agua, la evaluación de la oferta hídrica, el caudal ambiental, la demanda y la calidad del agua, la caracterización isotópica de la precipitación, los indicadores hídricos y la modelación para el pronóstico y las alertas tempranas. El tercer capítulo plantea el fortalecimiento de la capacidad técnica de la Corporación Autónoma Regional de Santander (en adelante, CAS) en el monitoreo del recurso hídrico superficial y subterráneo, y detalla el estado actual y las alternativas de mejora de su red de monitoreo hidrometeorológico y de calidad del agua superficial y subterránea, así como el plan de financiamiento del Programa Regional del Monitoreo del Agua (en adelante, PIRMA) de la CAS. El cuarto capítulo presenta las actividades y contenidos de divulgación del acuerdo, y reseña los boletines emitidos de pronóstico y alerta hidrometeorológica en el Valle Medio del Magdalena. El quinto capítulo resume los resultados del acuerdo y plantea las recomendaciones, actualizaciones y seguimientos futuros de los resultados. El sexto capítulo presenta los vínculos a los anexos que soportan lo plasmado en este documento.





1. CONTEXTO GENERAL Y MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo presenta el contexto general del acuerdo de cooperación entre el Ideam y Ecopetrol. Se determinan los marcos conceptuales, metodológicos, institucionales y normativos; se describe la zona de estudio y las escalas espaciales y temporales de análisis, y se presentan sus resultados.

1. 1. Acuerdo de cooperación AC 04

El otrosí N.º 1 del acuerdo de cooperación AC N.º 4 contiene el documento técnico - Anexo 1 que define, entre otros, los productos por entregar y los contenidos asociados a tales productos, y se plantean cuatro objetivos específicos:

1. Monitoreo, pronóstico y generación de alertas hidrometeorológicas y de calidad

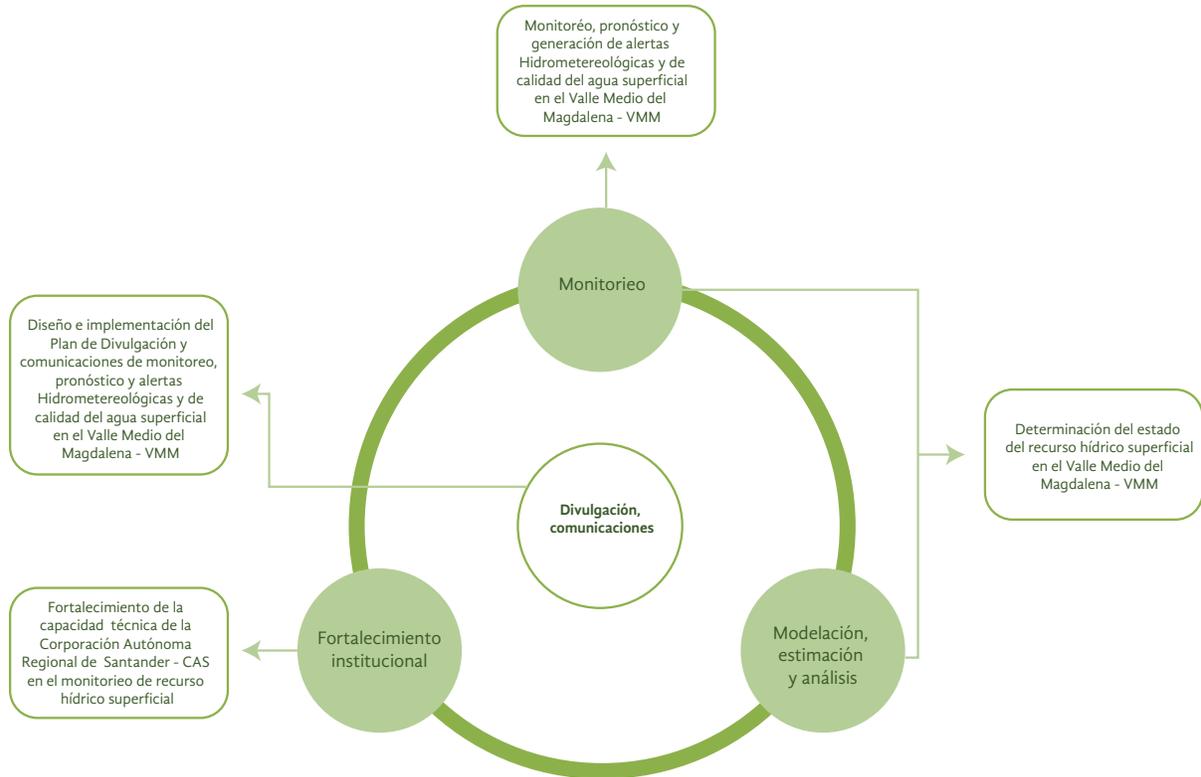
del agua superficial en el Valle Medio del Magdalena (VMM).

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 del 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; divulgación y comunicaciones.



Figura 1. 1. Esquema general de acuerdo AC 04 entre el Ideam y Ecopetrol



Fuente: elaboración propia.

1. 2. Marco conceptual. El ciclo hidrológico

El marco conceptual del estudio está soportado en los flujos, conexiones y almacenamientos 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

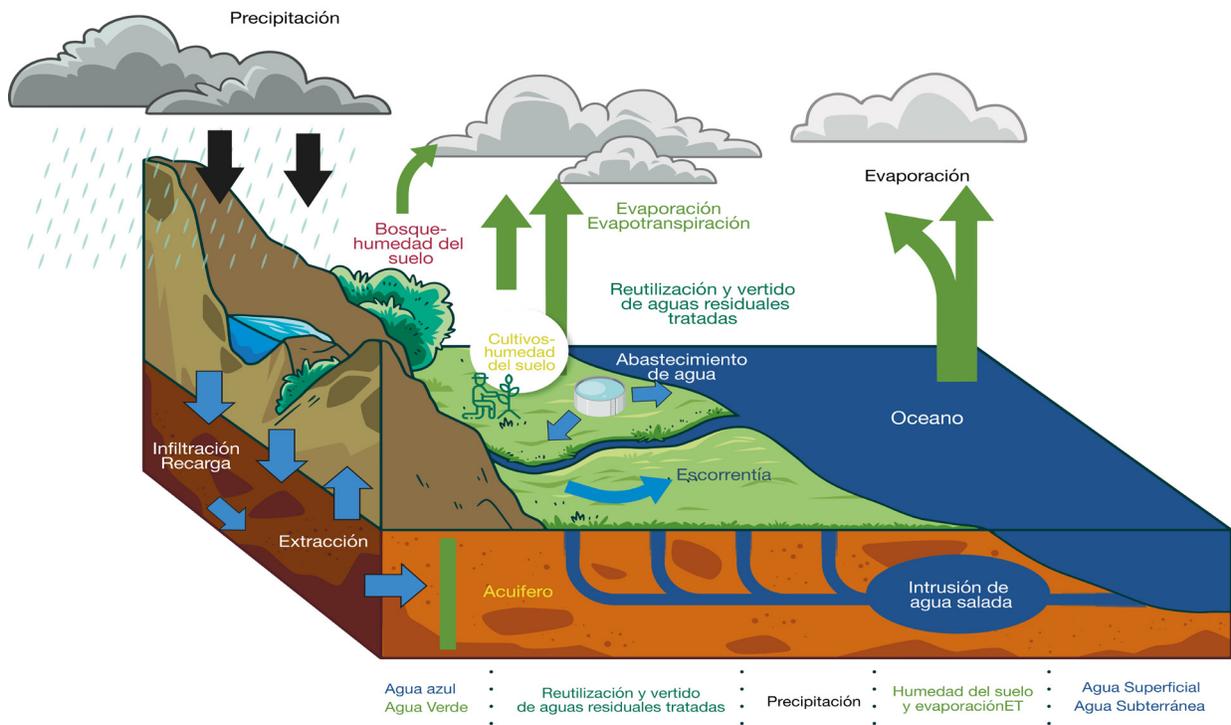
su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y re-evaporación” (OMM, 2012) (figura 1. 2). Se constituye como un modelo básico para entender el funcionamiento de los 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, 2013) (figura 1. 2).

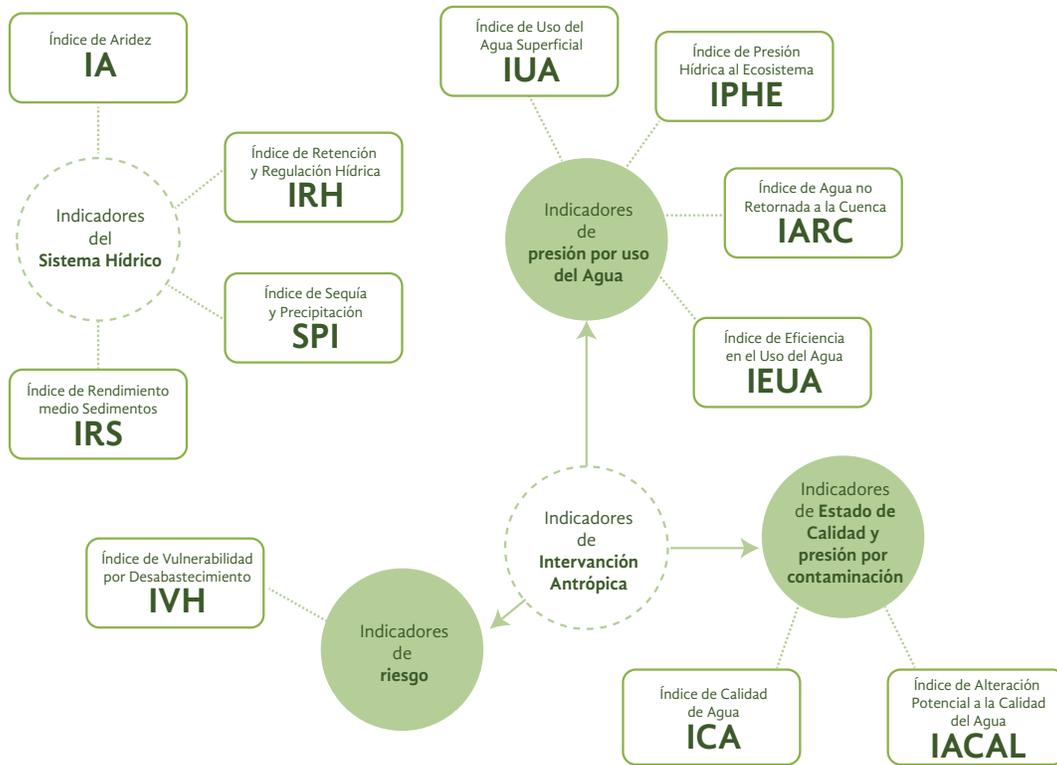
Figura 1. 2. Esquema del ciclo hidrológico.



Fuente: Tomado de IDEAM 2023



Figura 1. 3. Sistemas de indicadores hídricos para el ENA 2018



Fuente: Ideam (2019)

1. 3. Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua

El proceso metodológico toma como referente los Estudios Nacionales del Agua 2010, 2014 y 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 se presenta 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), y uso del agua (índice de uso del agua superficial, índice de presión hídrica al ecosistema, índice de agua no retornada a la cuenca) (ver figura 1.3).

La Evaluación Regional del Agua (en adelante, 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 las áreas 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 la estimación de la oferta, demanda, calidad del agua superficial y subterránea en la región, el cual se referenciará en los capítulos dedicados a estos procesos.

1. 4. Marco institucional y normativo

1. 4. 1. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (en adelante, 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 (en adelante, GIRH), definido por la Global Water Partnership (en adelante, 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, los principios, las estrategias, las líneas de acción generales y las 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 doce años (hasta el 2022). Su objetivo general es garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulada 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. 4. 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. 4. 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 MADS, con apoyo del Ideam e Invemar, busca la integralidad y complementariedad en el monitoreo de las principales variables de seguimiento del estado de 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*: este es un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, que estandariza la información básica requerida para su otorgamiento por las autoridades ambientales. Además, este 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 (en adelante, ICA) y el índice de alteración de la calidad del agua (en adelante, 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. 4. 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; dichos aspectos también se ven reflejados en un instrumento particular aplicado a los usuarios municipales, como es el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos Municipales (en adelante, PSMV).

1. 4. 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, que la define como aquella que deben pagar los usuarios por el efecto nocivo causado sobre los recursos naturales, cuando son usados para la disposición de residuos, y determina que los parámetros básicos para el cobro serían la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

1. 5. Área de estudio

El área de estudio corresponde a una porción del 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 (en adelante, SZH) del río Opón, río Lebrija medio-bajo y otros directos al Magdalena, y río Sogamoso. El área de influencia comprende a las subzonas hidrográficas de los ríos Carare, Fonce, Suárez y Chicamocha, teniendo en cuenta el aporte con relación a la oferta y calidad que estas pueden tener sobre las subzonas hidrográficas del área de interés, como resultado de procesos naturales y antrópicos. La zona comprende 44.441 km², y abarca 218 municipios en los departamentos de Cesar, Santander, Boyacá, Norte

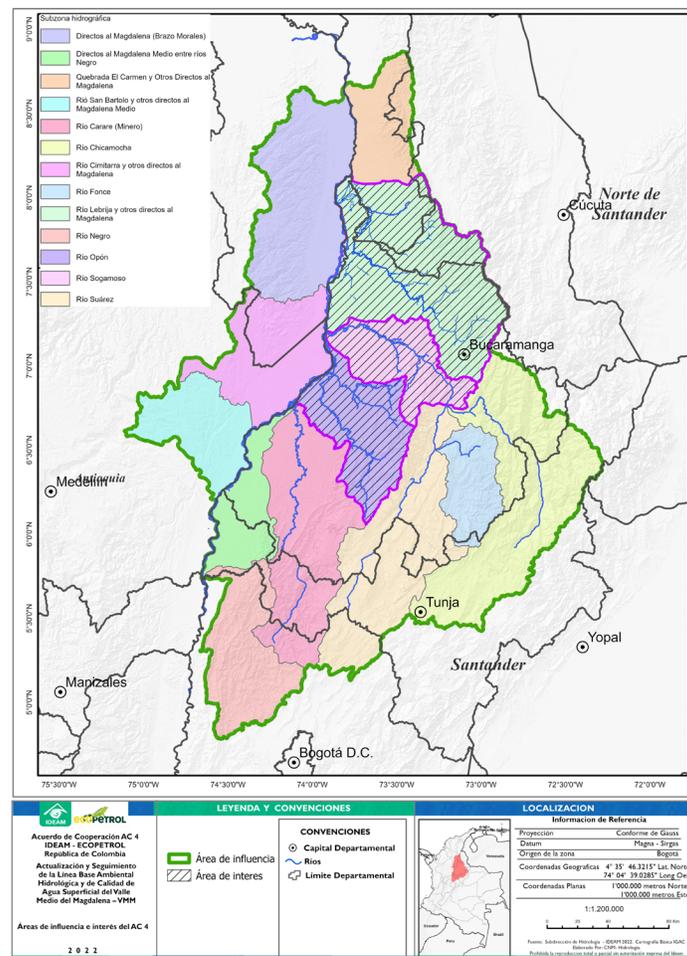


de Santander, Bolívar, Antioquia, Casanare, Arauca y Cundinamarca. Para la temática de la demanda del recurso, el área de influencia comprende, además de las subzonas mencionadas, las subzonas hidrográficas Río San Bartolo y otros directos al Magdalena Medio, Río Carare (Minero), Río Chicamocha, Río Cimitarra y otros directos al Magdalena, Río Fonca, Río Labriza y otros directos al Magdalena, Río Negro, Río Opón, Río Sogamoso y Río Suárez.

Río Cimitarra y otros directos al Magdalena, Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena (Brazo Morales) (figura 1. 4).

A continuación, se describen brevemente las subzonas hidrográficas correspondientes al área de interés.

Figura 1. 4. Localización del área de interés y área de influencia en los componentes de oferta, demanda y calidad



Fuente: elaboración propia.

1. 5. 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,

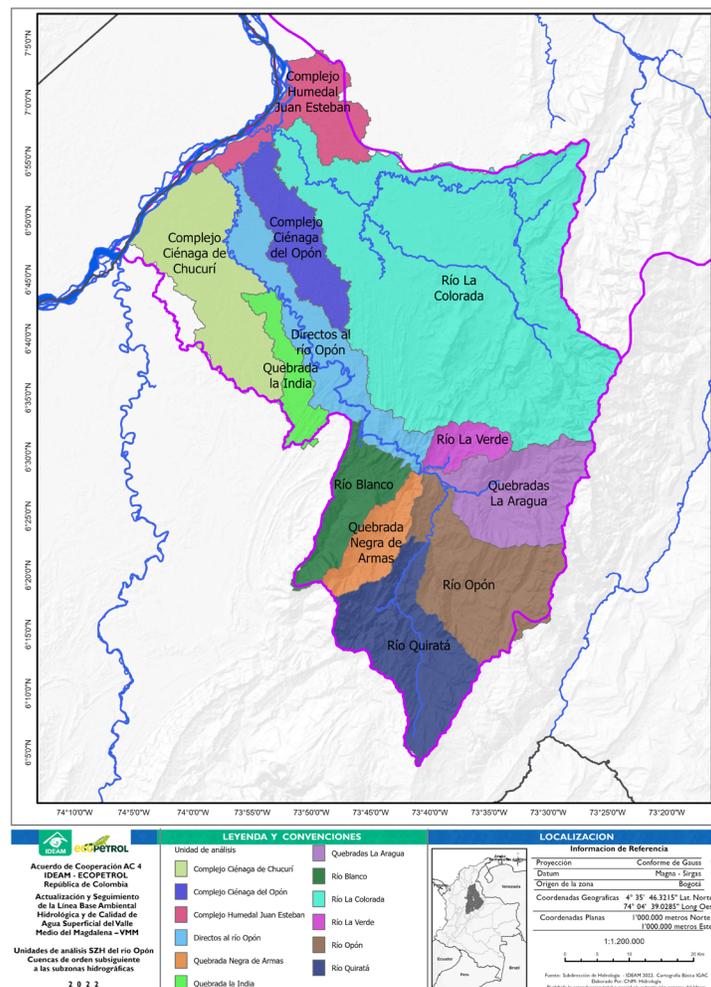
al oriente con la SZH del río Suárez, al sur con la SZH del río Carare y al occidente con el río Magdalena. Esta SZH se extiende a lo largo de 19 municipios del departamento de Santander (parcialmente), con una extensión total de



aproximadamente 4.318,46 km² equivalente al 14 % del área total del departamento (la localización de la SZH se presenta en la figura 1. 5). Dentro de sus principales corrientes se encuentran los ríos: Quitará, Verde, Blanco, Cascajales, La Colorada, Oponcito; todos ellos afluentes del río Opón.

Dentro del área de la SZH se encuentran contenidas las cabeceras de los municipios 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.

Figura 1. 5. Subzona Hidrográfica del río Opón



Fuente: elaboración propia.

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,

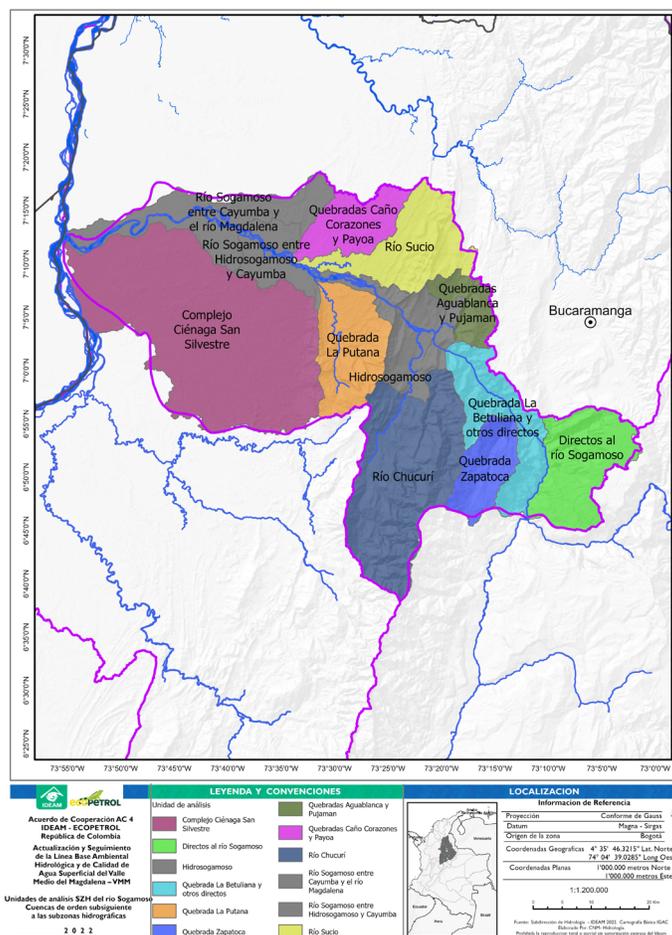
estas fuentes hídricas se unen en presencia de un complejo de ciénagas para finalmente desembocar al río Magdalena.

1. 5. 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, e inicia desde la confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha hasta la descarga del río Sogamoso en el río Magdalena. Esta subzona hidrográfica se localiza al 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 recibe las aguas de las SZH de los ríos Chicamocha y Suárez.

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 de esta SZH se encuentran contenidas las cabeceras municipales de los municipios Zapatoca, San Vicente de Chucurí, Betulia y una fracción de la cabecera municipal de Barrancabermeja (ver figura 1. 6). Adicionalmente, al interior de la SZH se localizan las ciénagas de San Silvestre, El Llanito, Zarzal, entre otras.

Figura 1. 6. Subzona hidrográfica del río Sogamoso



Fuente: elaboración propia.

Algunas de las principales afluencias del río Sogamoso son: aguas arriba los ríos Suárez 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 S. A. 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.

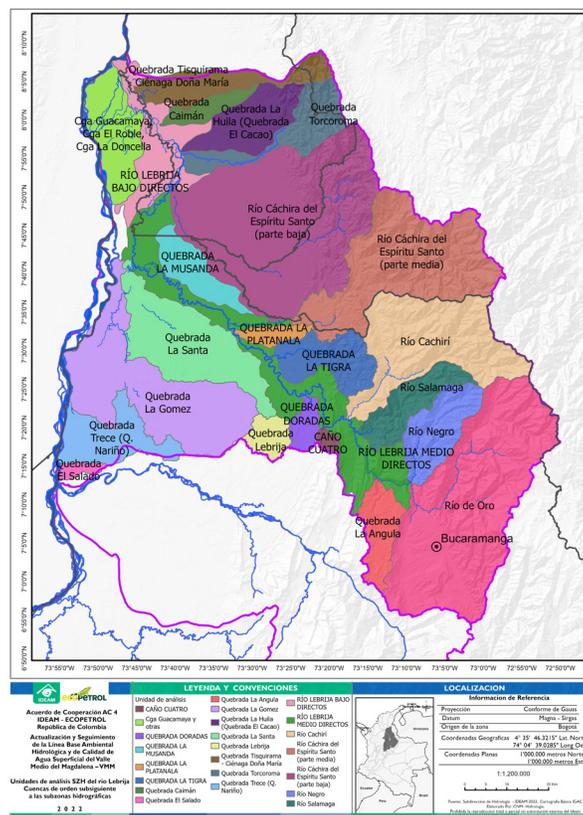
1. 5. 3. Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena

La SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena se localiza en el nororiente del

departamento de Santander. Limita al oriente con el departamento de Norte de Santander, al norte con los departamentos de Cesar y Bolívar, al occidente con el sur de Bolívar y al sur con la subzona hidrográfica del río Sogamoso. En la SZH del río Lebrija se ubica el área metropolitana de Bucaramanga, conurbación de los municipios de Bucaramanga, Girón, Piedecuesta y Floridablanca, además de Lebrija y Sabana de Torres, entre otros.

El río Lebrija se forma por la confluencia del río de Oro y el río Suratá. En la figura 1. 7 se muestra la ubicación, delimitación y subdivisión de la SZH del río Lebrija, donde se detalla que muchas corrientes del costado oriental drenan hacia este río que corre de suroriente hacia el noroccidente. Las subcuencas que se muestran en la figura corresponden a la

Figura 1. 7. Subzona hidrográfica del río Lebrija



Fuente: elaboración propia.

subdivisión hasta el nivel 3 (Ideam, 2013). Se deben destacar varias subcuencas que drenan directamente hacia el Magdalena, como lo son la quebrada La Gómez y la quebrada La Trece, que hacen parte de la SZH, pero que no drenan directamente al río Lebrija.

1. 6. 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 definidos en el ENA 2018 (ver la figura 1. 3). 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 este 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 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 POMCA, y hace uso de las curvas de nivel contenidas en la base cartográfica (1:25,000), el Modelo de Elevación

Digital (DEM por sus siglas en inglés) 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 optó por utilizar la delimitación de nivel subsiguiente elaborada por la CAS para los POMCA mencionados, de modo que los productos aquí generados se ajusten espacialmente con los productos a su vez generados por la CAS.

- **Criterios fisiográficos e hidrológicos:** en cuencas que no tienen POMCA se usaron unidades de análisis definidas por el Ideam, dado que se consideraron criterios fisiográficos y conexiones hidrológicas en redes de drenaje. Para la delimitación de las cuencas del nivel subsiguiente a SZH, se tuvieron 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 con resolución de 30 metros, y la revisión de imágenes satelitales para la verificación del trazado actual de las corrientes, entre otras fuentes de información.

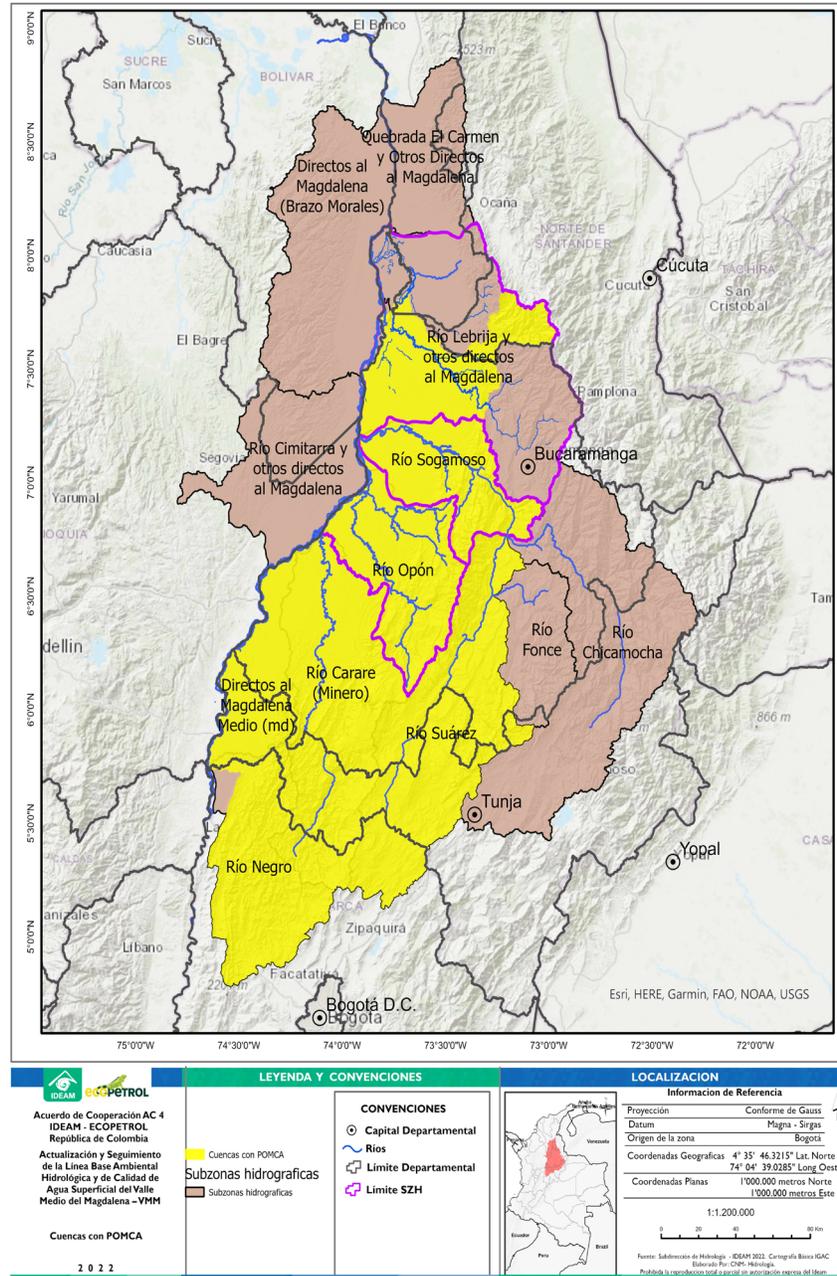
La figura 1. 8 muestra las cuencas con cubrimiento de POMCA (en verde) y en las que se usaron las unidades de análisis definidas en los POMCA.

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.

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



Figura 1. 8. Cubrimiento de cuencas con POMCA y cuencas sin POMCA



Fuente: elaboración propia.



2. ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

En este capítulo se presenta un resumen de los aspectos conceptuales y metodológicos tendientes a la estimación del estado del recurso hídrico superficial en el Valle Medio del Magdalena. Además, se detallan los resultados obtenidos. Inicialmente, se trata el monitoreo hidrológico y de calidad del agua efectuado en el marco del estudio. Posteriormente, se presentan los resultados de la oferta hídrica, el caudal ambiental, la demanda y calidad del agua, y la caracterización isotópica de la precipitación. Por último, se muestran los indicadores hídricos para las unidades de análisis y la implementación de la modelación tendiente al pronóstico y alertas tempranas en el tramo del río Magdalena que comprende el estudio. Cada temática analizada en este capítulo está soportada en documentos que detallan de forma extensa los conceptos,

metodologías, análisis y resultados obtenidos. Estos documentos se pueden descargar y consultar en los anexos.

2. 1. Monitoreo hidrológico y de calidad del agua de fuentes superficiales

En este numeral se presentan los monitoreos efectuados en el marco del estudio, los resultados obtenidos en las campañas, y el sistema de información hidrológica y de calidad del agua superficial, y se especifica cómo se accede a los datos de cantidad y calidad. Los contenidos de este numeral están basados en el documento “Información hidrológica y de calidad del agua del VMM actualizada al año 2023”, en el cual se expone de forma extensa y detallada la temática tratada.

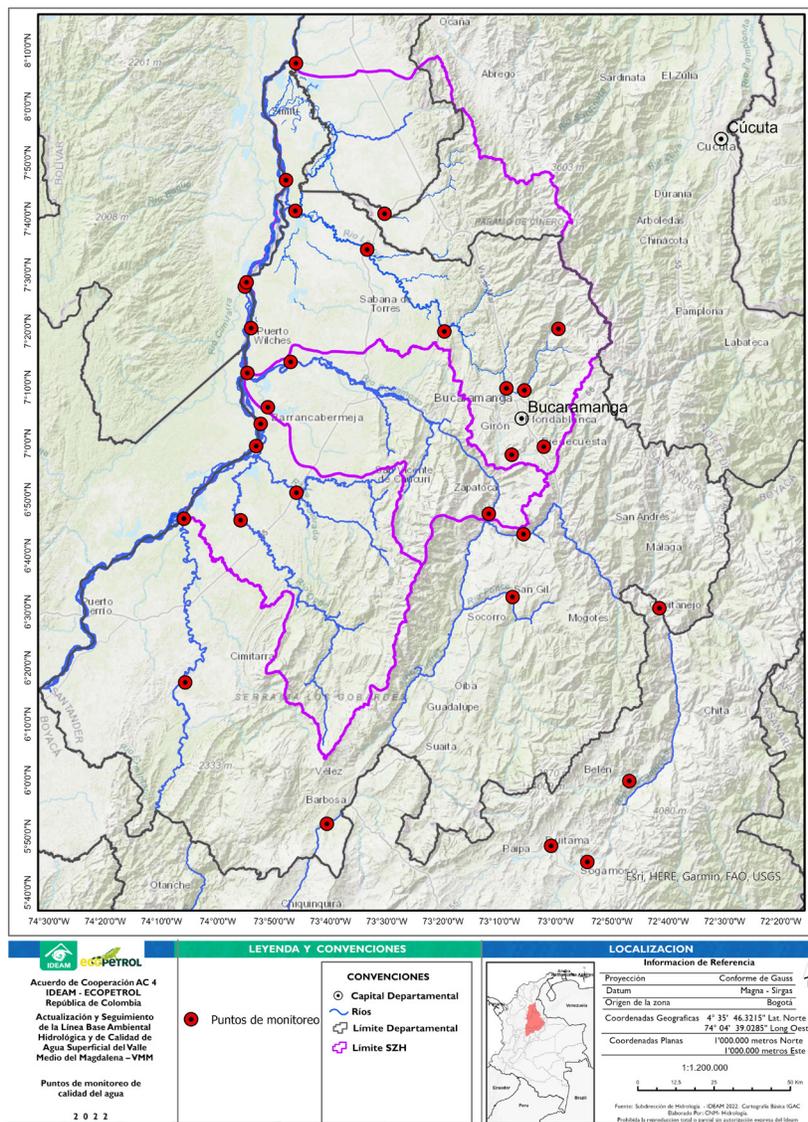


2. 1. 1. Monitoreos efectuados en el marco del estudio

Para la actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad de agua superficial del VMM, se visitaron 30 puntos ubicados en cuerpos de agua lóticos, y

uno solo de ellos en cuerpo léntico (Ciénaga San Silvestre), cuya distribución espacial se muestra en la figura 2. 1. Para cada punto se realizaron máximo ocho (8) monitoreos en el período 2021-2023.

Figura 2. 1. Distribución espacial de los puntos de monitoreo de calidad de agua superficial en las Subzonas Hidrográficas Opón, Sogamoso, Lebrija y Tramo del Magdalena



Fuente: elaboración propia.

Tanto las operaciones de monitoreo para la recolección de muestras como los ensayos de laboratorio realizados para evaluar las condiciones (el estado) de calidad del recurso cumplieron con la rigurosidad requerida para garantizar la trazabilidad metrológica en sus registros, la validez técnica y la confiabilidad de la información.

Para efectos de este estudio, se hizo un seguimiento a diferentes regímenes hidrológicos y estacionales (aguas altas y aguas bajas), aunque desafortunadamente el período coincidió con un fenómeno de La Niña prolongado (de agosto de 2020 a marzo de 2023), con lluvias por encima de los promedios históricos 1991-2020. De otra parte, ningún punto se puede considerar de referencia natural sin intervención, un sitio prístino (o con el menor impacto posible), relativamente libre de presiones a la calidad debidas a la agricultura, efluentes de aguas residuales o de minería, pues de tiempo atrás todos han seguido una tendencia de intervención antrópica.

Por representatividad y homogeneidad, las muestras fueron tomadas de la parte superficial por debajo del nivel del agua e integradas de tres verticales a $1/4$, $1/2$ y $3/4$ de la sección transversal de las corrientes desde puentes, tarabitas o lanchas, según disponibilidad o accediendo a pie en las fuentes vadeables.

El conjunto de máximo 55 variables básicas seleccionadas da cuenta de una caracterización fisicoquímica tradicional para evaluar el estado del recurso por grupos, que corresponden a categorías comúnmente reconocidas (Ideam e Invemar, 2021) como son: 1) variables *in situ*: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), conductividad eléctrica (COND), oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno (% SAT OD), pH; 2) materia orgánica: demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), Amonio N-NH_3 , variables que pueden inducir la reducción del oxígeno disponible; 3)

nutrientes: compuestos de nitrógeno solubles (nitrito NO_2 , nitrato NO_3 , nitrógeno amoniacal N-NH_3) y totales (nitrógeno total NT) y fósforo (fósforo soluble PO_4 , fósforo total PT), que pueden provocar eutrofización y afectar la disponibilidad de oxígeno y la integridad del hábitat para especies acuáticas, particularmente en las riberas de zonas planas y cuerpos lénticos; 4) características físicas: sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), turbidez (TURB); 5) iones principales, sales disueltas: sulfatos SO_4 ; 6) presión por actividad agrícola, minera e industrial: metales pesados MP en agua (fracción total de Al, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) y sedimentos (los mismos que en agua, como fracción biodisponible y mercurio Hg total), hidrocarburos HCT (totales), pesticidas organoclorados compuestos (algunos obsoletos prohibidos por la OMS por su persistencia en el ambiente, de amplio uso en el pasado, y otros por ser muy peligrosos o moderadamente peligrosos en cuanto a su toxicidad y para la salud humana), organofosforados (dos de uso frecuente en Colombia, uno de ellos muy peligroso) y triazinas (una de uso frecuente en Colombia).

No se tuvieron en cuenta variables microbiológicas relacionadas con patógenos que afectan la salud pública, debido a que el seguimiento se hizo desde el concepto de calidad ambiental. Por calidad de las aguas ambientales (United Nations water, 2017) se entiende el agua natural no tratada que se ve afectada por una combinación de influencias naturales y actividades antropogénicas, como los aportes de las aguas residuales o la escorrentía agrícola.

Haciendo una adaptación del concepto de “valor objetivo” (GEMS Water, United Nations Environment Program UNEP, 2020), los valores criterio (alarma) para la admisibilidad del recurso para un uso o destinación determinado pueden ser de tres tipos, dependiendo del parámetro a ser medido: i) un valor “máximo” que no debe ser excedido (ej. en Colombia



no debe excederse el valor de 0,1 mg P/L de fosfatos para uso en acuicultura); ii) valores “mínimos”, significa que el valor del parámetro no debe caer por debajo del objetivo (ej. el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto no debe ser inferior de 70 % para uso recreativo por contacto primario y secundario); iii) parámetros que tienen un “rango” de aceptación como valores normales (ej. un rango óptimo de pH entre 6,5 y 8,5 para consumo humano), una desviación de dicho rango puede ser sintomática de un problema de calidad del agua que puede requerir una investigación más exhaustiva.

Por ejemplo, en Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) se han contemplado criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para: consumo humano y doméstico, uso agrícola, uso pecuario, fines recreativos mediante contacto primario y secundario, uso estético, preservación de flora y fauna (aplicable por ejemplo a zonas de protección natural, reservas), entre otros.

Cuando en un determinado tramo hay varios usos del recurso con prioridad similar, por el principio de precaución, se toma en este estudio como valor de alarma el valor más restrictivo.

2. 1. 2. Resultados y análisis de los monitoreos

De las 55 variables determinadas, 22 cuentan con valores criterio de alarma propuestos por el Grupo de Evaluación Hidrológica en el marco del estudio para algún uso del recurso (40 %); de estas, 12 variables presentaron valor de alarma en al menos uno de los monitoreos, y para cada uno de los 31 puntos visitados se calculó el porcentaje de alarma, según el número de veces que la magnitud presentó un valor que excedió el criterio de admisibilidad. Para las salidas gráficas (figura 2. 2, figura 2.

3, figura 2. 4), dicho porcentaje se representa en forma de círculos alrededor del punto, cuyo tamaño e intensidad de color se incrementa en la medida en que la frecuencia de excedencia aumenta, dando un indicio de mayor persistencia en la condición de presión a la calidad. Así mismo, un menor tamaño e intensidad indica presiones más esporádicas que obedecen a alteraciones puntuales cercanas al momento del muestreo.

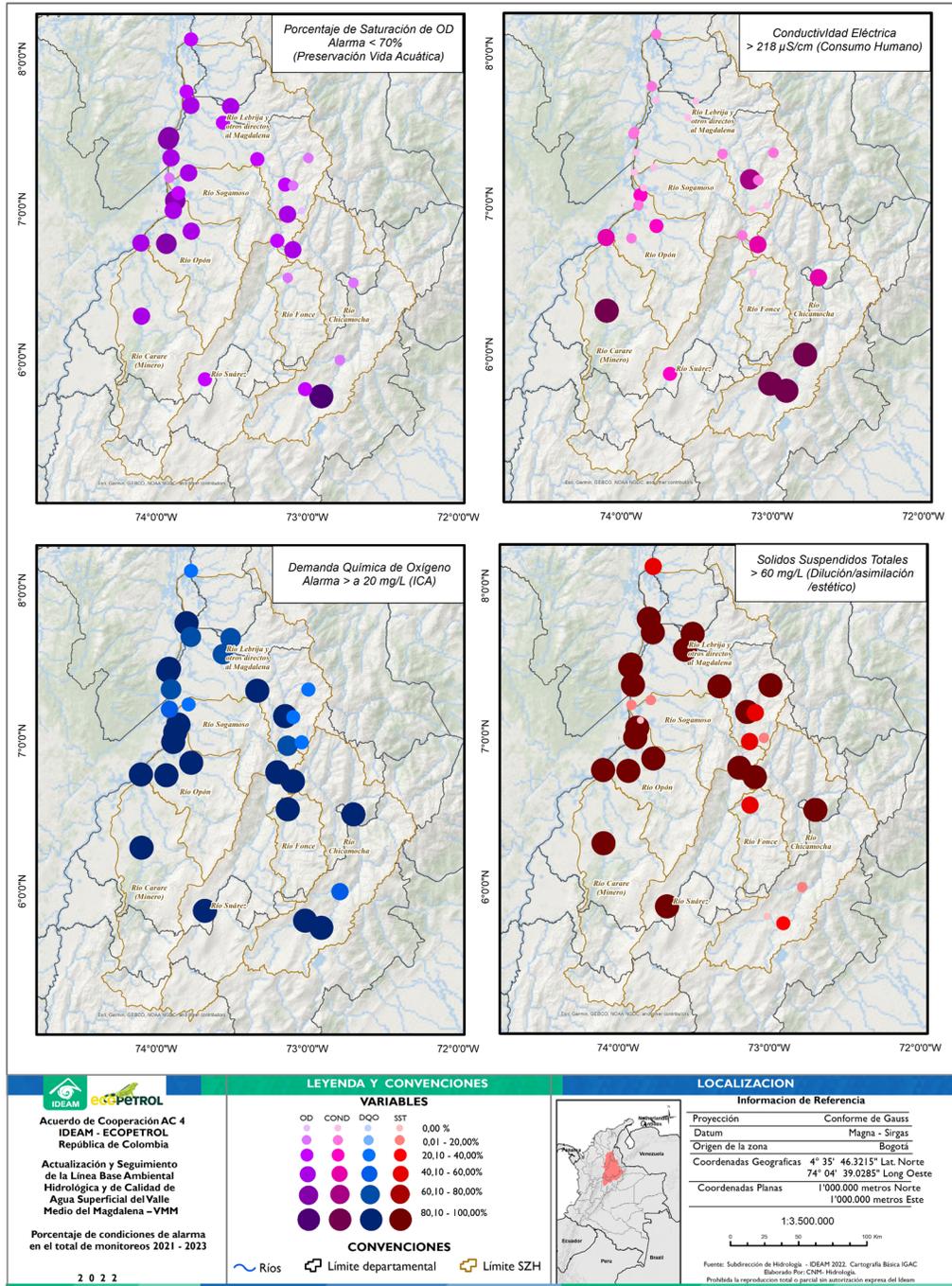
Las condiciones de oxigenación presentaron alteración con mayor frecuencia en las SZH Opón y un tramo del Magdalena, y en menor proporción en las SZH Sogamoso y Lebrija (figura 2. 2), de modo que las estaciones más presionadas coinciden con valores más altos de sólidos suspendidos que, a su vez, se correlacionan con magnitudes mayores de demanda química de oxígeno, lo que indica presencia de material no biodegradable o conductividad (que refleja más sales minerales disueltas), o carbono orgánico y nitrógeno amoniacal (estos dos últimos indicativos de descargas de aguas residuales).

En el caso de los hidrocarburos totales HCT (figura 2. 3), los valores en condición de alarma fueron ocasionales, se presentaron con una frecuencia inferior del 20 %, mostrando presiones puntuales en estaciones ubicadas en los municipios de Simacota, Barrancabermeja, Puerto Wilches y Puerto Parra, en Santander; Aguachica, en Cesar, y San Pablo, en Bolívar.

En cuanto a los metales totales en agua, el plomo excedió el criterio de alarma puntualmente en un solo monitoreo, en un punto ubicado en el municipio de Cimitarra sobre el río Carare. Excedencias de manganeso (Mn), aluminio (Al) y Hierro (Fe) fueron coincidentes en los municipios de Simacota (río La Colorada), Los Santos (río Sogamoso), Cimitarra (río Carare) y Barrancabermeja (río Magdalena).

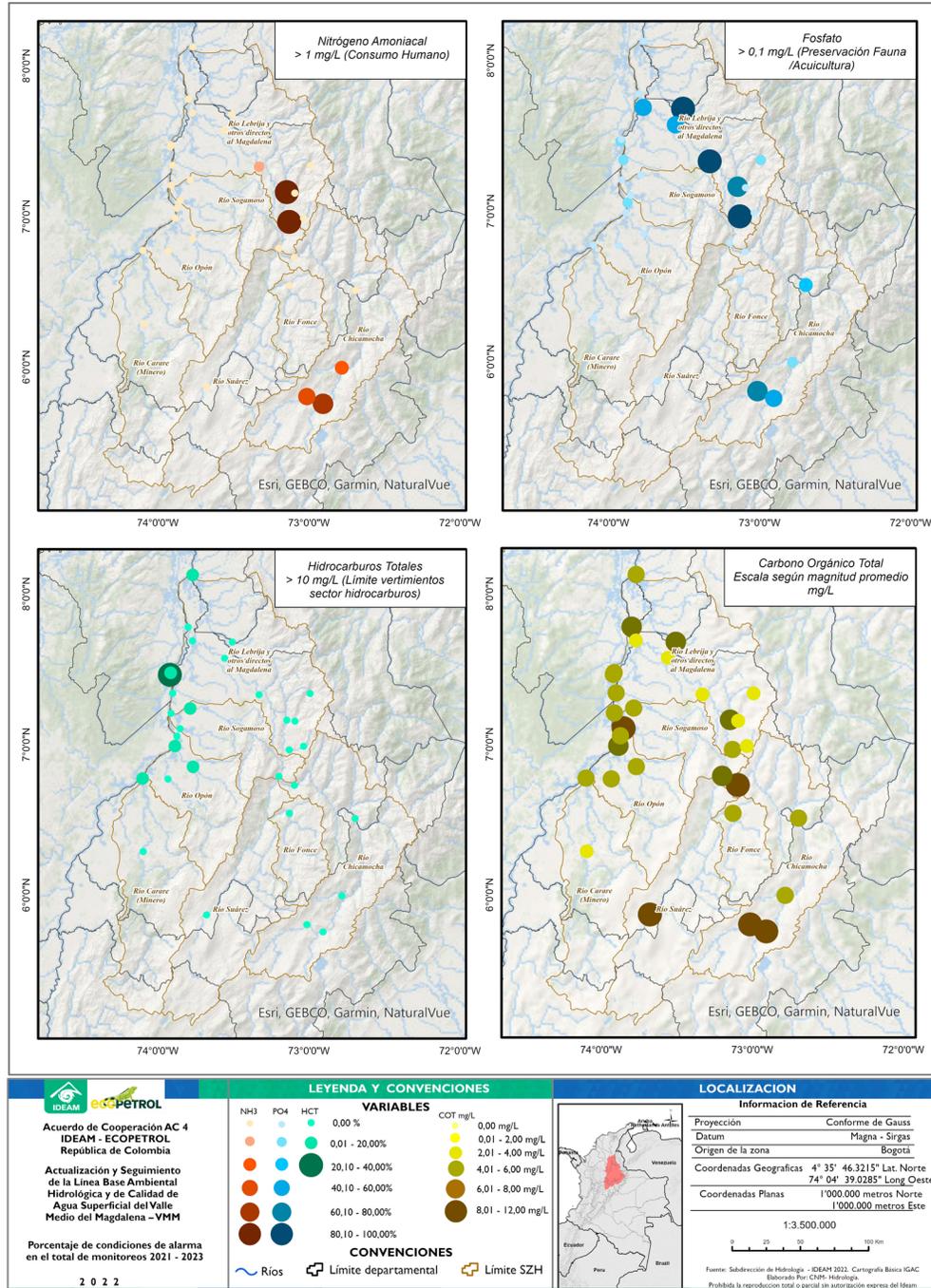


Figura 2. 2. Porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo, a partir del porcentaje de saturación de OD, conductividad eléctrica y concentración de demanda química de oxígeno y carbono orgánico total



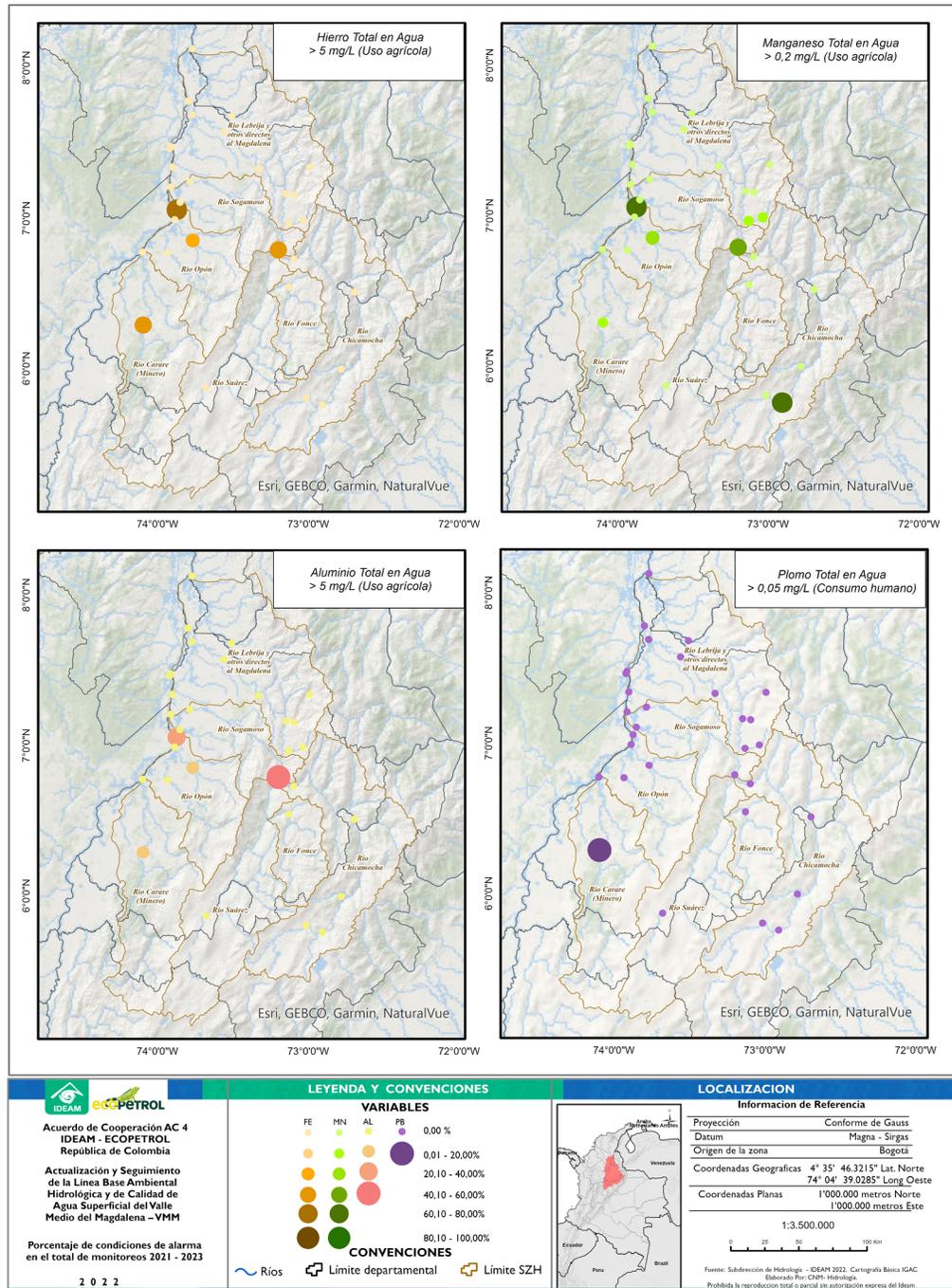
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 3. Porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo, a partir de concentración de sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal, fósforo soluble e hidrocarburos totales



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 4. porcentaje de estado/condiciones de alarma en el total de monitoreos 2021-2023 para variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir concentraciones totales en agua de plomo, manganeso, aluminio y hierro



Fuente: elaboración propia.

En cuanto al posible origen de estos metales pesados en el agua, según el Instituto de Recursos de Agua de Texas del Servicio de Extensión Cooperativa de Texas (2023) el hierro y el manganeso son elementos comunes en la superficie de la tierra, y son dos elementos similares. El hierro es más común que el manganeso, pero frecuentemente aparecen juntos. No son peligrosos para la salud, pero pueden darle al agua un sabor, olor y color indeseables.

Respecto del aluminio, García y Zúñiga (2021) mencionan que el aluminio es un componente natural del agua superficial y subterránea debido, principalmente, a que forma parte de la estructura de las arcillas y puede estar presente en forma soluble en sistemas coloidales responsables de la turbiedad; se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, y se considera tóxico para el crecimiento de las plantas en suelos ácidos. Es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre; en aquellos municipios donde no se realizó tratamiento del agua (para potabilización), la procedencia del aluminio se debió a que venía incorporado en su fuente hídrica abastecedora.

En relación con el plomo, el Ministerio de Salud (Ministerio de Salud y Protección Social. Dirección de Promoción y Prevención, 2022) señala en la información general sobre este metal que el plomo (Pb) es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar a una importante contaminación ambiental, a la exposición humana y a graves problemas de salud pública en muchas partes del mundo. Entre las principales fuentes de contaminación ambiental por plomo se destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje, y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y combustibles, principalmente para la aviación.

El plomo es una sustancia tóxica versátil y ampliamente utilizada. Este metal también se usa en muchos otros productos, como pigmentos, pinturas, soldaduras, vidrieras, vajillas de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, joyas, juguetes y algunos productos cosméticos y medicamentos tradicionales. También puede contener plomo el agua potable canalizada a través de tuberías de plomo o soldadas con este metal. En la actualidad, gran parte del plomo comercializado mundialmente procede del reciclaje.

2. 1. 3. Sistema de información hidrológica y de calidad de agua superficial en el Valle Medio del Magdalena

Para la gestión de la información generada, las fases de cada monitoreo son: planificación (fase 1), ejecución (fase 2) y obtención de resultados y salidas de información (fase 3), se registraron en el aplicativo AQS que es uno de los módulos de DHIME, al que se accede desde el vínculo indicado a continuación: <http://dhime.ideam.gov.co/webgis/home/>

Dhime es el Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos del Ideam. Este portal permite el acceso a las herramientas de gestión de series temporales, datos de laboratorio (mediante el aplicativo Aquarius Samples [en adelante, AQS]), acceso bajo demanda a datos oficiales, apoyado en mapas inteligentes, herramientas analíticas y geo información del Ideam. El ingreso a las aplicaciones se autoriza únicamente a servidores públicos del Ideam.

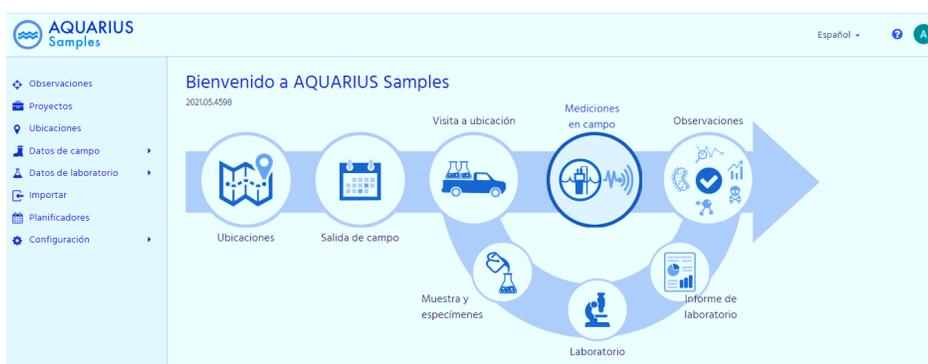
AQS es una aplicación comercial (licenciada) de administración de muestras que almacena y valida, de manera segura, todos los datos discretos de entorno en la nube, para el análisis y visualización de la información generada en el Laboratorio de Calidad



Ambiental, la cual se empezó a usar a partir del segundo trimestre de 2019. Este repositorio central de datos conserva todos los metadatos relevantes asociados con las mediciones de calidad del agua. Se accede desde el vínculo indicado a continuación, a través de correos de Gmail: <https://ideam.aqsamples.com/login>

Por lo anterior, el acceso al público de los datos crudos se obtiene en respuesta a una solicitud de los usuarios a través de los canales de contacto o atención al ciudadano del Ideam.

Figura 2. 5. Secciones del Aplicativo AQS: ubicaciones, salidas de campo, visita a ubicación, mediciones en campo, observaciones, muestras y especímenes y salidas de información



Fuente: elaboración propia.

El alcance del diligenciamiento del aplicativo inicia en la creación de un proyecto; para la planificación de una salida de campo que puede contener una o más visitas, incluye la creación de las ubicaciones asociadas (sitios), la selección de especímenes (recipientes) según la definición de las propiedades (variables) observadas, la digitación de resultados de campo y de ensayos en laboratorio, la revisión y aprobación de los registros y la generación de reportes.

Como parte de la metadata que soporta los registros de monitoreo y los resultados analíticos, AQS requiere:

- La creación del punto geográfico, denominado “ubicación” en el aplicativo.
- Detalles de la ubicación del muestreo.
- Creación del proyecto.

- Selección de las ubicaciones para el proyecto.
- Creación de la salida de campo.
- Visita a ubicaciones. Distingue estados: planificado, en progreso y finalizado.
- Fecha y hora de inicio, y finalización de las actividades (de monitoreo).
- El personal que realiza las actividades, denominado “participantes” en el aplicativo.
- Se describe si se van a tomar datos de campo (ej. variables In Situ: pH, COND, OD, TEMP).
- Se señalan las variables que se van a coleccionar para su posterior análisis en el laboratorio, denominadas “propiedad observada” en el aplicativo.
- Se anota la preservación de las muestras, en el aplicativo se llama “nombre del espécimen”.



- Se señala si se van a realizar estudios de campo y la(s) comunidad(es) hidrobiológica(s) que se evaluarán.
- Se señala si se van a realizar perfiles verticales.
- Se crean las muestras, distingue entre muestras de rutina, réplicas (duplicados) y controles de calidad del muestreo (blanco, réplica, testigo, adicionado).
- Asigna un código único, en el aplicativo se llama “nombre de la actividad”, y obedece a la asignación de un consecutivo único que se lleva desde que se inició en el LCA; el ingreso de muestras en medio digital actualmente es alfanumérico, la parte numérica es el consecutivo y la parte alfabética una letra que se asigna al proyecto. Incluye medio (por ejemplo, agua superficial), método de recolección, comentarios (por ejemplo, actividades económicas aledañas al sitio), se crea el nombre del espécimen (que corresponde a los envases o recipientes, con su correspondiente preservación). Para discriminar todas las variables específicas por determinar en cada recipiente, en el aplicativo se denomina a este campo propiedad observada; en el menú detalles del espécimen del aplicativo se ingresan las correspondientes solicitudes de análisis, es decir, la propiedad (variable), el método de análisis (o ensayo) usado, el método de preparación (si aplica), el tiempo de retención (en horas) que se refiere a los tiempos recomendados para la ejecución del análisis, contabilizados desde el momento del muestreo y comentarios.
- Se realiza la digitación de resultados de campo y laboratorio (avalados técnicamente), que en la consulta exportada corresponde al campo “Clasificación de datos” (en la salida o consulta las opciones son FIELD y LAB); se indican las unidades de medida, los límites de detección y cuantificación

del método LDM y LCM, respectivamente. Cuando el resultado está por debajo de dichos límites, se selecciona la opción NO DETECTADO (NOT_DETECTED), se deja registro del responsable (analista) en el campo denominado “indicador de calidad”, y del estado de revisión del dato, según el estado de auditoría analítica (radicado, analizado, reprocesado, revisado, digitado, aprobado). Los campos denominados “indicador de calidad” y “estado del resultado” no se incluyen en la consulta entregada.

Para la generación de consultas o reportes:

- Se procede a la exportación de datos (en formato CSV) desde el menú OBSERVACIONES, con los filtros deseados de fechas, proyecto, salidas de campo, ubicaciones, etc.
- Se organiza la exportación en Excel con los campos autorizados para entrega a los usuarios, con el aval del líder técnico (Anexo 3).

2. 2. Evaluación de la oferta hídrica superficial

La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) se define como 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). En este numeral se resumen los aspectos conceptuales y metodológicos de la evaluación de la oferta hídrica superficial en el Valle Medio del Magdalena y se presentan los resultados. Los contenidos están basados en el documento “Modelación de oferta hídrica superficial del VMM” y en el segundo capítulo del documento “Comportamiento histórico y estado actual



del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”, en los cuales se exponen de forma extensa y detallada la temática tratada (disponibles en los anexos de este documento).

2. 2. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

Para determinar la OHTS se definen unidades de análisis, que, en el caso del estudio, corresponden a un nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas y a una resolución temporal anual. La OHTS está determinada por el ciclo hidrológico en cada unidad de análisis; por lo tanto, es este ciclo y su distribución espacio-temporal la que define los aspectos conceptuales de la OHTS. En la figura 1. 2 se ilustran los procesos del ciclo hidrológico y sus interacciones en el medio natural.

Para determinar la OHTS, se requiere implementar un modelo que permita representar el ciclo hidrológico o el sistema socio-ecohidrológico. Para simular la distribución espacio-temporal del ciclo hidrológico se recurre entonces 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 los datos e información (observación), se acepta 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. Si el modelo simula de forma adecuada las salidas (caudales observados), se acepta como válido y se usa para la estimación o simulación. La figura 2. 6 muestra las etapas metodológicas que se han seguido.

Figura 2. 6. Etapas de la modelación hidrológica



Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica (Ideam, 2018).



Para la selección del modelo se tuvieron en consideración los objetivos de la modelación, las escalas de análisis y de generación de resultado, y la información disponible.

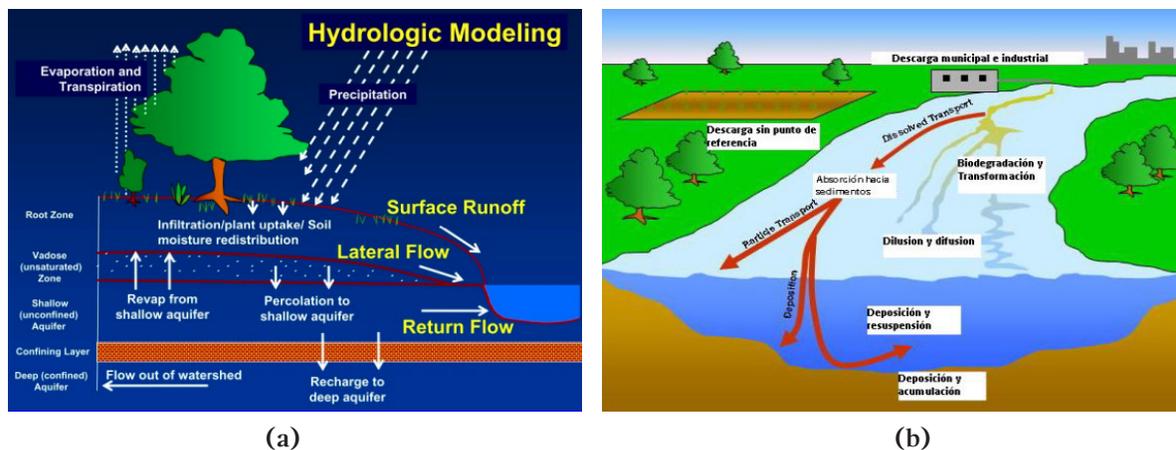
La revisión de datos e información disponible comprendió dos grupos de variables:

- 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 reanálisis. 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 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. Esta información contiene la topografía, las coberturas de la tierra, los suelos y la geología.

El modelo seleccionado para la evaluación de la oferta hídrica es el modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool), una herramienta hidrológica para análisis de cuencas desarrollada originalmente por el Servicio Agrícola de Investigación (ARS, por sus siglas en inglés) para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). 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).

El principio fundamental de modelación en SWAT se basa en la definición de HRU (Unidades de Respuesta Hidrológicas, por sus siglas en inglés), 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 (figura 2.7 (a)) y la fase de tránsito (figura 2.7 (b)).

Figura 2. 7. Representación de los procesos hidrológicos en el SWAT.
(a) fase terrestre del ciclo hidrológico, (b) fase de tránsito en SWAT



Fuente: Arnold et al. (2012).



Se realizaron dos ejercicios de modelación: el primero durante el segundo semestre de 2021 y el segundo en el primer semestre de 2022. Con base en los primeros modelos, se refinaron las entradas de los mismos durante el año 2022 para mejorar el desempeño alcanzado hasta ese momento. La refinación consistió principalmente en el cambio del producto de precipitación y en la recalibración de los modelos.

2. 2. 2. Resultados de la modelación de la oferta hídrica superficial

2. 2. 2. 1. Variación espacio-temporal de los caudales

Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena

Dentro de la SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena [código de la subzona: 2319] se

reportan un amplio 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, 2021). No obstante, dentro de la SZH existen variaciones de la escorrentía y en consecuencia del caudal registrado en las estaciones. En la tabla 2.1 y en la figura 2.8 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.

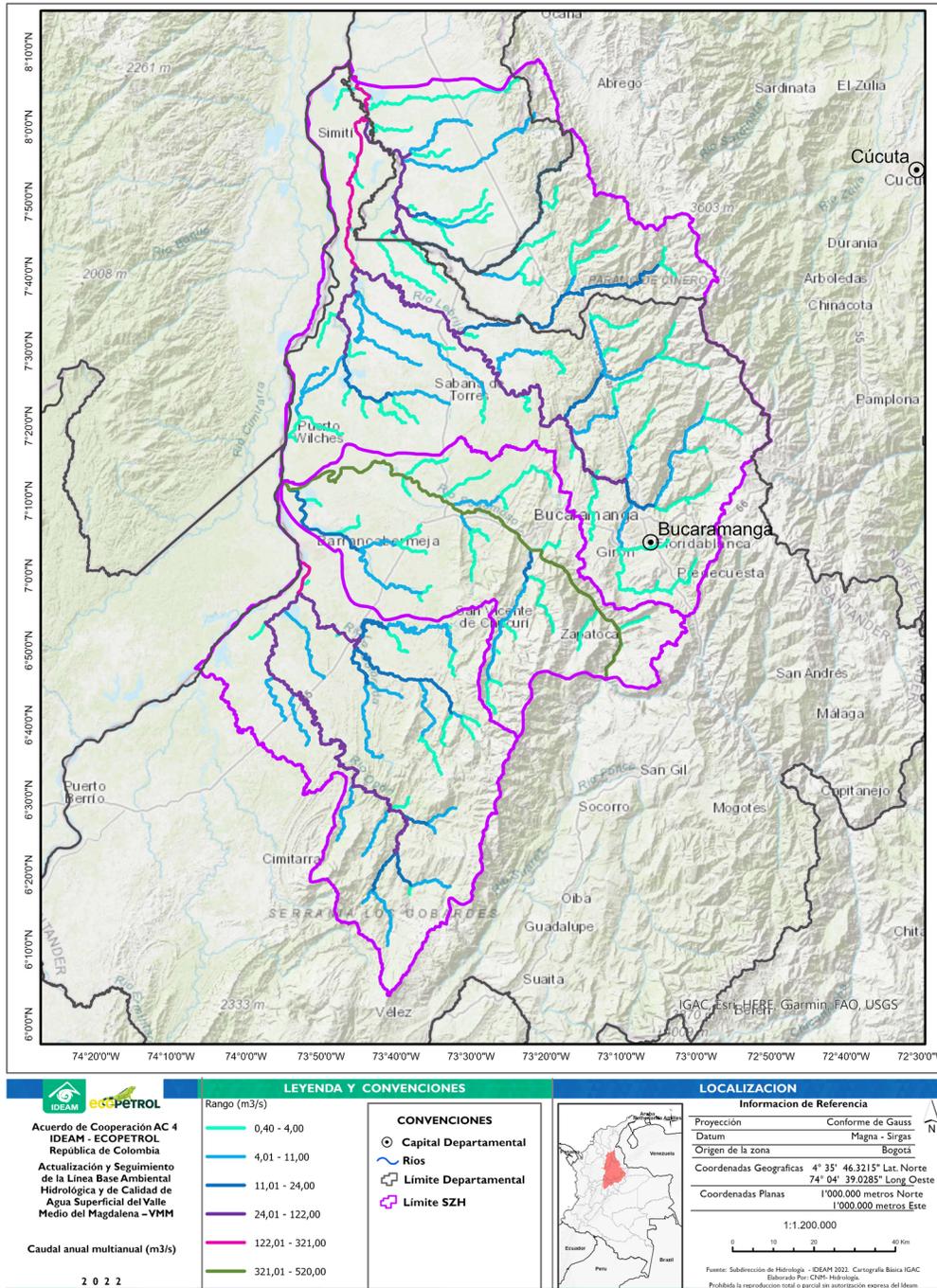
Tabla 2. 1. Caudales anuales multianuales en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	Q (m ³ /s)
Rch 1	Río Lebrija desembocadura en el río Magdalena	216.4
Rch 93	Río de Oro desembocadura en el río Lebrija	17.5
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo desembocadura en el río Lebrija	22.8
Rch 121	Quebrada La Gómez 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 la ciénaga La Tigra	10.1

Fuente: elaboración propia.



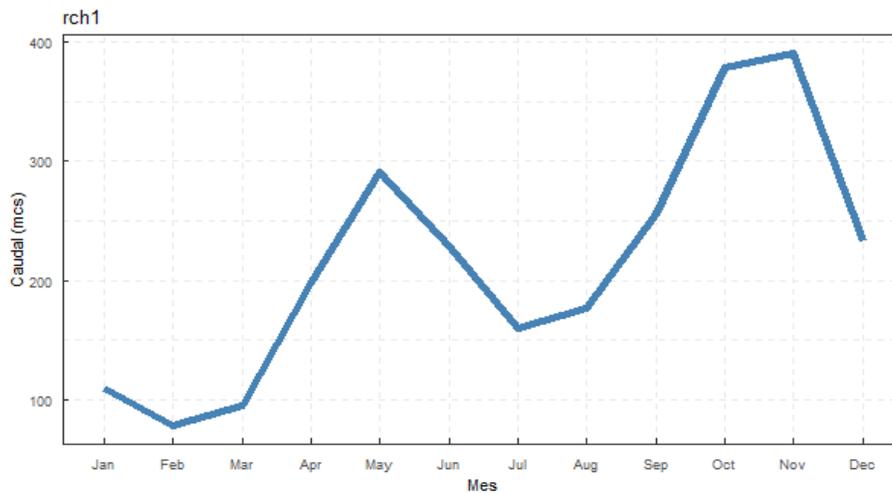
Figura 2.8. Caudal anual multianual en los canales simulados



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 2. 9 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 et al., 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 (principalmente, en algunas subcuencas del suroccidente y en algunas del nororiente).

Figura 2. 9. Variación intraanual de los caudales en mcs (metros cúbicos/segundo) para el canal del río Lebrija que desemboca directamente al río Magdalena



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la variación interanual 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 et al., 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.

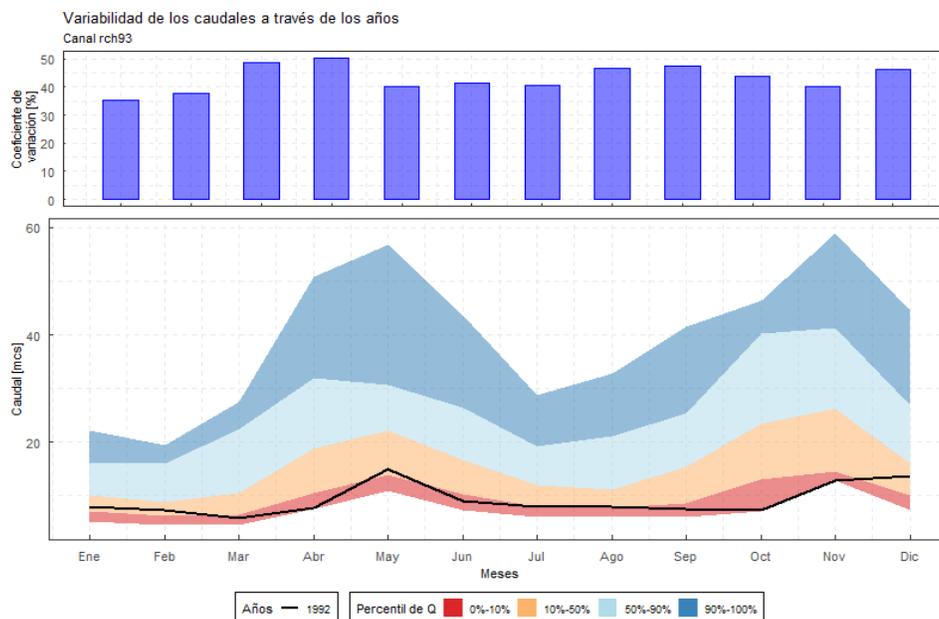
Tomando en cuenta la importancia de estos fenómenos se ha desarrollado, a partir de las simulaciones, una caracterización de esa variabilidad mensual de los caudales. Para cada canal simulado se determinó el coeficiente de variación (CV) de cada mes con las series de tiempo de los caudales mensuales. 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 2. 10 se muestra un ejemplo del análisis realizado para todas las estaciones. Se pueden ver también en las imágenes los valores registrados para 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 enero y diciembre registraron valores de caudal cercanos al valor

mediano de esos meses. Marzo-abril y agosto-septiembre son, en este caso, los meses con mayor CV, y, por tanto, cuando es más probable que se presenten caudales alejados del promedio multianual (superan el 40 % que ya se considera alto).

Figura 2. 10. Variabilidad de los caudales en mcs (metros cúbicos/segundo) simulados y clasificados por mes para la desembocadura del río de Oro en la SZH del río Lebrija



Fuente: elaboración propia.

Subzona hidrográfica del río Opón

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 161,0 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 2. 8.

En la figura 2. 8 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.



En cuanto a la variación intraanual 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 intraanual 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 2. 2.

Tabla 2. 2. 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 la estación Puente 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 Quiratá	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

Fuente: elaboración propia.



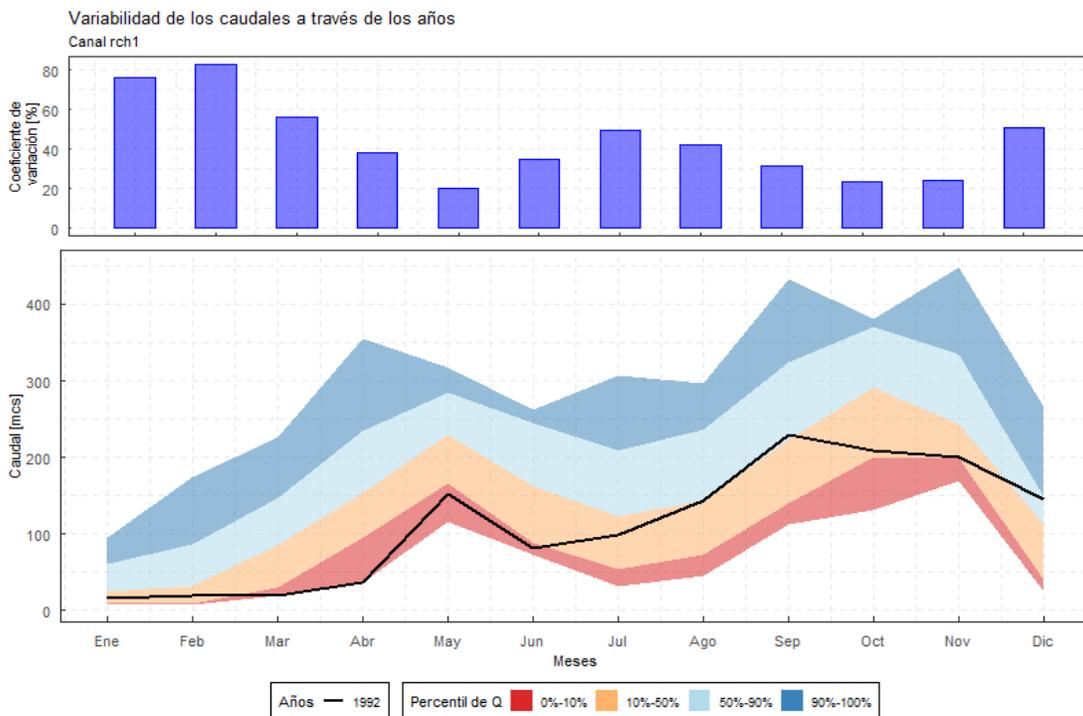
Adicionalmente, a partir de los caudales simulados se hizo la caracterización de la variabilidad mensual de estos. Para ello se estimaron cada mes, partiendo de las series de tiempo de caudales mensuales, los percentiles 0 %, 10 %, 50 %, 90 % y 100 %, y el coeficiente de variación (CV). En la figura 2. 11 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.

En la desembocadura del río Opón, para el año 1983 (considerado un año de baja afectación por el fenómeno de El 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 se pueden esperar valores alejados del promedio mensual multianual.

Se aprecia que el mes de septiembre, considerado 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.

Figura 2. 11. Variabilidad interanual de los caudales del río Opón



Fuente: elaboración propia.



Subzona hidrográfica del río Sogamoso

La modelación hidrológica semi distribuida 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, 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 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. En el segundo escenario, para el periodo 2014-2019, los caudales resultados 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 ríos aguas abajo del sitio de presa. De este modo, se obtuvieron las series de caudal, para el período 1983-2019, en los tramos del río Sogamoso.

Los caudales medios anuales multianuales para los ríos de la SZH varían entre 0,5 y 517,0 m³/s. La distribución espacial de los tramos

de río en los que se obtuvieron resultados y sus caudales medios anuales multianuales resultado de la modelación son presentados en la figura 2. 8. 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 (Suárez, 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.

La variación intraanual 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 afluencias más bajas en el periodo intraanual 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 2. 3.



Tabla 2. 3. 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 Puente 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 la 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 Zapatoca	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

Fuente: elaboración propia.

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 2. 12 se presenta cada uno de los estadísticos

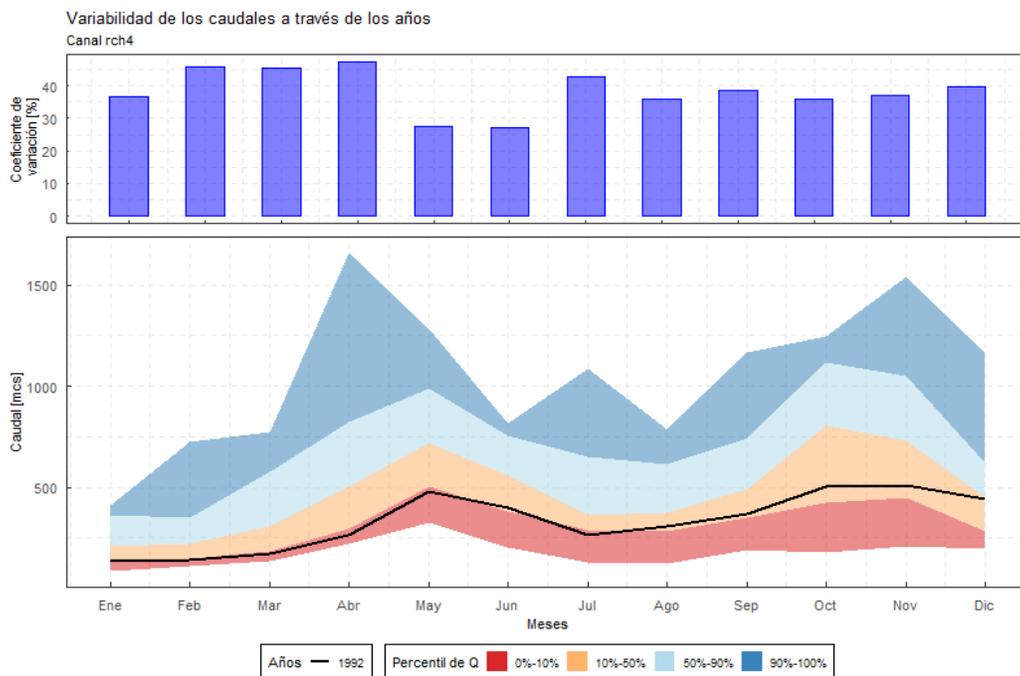
estimados y se imprimen los valores mensuales multianuales del año 1983, considerado un año medio con una leve influencia del fenómeno de El Niño al comienzo de este, para el tramo de río correspondiente a la desembocadura del río Sogamoso al río Magdalena.



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 fueron en los que se pudieron percibir los efectos del fenómeno de variabilidad climática que se presentó, pues los valores registrados se encuentran por abajo de la mediana.

Figura 2. 12. Variabilidad interanual de los caudales del río Sogamoso



Fuente: elaboración propia.

2. 2. 2. 2. Variación espacio-temporal de la escorrentía

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. Es necesario aclarar que los valores que se procesaron posteriormente 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 o cauces, o almacenándose en cuerpos lénticos.

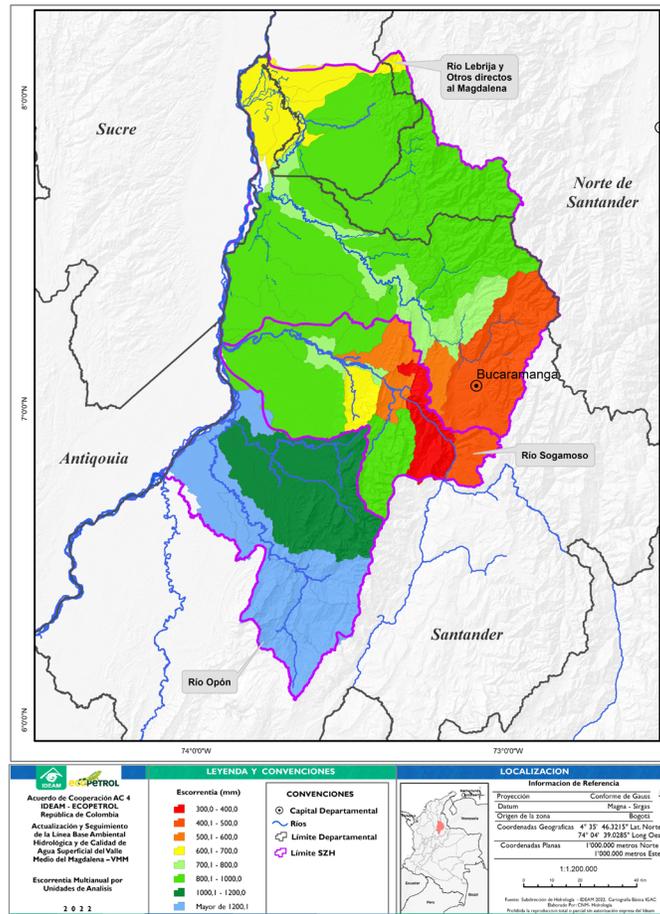


Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena

En la figura 2. 13 se muestra la escorrentía en las subcuencas modeladas, aquellas que se encuentran en la zona suroriental tienen una menor escorrentía y las del suroccidente son 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 muestran en la tabla 2. 4 los valores para las 24 unidades de análisis en conjunto con la escorrentía ponderada para 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 2. 13. Escorrentía simulada en las unidades de análisis.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 4. 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 La Platanala	58.4	231918	Ciénaga Guacamaya, ciénaga El Roble, ciénaga La Doncella	205.6
231907	Quebrada La Musanda	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 (quebrada Nariño)	270.9	231923	Río de Oro	555.0
231912	Quebrada El Salado	28.6	231924	Río Cachirí	547.6

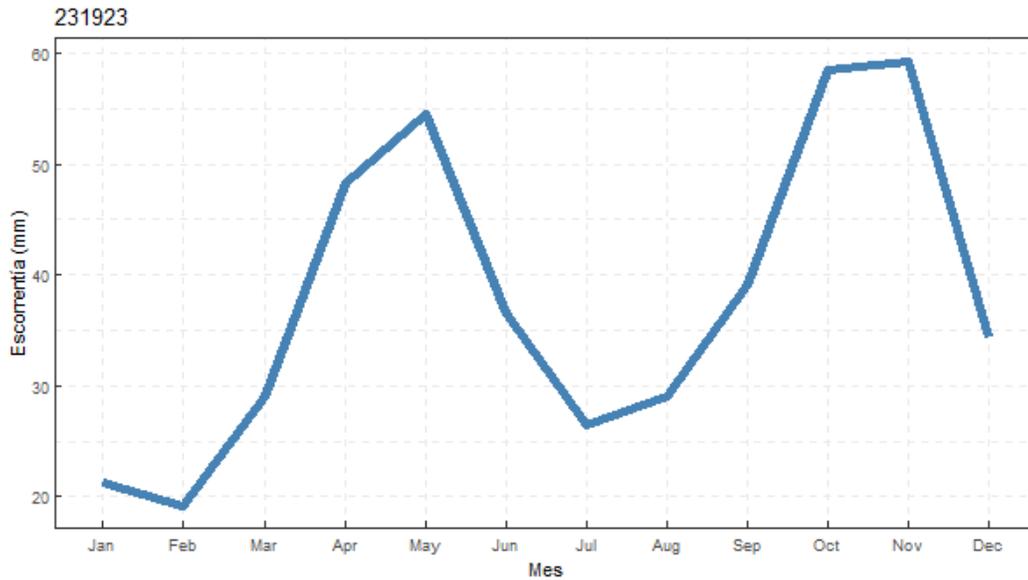
Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la variación de la escorrentía se puede ver que esta 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. Existen algunas unidades donde el veranillo de mitad de año no es tan marcado como el que se ve de ejemplo en la figura 2. 14, que se ubican en la parte norte de la SZH.



Figura 2. 14. Variación intraanual mensual multianual para la unidad del río de Oro en la SZH del río Lebrija



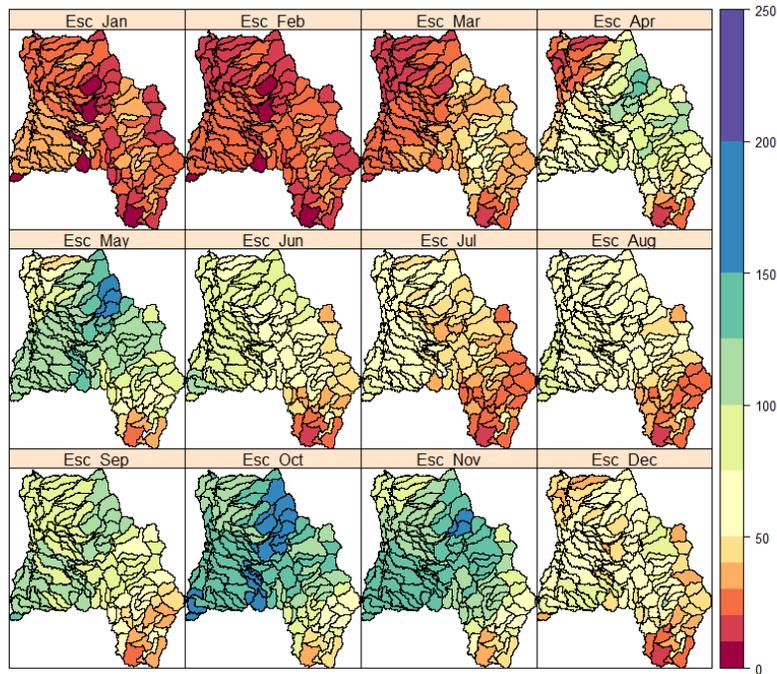
Fuente: elaboración propia.

Igualmente, la escorrentía mensual cambia dependiendo de la posición, lo que se representa en la figura 2. 15. 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 Cáchira y el Cáchira 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.

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 2. 16 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 el hecho de que haya una mayor variabilidad 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.

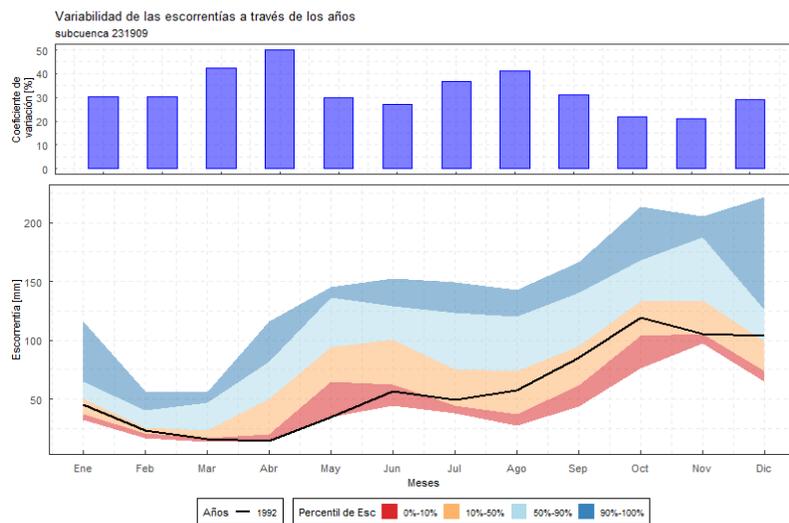


Figura 2. 15. Variación espacial de la escorrentía mensual multianual en milímetros en la SZH del río Lebrija



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 16. Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de la Quebrada La Gómez en la SZH del río Lebrija



Fuente: elaboración propia.



Subzona hidrográfica del río Opón

La escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente de 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 2. 13 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual.

La oferta hídrica en volumen es estimada como el producto de la escorrentía por el área de cada cuenca de primer nivel subsiguiente. La cuenca del río La Colorada es la que aporta un mayor volumen en un año promedio en la SZH del río Opón.

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 escorrentía obtenida mediante el modelo SWAT radican en la metodología de la estimación, puesto que para el 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 escorrentía en una SZH, pues se obvian procesos hidrológicos que pueden tener relevancia para una SZH específica. En la tabla 2. 5 se presenta el detalle de la escorrentía y volumen anual multianual para las 12 cuencas de nivel subsiguiente.

Tabla 2. 5. Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades espaciales de análisis en la SZH del río Opón

Código	Cuencas de nivel subsiguiente	Escorrentía mm/año	Oferta 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

Fuente: elaboración propia.

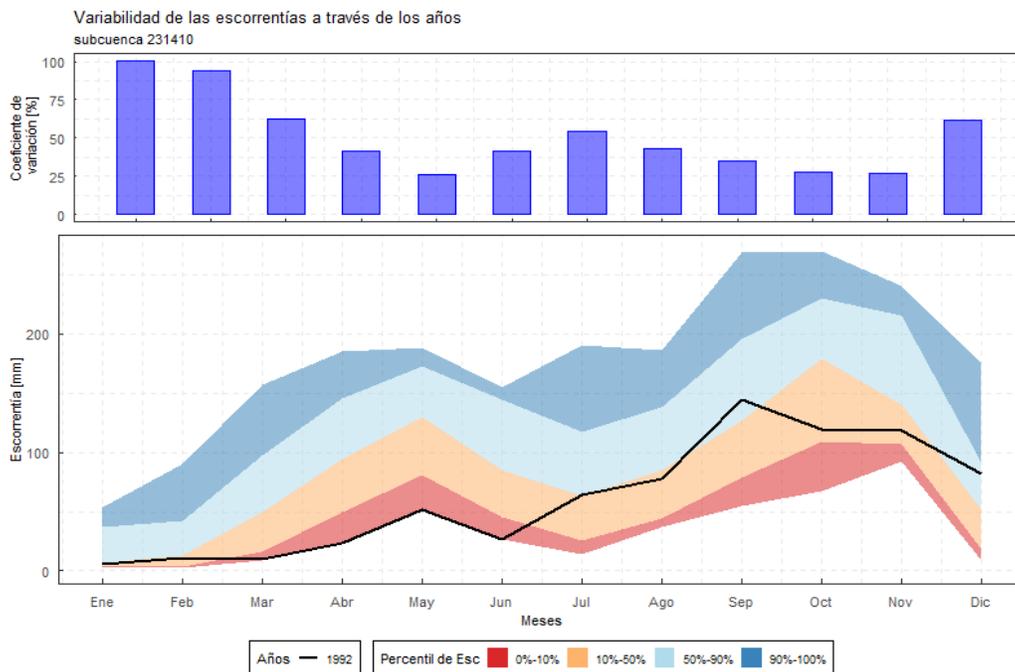


En cuanto a la variación mensual multianual de la escorrentía se observó que esta coincide con el régimen climatológico de la precipitación, presentando sus picos en los meses de mayo y octubre, y teniendo un comportamiento bimodal. En todas las cuencas los valores más bajos de escorrentía corresponden 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.

Con respecto a la variabilidad interanual analizada 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 observaron las escorrentías más bajas se identificaron las mayores variabilidades; estos son: enero, febrero, julio, agosto y diciembre. Estas altas variabilidades podrían ser interpretadas como un indicativo de que pueden existir mayores fluctuaciones en la disponibilidad del recurso en estos meses, y esto a su vez se explicaría en la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática. En la figura 2. 17 se presenta como ejemplo la variabilidad de la cuenca del río La Colorada. Las demás gráficas se encuentran en los anexos del documento.

Figura 2. 17. Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca del río La Colorada



Fuente: elaboración propia.



Subzona hidrográfica del río Sogamoso

En lo que respecta a la escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente de la SZH del río Sogamoso, esta varía en el rango entre los 360 y 850 mm/año. Se destacan las cuencas de la parte baja de la SZH y la cuenca del río Chucurí, en las 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 2.13 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual.

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.

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). Esto se justifica por las mismas razones expuestas en la SZH del río Opón. En la tabla 2. 6 se presentan el detalle de la escorrentía y el volumen anual multianual para las 12 cuencas del nivel subsiguiente.

Tabla 2. 6. Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades de análisis - Sogamoso

Código	Cuenca Nivel Subsiguiente	Escorrentía mm	Oferta mm ³
2405-01	Río Sogamoso entre Cayumba y el río Magdalena	824.4	220.5
2405-02	Complejo Ciénaga de 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

Fuente: elaboración propia.

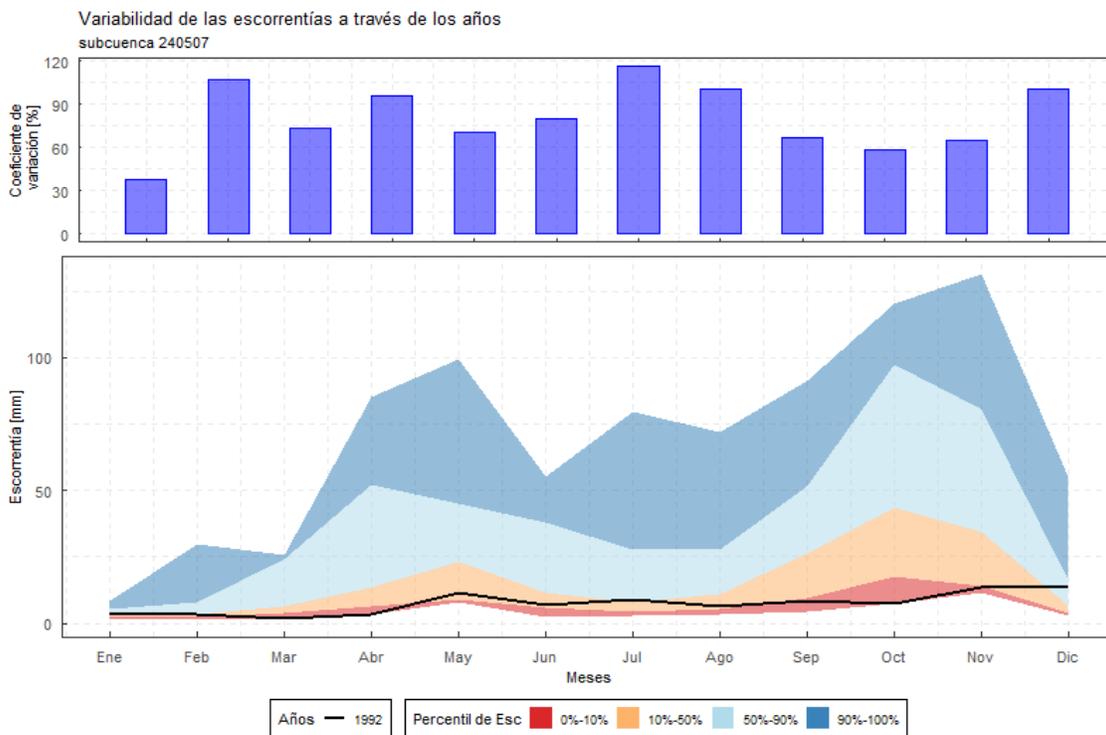


La variación mensual multianual de la escorrentía se relaciona directamente con el régimen climatológico bimodal de la precipitación en esta región. Se presenta un régimen bimodal con sus picos en los meses de mayo y octubre. En toda la SZH del río Sogamoso los valores más bajos de escorrentía se presentan en los meses de enero y febrero.

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 2.18 se presenta como ejemplo la variabilidad de la unidad de análisis "directos al río Sogamoso, entre Cuchuilla e San Panlo y Marta".

Respecto a la variabilidad interanual evaluada a través de los percentiles 100, 90, 50, 10

Figura 2.18. Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de análisis "directos al río Sogamoso, entre Cuchuilla e San Panlo y Marta".



Fuente: elaboración propia.



2. 3. Caudal ambiental

Se considera el caudal ambiental como el “volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos”, de acuerdo con la definición contemplada en el decreto 1076 de 2015 (artículo 2.2.3.3.1.3). Esta definición fija un enfoque en el que se condiciona el estado de los ecosistemas acuáticos y los beneficios que estos prestan a los seres humanos, y orienta unos límites de sostenibilidad para su aprovechamiento, de acuerdo con el régimen natural de flujo (Richter, 2010), preservando o restaurando los principales atributos de dicho régimen. En este numeral se resumen los aspectos conceptuales y metodológicos y se presentan los resultados obtenidos. Los contenidos están basados en el anexo “Caudal ambiental a nivel de piloto en Subzona y nivel subsiguiente en las áreas de interés de Ecopetrol”, en el cual se expone de forma extensa y detallada la temática tratada.

2. 3. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

Se estimaron caudales ambientales teniendo en cuenta dos escalas: escala de tramo y escala de cuenca hidrográfica.

La metodología MADS-Ideam para la estimación de caudales ambientales solo es aplicable a escala de tramo o segmento, debido al gran volumen de información requerido por cada uno de los componentes metodológicos (hidrología, hidráulica, calidad, hidrobiología). Los caudales ambientales son específicos para cada tramo, considerando su régimen natural, las comunidades hidrobiológicas y las particularidades socio-ambientales.

En general, la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá

(MADS-Ideam, 2018) posee diferentes fases, y en cada una de ellas existen unos requerimientos de información. Dichas fases son las siguientes:

- Fase 1: levantamiento de la información y la caracterización del cuerpo de agua. Aquí se requiere definir con claridad el cuerpo de agua objeto del estudio.
- Fase 2: estimación del régimen de caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico. Implica la aplicación del componente hidrológico del caudal ambiental, incluyendo además la hidro-biología.
- Fase 3: evaluación del régimen de caudales ambientales considerando los servicios ecosistémicos. En esta fase se valora, en particular, la capacidad de dilución como principal servicio eco-sistémico.
- Fase 4: seguimiento e implementación de los caudales ambientales. Incorporación del caudal ambiental dentro de la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca por parte de las autoridades competentes.
- El paso a paso de la metodología de caudales ambientales, incorporando los demás componentes, como se muestra en la figura 2.19. Allí se exponen los principales requerimientos de información en cada actividad o paso desarrollado.



Figura 2. 19. Diagrama de flujo de la aplicación de la metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá



Fuente: elaboración propia.

Como requerimientos fundamentales de información para la aplicación del componente hidrológico se encuentran:

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

- Programar una visita de campo que sirva para verificar algunas métricas hidrológicas e hidráulicas.

Para considerar los aspectos ecológicos del caudal ambiental (figura 2. 19), la determinación del conocimiento se hace a través de una línea base hidrobiológica, que modifica posteriormente los valores definidos en los pasos anteriores para el caudal ambiental.

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



hidrológica y la provisión de hábitat, y se puede abordar a partir de la valoración de los principales agentes de alteración de origen antrópico (Flotemersch et al., 2015).

En la tabla 2. 7 se propone un conjunto de variables para el análisis de aspectos ecológicos en la determinación de caudales ambientales en ríos de Colombia, donde se fundamentan las dos consideraciones esenciales de disponibilidad y calidad de hábitat.

A escala de tramo, y posteriormente a una priorización basada en la disponibilidad de información, se seleccionaron los siguientes tramos: por la subzona hidrográfica del río Opón, el río La Colorada; por la subzona hidrográfica del río Sogamoso, el cauce principal del río Sogamoso aguas abajo del embalse de Topocoro, y por la Subzona hidrográfica del río Lebrija, la quebrada La Gómez.

Para la escala de cuenca hidrográfica se adoptó la metodología usada en los estudios

nacionales del agua, para estimar el caudal ambiental en unidades de análisis correspondientes al nivel subsiguiente de subzonas hidrográficas definidas en el Valle Medio del Magdalena.

Esta metodología no contempla los componentes bióticos, de calidad o de demanda, y uso del recurso. Considera el régimen de caudales a través de la Curva de Duración de Caudales (CDC) diaria, de la cual se extrae el valor asociado a un percentil. Con la publicación del ENA 2010 se modificó el percentil seleccionado (Q95 %) que había establecido el proyecto de Ley del Agua de 2005 (Ley 365 de 2005); y se empezó a utilizar el percentil Q 85 % si el IRH es superior a 0.7, o el percentil Q 75 % si el IRH está por debajo de 0.7, que corresponde a una regulación en las categorías de moderada, baja o muy baja, como puede verse en la figura 2.20 (tomada de Ideam, 2019).

Tabla 2. 7. Panorámica general de las variables propuestas para la inclusión de los aspectos ecológicos en la determinación de los caudales ambientales en ríos de Colombia (MinAmbiente y ANLA, 2013)

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

Fuente: elaboración propia.



Figura 2. 20. Esquema de cálculo y categorización del IRH y del caudal ambiental

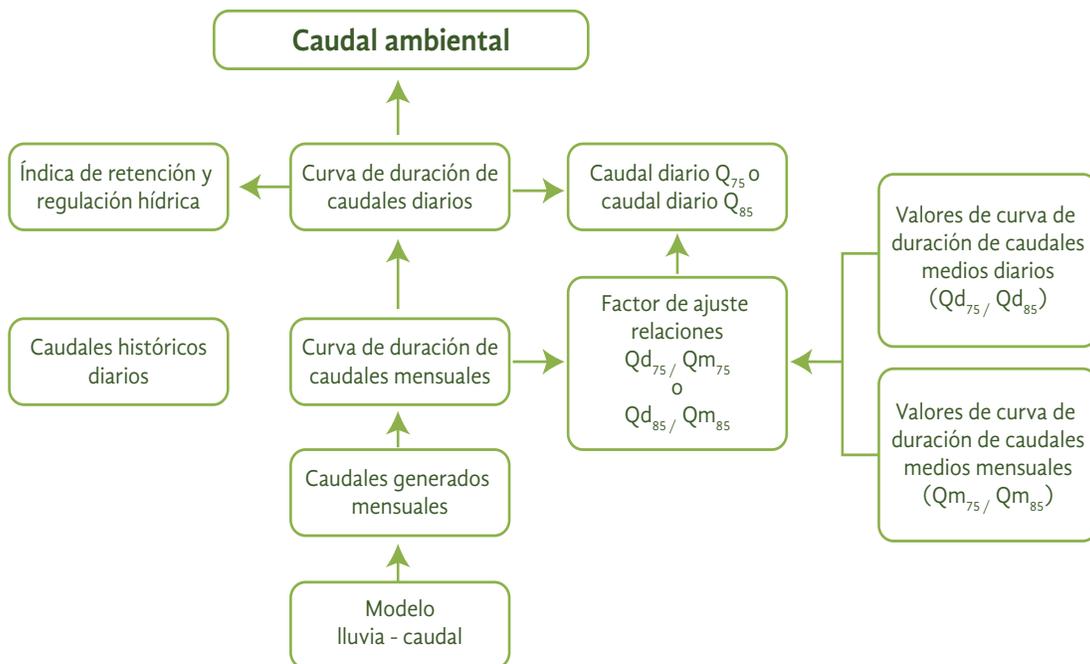


Fuente: Ideam (2019).

Un diagrama de cómo puede aplicarse lo descrito se observa en la figura 2. 21. Cuando el modelo es a escala diaria debe verificarse el

desempeño del modelo y hacer un análisis diagnóstico de las simulaciones, que incluya la comparación de las CDC observada y simulada.

Figura 2. 21. Procedimiento para la determinación del caudal ambiental



Fuente: Ideam (2013).



Los cálculos y resultados para el área del VMM, específicamente para cada unidad de análisis, se realizan con la escorrentía producida por SWAT (también conocida como producción de agua o Water Yield en inglés) transformada a caudal equivalente.

2. 3. 2. Resultados del caudal ambiental

2. 3. 2. 1. Caudal ambiental en los tramos analizados según la metodología del Ministerio de ambiente (MADS-Ideam, 2018)

En la tabla 2. 8 se presenta el caudal ambiental del río Sogamoso en el tramo de estudio.

Tabla 2. 8. Caudales ambientales para el río Sogamoso en el tramo de interés (m³/s)

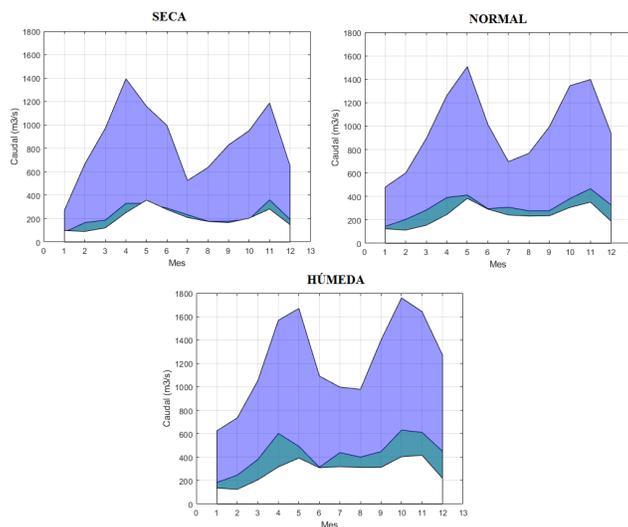
Condición	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Octu.	Nov.	Dic.
Seca	84.1	166.2	187.5	330.7	330.9	289.7	233.3	177.6	177.5	195.1	360.6	193.7
Normal	145.0	204.2	283.7	390.5	411.9	295.3	308.1	277.4	278.5	382.2	466.4	328.3
Húmeda	183.8	246.9	380.4	602.6	492.4	314.1	438.9	400.9	447.2	630.8	611.5	450.2

Fuente: elaboración propia.

En la figura 2. 22 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales estimados y

los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables. Los caudales ambientales corresponden, en promedio, al 72 % de los caudales medios del río Sogamoso en el tramo de interés.

Figura 2. 22. Caudales ambientales y máximos aprovechables por condición hidrológica para el río Sogamoso en el sitio de interés



Fuente: elaboración propia.



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

En tal sentido, se propone la generación intencional de algunos eventos de interés

ecológico que minimizan la alteración al régimen de caudales y que generan los pulsos necesarios para que los ecosistemas puedan cumplir con sus funciones biológicas de desplazamiento, desove, conexión con las ciénagas, además del transporte y arrastre de sedimentos, y nutrientes. En las tablas 2. 9., 2. 10 y 2.11 se muestran los condicionamientos definidos, donde Q Tr 15 es el caudal con período de retorno de quince años, QLL es el caudal a banca llena y Qmin 10 es el caudal mínimo para un período de retorno de diez años.

Tabla 2. 9. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones húmedas

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Duración media	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1.0	2.0
	Duración máxima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Duración mínima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Recomendación	0 eventos			1 evento	0 eventos						1 evento	
	0 días			1 día	0 días						2 días		
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	6	3	0	2	0	2	9	3	6
	Duración media	0	0	0	3.5	2.7	0	2.5	0	1	2.1	4.7	2.2
	Duración máxima	0	0	0	12	6	0	4	0	1	7	11	7
	Duración mínima	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
	Recomendación	0 eventos			1 evento			1 evento	1 evento				
	0 días			3 días			2.5 días	2.5 +/- 1 día					
Qmin10	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											

Fuente: elaboración propia.



Tabla 2. 10. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones normales

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0
	Duración media	0	0	0	0	1.3	0	0	0	0	0	1	0
	Duración máxima	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
	Duración mínima	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	Recomendación	1 evento, 1 día											1 evento, 1 día
Qmin10	# Eventos naturales	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	1	8.3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	1	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	1	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 eventos, 5 días				0 eventos, 0 días							

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 11. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río Sogamoso - condiciones secas

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
Qmin10	# Eventos naturales	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 eventos, 1 días				0 eventos, 0 días							

Fuente: elaboración propia.

En Colombia, el Ideam ha utilizado dentro de los estudios nacionales del agua (ENA 2010-2014) una metodología basada en el índice de retención y regulación hídrica IRH, y los

percentiles Q85 y Q75 de la curva de duración de caudales. Igualmente, hace algunos años, la Universidad Nacional de Colombia -UNAL- en conjunto con la Agencia Nacional de

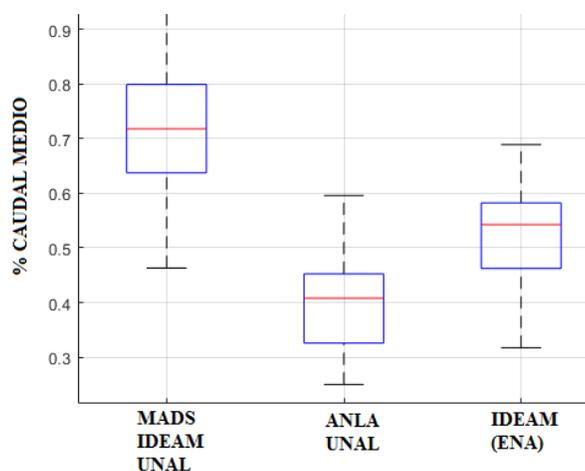


Licencias Ambientales -ANLA- desarrollaron una metodología cuyo enfoque hidrológico se basa en el cálculo del indicador 7Q10 y el percentil Q95. En ambos casos la metodología considera la variabilidad climática, y por tanto los caudales característicos (Q75, Q85 y Q95)

son estimados para cada mes y cada condición hidrológica (seca, normal, húmeda), en tal sentido, sus resultados son comparables desde el punto de vista espacial y temporal.

En la tabla 2. 12 se presenta el caudal ambiental del río La Colorada en el tramo de estudio.

Figura 2. 23. Comparación de los caudales ambientales del río Sogamoso en el sitio de interés con otras metodologías aplicadas en la gestión del recurso hídrico en Colombia



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 12. Caudales ambientales para el río La Colorada en el tramo de interés (m³/s)

Condición	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Seca	14.8	24.6	24.5	33.8	22.4	24.2	22.1	17.6	30.8	29.1	25.31	18.31
Normal	22.0	34.6	39.5	49.5	47.4	38.9	34.2	32.9	43.4	53.9	43.19	28.33
Húmeda	28.9	46.3	58.9	76.2	69.9	55.6	53.1	61.0	66.7	76.4	61.73	41.32

Fuente: elaboración propia.

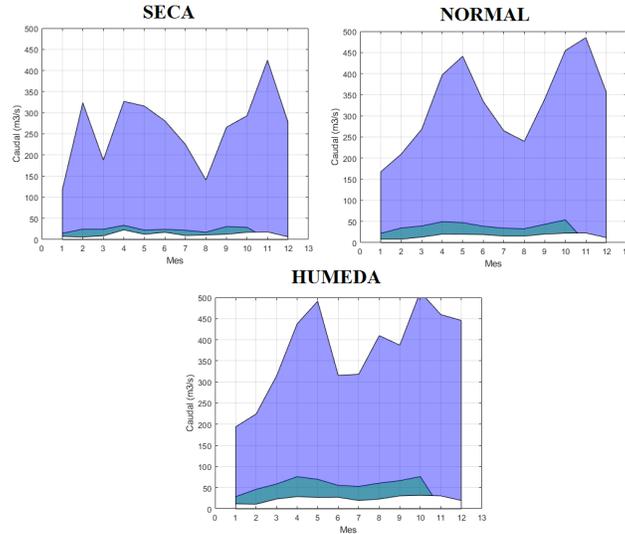
En la figura 2. 24 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica para el río La Colorada en la estación Ayacucho. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales

estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

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



Figura 2. 24. Régimen de caudales antes y después del aprovechamiento máximo para el río La Colorada en el tramo priorizado



Fuente: elaboración propia.

Se definen los condicionamientos para minimizar la alteración del régimen de caudales a continuación.

Tabla 2. 13. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones húmedas

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Duración media	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1.0	2.0
	Duración máxima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Duración mínima	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	1	2
	Recomendación	0 eventos 0 días			evento 1 día		0 eventos 0 días					1 evento 2 días	
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	12	113	0	0	0	7	9	5	2
	Duración media	0	0	0	2	2.8	0	0	0	2.3	2.8	3.1	2.3
	Duración máxima	0	0	0	8	7	0	0	0	12	8	11	8
	Duración mínima	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
	Recomendación	0 eventos 0 días			1 evento 3 días		0 eventos 0 días			1 evento 2.5 +/- 1 días			
Qmin10	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											

Fuente: elaboración propia.



Tabla 2. 14. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones normales

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	7	0
	Duración media	0	0	0	0	2.3	0	0	0	0	0	1	0
	Duración máxima	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0
	Duración mínima	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0
	Recomendación						1 evento, 2 días						1 evento, 1 día
Qmin10	# Eventos naturales	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	1	8.3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	1	12	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	1	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 eventos, 5 días				0 eventos, 0 días							

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 15. Consolidación de condicionamientos orientados a la alteración mínima del régimen de caudales en el tramo del río La Colorada - condiciones secas

	Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Q Tr 15	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
QLL	# Eventos naturales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	0 eventos, 0 días											
Qmin10	# Eventos naturales	0	7	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración media	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración máxima	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Duración mínima	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Recomendación	1 evento, 2 días				0 eventos, 0 días							

Fuente: elaboración propia.



En la tabla 2. 16 se presenta el caudal ambiental para la quebrada La Gómez en el tramo de estudio.

Tabla 2. 16. Caudal ambiental para la quebrada La Gómez (m³/s)

Condición	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Seca	0.31	0.28	0.24	0.79	0.94	0.86	0.68	0.64	0.89	1.57	1.63	0.70
Normal	0.40	0.39	0.46	0.97	1.13	0.99	0.76	0.89	1.20	1.66	1.78	1.13
Húmeda	0.53	0.49	0.78	1.25	1.28	1.33	0.94	1.30	1.45	1.78	2.01	1.54

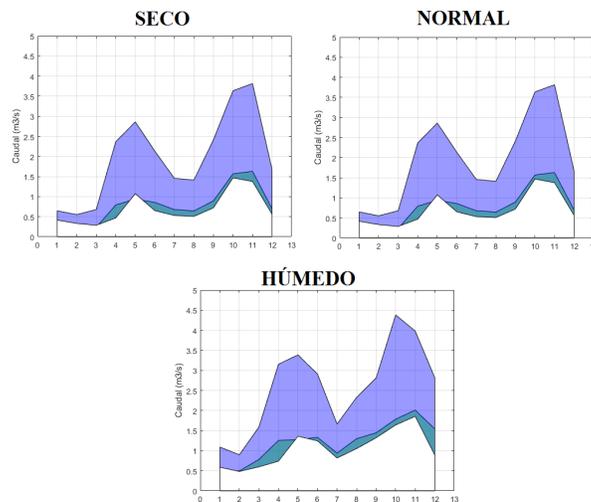
Fuente: elaboración propia.

En la figura 2. 25 se muestra el régimen de caudal ambiental obtenido, comparado con las series de caudales máximos y mínimos por condición hidrológica para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado. El área obtenida entre la línea de caudales ambientales

estimados y los caudales máximos en un punto de interés corresponde al rango de caudales aprovechables.

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

Figura 2. 25. Régimen de caudales antes y después del aprovechamiento máximo para la quebrada La Gómez en el tramo priorizado



Fuente: elaboración propia.

El método de caudal ambiental desarrollado por el MADS-Ideam, con el soporte de la UNAL, arroja caudales ambientales equivalentes al 72 %, 63 % y 63 % del caudal medio del río Sogamoso, el río La Colorada y la quebrada La Gómez, respectivamente. El método

ANLA-UNAL se acerca al 40 %, 42 % y 38.3 % del caudal medio del río Sogamoso, el río La Colorada y la quebrada La Gómez, respectivamente. El método del Ideam se considera intermedio con un 52 %, 54 % y 52.4 % del caudal medio del río Sogamoso, el río La Colorada



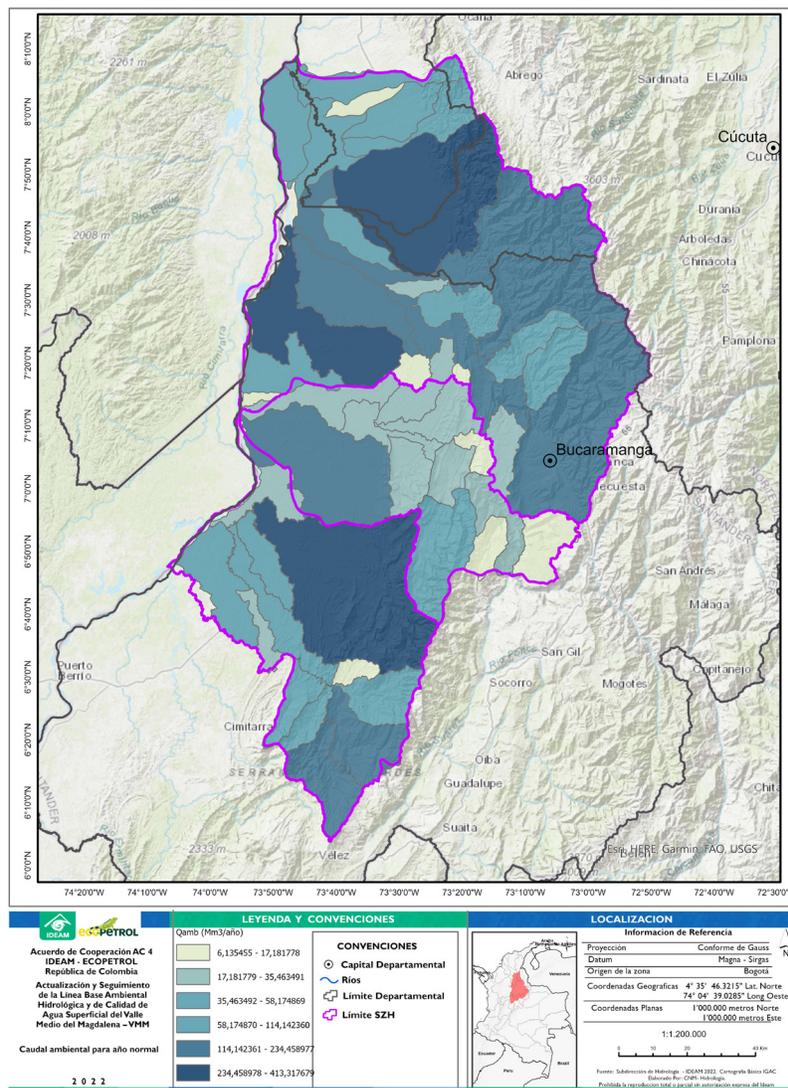
y la quebrada La Gómez, respectivamente. Los cálculos demuestran que la metodología aplicada al río Bogotá es muy restrictiva, bajo la hipótesis de no alteración del régimen de flujo.

2.3.2.2. Caudal ambiental en cuencas de nivel subsiguiente a subzonas hidrográficas

El caudal ambiental determinado varía dependiendo del tamaño de la unidad de análisis en

un año normal (figura 2.26). Esto se debe a que depende del caudal equivalente, que a su vez depende del área analizada. Sin embargo, se evidencia que en 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 2.17.

Figura 2.26. Caudal ambiental calculado con metodología Ideam-ENA para un año normal

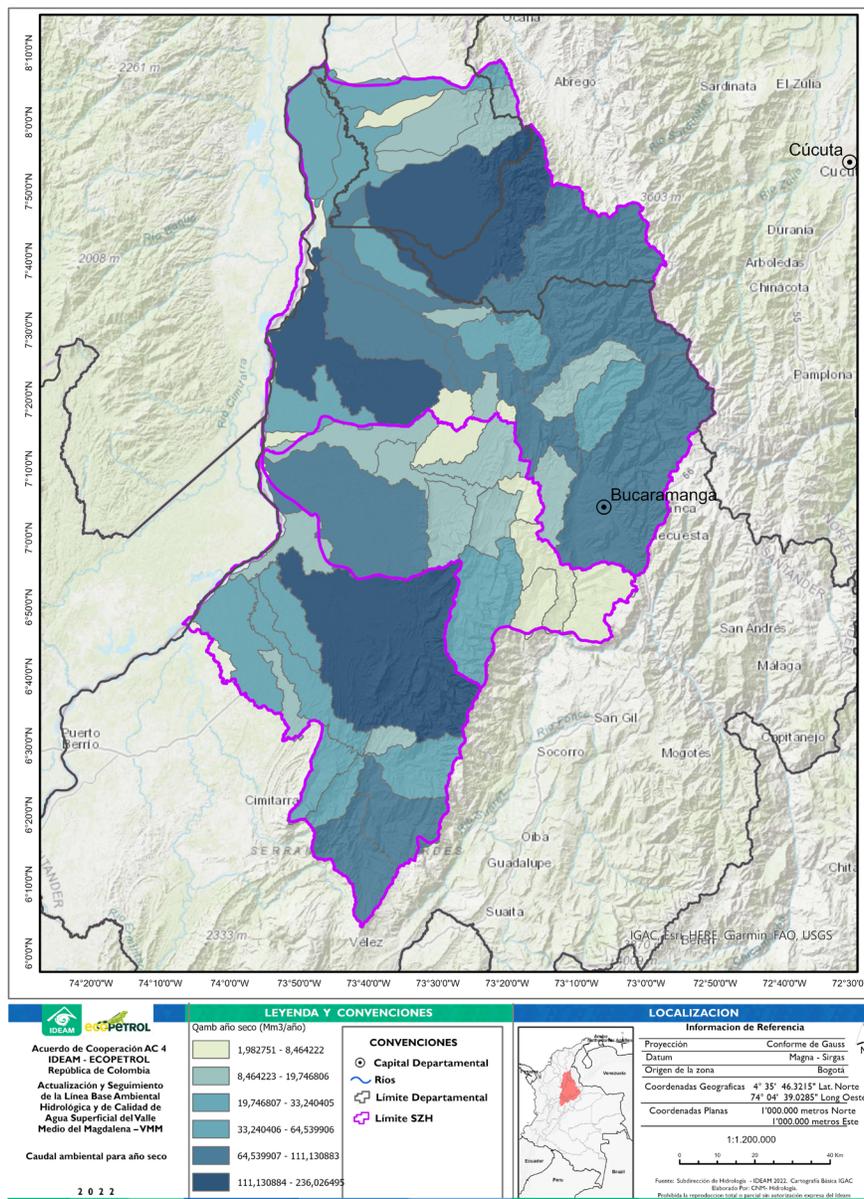


Fuente: elaboración propia.

De manera similar, se hallaron los valores estimados para el caudal ambiental de un año seco, que pueden verse en la figura 2.27. Se observa que en algunas zonas hay una

reducción sustancial del volumen necesario para conservar las funciones de los ecosistemas. Los valores para cada unidad de análisis también pueden verse en la tabla 2.17.

Figura 2.27. Caudal ambiental por metodología Ideam-ENA para un año seco



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 17. Valores del caudal ambiental para cada unidad de análisis del nivel subsiguiente en el VMM

Unidad de Análisis	Qamb (mm3/año)	Qamb (m3/s)	Qamb año seco (mm3/año)	Qamb año seco (m3/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

Fuente: elaboración propia.



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

2. 4. Evaluación de la demanda de agua

En este numeral se presenta el marco conceptual y metodológico, el análisis de la información y los resultados de la evaluación de la demanda del agua en el Valle Medio del Magdalena. Los contenidos están basados en el tercer capítulo del anexo “Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”, en el cual se expone de forma extensa y detallada la temática tratada.

2. 4. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

La demanda hídrica se entiende como la extracción de agua del sistema para ser usada como parte de las actividades económicas y para el uso doméstico. 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. La figura 2.28 sintetiza los conceptos necesarios para la evaluación de la demanda de agua en una región.

Figura 2.28. Conceptos de demanda hídrica



Fuente: Ideam (2015).



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 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.

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

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

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 del agua en la construcción

La metodología de cálculo planteada para cada sector se resume en la tabla 2. 18.

Tabla 2. 18. Síntesis de las metodologías de cálculo del uso de agua en los sectores económicos

Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
Agrícola (C _{saj})	<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 cultivos y de los pastos empleados en ganadería en la zona donde se realiza el estudio, 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 del caucho, con la visita realizada en campo.</p>	<ol style="list-style-type: none"> a. Se emplearon los polígonos definidos para el área de estudio (52.410 polígonos). 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). 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 de esta área).



Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
<p>Pecuario (Cspj)</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> $Dp = Cv + Cua + Cs$ <p>Donde: Dp: demanda pecuaria Cv: consumo vital en la fase de cría, levante y terminación Cua: consumo en lugares de manejo y alojamiento animal Cs: consumo en sacrificio (explicada más adelante)</p>	<p>Para ganado bovino, equino y bufalino: los criterios de distribución e^{++} son el área de cobertura de pasto.</p> <p>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 proporción al área del municipio por unidades de análisis</p>
<p>Sacrificio de ganado Csgj</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 por planta, se procedió a identificar qué plantas se localizan en la zona de estudio.</p> <p>Una vez calculado el número de animales sacrificados, se procedió a estimar la demanda hídrica mediante la siguiente ecuación:</p> $DHP_{sac-bov,buf-cuenca} = \sum (Inv_{bov,buf} \times F_{sac-animal} \times DT_{municipio-cuenca})$	<p>Se asignó a las cabeceras municipales por la existencia de las plantas de sacrificio.</p> <p>Las cabeceras siempre pertenecen a una única unidad de análisis.</p>
<p>Sector piscícola Cpj</p>	<p>Estimación a partir de la revisión de concesiones, opinión de expertos e información de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca -Aunap-.</p> <p>Además, se complementó con visitas a piscícolas con el fin de establecer conjuntamente el uso del agua. Se establece el proceso productivo y su cadena de uso. Se verifican los módulos de uso del agua para las especies presentes en la zona, y se determina el uso de este recurso 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), la que se convierte en biomasa, la que se utiliza para el mantenimiento de las piscinas y la que se utiliza para el beneficio.</p>	<p>No se espacializa porque no hay información completa y porque las fuentes no tienen una evaluación de la calidad del dato</p>
<p>Sector industrial Csj</p>	<p>A partir de la información del Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH-, del RUA, las encuestas Anual Manufacturera y Ambiental Industrial se consolida 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 del 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.</p>	<p>SIRH y RUA registran las coordenadas de cada establecimiento, por lo tanto, su georreferenciación indica exactamente a qué unidades de análisis pertenece.</p> <p>En el caso de la información de la Superintendencia, se asigna el valor a las cabeceras municipales.</p>
<p>Sector energía (Cej)</p>	<p>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 del agua reportado.</p>	<p>Existen las coordenadas de cada embalse central hidroeléctrica, termoeléctrica y PCH, por lo tanto, su georreferenciación dice exactamente a qué unidades de análisis pertenecen.</p>



Sector	Referente de método de cálculo	Metodología de espacialización
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. El cálculo es el siguiente:</p> $Csmj = P_{\text{mineral 1}} * (mdu_{\text{mineral 1}}) + P_{\text{mineral 2}} (mdu_{\text{mineral 2}}) + P_{\text{mineral 3}} * (mdu_{\text{3}}) + \dots + P_{\text{mineral n}} * (mdu_{\text{mineral n}})$ <p>Donde: Csm = uso del agua del sector minero Pmineral = producción del mineral en toneladas mdu= módulo de uso de cada mineral</p>	<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 podrían 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 50 % de la demanda de Segovia se asigna a esa unidad.</p>
Sector hidrocarburos (Cshj)	<p>En el caso de Ecopetrol, se agregan los registros de uso del 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-.</p>	<p>Existen las coordenadas de cada pozo y refinería de Ecopetrol, por lo tanto, la georreferenciación indica exactamente a qué unidades de análisis pertenece. La producción que corresponde a los demás operadores se distribuye en proporción al área del municipio donde están ubicados.</p>
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 del agua existentes para la zona.</p> $Chj = \text{Pob} * \text{intensidad} + \text{pérdidas técnicas}$ <p>Donde: 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 habitantes, y 70 % para las menores de 20.000 habitantes.</p>	<p>El uso urbano se distribuye en las cabeceras y el uso rural se distribuye en proporción al área total del municipio</p>
Servicios (Cssj)	<p>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.</p>	<p>Se asocia a las caberas municipales.</p>
Construcción (Ccj)	<p>Se realiza una agregación del uso en las concesiones de agua, a partir del registro en el SIRH.</p>	<p>No se espacializa porque no hay información completa y porque las fuentes no tienen una evaluación de la calidad del dato.</p>

Fuente: elaboración propia.



En el desarrollo del proceso de estimación se indagó en todas las fuentes disponibles de las que se tuvo conocimiento. La tabla 2.

19 sintetiza las fuentes de información, la información recopilada y el estado de la información para cada sector.

Tabla 2. 19. Fuentes de información disponible

Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
Agrícola	DANE Ministerio de Agricultura, Agronet y Evaluaciones Agropecuarias Municipales -EVA-	Áreas sembradas por departamento Áreas sembradas por municipio y departamento	En el DANE hay datos municipales, gran parte de la información está concertada con los gremios, y no se tiene información de cultivos tradicionales. En este sentido, tiene categorías distintas a las presentadas por el ministerio. Por ejemplo, en EVA se puede encontrar el caucho, pero en el DANE este está agrupado con otros cultivos. El DANE presenta datos de arroz en categoría distinta a las EVA. Por ejemplo, en el DANE se considera arroz manual y mecanizado, mientras que en las EVA 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 usarla en el proceso de polígonos homogéneos (Estudio Nacional del Agua [Ideam, 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 - EVA	Pastos	Es información de 2013, dado que no se encuentra para años posteriores. Esta 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.
Post cosecha	Palma: Fedepalma	Toneladas de fruto fresco que se procesa 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, que actualiza permanentemente sus bases de datos. Se verificó que las plantas realmente estén dentro del área de estudio buscando la información en las páginas web de cada empresa. 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	EVA, toneladas de café pergamino por municipio. Módulo de uso del agua para beneficio tradicional y módulo de uso del 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 (según el ENA del 2011).
	Caucho: Compañía Cauchera Colombiana	M3 de agua usada en el proceso de transformación del látex 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.



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
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 les aplica los módulos de uso, previamente revisados con Unipaz, para establecer su validez en la región. Se realizó un 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 el dueño de planta de sacrificio de ganado menor. Lista de plantas de sacrificio autorizadas en el país por municipio. Tipo de planta .	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 cuentan 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.
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 del 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. 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.



Sector	Fuente de información disponible	Información	Estado de la información
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 del agua por cada mineral/metal reportados en el portal web de la UPME (2014, 2020).	Los registros de producción por municipio no necesariamente corresponden a la producción que hace el este, sino al registro de la venta (en el caso del oro), así que hay alguna distorsión en el cálculo de uso del agua. Se distribuyen 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 del agua en las diferentes etapas de la exploración Módulos de uso del 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 del 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 la registran parcialmente, generalmente de las cabeceras municipales. Como en los municipios pequeños no hay micro medición, el vacío de información real del uso del 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 del 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 para las áreas rurales (lavaderos de carros).
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.

Fuente: elaboración propia.



2. 4. 2. Resultados de la demanda hídrica superficial

La tabla 2. 20 y la figura 2. 29 muestran la distribución del uso del agua para las subzonas hidrográficas del área de interés y de

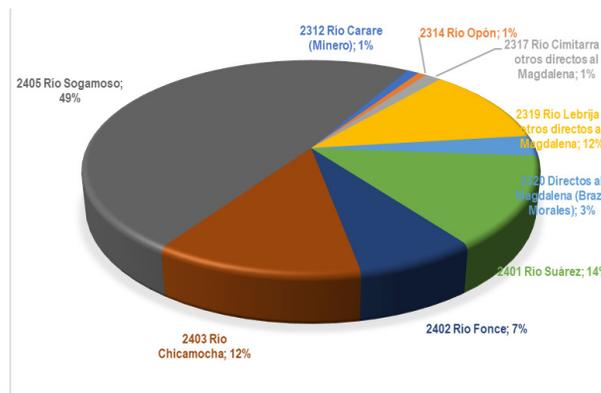
influencia, donde se resalta la subzona hidrográfica 2405, río Sogamoso, con un 49 % del total de la demanda, y el sector energía aporta gran parte del uso del agua.

Tabla 2. 20. 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

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.29. Distribución porcentual de la demanda anual del agua en las subzonas hidrográficas del área de interés e influencia para el 2019



Fuente: elaboración propia.



Cuando se suma la estimación del uso 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, 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), la 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 esta queda incluida en la subzona hidrográfica del río Sogamoso y no en la del río Opón.

La tabla 2. 21 registra el uso del agua en los sectores en el área de estudio.

Tabla 2. 21. Uso de agua en los sectores económicos presentes en el Valle Medio del Magdalena

Sector	Uso del agua (m3/año)	Porcentaje
Agrícola	698.517.877	17.52 %
Permanentes	247.100.460	35.37 %
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 %



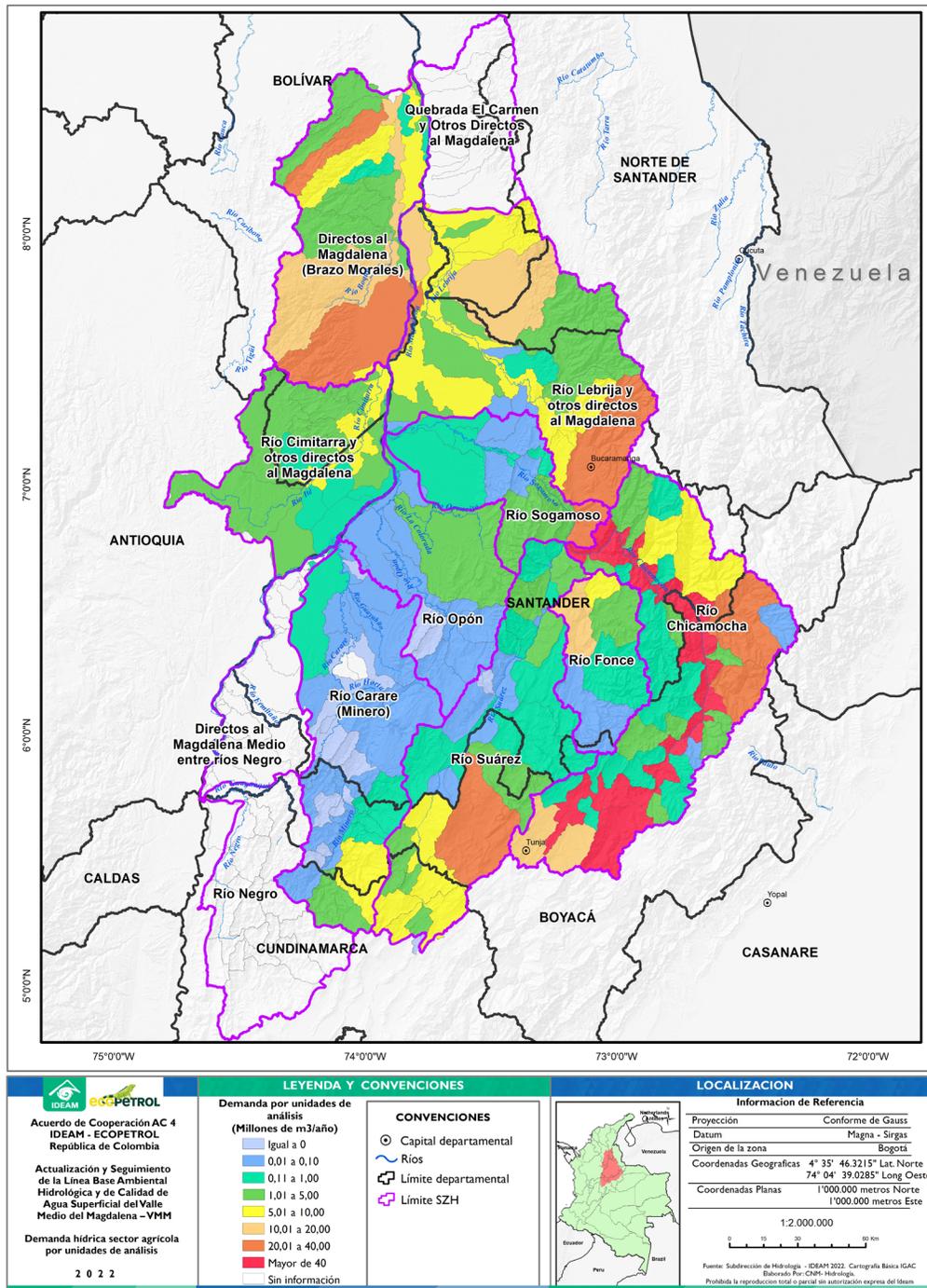
Sector	Uso del agua (m ³ /año)	Porcentaje
Sacrificio	6.209.704	0.16 %
Bovinos y bufalinos	173.480	2.79 %
Porcinos	67.637	1.09 %
Ovinos	28.648	0.46 %
Caprinos	11.056	0.18 %
Avícola	5.928.882	95.48 %
Piscícola	10.214.806	0.26 %
Industria	9.627.177	0.24 %
Construcción	3.356.849	0.08 %
Minería	18.357.163	0.46 %
Hydroenergía	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 %

Fuente: elaboración propia.



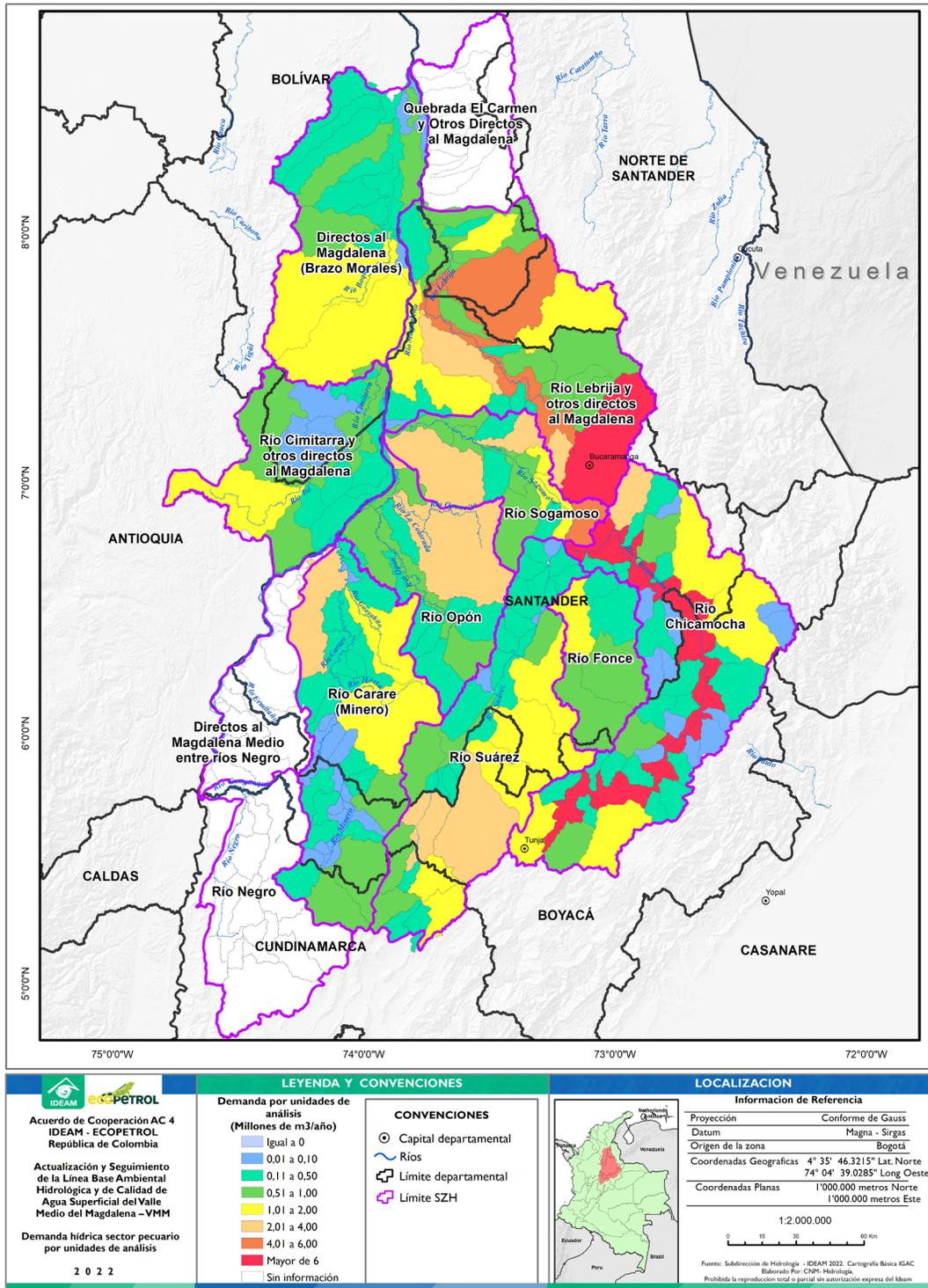
Los mapas de las figuras 2.30 a 2.38 presentan los resultados de la demanda sectorial y total en el Valle Medio del Magdalena.

Figura 2.30. Demanda hídrica para el sector agrícola por unidades de análisis



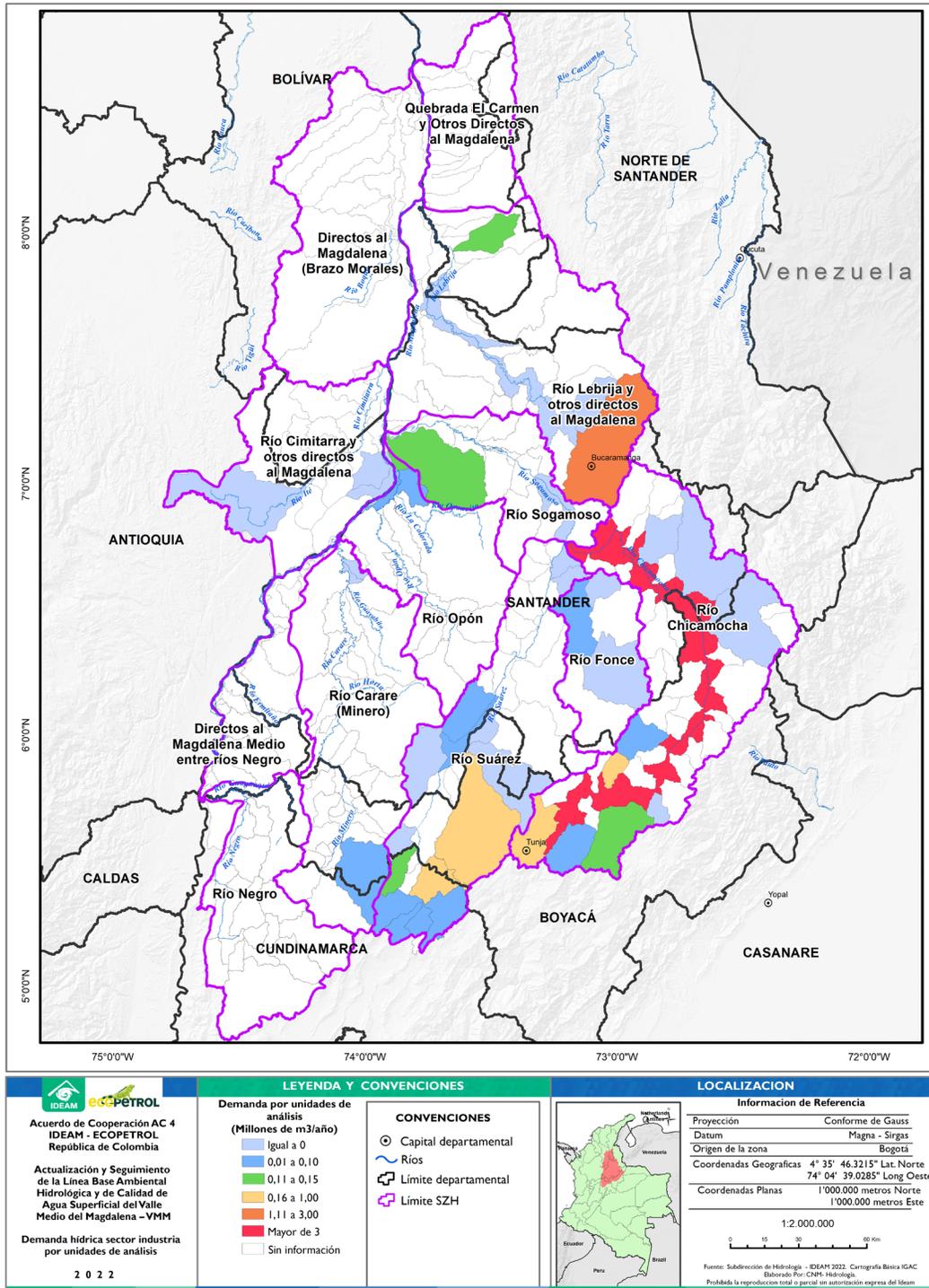
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.31. Demanda hídrica para el sector pecuario por unidades de análisis



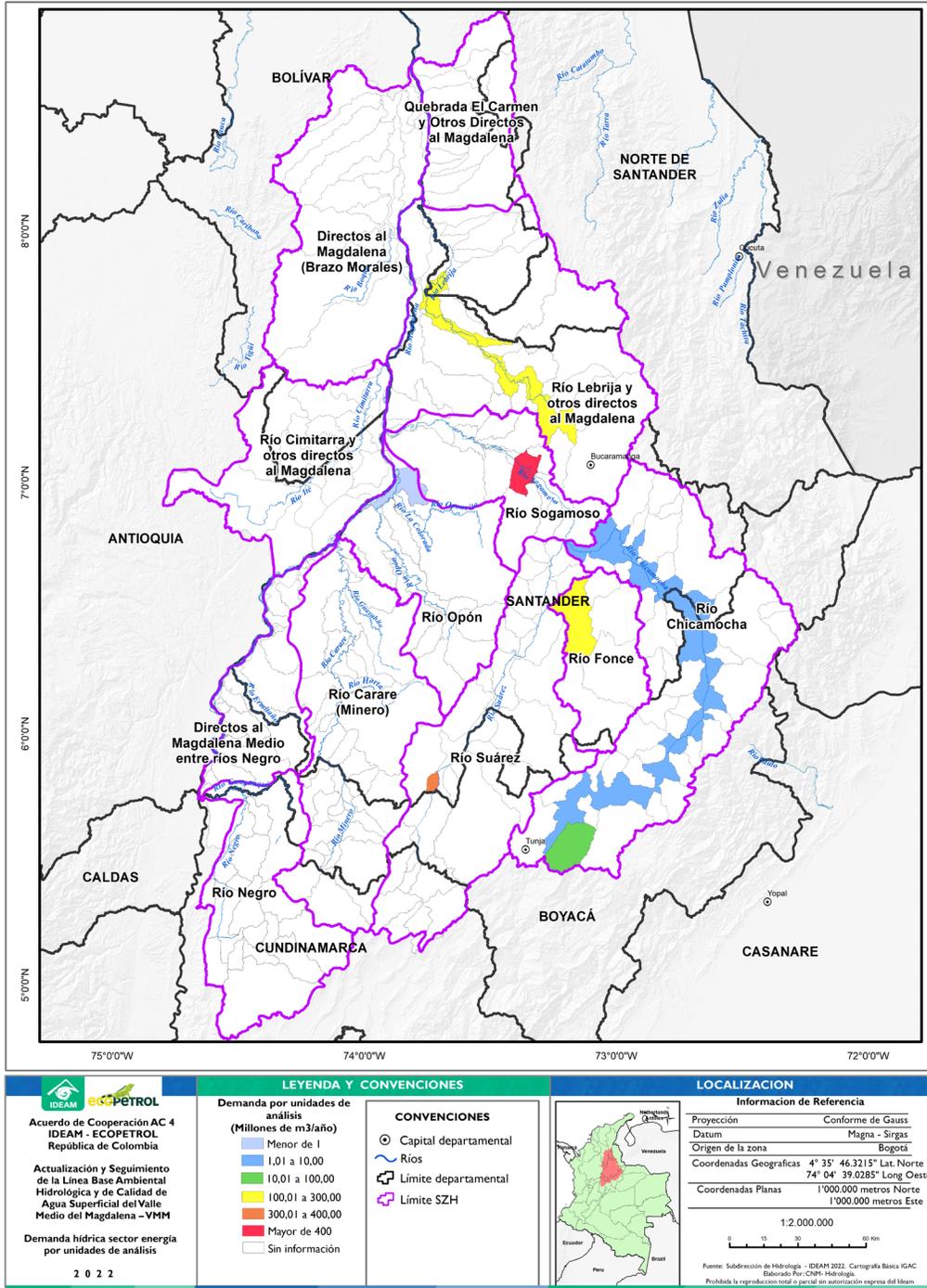
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.32. Demanda hídrica para el sector industrial por unidades de análisis



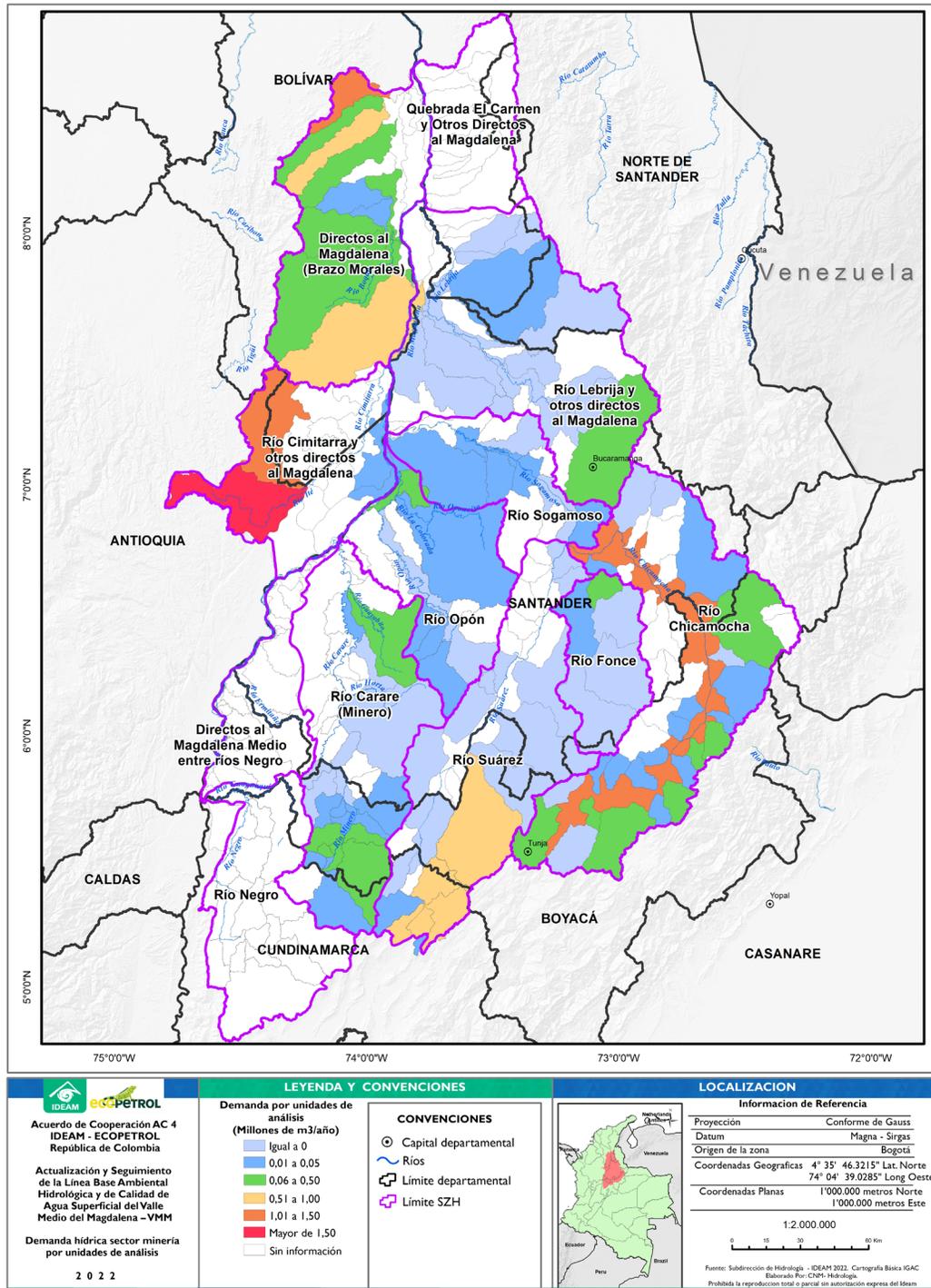
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.33. Demanda hídrica para el sector energético por unidades de análisis



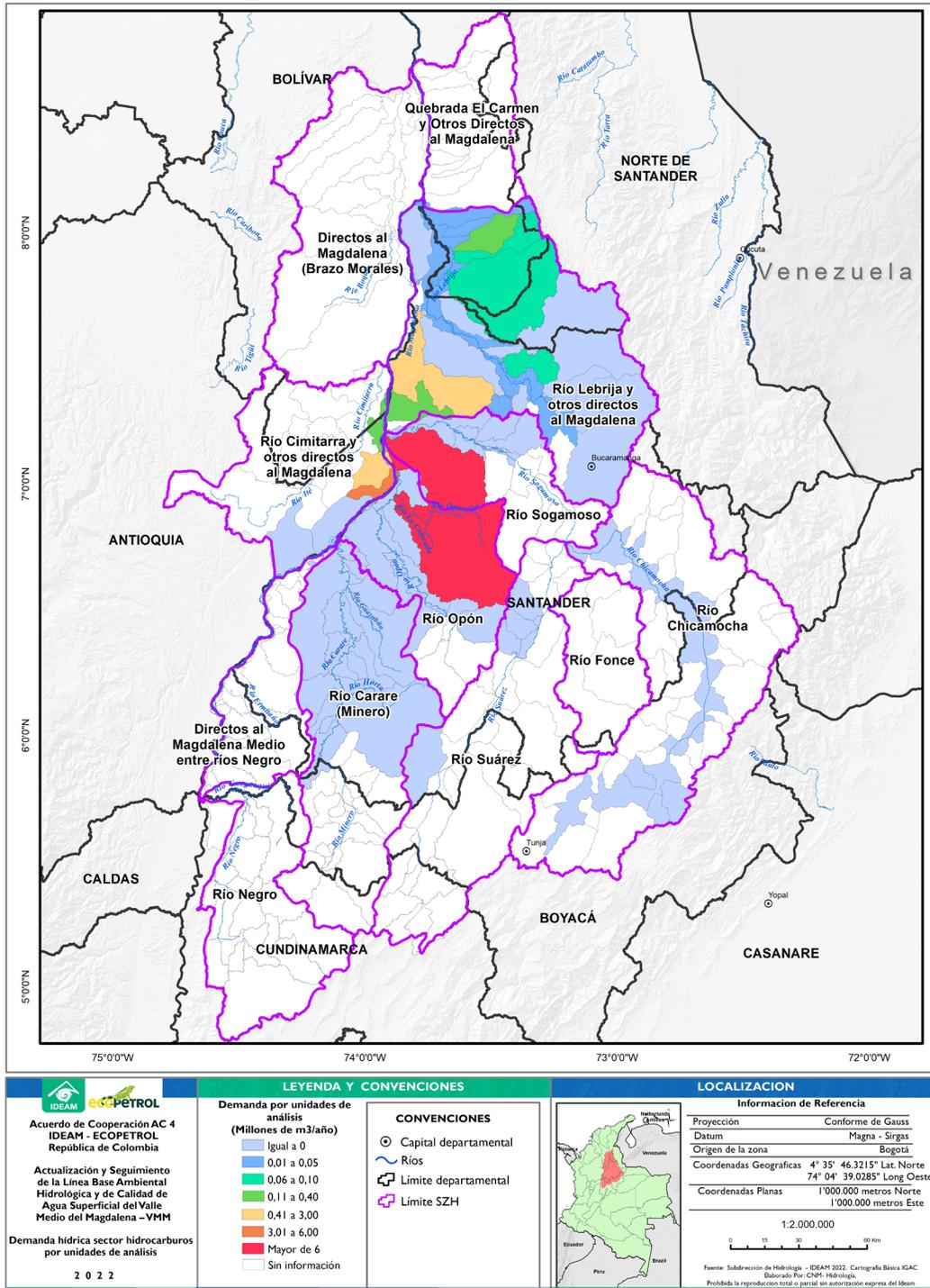
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.34. Demanda hídrica para el sector minero por unidades de análisis



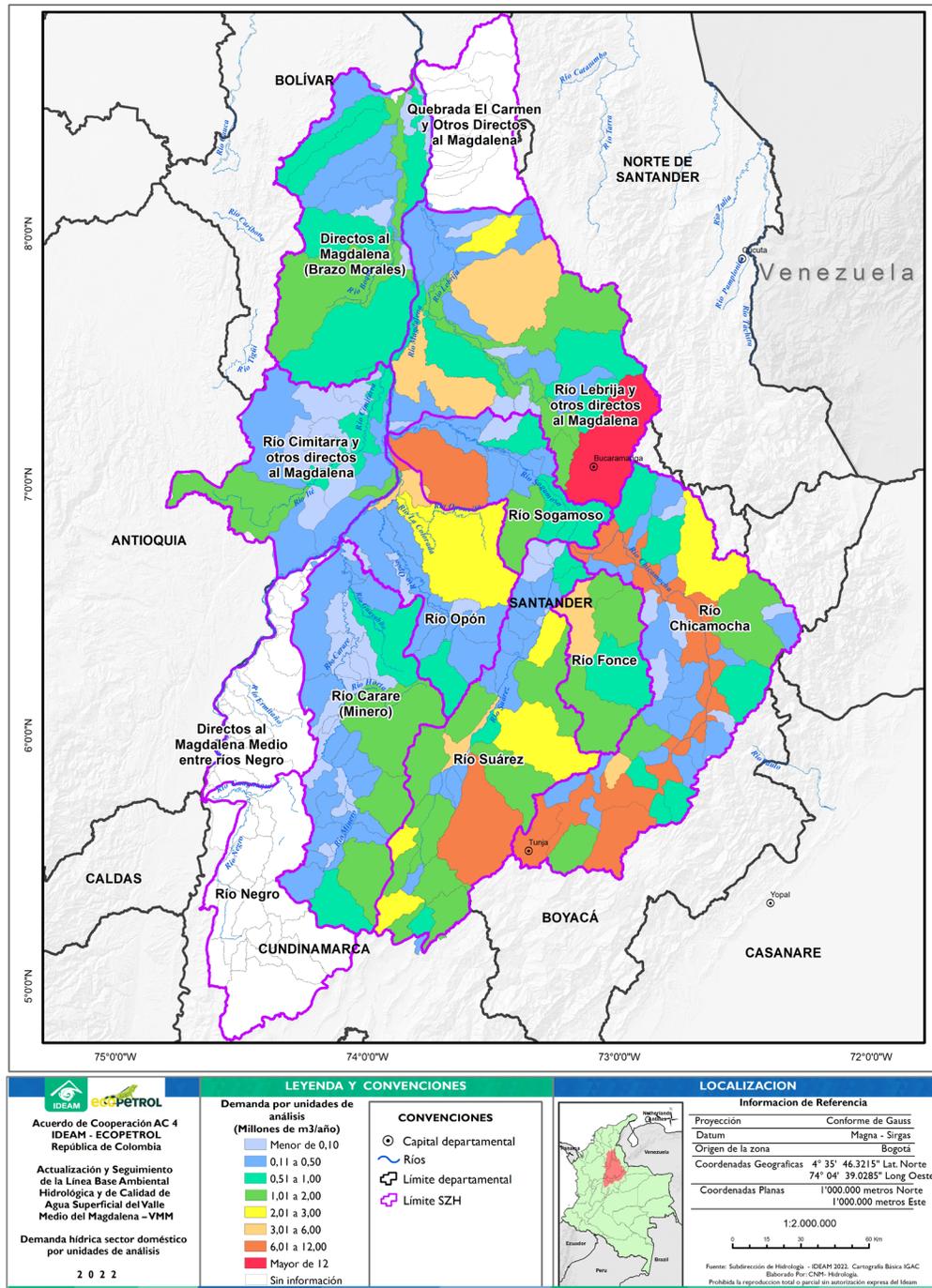
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.35. Demanda hídrica para el sector hidrocarburos por unidades de análisis



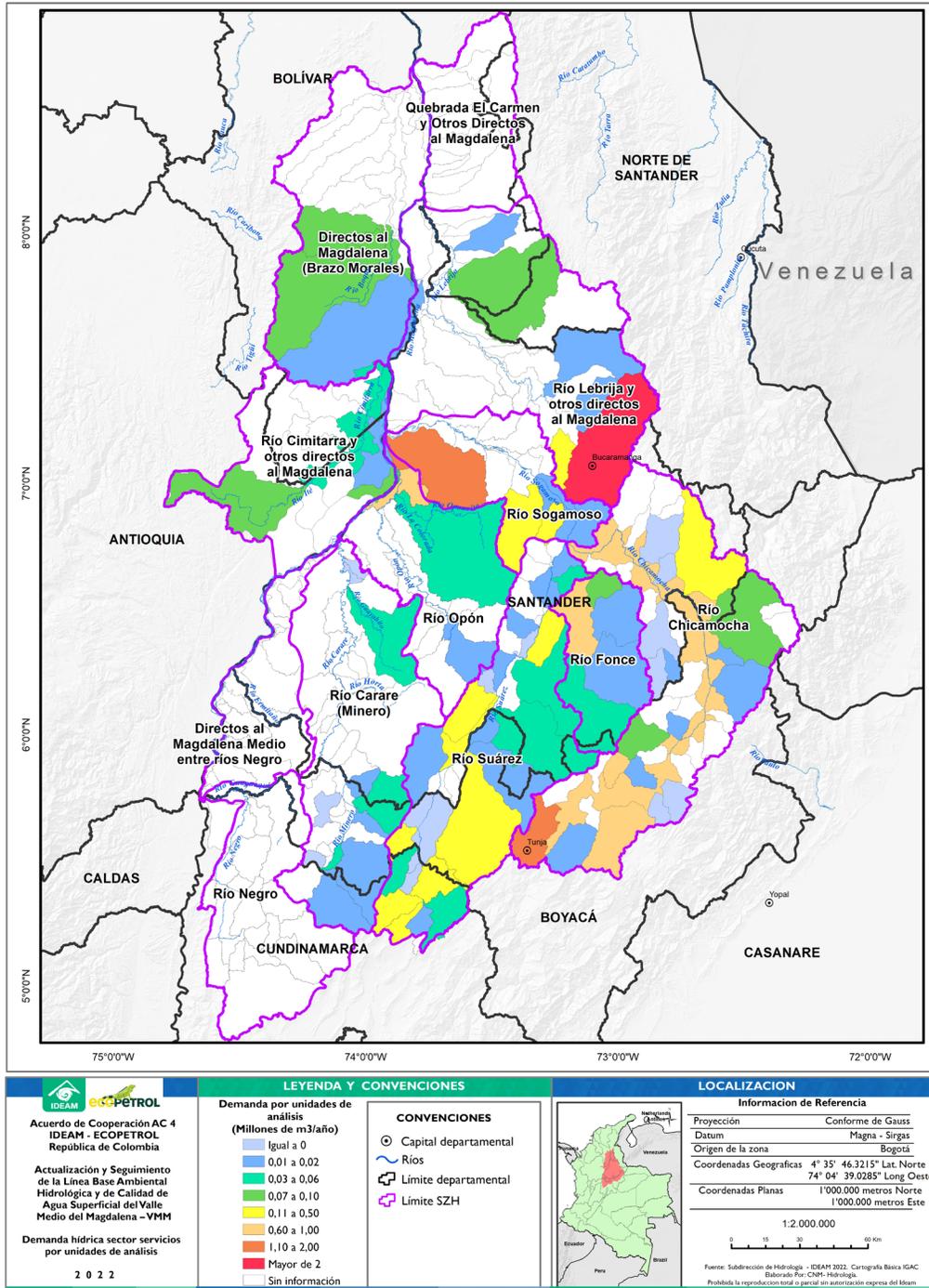
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.36. Demanda hídrica para el sector doméstico por unidades de análisis



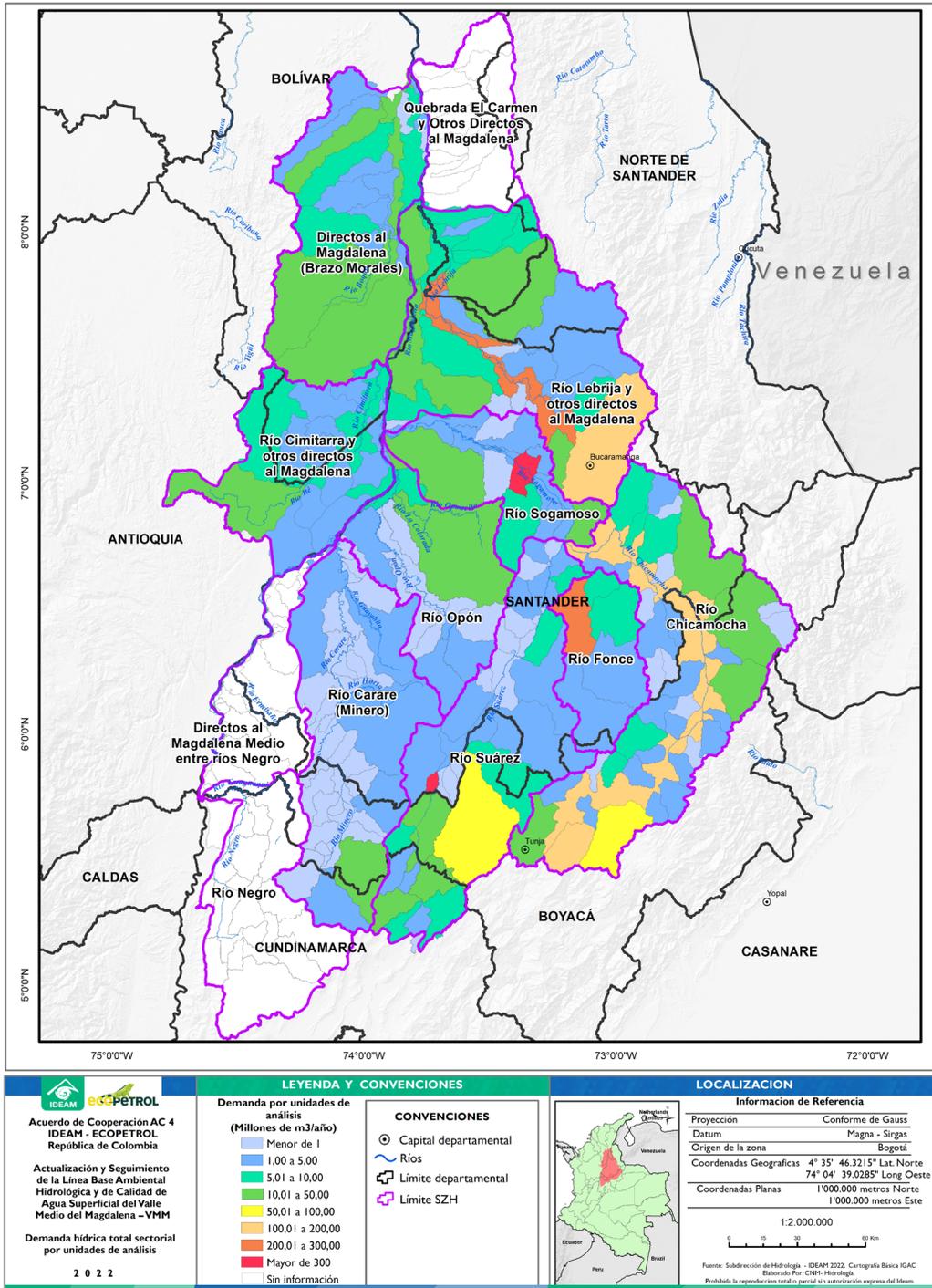
Fuente: elaboración propia.

Figura 2.37. Demanda hídrica para el sector servicios por unidades de análisis



Fuente: elaboración propia.

Figura 2.38. Demanda hídrica total sectorial por unidades de análisis



Fuente: elaboración propia.

2. 5. Evaluación de la calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua comprende 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 en las áreas de estudio e influencia, para generar una línea base por subzona hidrográfica de estudio y unidades hidrográficas de análisis. El propósito es 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. En este numeral se resumen los aspectos conceptuales y metodológicos y los resultados de la evaluación de la calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena. Los contenidos están basados en el cuarto capítulo del anexo “Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”, en el cual se exponen de forma extensa y detallada la temática tratada.

2. 5. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

Para efectos de dimensionar conceptualmente el alcance de la evaluación del estado de la calidad del agua, se plantean 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 parámetros (indicadores o variables)

organolépticos, fisicoquímicos, microbiológicos e hidrobiológicos característicos de un cuerpo de agua dado, que reúne las condiciones necesarias para su funcionamiento ecosistémico y su aprovechamiento para los usos determinados conforme a la ley.

- **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 solo en muy contadas ocasiones se dispone de los datos necesarios para definir las.
- **Procesos de alteración de la 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 en 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.

2. 5. 1. 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 del 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).

- **Segunda fase - caracterización:** busca consolidar las líneas de información pertinente sobre calidad de las fuentes hídricas y vertimientos puntuales.
- **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 la línea base).
- **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 concluye con análisis integrados que permitan establecer una relación *presión - estado*.

2. 5. 1. 2. Indicadores

Los indicadores de calidad hídrica pretenden responder a preguntas básicas sobre qué se debe saber del agua, esto es útil 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 una gestión integral del recurso hídrico.

El Índice de Calidad del Agua en Corrientes Superficiales -ICA- es un indicador 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 el momento de la toma de una muestra.

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 2. 22.

Tabla 2. 22. 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
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/1	0,2	0,17	0,14
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/1	0,2	0,17	0,14
NT/PT	-	N/A	0,17	0,14
Conductividad eléctrica, CE.	µS/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

Fuente: elaboración propia.



Los valores optativos que pueden 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 2. 23).

Tabla 2. 23. 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

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL) es el valor numérico de la relación entre la carga anual de cada una de las cinco variables físico-químicas que 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 categorización del índice se ilustra en la tabla 2. 24.

Tabla 2. 24. 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

Fuente: elaboración propia.

2. 5. 2. Resultados de la evaluación de la calidad del agua superficial

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación de la calidad del agua superficial, iniciando por las condiciones de presión al recurso hídrico y continuando con las condiciones de calidad del agua.

2. 5. 2. 1. Presión sobre el recurso hídrico

En la zona se presentan diferentes tensores de contaminación según el tipo de actividades que generan los principales vertimientos o tipos de aguas residuales: aguas residuales municipales, cría y sacrificio de animales (asociado a la localización de las cabeceras-alcantarillados



municipales), sector de hidrocarburos, sector agrícola, crías de aves de corral, cría de ganado, procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos.

En la tabla 2. 25 se ilustran los resultados obtenidos de la cuantificación de las cargas

vertidas para las cinco variables del IACAL por cada subzona hidrográfica y el total que percibe el tramo. El detalle de los resultados puede consultarse en el anexo “Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”.

Tabla 2. 25. Cargas puntuales en toneladas por año 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

Fuente: elaboración propia.

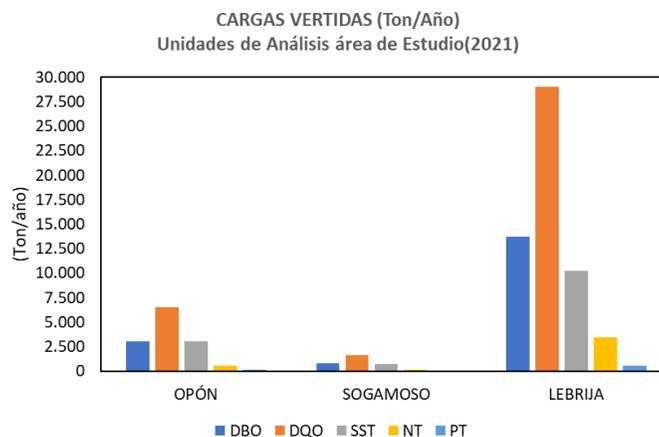
Según los cálculos efectuados, la representatividad sectorial en las áreas de estudio está liderada por las cabeceras y centro poblados municipales, que aportan aproximadamente el 96 % de las cargas, teniendo como indicador base la DBO.

En la figura 2.39. se pueden observar las cargas vertidas durante el año 2021 en las áreas

de estudio, por cada una de las variables constitutivas del IACAL.

Los resultados para las tres (3) SZH y los dos (2) años hidrológicos evaluados se aprecian en la figura 2.40 y 2.41.

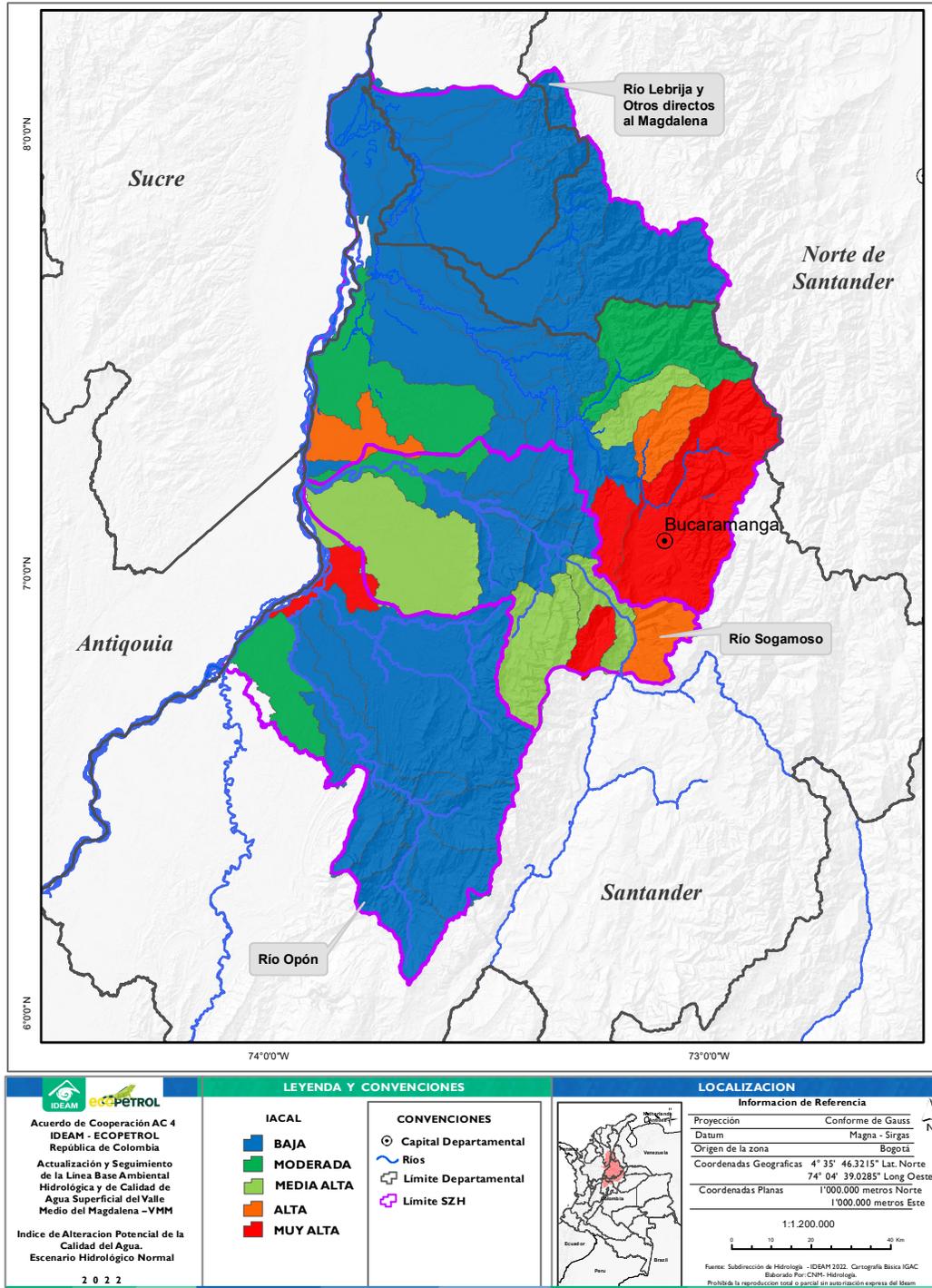
Figura 2. 39. Cargas vertidas en las áreas de estudio



Fuente: elaboración propia.

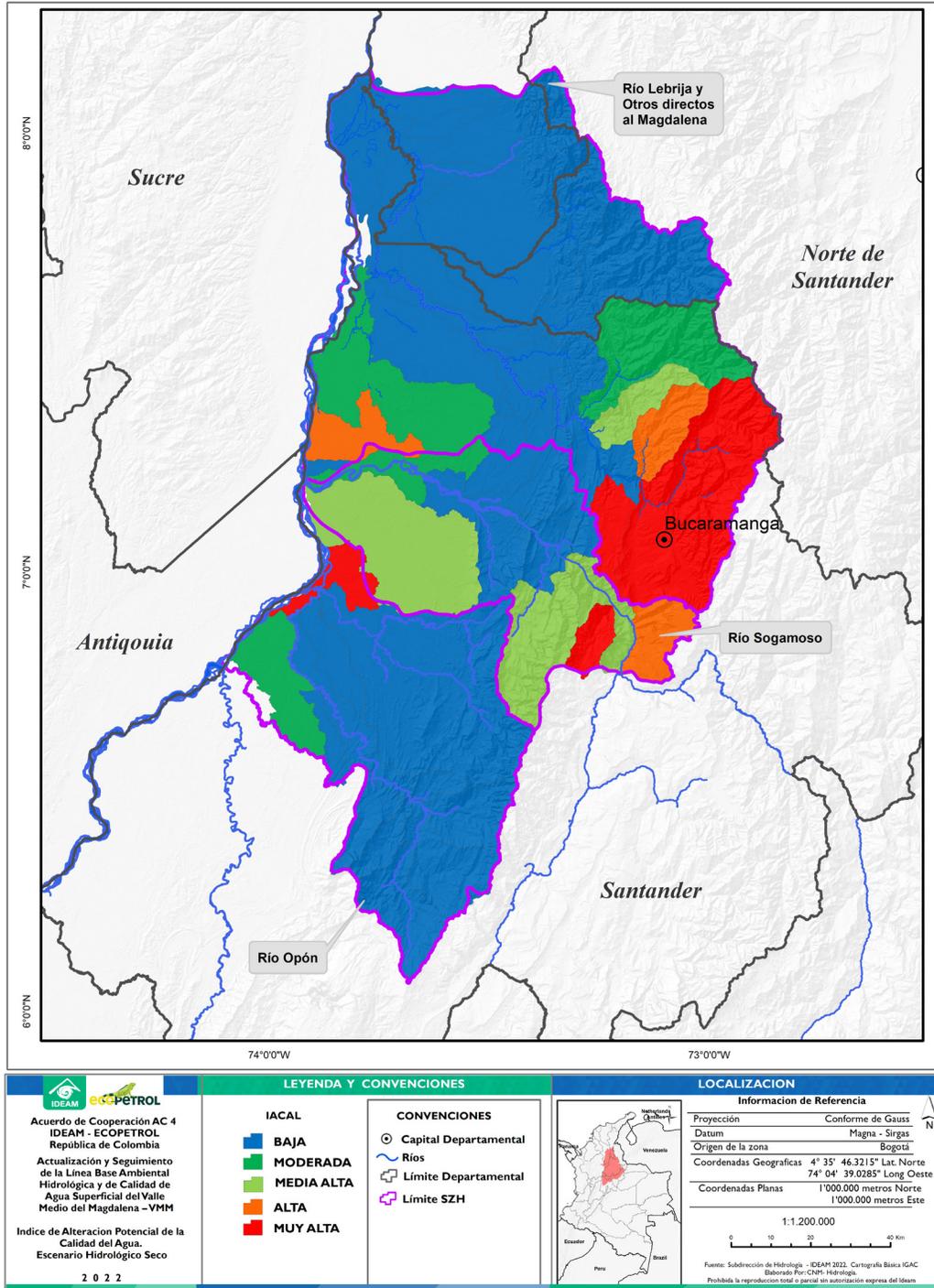


Figura 2.40. IACAL en un año normal en las áreas de estudio (2021)



Fuente: elaboración propia.

Figura 2.41. IACAL en un año seco en las áreas de estudio (2021)



Fuente: elaboración propia.

Se observa que la SZH del río Lebrija le aporta la mayor presión al río Magdalena (hecho que se acentúa en época seca), pero mantiene un índice alto respecto a la época normal o media, y evidencia que en época crítica dispone de caudales que evitan una alteración mayor de la calidad del agua. 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 este tramo del río Magdalena se encuentra 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 un 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 un año normal.

Con respecto a las variables, los SST ejercerían una menor presión y comparativamente durante época normal; en cuanto a la materia orgánica, aunque se denotan diferencias entre la DQO y la DBO, estas no señalarían necesariamente 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 en 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 2. 25, de tal forma que se cuenta con un referente de la dilución carga/oferta por cada año hidrológico.

2. 5. 2. 2. *Condiciones de calidad del agua*

El proceso de evaluación de las condiciones de calidad del agua consideró dos etapas, tal como se expuso en los aspectos metodológicos: la de establecimiento de la línea base y la de seguimiento.

En la tabla 2. 26 se presenta un resumen de los resultados, indicando el número de registros obtenidos para los tres (3) ICA calculados, las variables complementarias analizadas y los escenarios hidrológicos identificados, tanto para la línea base, como para la fase de seguimiento.



Tabla 2. 26. Síntesis de los resultados del ICA y variables complementaria monitoreadas

Áreas de Estudio	Resultados ICA	ICA 5 var.	ICA 6 var.	ICA 7 var.	Variables Complementarias	Clasificación monitoreos
Río Opón	N.º de registros	64	64	50	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Namonialcal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC	Normal Seca Húmeda Transición Seca - Normal Transición Húmeda - Normal
	Buena	3	2	2		
	Aceptable	34	28	23		
	Regular	20	22	17		
	Mala	7	12	8		
Río Sogamoso	N.º de registros	91	90	44	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Namonialcal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC, G/A	Normal Húmeda Húmeda y Seca en zonas de influencia
	Buena	7	3	2		
	Aceptable	44	28	28		
	Regular	28	37	12		
	Mala	12	22	2		
Río Lebrija	N.º de registros	167	154	126	CT, COT, DBO, Turbiedad, ST, Namonialcal, Nitritos, Nitratos, NTK; Fosfatos, Sulfatos, Hg, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, As, CN-, Mn, Fe, THC, G/A	Normal Húmeda Transición Seca - Normal Transición Húmeda - Normal Transición Normal - Húmeda
	Buena	27	4			
	Aceptable	84	65	40		
	Regular	37	69	68		
	Mala	19	16	18		
Tramo Río Magdalena	N.º de registros	27	24		COT, Turbiedad, ST, Namonialcal, Nitritos, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos, Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Al, Mn, Fe, THC,	Normal Seca Húmeda
	Buena					
	Aceptable	2				
	Regular	16	8			
	Mala	9	16			

Var: variables

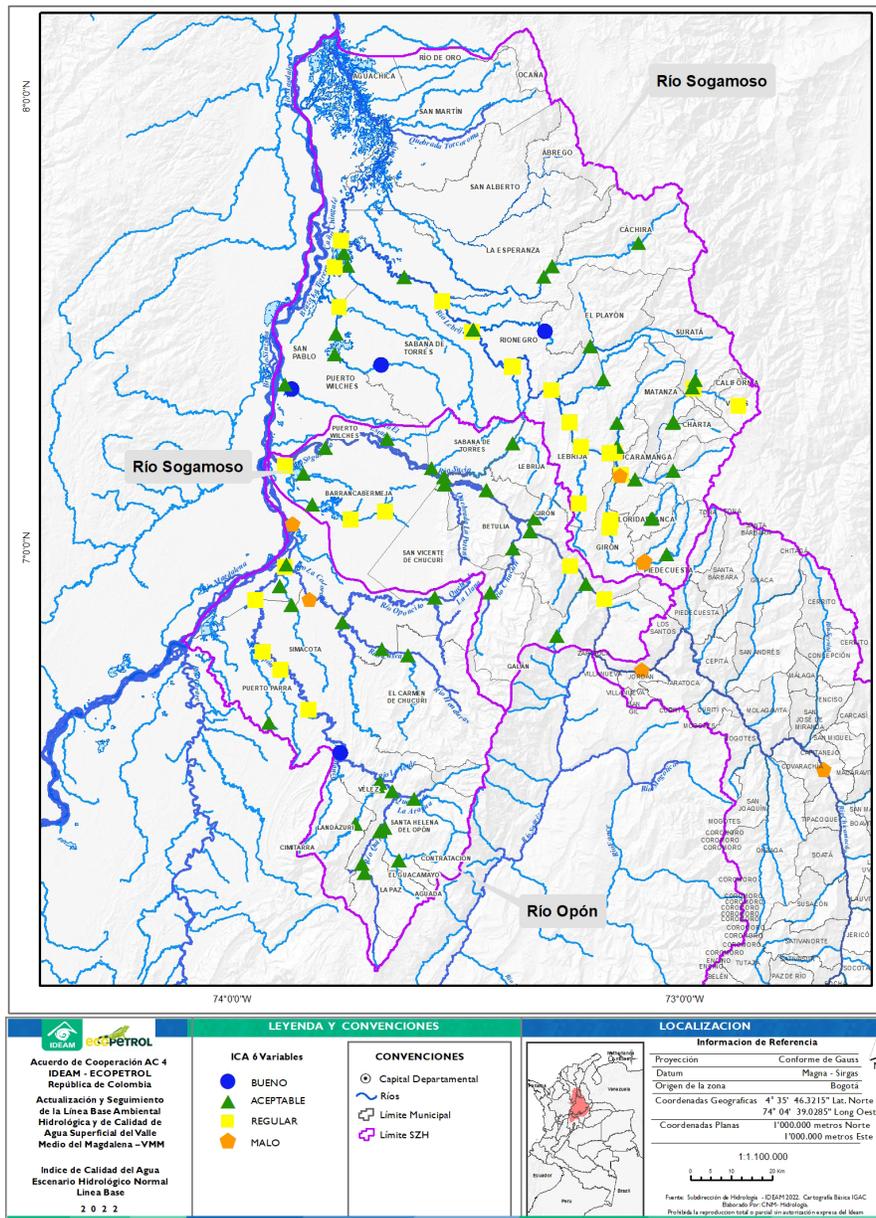
Fuente: elaboración propia.



La figura 2.42. muestra los resultados del ICA para los años normales en cada subzona hidrográfica de la fase de línea base. El detalle de la interpretación del ICA en la etapa de línea base, por cada subzona hidrográfica, puede

ser consultada en el anexo “Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”.

Figura 2.42. Comportamiento del ICA - seis (6) variables durante la etapa de línea base en época normal



Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de calidad del agua correspondientes a la etapa de línea base se presentan,

para el tramo del río Magdalena, en la tabla 2. 27.

Tabla 2. 27. Resultados del ICA en el 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

Fuente: elaboración propia.

La calidad del agua en el tramo del río Magdalena registró características malas durante la etapa de línea base, esencialmente aguas abajo del río Carare durante las 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.

En la figura 2.43 se puede observar la variación del ICA en la fase de seguimiento. Solo se reportan cuatro campañas, dado que en la última solamente hay un dato de monitoreo.

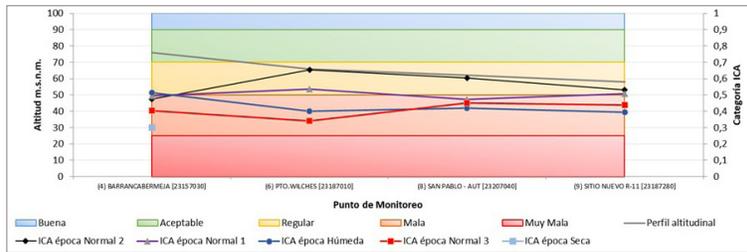
La mala calidad del agua se denota en las desembocaduras de los ríos Opón y Carare (tanto en época normal como húmeda), en la del río Cimitarra entre regular y mala, y en las de los ríos Sogamoso y Lebrija entre regular y aceptable. Las condiciones de calidad

baja 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 ríos Opón, Cimitarra y Lebrija; concentraciones críticas de DQO en la desembocadura del río Opón en época normal y río Carare en 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 observa 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 manera generalizada.

En las figuras 2.44, 2.45 y 2.46 se puede observar la variación del ICA en la fase de seguimiento de los ríos Lebrija, Sogamoso y Opón.

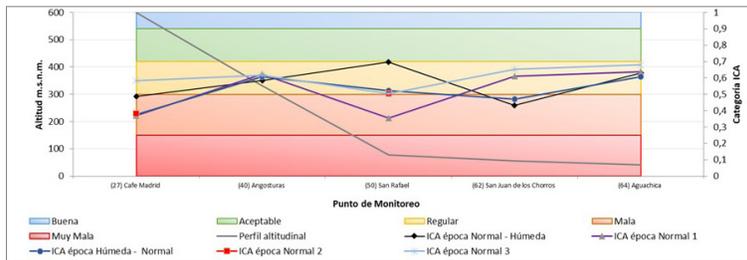


Figura 2. 43. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Magdalena durante la etapa de seguimiento



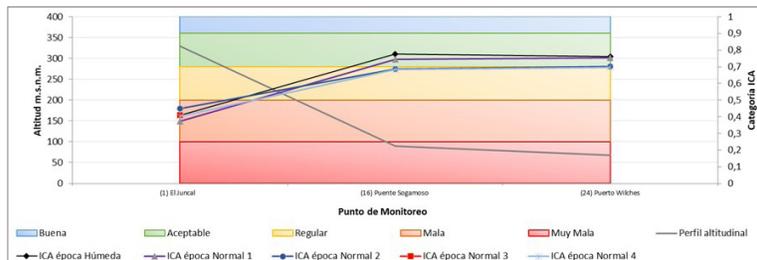
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 44. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Lebrija durante la etapa de seguimiento



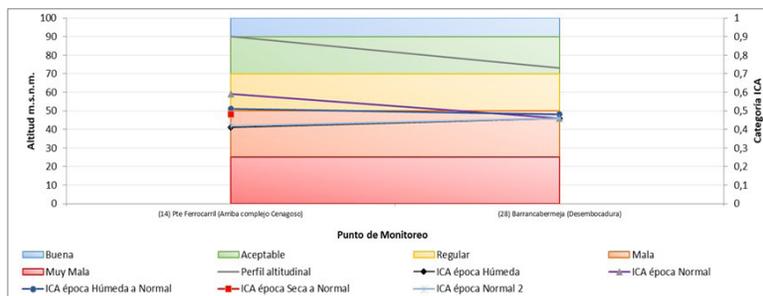
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 45. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Sogamoso durante la etapa de seguimiento



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. 46. Resultados del ICA - seis (6) variables en el tramo del río Opón durante la etapa de seguimiento



Fuente: elaboración propia.



Finalmente, se contempló 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 contempló este análisis para la etapa de seguimiento, debido a la disponibilidad de información.

2. 5. 2. 3. Análisis integrado de calidad del agua ICA - IACAL

El análisis se adelanta a través de una comparación entre el IACAL y el ICA, tomando como referencia la calidad del agua que cada uno de los afluentes (en los puntos de monitoreo hacia la desembocadura) les entrega a las corrientes principales. En la tabla 2. 28 se presenta una síntesis de la relación ICA - IACAL, a nivel del tramo.

Tabla 2. 28. 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		
	Río Carare	2	Normal	Regular		
	Río Carare	2	Húmeda	Mala		
2314	Río Opón	3	Normal	Mala	Alta	Media -Alta
	Río Opón	3	Húmeda	MALA		
	Río Magdalena	4	Normal	MALA		
	Río Magdalena	4	Húmeda	Regular		
2405	Río Magdalena	4	Seca	Mala		
	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		
2317	Río Cimitarra	7	Normal	Mala		
	Río Cimitarra	7	Normal	Regular		
	Río 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		

Fuente: elaboración propia.

La calidad del agua tiende a ser mala en todo el tramo del río Magdalena y durante los diferentes escenarios hidrológicos monitoreados, condición inducida por concentraciones significativas de SST y por la relación de nutrientes, no solo provenientes 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 establecen patrones de diferenciación entre escenarios hidrológicos, que en el caso de época húmeda no mejora por dilución, posiblemente por efecto de cargas distribuidas.

- **Río Opón:** la calidad del 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



la baja calidad, 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.

- **Río Sogamoso:** la calidad del agua en la cuenca alta es mala, influenciada por la de los ríos Chicamocha y Suárez. Aguas abajo el río Sogamoso mejora sus condiciones de calidad, fluctuando entre regular y mala, salvo en las zonas altas o en aquellas unidades donde no se presentan presiones significativas y el reporte es aceptable. En el sector bajo se reporta una tendencia 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. A pesar de 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 del agua es aceptable, se denota en los sectores altos de las diferentes unidades de análisis, y 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 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, obedecían a un escenario normal o de año medio, llamando la atención la mala calidad del agua en el río San Alberto, que posiblemente se explica por sus 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 bajo del río Lebrija son aceptables y no se observan diferencias marcadas entre escenarios hidrológicos, evidenciándose la recuperación de la corriente del agua. Esto se debe, por un lado, a la calidad del 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 ser regular, reflejo de la alta presión que reporta en la estimación del IACAL.

2. 6. Caracterización de la composición isotópica de la precipitación

El detalle de los indicadores puede ser consultado en el anexo "Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrológicas". En este numeral se resumen los aspectos conceptuales y metodológicos, el análisis de la composición isotópica de la precipitación y las consideraciones sobre el funcionamiento de los sistemas de flujo superficial y subterráneo en el Valle Medio del Magdalena. Los contenidos están basados en



el anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de acuerdo con la caracterización realizada”, en el cual se expone de forma extensa y detallada la temática tratada.

2. 6. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico con igual número de protones, pero distinto número de neutrones. Los isótopos de un elemento se designan con el símbolo del elemento químico, más el número másico, que es la suma de protones y neutrones, así: ${}^A X$, donde el superíndice A representa el número de masa y X el elemento químico.

Los isótopos pueden dividirse en dos grupos, estables e inestables (también conocidos como radiactivos). Los isótopos estables son los que ocurren naturalmente en los elementos que se encuentran en abundancia en el entorno; son aquellas especies que no sufren decaimiento radiactivo (proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable) o su vida media es superior a los 300 millones de años. Entre estos isótopos se encuentran los siguientes, los cuales son usados para el estudio y diagnóstico del ciclo hidrológico (Gat et al., 2001):

${}^{18}O$ (oxígeno 18), 2H (deuterio), ${}^{13}C$ (carbono 13), ${}^{34}S$ (azufre 34), ${}^{15}N$ (nitrógeno 15)

Los isótopos radiactivos o inestables son aquellos que sufren cambios en su núcleo a través del tiempo, se desintegran emitiendo partículas α , β y γ , y solo existen durante periodos determinados referidos como “tiempo de vida medio”. Los isótopos radioactivos más utilizados en estudios hidrológicos e hidrogeológicos son el 3H (tritio), con un tiempo de vida medio de aproximadamente 12,32

años y el ${}^{14}C$ con un periodo de 5730 años. Los isótopos radioactivos del oxígeno ${}^{14}O$, ${}^{15}O$, ${}^{19}O$ y ${}^{20}O$ presentan periodos de desintegración de solo segundos (Gat et al., 2001).

La abundancia de los isótopos se expresa en función de las relaciones isotópicas, por ejemplo, ${}^2H/{}^1H$ o ${}^{18}O/{}^{16}O$ (Gat et al., 2001). La abundancia isotópica se denota con la letra R y corresponde a la relación del isótopo raro (menos abundante) con respecto al isótopo más abundante (Mook, 2002):

$${}^8 R = \frac{{}^8 O}{{}^6 O}; \quad {}^B R = \frac{{}^B C}{{}^2 C}; \quad {}^2 R = \frac{{}^2 H}{{}^1 H}$$

Ecuación 1.

Sin embargo, por razones prácticas, en lugar de utilizar la relación isotópica R para describir las composiciones isotópicas se utilizan los valores, que representan las desviaciones relativas respecto a un valor estándar (Gat et al., 2001), y se escribe:

$$\delta = \frac{R_{muestra}}{R_{estandar}} - 1$$

Ecuación 2

Como generalmente δ es un valor pequeño se acostumbra a expresar en ‰ (por mil, equivalente a 10⁻³). Mook (2002) enfatiza que el valor de δ simplemente es un número adimensional pequeño. Para el caso deuterio-hidrógeno (2H-1H), se utiliza ${}^2\delta$ o δ^2H ; en el caso del isótopo del ${}^{18}O$, la notación es ${}^{18}\delta$ o $\delta^{18}O$.

Para este estudio se desarrolló un esquema metodológico sustentado en el diseño de una red de monitoreo, que permitió contar con datos isotópicos e hidroquímicos, para caracterizar la composición isotópica, principalmente de $\delta^{18}O$ y δ^2H , de la precipitación, de aguas superficiales y aguas subterráneas.



El detalle del esquema puede ser consultado en el anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de acuerdo con la caracterización realizada”.

Se partió de la recopilación, revisión y evaluación de información existente para el área de estudio, relacionada con estudios hidrogeológicos, que permitió la identificación de unidades hidrogeológicas y sistemas acuíferos, dinámica de flujo (zonas de recarga, tránsito y descarga). Se consideró también la información hidroquímica e isotópica disponible de algunos estudios.

Se diseñó e implementó una red de monitoreo de isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) en la precipitación, en aguas superficiales y aguas subterráneas seleccionando puntos en cuerpos superficiales como ríos, y puntos de captación de agua subterránea como pozos y aljibes.

Para la selección de los puntos de monitoreo en la precipitación se consideró la distribución altitudinal, proporcionada por el Modelo de Elevación Digital de 12,5 m, y la distribución espacial de la precipitación en la zona de estudio para los años 1983-2020. Además, se tuvo en cuenta la ubicación de las estaciones meteorológicas del Ideam activas, considerando que los totalizadores fueron ubicados dentro de dichas estaciones, por la disponibilidad de contar con un observador para hacer el muestreo y también buscando garantizar su operación en el tiempo.

Para la selección de los puntos de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas se consideró la información hidrogeológica disponible para la zona; se tuvieron en cuenta solo aquellos puntos que captaban las unidades acuíferas de interés, como son el Grupo Real y los Depósitos Cuaternarios. Para el caso del agua superficial se tuvieron en cuenta aquellos sitios donde, de acuerdo con la

información reportada por otros estudios, tienen una relación con flujos subterráneos; además se tuvo la precaución de no tomar puntos donde existiera influencia de descargas puntuales. Se escogieron así 11 puntos para monitoreo subterráneo y 12 para monitoreo superficial.

Para la validación de los datos hidrogeoquímicos se utilizó el criterio del porcentaje en el error del balance iónico (Appelo & Postma, 2005), donde se consideraron como válidas aquellas muestras con un porcentaje de error menor al 10 %. Para el caso de los isótopos estables se consideró el exceso de deuterio, el cual es un marcador de procesos de evaporación, este se define como $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ (Mook, 2002). A través de las gráficas de valores del exceso de deuterio vs. el periodo de acumulación se puede sospechar de muestras que presentan una gran variabilidad y solo considerar aquellas donde el comportamiento presenta una dispersión más corta, por encima del límite que es 5,0 ‰, indicando algún grado de evaporación.

La caracterización hidrogeoquímica tuvo en cuenta la variación de la conductividad eléctrica en ambas unidades hidrogeológicas, la evolución espacial de los iones mayoritarios, la identificación de facies hidrogeoquímicas por medio de Diagramas Stiff, Piper, gráficos binarios y la evolución a lo largo del tiempo, con el fin de evaluar trayectorias de flujo del agua subterránea y zonas de recarga.

Posteriormente, se analizaron los datos isotópicos de la precipitación, calculando las líneas meteóricas locales y el gradiente altitudinal isotópico, y se realizó la interpretación con la composición isotópica del agua subterránea y el agua superficial, con el fin de conocer las zonas de recarga, y la relación entre el agua superficial y el agua subterránea.

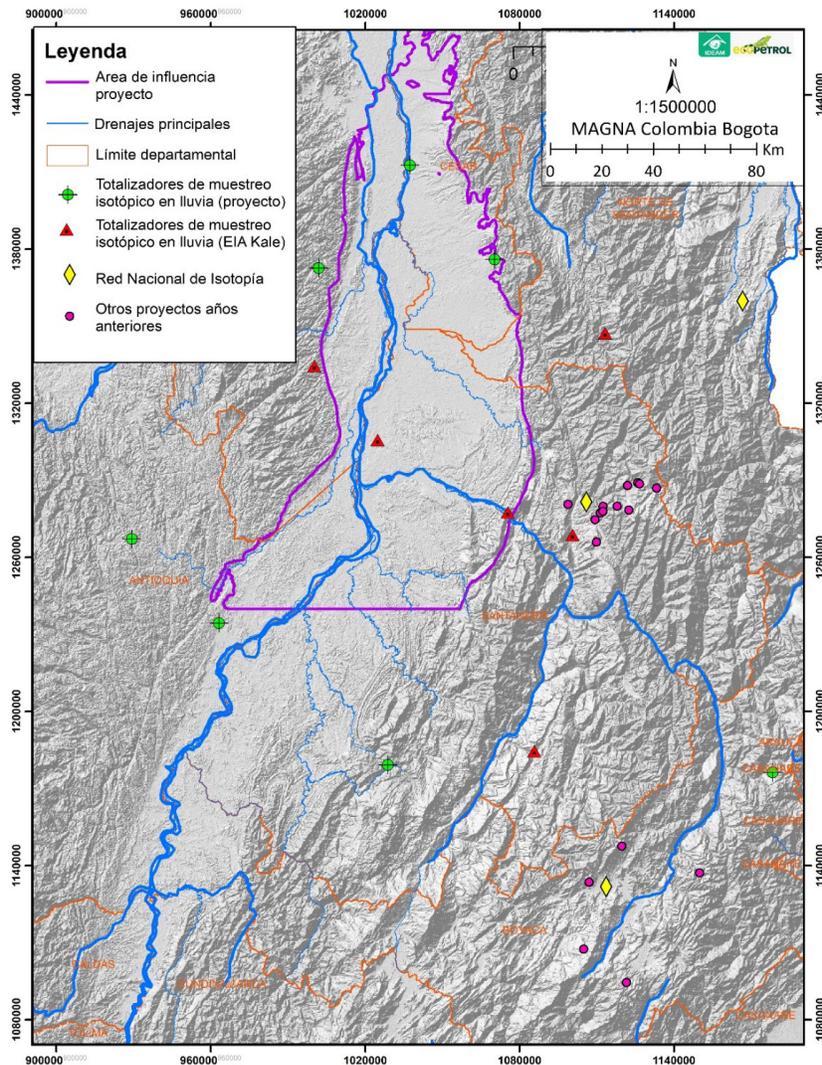


2. 6. 2. Análisis de la composición isotópica de la precipitación

Para el análisis de la composición isotópica de la precipitación se tuvieron en cuenta las ubicaciones de muestreo isotópico en agua lluvia, adelantada en otros estudios para la zona; y se evaluaron los datos suministrados por la Red Nacional de Isotopía del Ideam de

puntos de monitoreo instalados en el Estudio de Impacto Ambiental para el Proyecto Piloto de Investigación Integral PPII- Kale y Platero, además de otros estudios adelantados en esta misma zona de proyectos auspiciados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (figura 2.47).

Figura 2.47. Puntos de monitoreo isotópico en agua lluvia considerados para el análisis



Fuente: elaboración propia.



Se instalaron en la zona totalizadores Palmex, como el presentado en la figura 2.48, y se realizó

un muestreo mensual de isótopos de deuterio (^2H) y Oxígeno 18 (^{18}O) en agua lluvia.

Figura 2.48. Izquierda: totalizador comercial con tubo sumergido instalado en la zona de interés. Derecha: totalizadores instalados en las estaciones climatológicas del Ideam de Remedios (Antioquia) y en Puerto Berrío (Antioquia)



Fuente: elaboración propia.

Los datos surgieron del proceso de validación mencionado en el numeral anterior.

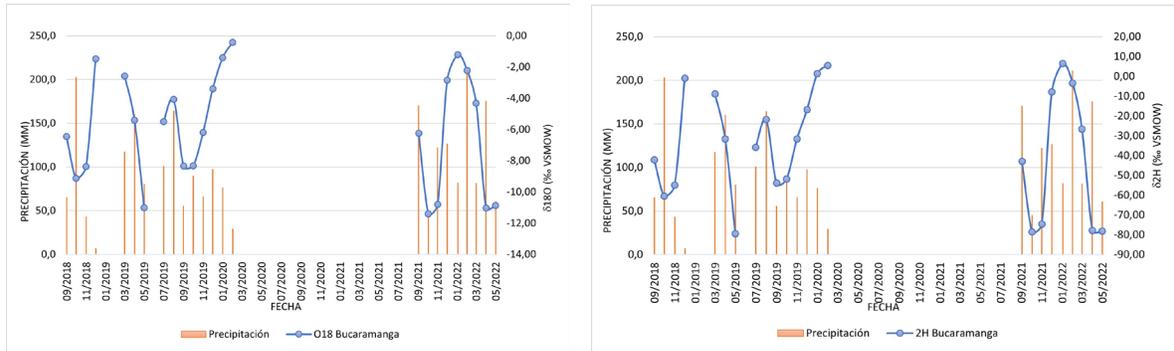
La estación ubicada en Bucaramanga presenta una composición isotópica que varía entre $-12,46$ y $-0,43$ ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$, y entre $-91,40$ a $6,40$ ‰ de $\delta^2\text{H}$ con datos hasta marzo de 2023. Se puede evidenciar un enriquecimiento (valores menos negativos) en términos generales, en las épocas secas, particularmente en diciembre, enero, febrero y marzo; y en menor proporción, junio, julio y agosto, en donde las lluvias tienen valores promedio de 67,89 mm y 90,41 mm, respectivamente. Por otro lado, se observan valores más empobrecidos (valores más negativos) en las temporadas de lluvia que se extienden de abril a mayo y de septiembre a noviembre, con precipitaciones promedio de 120,49 mm y 127,46 mm, respectivamente (figura 2.49). Esto se encuentra directamente relacionado

con el efecto de cantidad, típico de climas tropicales, donde a mayor cantidad de lluvia se registran valores más empobrecidos de la composición isotópica de la precipitación. También se observan algunos meses en los que este comportamiento no es evidente, lo cual podría estar relacionado con condiciones climáticas particulares del área de influencia de la estación; sin embargo, solo con un monitoreo continuo se podría explicar este comportamiento.

Además, se encontró una tendencia al desfase de aproximadamente un mes en la respuesta del efecto de cantidad, es decir, el enriquecimiento o empobrecimiento de una muestra de un mes, debido a la disminución de la precipitación o a un aumento respectivamente, no se ve reflejado siempre en el mismo mes, sino que puede verse reflejado en el mes siguiente.



Figura 2.49. Variación temporal de la composición isotópica:
(a) $\delta^{18}\text{O}$ y (b) $\delta^2\text{H}$ de la estación de Bucaramanga



(a)

(b)

Fuente: elaboración propia.

Las otras estaciones presentan un comportamiento similar y se pueden consultar en el anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de

acuerdo con la caracterización realizada”. En la Tabla 2. 29 se presentan las líneas meteóricas locales para cada estación, que contaron con un monitoreo de alrededor de un año de datos.

Tabla 2. 29. Información de la línea meteórica para cada estación

Estación	Pendiente	Intercepto	Coefficiente de determinación
Bucaramanga	8,19	12,7	0,9919
Duitama	8,10	11,36	0,9950
Carmen de Tonchalá	8,06	11,44	0,9974
Remedios	8,00	10,99	0,9973
Puerto Berrío	7,91	7,93	0,9969
Girón	8,27	12,22	0,9975
Cáchira	7,92	9,78	0,998
Canelos	8,19	12,00	0,999
Oiba	8,25	12,90	0,997
Puerto Wilches	7,92	10,54	0,997
Sogamoso	8,34	12,97	0,994
San Pablo	7,88	9,36	0,99
Picacho	8,11	14,46	0,995
La Casita	8,43	15,20	0,995
San Antonio	8,29	13,87	0,999
Tona	8,31	14,46	0,9954

Fuente: elaboración propia.



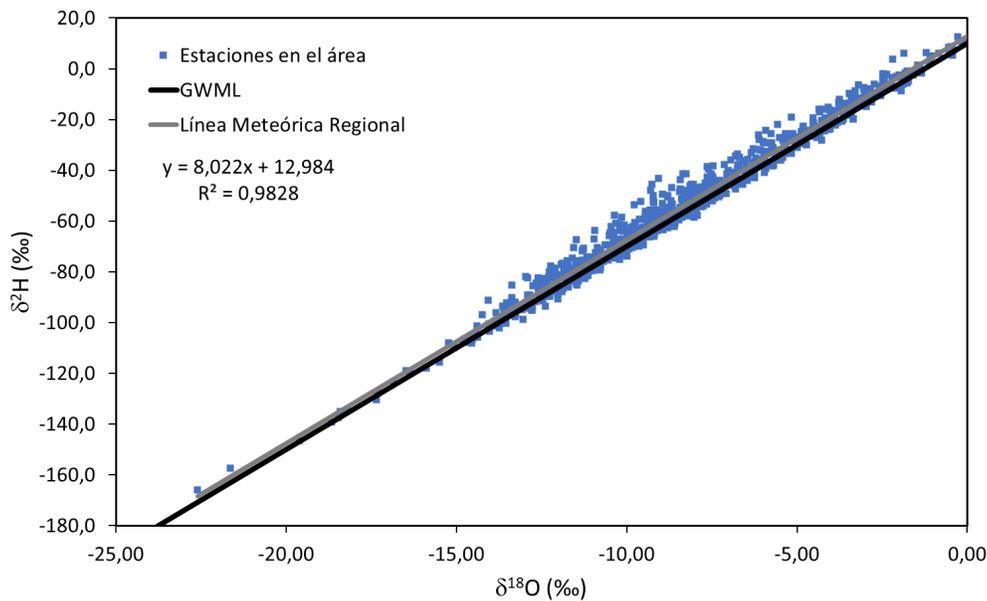
Las líneas meteóricas de estas estaciones son similares a la línea meteórica mundial, definida como $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$. Asimismo, se tuvo en cuenta la línea propuesta por Rozanski et al. (1993) con pendiente 8,17 e intercepto 10,35. La mayoría de las estaciones y la línea meteórica regional presentan valores cercanos a la pendiente e intercepto presentadas anteriormente (figura 2.50). Solo la estación Puerto Berrió muestra un intercepto notablemente inferior, por lo cual será necesario continuar con el monitoreo para saber si se sigue comportando de esta manera.

Esta similitud indica que la precipitación en estas estas estaciones se encuentra afectada exclusivamente por procesos meteóricos,

sin efecto de evaporación (Mook, 2002). Adicionalmente, las rectas presentan un coeficiente de determinación de 0,99, con lo cual se infiere que la regresión es válida.

Las rectas meteóricas de las estaciones ubicadas al nororiente de Bucaramanga -Picacho, La Casita, San Antonio y Tona presentan pendientes de 8,4 a 8,1, pero en estos casos los interceptos son más altos con valores entre 15,19 a 14,46, esto está por encima del intercepto de la Línea Meteórica Mundial que es de 10,0, lo cual indica una presencia de procesos de reciclaje. Las estaciones ubicadas a elevaciones mayores de los 2.000 m s. n. m. como Picacho y La Casita presentan los valores más empobrecidos.

Figura 2.50. Línea meteórica regional de la composición isotópica en el área de interés



Fuente: elaboración propia.



Por otra parte, fueron calculados los valores promedios ponderados para cada estación (tabla 2. 30).

Tabla 2. 30. Valores ponderados para el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ por cada estación

Estación	$\delta^{18}\text{O}$ ponderada (‰)	$\delta^2\text{H}$ ponderada (‰)	Altura (ms. n. m.)
Bucaramanga	-7,00	-44,76	1.013
Duitama	-9,90	-69,3	2.513
Carmen de Tonchalá	-7,52	-48,6	285
Picacho	-12,64	-88,1	3.456
La Casita	-8,99	-60,4	2.538
San Antonio	-8,01	-52,6	1.437
Tona	-9,23	-61,8	1.878
La Galvicia	-7,85	-46,8	1.808
Berlín	-9,6	-88,4	3.335
Remedios	-9,0	-66,3	154
Puerto Berrío	-12,59	-55,8	640
Girón	7,9	-52,6	758
Cáchira	-12,59	-88,8	1.930
Canelos	-8,8	-60,1	1.040
Oiba	-8,4	-56,6	1.467
Puerto Wilches	-8,7	-58,3	76.5
San Pablo	-9,7	-67,0	416.3
Sogamoso	-8,0	-54,3	432

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, es necesario analizar también cómo varía la composición isotópica de la precipitación con respecto a la altura, para lo cual hay que tener en cuenta la longitud de las series disponibles, pues parece que, en las estaciones más recientes, con menor cantidad de registros, la señal isotópica ponderada es similar a las estaciones que están a una mayor altura, pero con una serie más extensa de datos. Por ejemplo, la estación Bucaramanga localizada a una altura 1.013 ms. n. m. registra un $\delta^{18}\text{O}$ ponderado de -7,00 ‰, mientras que las estaciones Remedios (154 ms. n. m.) y Puerto Wilches (76 ms. n. m.) presentan valores de -9,61 y -8,69 ‰, respectivamente; es decir, están más empobrecidos. Otra explicación podría ser que la humedad que

producen las precipitaciones en estas zonas fuera diferente a la producida por las lluvias en zonas más altas; sin embargo, no existe gran diferencia en el exceso de deuterio de una con respecto a la otra. Por lo tanto, con la información recolectada podría plantearse la hipótesis de que estas estaciones están siendo afectadas por un efecto de cantidad importante, debido a la presencia del fenómeno de La Niña en el 2022. Para confirmar esta hipótesis será necesario continuar con algunas de estas estaciones.

Por el momento, se puede afirmar que en las zonas más altas hacia el oriente del área de interés se presentan lluvias con mayor empobrecimiento.



2. 6. 3. Consideraciones sobre el funcionamiento de los sistemas de flujo superficial y subterráneo

Se consideró caracterizar el agua poco profunda presente en los acuíferos de importancia regional, como es el Grupo Real y los Depósitos Cuaternarios, y se seleccionaron puntos de agua con profundidades menores a 200 m para los acuíferos cuaternarios, y menores a 180 m para la Formación Bagre del Grupo Real. Para los puntos de aguas superficiales se incluyeron muestras tomadas en los principales ríos como el Magdalena, Sogamoso y Lebrija, además de algunos de sus afluentes como quebradas. Asimismo, fue incorporada la información secundaria de otros proyectos en el área de estudio, la cual puede consultarse en el anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de acuerdo con la caracterización realizada”.

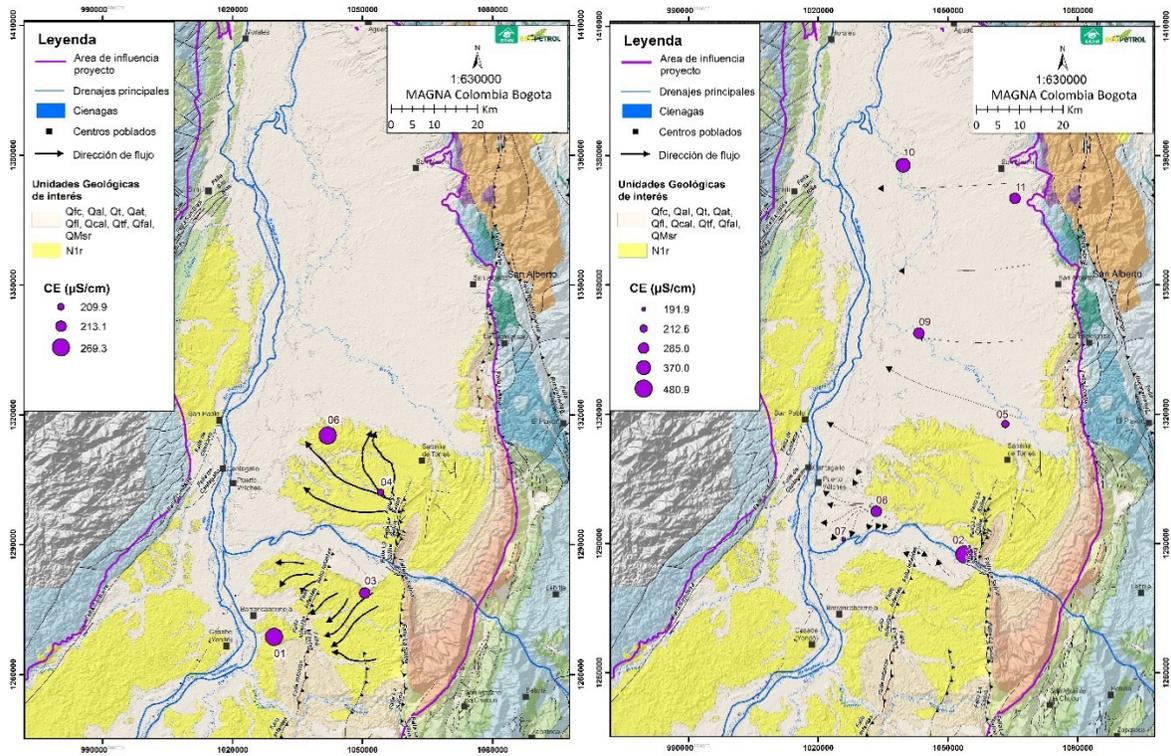
La conductividad eléctrica para las captaciones del Grupo Real se encuentra en el rango de 209,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 269,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para profundidades que están entre 19 y 32 m, y entre 60 y 80 m, respectivamente. De acuerdo con el mapa, en donde aflora el Grupo Real al norte del río Sogamoso, la conductividad aumenta hacia el noroccidente en dirección de las líneas de flujo, al igual que hacia el sur del río donde las conductividades son mayores hacia el suroccidente, coincidiendo con las trayectorias de flujo. Sin embargo, es necesario resaltar que se tienen muy pocos puntos de monitoreo sobre esta formación (figura 2.51).

Para los Depósitos Cuaternarios se presentan valores entre 191,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 480,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando de igual manera aguas dulces y de poca mineralización. Hacia el río Sogamoso, en puntos cercanos al margen del río, se presentan conductividades de 480,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 285,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a pocas profundidades entre 3,8 y 4,43 m. Hacia el río Lebrija se presentan valores de 237,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en un tramo cerca al río Magdalena y de 370,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a un punto cerca de la margen del río, con profundidades aproximadas de 20 m. Por otro lado, en el sector de Sabana de Torres se reportan valores de 212,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a profundidades de 35 m, y hacia San Martín de 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a profundidades de 50 m. En general, no hay una coherencia con las líneas de flujo, lo cual puede ser atribuido a que es un acuífero libre donde se pueden tener mezclas de agua lluvia recién infiltrada con agua más mineralizada del cuerpo de agua en algunos puntos. Solo el monitoreo continuo y con una mayor cantidad de puntos permitirá confirmar estas tendencias.

En general, no se observa una tendencia clara en el aumento de la conductividad a lo largo de la zona de estudio. Este comportamiento se podría explicar al tratarse de acuíferos libres, donde se mezclan aguas lluvias con el agua del cuerpo de agua, encontrando zonas de rejuvenecimiento del agua.



Figura 2.51. Izquierda: mapa de conductividad para puntos que captan el Grupo Real en el sector de Sabana de Torres y al sur del río Sogamoso. Derecha: mapa de conductividad para puntos que captan los Depósitos Cuaternarios en la mayoría del área de influencia



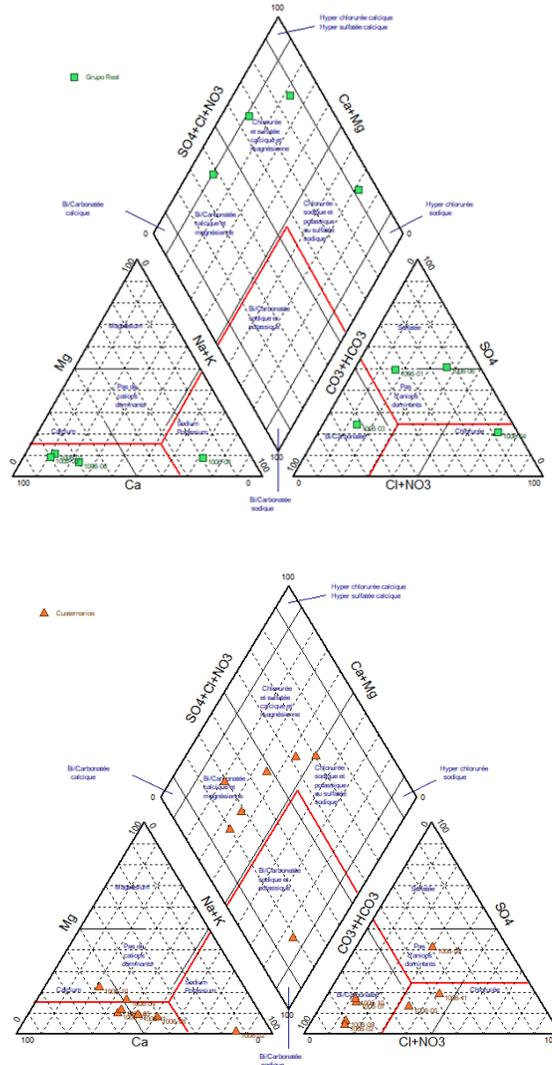
Fuente: elaboración propia.

En los puntos que captan el Grupo Real en los primeros 80 m se pueden identificar tres tipos de aguas: bicarbonatadas cálcicas-magnésicas, sulfatadas sódicas, además de cloruradas sódicas (figura 2.52). Estas son aguas de poco tránsito posiblemente, lo que es coherente con los puntos que captan a pocas profundidades (máximo de 30 m) al Grupo Real que aflora en el área, el cual se comporta como un acuífero libre o semiconfinado, donde el agua que se infiltra hace un recorrido corto.

Para los puntos que captan agua de los Depósitos Cuaternarios a profundidades menores a 100 m se registran aguas bicarbonatadas cálcicas magnésicas, y una mezcla de aguas sulfatadas sódicas y cloruradas magnésicas; algunas son bicarbonatadas sódicas (figura 2.52).



Figura 2.52. Diagrama Piper para las captaciones del Grupo Real y Depósitos Cuaternarios



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, las aguas superficiales registran facies de tipo bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas magnésicas. Son aguas que presentan conductividades con valores que van desde 144,2 a 309,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Con base en lo anterior, se evaluaron los procesos hidrogeoquímicos presentes en el acuífero y su relación con la recarga:

- Hidrólisis y disolución de carbonatos:

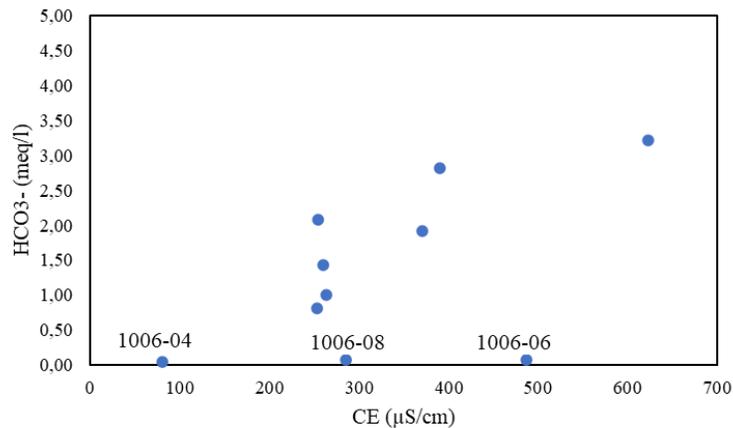
Para evaluar este proceso se analizó en primer lugar la correlación entre los bicarbonatos y la conductividad eléctrica. De la figura 2.53 se infiere que existe una relación directa entre estas dos variables; es decir, se presenta una mayor conductividad eléctrica cuando se registran mayores contenidos de bicarbonato.



Solo dos muestras presentan un aumento de la conductividad sin registrar un aumento en los bicarbonatos: 1006-08 y 1006-06 con 285 y 487 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Más adelante, se observarán otros procesos que pueden estar presentes en estos sitios. Si no se tienen en cuenta estas muestras la relación HCO_3^- vs. conductividad eléctrica registra un

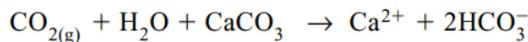
coeficiente de correlación de 0,9; esto quiere decir que la correlación es alta y que evidentemente el proceso de disolución de CO_2 , del cual se genera el bicarbonato, está presente en el acuífero. El CO_2 puede provenir de la oxidación de la materia orgánica o de la respiración de las plantas (Appelo & Postma, 2005).

Figura 2.53. Relación entre el HCO_3^- y la conductividad eléctrica



Fuente: elaboración propia.

La presencia de este medio con hidrogeniones permite la disolución de minerales y la alteración de silicatos, los cuales se analizan a continuación. En acuíferos carbonatados la disolución de la calcita es un proceso predominante y se rige por medio de la ecuación, donde se espera que, si este es un proceso importante en el acuífero, se produzcan dos moles de bicarbonato por una de calcio.



(Appelo & Postma, 2005)

El acuífero del Valle Medio del Magdalena no registra formaciones carbonatadas consolidadas, pero si muestra carbonatos en las diferentes descripciones litológicas, por lo tanto, es posible que esos carbonatos incorporen

el ion Ca^{2+} al acuífero. La correlación entre estos iones es del 0,54, considerada una correlación media (Esteller et al., 2017). En efecto, existen puntos que registran mayor contenido de calcio que bicarbonato (ver anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de acuerdo con la caracterización realizada”), lo cual implica que existen otros procesos que están aportando mayor contenido de calcio, como, por ejemplo, la alteración de la anortita y la disolución de trazas de yeso (Appelo & Postma, 2005). Por otra parte, el sulfato y el calcio presentan una muy baja relación.

Otro proceso que es frecuente en acuíferos con una matriz arcillosa importante es el de intercambio catiónico, el cual puede afectar



los contenidos de calcio, magnesio y sodio en el acuífero, y también está presente en él (ver anexo “Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol de acuerdo con la caracterización realizada”). El ion sodio también puede ser aportado por procesos de intrusión marina pasada, actual, disolución de halita o procesos de depósito en la lluvia. Para determinarlo se utiliza, entre otros, la relación Na/Cl (meq/l); valores cercanos a “1” son indicativos de procesos de disolución de halita, mientras que valores de 0,86 son característicos de aguas mezcladas con agua de mar. Esta relación presenta un rango de variación entre 0,59 y 6,19. Solo el punto 1006-05 registra un valor cercano a 1, con 1,04. Con esto se infiere que no existen procesos de intrusión marina ni de disolución de halita, lo cual es coherente con el contexto regional.

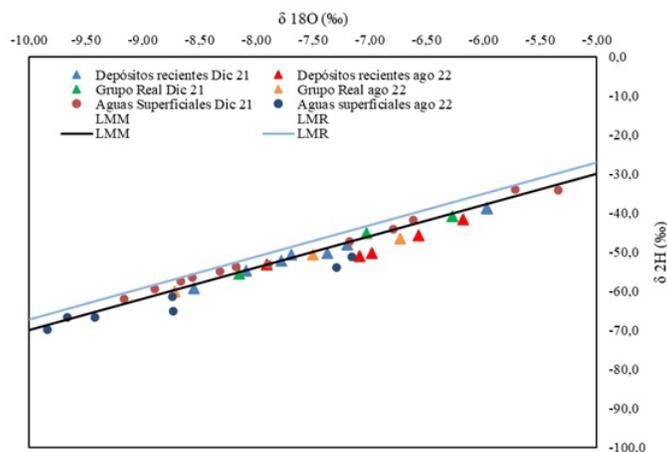
De lo anterior, se deduce que la evaluación hidrogeoquímica permite evidenciar unos procesos de recarga proveniente de la infiltración del agua lluvia y reacciona con el $\text{CO}_{2(g)}$, y con los minerales.

En el anexo antes mencionado se presentan los resultados de laboratorio para los análisis de ^{18}O y ^2H realizados para aguas superficiales y subterráneas, recolectados en la primera campaña realizada en noviembre del 2021, correspondiente a una época húmeda.

El agua subterránea presenta una variabilidad de $-5,97$ a $-8,55$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$. Al igual que en la hidrogeoquímica, estos valores también son coherentes con lo presentado por Ecopetrol (2021), donde se muestran rangos de variación en 17 muestras entre $-6,46$ a $-8,65$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$. El agua superficial registra un rango de variación de $-5,72$ a $-9,16$ ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$. Las muestras registran un exceso en deuterio entre $7,0$ a $14,26$ ‰, de lo cual se infiere que las muestras no fueron sometidas a procesos de evaporación y pueden ser utilizadas para la interpretación.

De acuerdo con la figura 2.54 los puntos de agua subterránea se encuentran alineados sobre la Línea Meteórica Mundial, indicando que efectivamente existe una recarga al sistema, como se evidenció con el análisis hidrogeoquímico.

Figura 2.54. Variación de la composición isotópica del agua subterránea y superficial en el Valle Medio del Magdalena respecto a la línea meteórica mundial



Fuente: elaboración propia.



El rango de variación del agua subterránea es de 2,58 ‰ $\delta^{18}\text{O}$. Los puntos más enriquecidos corresponden a 1006-05 y 1006-10, localizados hacia el suroriente y hacia el norte respectivamente. Por el contrario, la más empobrecida se encuentra al sur oriente (1006-02) sobre los depósitos recientes. En términos generales, no se aprecia una tendencia o patrón claro en la composición isotópica del agua subterránea, lo cual es típico de acuíferos libres donde es posible encontrar un rango de diferencia amplio, debido a los diferentes procesos hidrológicos y de recarga que pueden presentarse (Campillo et al., 2021). En cualquiera de los casos la variación del agua subterránea se encuentra dentro del rango de las medias ponderadas de la precipitación, lo cual indica efectivamente una recarga.

La composición del agua superficial registra un rango de variación de 3,82 ‰, los valores más enriquecidos corresponden a los puntos 1006-27 (-5,34 ‰ $\delta^{18}\text{O}$) y 1006-14 (-5,72 ‰ $\delta^{18}\text{O}$), 1006-21 (-6,79 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, quebrada La Gómez) y 1006-13 (-6,62 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, río La Colorada). Bajo estos primeros análisis en el Valle Medio del Magdalena, es posible inferir que estos puntos registran una evaporación, sin embargo, el exceso en deuterio registra un valor entre 8,62 y 11,76 ‰, indicando que el proceso de evaporación no es predominante en este monitoreo. Lo anterior es coherente con el régimen climático, considerando que las muestras fueron tomadas en la época húmeda. En esta época se espera que la composición isotópica de la precipitación (más empobrecida) gobierne la composición isotópica del agua superficial. Los puntos más enriquecidos se encuentran hacia el nororiente. Para confirmar estas tendencias será necesario un monitoreo continuo y generar argumentos sobre este comportamiento.

El resto de las muestras presenta valores más empobrecidos, se encuentran sobre

la línea meteórica mundial (figura 2.54) y es parecida a la composición isotópica del agua subterránea.

2. 7. Indicadores hídricos

En este numeral se presentan los indicadores hídricos dependientes de la oferta hídrica obtenidos según la estrategia de modelación adoptada; estos son los índices de regulación hídrica e índice de aridez, tomando como unidades de análisis el nivel subsiguiente a la subzona hidrográfica. Además, se presenta el índice de uso del agua. Los contenidos están basados en el documento “Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas”, en el cual se expone de forma extensa y detallada la temática tratada, específicamente en el capítulo cinco.

2. 7. 1. Índice de regulación hídrica e índice de aridez

Los índices hidro climatológicos 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 esta para 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 del agua y la energía disponible para esa evaporación



(Ideam, 2019). Esto se representa con la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial y ETR es la evapotranspiración real.

A continuación, se presentan los resultados para las subzonas hidrográficas analizadas.

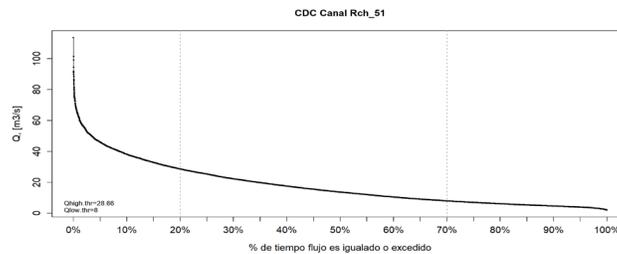
2. 7. 1. 1. Índice de regulación hídrica (IRH)

En la figura 2.55 se muestra la CDC para uno de los canales simulados en la zona hidrográfica del río Lebrija. Se puede ver que para el

agua que fluye por dicho canal, la diferencia del valor de caudal excedido entre el percentil 70 % y el 100 % del tiempo no es significativa, mientras que el flujo correspondiente al 20 % del tiempo sí tiene un aumento con respecto a sus predecesores. Los caudales con menor ocurrencia que este percentil crecen rápidamente.

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 2. 31.

Figura 2.55. CDC diaria de los caudales simulados en la desembocadura del río Cachirí en el río Lebrija



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 31. 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

Fuente: elaboración propia.

Con los datos usados para formar la CDC se calculó y clasificó el IRH, que puede verse para algunos canales de importancia en la tabla 2. 32 y en la figura 2. 56 para toda la SZH. Se puede ver que la mayoría de las corrientes tienen una regulación moderada y que varias 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 abajo 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, no es posible constatar esto con la información producida por la modelación hidrológica de la zona.

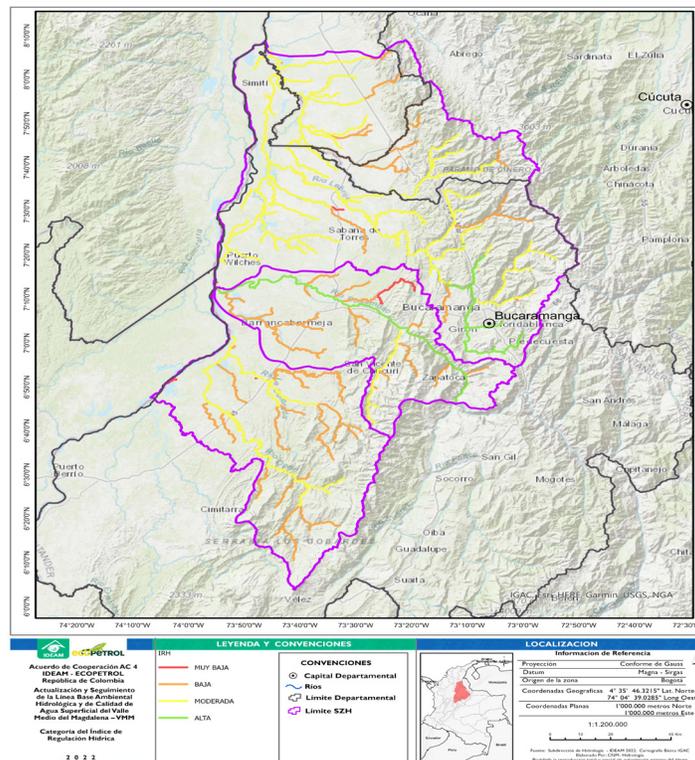


Tabla 2. 32. Índice de Regulación Hídrica en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	IRH	IRH Clasificación
Rch 1	Río Lebrija desembocadura en el río Magdalena	0.75	Moderada
Rch 93	Río de Oro desembocadura en el río Lebrija	0.76	Alta
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo desembocadura en el río Lebrija	0.71	Moderada
Rch 121	Quebrada La Gómez 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 la ciénaga La Tigra	0.70	Moderada

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.56. Índice de Regulación Hídrica en los canales simulados en la SZH del río Lebrija

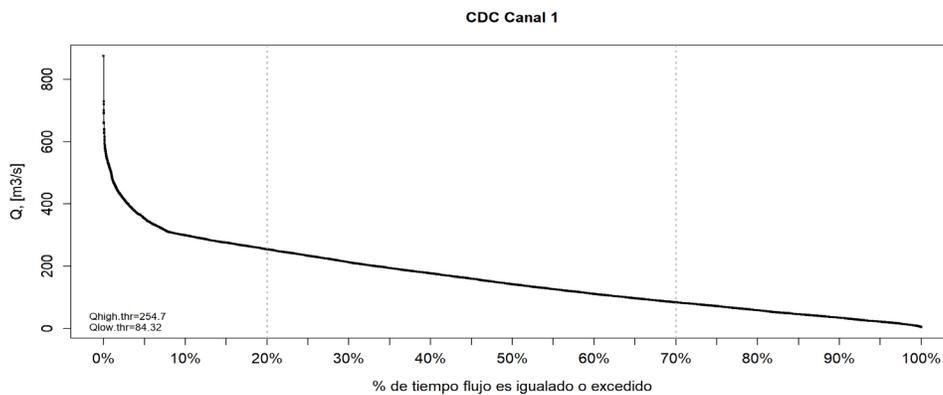


Fuente: elaboración propia.

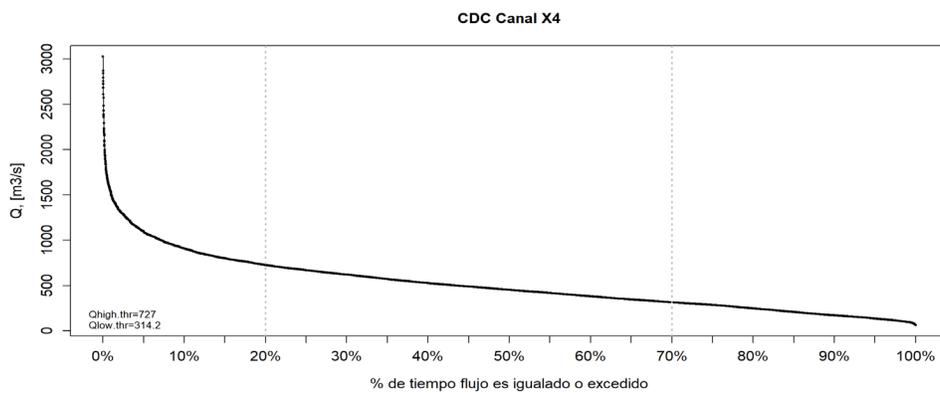
Se debe resaltar que la estimación de la regulación ha sido posible únicamente debido a que la modelación hidrológica se realizó a escala diaria y a que tiene en cuenta procesos de tránsito del caudal (calibrados en la mayoría de las subcuencas planteadas en la modelación).

En la figura 2.57 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 estas SZHs.

Figura 2.57. Curvas de duración de caudal en tramos de los ríos Opón y Sogamoso



a) Tramo del río Opón en su desembocadura



b) Tramo del río Sogamoso en su desembocadura

Fuente: elaboración propia.

Los valores de IRH obtenidos y la categoría asignada a algunos de los principales ríos de

la SZH del río Sogamoso son presentados en la tabla 2. 33.



Tabla 2. 33. 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 Puente 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

Fuente: elaboración propia.

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 Cuenas Hidrográficas elaborados por la CAS para ambas SZHs. En la figura 2.56 se presenta

la distribución espacial del IRH en las 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 obtienen valores de IRH más altos.

2. 7. 1. 2. Índice de aridez (IA)

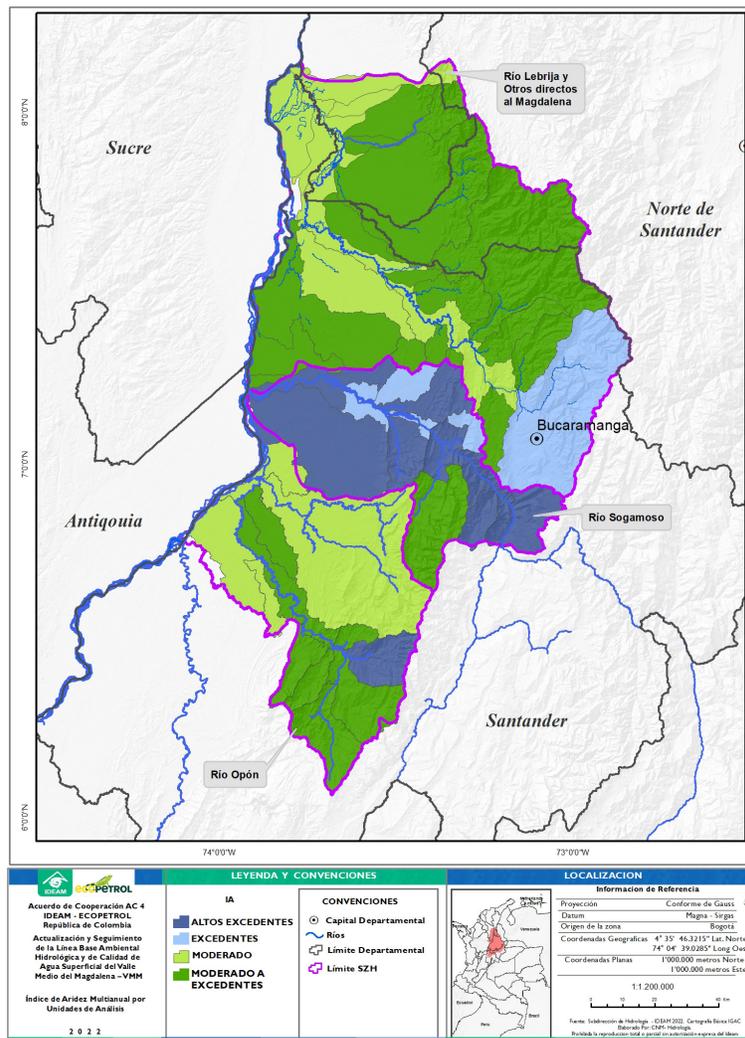
A través de los resultados de la modelación realizados con el aplicativo SWAT se pudo estimar, a nivel de subcuenca, el índice de aridez



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 2.58 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 Suratá 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”, debido probablemente a que la precipitación en esa zona está un poco sobreestimada por el producto satelital usado.

Figura 2.58. Índice de aridez en las unidades de análisis



Fuente: elaboración propia.

En la SZH del río Opón las cuencas del 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 un IA que la categorizan mayoritariamente como una región con disponibilidad moderada de agua, con una zona clasificada como “moderada a excedentes de agua”.

2. 7. 2. Índice de uso del agua

De acuerdo con el *Estudio Nacional del Agua* (Ideam, 2015), el Índice de Uso del Agua (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 4):

$$IUA = \left(\frac{D_h}{O_h} \right) \cdot 100$$

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 2.34.

Tabla 2. 34. Interpretación del índice de uso del agua

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 (Ideam, 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 *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 escurrientías y caudales equivalentes a las cuales se les aplicó el siguiente proceso para cada unidad de análisis por separado:

- Se realizó un promedio móvil de 12 intervalos sobre las series, indicando en cada uno cuál fue el volumen para el intervalo al que pertenece; este representa un año diferente al año calendario y al año hidrológico.
- 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 el del año húmedo; se guardó el intervalo de inicio y fin para cada una de las unidades de análisis por separado.

- Se extrajo el intervalo identificado, se transformó a volumen (cuando fue necesario) y se sumó para hallar el dato anual; con esto, se halló la oferta o el valor de la escurrientía para los años típicos.

Se debe aclarar que las modificaciones al cálculo de las variables mencionadas solo aplican para el presente estudio. En cada caso de estudio la metodología halla periodos de datos de igual longitud, pero de diferente inicio y fin; esto garantiza que se puedan dilucidar diferencias locales entre estos casos. Los datos de escurrientías y caudales equivalentes usados para realizar las clasificaciones fueron obtenidos de las simulaciones del aplicativo SWAT.

La tabla 2. 35 muestra los resultados consolidados de las variables que determinan el IUA y el valor calculado de este para las unidades de análisis en año medio. Por su parte, la tabla 2. 36 muestra los resultados consolidados de las variables que determinan el IUA y su valor calculado para las unidades de análisis en año seco.

Las figuras 2.59 y 2.60 muestran los mapas del IUA en año medio y seco respectivamente.



Tabla 2. 35. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año medio

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre De La 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 Chucuri 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 la vereda La Honda y la 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 %



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre De La 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 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 %
	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 Gómez	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	Ciénagas Guacamaya, El Roble., 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 %
	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 %



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre De La 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 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 Zapatoaca	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 %
	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 %

Fuente: elaboración propia.



Tabla 2. 36. Resultados consolidados del IUA por unidad de análisis en año seco

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre de La 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 la vereda La Honda y la 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 %
	231412	Río La Verde	0,20	62,6	1,16	36,5	26,0	0,8 %



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre de La 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 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 Gómez	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	CiénagasGuacamaya, El Roble, La Doncella	13,06	109,1	2,33	73,6	35,6	36,7 %
	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 %



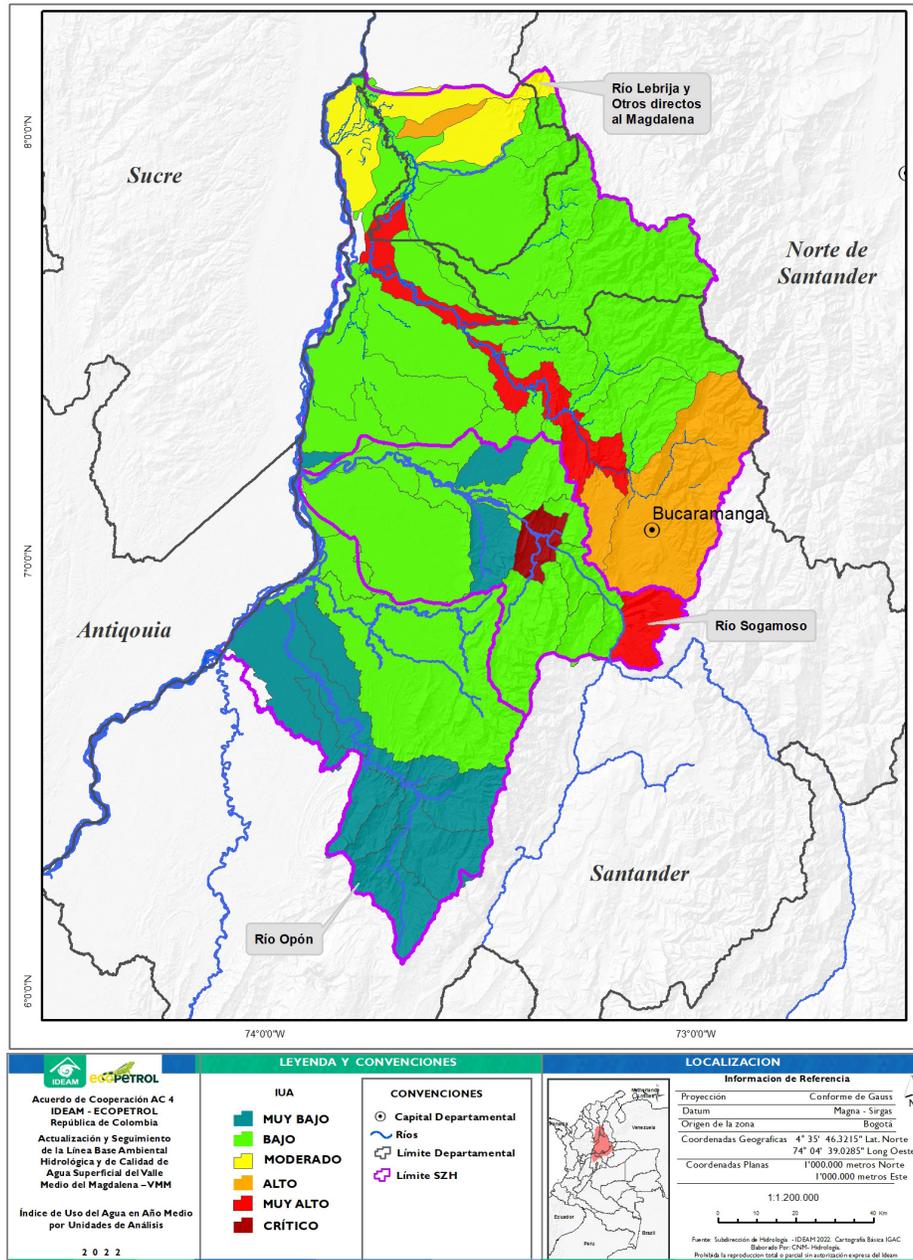
LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Subzona Hidrográfica	Código	Nombre de La 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 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 %
	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 %

Fuente: elaboración propia.

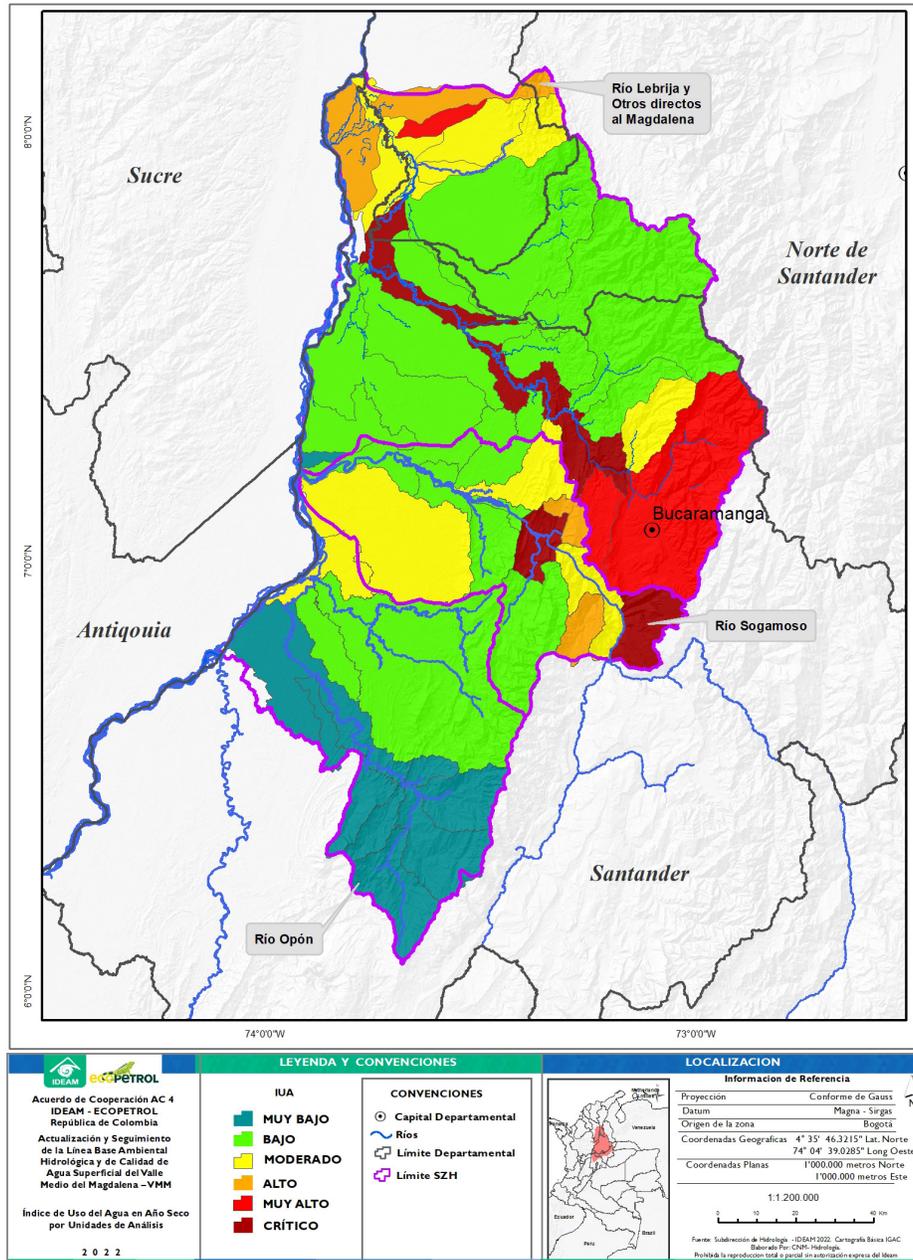


Figura 2.59. Índice de uso del agua (IUA) en año medio en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos/año)



Fuente: elaboración propia.

Figura 2.60. Índice de uso del agua (IUA) en año seco en las unidades de análisis (en millones de metros cúbicos/año)



Fuente: elaboración propia.

2. 8. Modelación para pronóstico y alertas tempranas

Este numeral presenta un resumen de los aspectos conceptuales y metodológicos de la modelación hidrológica e hidráulica con fines de pronóstico a corto plazo en el Valle Medio del río Magdalena (VMM) tendiente a la evaluación del pronóstico hidrológico y a la optimización de los modelos existentes en el sistema operacional de pronóstico hidrológico del IDEAM, denominado La Plataforma FEWS (Flood Forecasting and Early Warning System).¹ Colombia. Además, presenta los resultados de su implementación en la Plataforma. Los contenidos están basados en el documento “Evaluación del pronóstico hidrológico (modelos FEWS) en las áreas de interés de Ecopetrol en el VMM” en el cual se exponen de forma extensa y detallada la temática tratada.

2. 8. 1. Aspectos conceptuales y metodológicos

Un sistema de alerta temprana hidrometeorológicas tiene por propósito advertir de la llegada de condiciones hidrometeorológicas peligrosas con suficiente antelación para que las entidades gubernamentales (nacional, regional o local) puedan emprender acciones que permitan reducir al mínimo los impactos inminentes, tales como, la pérdida de vidas humanas y los daños en infraestructuras. Para lograrlo, es necesario que el sistema de alerta temprana pueda anticiparse a la ocurrencia de un evento de inundación o creciente súbita, mediante el pronóstico de los niveles y/o caudales en la corriente hídrica de interés en el futuro cercano (horas o días). Este pronóstico

es denominado “Pronóstico Hidrológico” y puede generarse a través del conocimiento experto de quien hace el seguimiento diario a la variación de los niveles de los ríos o mediante el uso de herramientas de modelación.

El pronóstico hidrológico basado en conocimiento experto esta dado principalmente de forma vivencial, es decir, por la experiencia de quien ha visto el comportamiento de un río por meses o años y están en capacidad de prever su comportamiento a futuro a partir de lo que observa en el entorno de la cuenca, es decir, cambio en la lluvia o en los niveles aguas arriba del punto de interés. Este tipo de pronóstico es principalmente cualitativo y permite identificar posibles tendencia o cambios de tendencia basados en el monitoreo continuo y su posible afectación, sin llegar a establecer tiempos concretos de ocurrencia ni tampoco las magnitudes del evento. Si bien es un pronóstico cuya incertidumbre puede llegar a ser alta, dependiendo de la destreza del experto y su percepción del entorno, lanza señales para un actuar preventivo frene a eventos hidrometeorológicos extremos en cuencas poco instrumentadas y con bajo nivel de conocimiento en la dinámica de la corriente hídrica.

El pronóstico hidrológico generado mediante el uso de herramientas de modelación está basado en observaciones y mediciones en la corriente o cuenca hídrica de interés, a partir de lo cual se hace una representación simplificada de su dinámica mediante el uso de algoritmos que buscan simular su comportamiento bajo condiciones específicas. Esos algoritmos son diversos, y contempla los basados en conceptos físico, como la relación lluvia-esorrentía (módelos hidrológicos) y las leyes de la hidrodinámica (modelos hidráulicos), o los algoritmos basados en datos como los estadísticos y estocásticos, entre muchos otros. Este tipo de modelos es cuantitativo y

1 "Sistema de pronóstico y alertas tempranas de inundaciones"



su certidumbre estará en función de la calidad de la calibración y validación del modelo (qué también representa la realidad que simula) y la información disponible para su implementación. De manera que, estos modelos pueden establecer de manera más precisa la ocurrencia y la magnitud del evento que están simulando.

Uno de los componentes fundamentales del pronóstico es el horizonte de pronóstico, el cual corresponde al periodo de tiempo máximo en que el pronóstico puede anticipar un evento. Para el caso de los pronósticos basados en conocimiento experto, ese tiempo es usualmente corto, y será el comprendido entre la detección del evento mediante el seguimiento y su ocurrencia. Un ejemplo de esto es el tránsito de una creciente entre dos poblaciones, donde la que está aguas abajo puede ser afectada en las siguientes horas o días dependiendo de la velocidad del flujo. De manera que el horizonte de pronóstico será el tiempo de tránsito de la creciente, si esta es detectada cuando transita por la población aguas arriba y se advierte en ese momento.

Por otra parte, el horizonte de pronóstico hidrológico a partir de modelación está determinado a partir de: el horizonte del pronóstico de variables meteorológico para el caso de los modelos hidrológicos, y por el horizonte de pronóstico hidrológico de los afluentes al río principal en el caso de los modelos hidráulicos. En términos operacionales, donde los aportes (entradas) de un modelo hidráulico son resultado de la modelación hidrológica, el horizonte del pronóstico hidrológico del conjunto de modelos será igual o menor al que se establezca para el pronóstico meteorológico. Para el caso del IDEAM, modelos de pronóstico meteorológico como el WRF tienen horizontes de pronóstico de hasta 7 días, sin embargo, se ha encontrado

una mayor certidumbre en los primeros tres, razón por la cual, el pronóstico hidrológico se genera con un horizonte de tres días.

En el caso particular de los modelos basados en datos (estadísticos/estocásticos) el horizonte de pronóstico estará dado por la capacidad de predecir el futuro a partir de las características de la serie. Por ejemplo, los modelos ARMA o ARIMA que tienen su fundamento en la media móvil funcionan muy bien en ríos grandes con baja intervención antrópica como el Magdalena en su parte baja, el Orinoco o el Amazonas donde la memoria de la serie es amplia y no se presentan cambios súbitos de tendencia.

Otro elemento importante en el pronóstico hidrológico y los sistemas de alerta temprana son los umbrales de afectación mediante los cuales se determinan los niveles de alerta. Estos umbrales son indicadores, ya que a partir de su clasificación los tomadores de decisiones pueden adelantar acciones para prevenir o mitigar las afectaciones de una inundación o creciente súbita. Los niveles de alerta por inundaciones se clasifican en: alerta amarilla (niveles altos, se requiere un seguimiento más continuo), alerta naranja (niveles altos, se requiere evaluar posibles acciones preventivas) y alerta roja (niveles cercanos o por encima del desbordamiento, alta probabilidad de afectación y se requiere activar los planes de emergencia). Así las cosas, la emisión de alertas en una corriente hídrica serán el resultado de analizar el pronóstico hidrológico junto con los niveles de alerta.

Dentro de los modelos más usados por el IDEAM en el pronóstico hidrológico están: los modelos hidrológicos que se basan en información observada y pronosticada de precipitación, evapotranspiración, temperatura, características de las cuencas, etc., y los



modelos hidráulicos que se basan en información observada/simulada y pronosticada de los caudales del tramo de estudio y sus aportantes, así como, de su configuración topológica (secciones transversales, rugosidades y estructuras hidráulicas).

La generación de pronóstico hidrológico comprende cuatro fases básicas: identificación de la necesidad del pronóstico, estructuración e implementación de la herramienta operativa de pronóstico, evaluación del pronóstico hidrológico y, publicación del pronóstico. De manera particular, el trabajo adelantado se orientó a la evaluación del pronóstico hidrológico de los modelos hidráulicos e hidrológico existentes en la Plataforma. Esta fase se busca evaluar la capacidad predictiva de los modelos mediante la estimación de indicadores de desempeño bajo condiciones operativas, identificando errores sistemáticos de sesgo, desplazamiento y/o tendencia. Estas fuentes de error pueden estar asociadas a cambios en la disponibilidad de información, y los cambios propios de la dinámica de los ríos y cuencas.

Para el caso particular de VMM, los modelos existentes en la Plataforma FEWS-Colombia fueron implementados y optimizados entre el 2008 y el 2015, y estaban conformados un modelo hidráulico del sector comprendido entre Puerto Berrío y Sitio Nuevo implementado en MIKE 11 en 1D, un modelo hidrológico del río Opón implementado en HEC-HMS y un modelo estadístico de Medio Móvil (MA) para la salida del río Sogamoso. Este conjunto de modelos fue definido en su momento bajo las siguientes consideraciones: los modelos operacionales de pronóstico deben buscar

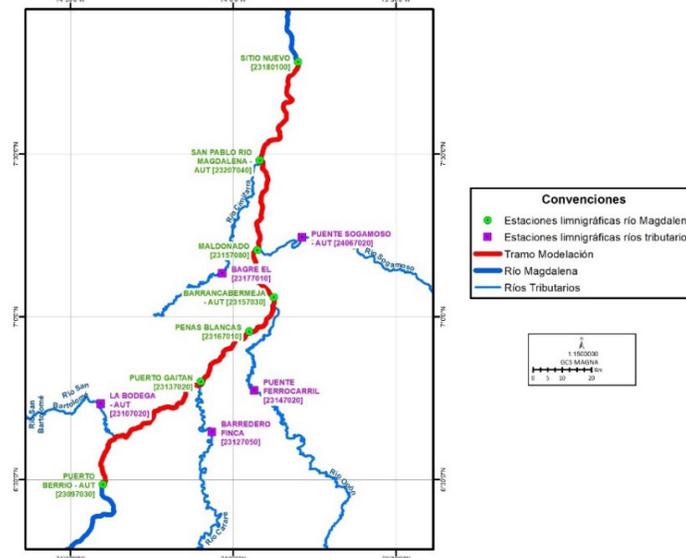
en lo posible la simplicidad, los tiempos computacionales deben ser cortos (menor a los 15 minutos), fáciles de interpretar por el pronosticador y debe ser acorde con la información disponible en tiempo real y cuasireal para alimentar el modelo diariamente.

En consideración a la última actualización de estos modelos, era evidente que los modelos presentaban cambios sustanciales en su parametrización, así también, las fuentes de información habían tenido avances importantes en los últimos años, tanto de las series observadas (medidas o estimaciones) como de las series pronosticas de variables meteorológicas. Estos dos aspectos llevaron a la decisión de hacer un análisis de esos cambios, actualizar la geometría y topología para el caso del modelo hidráulico, e incorporar nuevos algoritmos de cálculo y nuevas fuentes de información en los modelos hidrológicos.

Es así, que para el análisis de cambios en el modelo hidráulicos e hidrológicos se hizo una caracterización hidrológica basada en series históricas de caudales de estaciones ubicadas en los ríos San Bartolomé, Carare, Opón, Sogamoso, Cimitarra y Magdalena (ver Figura 2.61) y una caracterización morfodinámica multitemporal de orillas, barras aluviales y llanuras de inundación basada en imágenes de satélite. (Tabla 2.37).



Figura 2.61. Localización de las estaciones hidrológicas asociadas al tramo de modelación hidráulica



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. 37. Descripción de las imágenes utilizadas en el análisis multitemporal

Período	Fechas	Sensores	Path/Row
1	22/03/1985, 09/03/1986, 15/07/1986, 16/12/1986, 31/05/1987, 17/12/1987	LANDSAT 5 y 4	8/54, 8/55, 8/56, 7/55 y 7/56
2	11/08/1996, 30/08/1997, 20/12/1977	LANDSAT 5	8/54, 8/55, 8/56, 7/56, 7/55
3	04/08/2002	LANDSAT 7	8/54, 8/55, 8/56
4	27/07/2005, 20/02/2006, 05/12/2006	LANDSAT 7	8/54, 8/55, 8/56
5	12/05/2015, 01/09/2015	LANDSAT 8	8/54, 8/55, 8/56
6	04/01/2021, 20/01/2021	LANDSAT 8	8/54, 8/55, 8/56

Fuente: elaboración propia.

Se desarrollaron actividades de campo tendientes a mejorar las entradas del modelo hidráulico en cuanto a secciones transversales. Se efectuaron levantamientos topo batimétricos para actualizar la topología del modelo hidráulico. En tal sentido el IDEAM realizó un levantamiento batimétrico en octubre de 2021 y posteriormente, levantamiento topográfico con tecnología aerotransportada (LIDAR) para cubrir las orillas e islas de la zona del levantamiento batimétrico. Estos dos

productos se acoplaron en un solo modelo de elevación digital que permitió la definición de secciones transversales separadas cada 1 kilómetro (aproximadamente).

A partir de lo anterior se adelanta la actualización del modelo hidráulico para el mismo tramo del modelo existente y bajo el mismo software de modelación (MIKE 11 – 1D). Esta actualización comprendió las etapas de actualización de la geometría, ajuste de la topología, condiciones de frontera, incorporación de



estructuras hidráulicas para simular los desbordamientos. Una vez ajustado el modelo, se recalibró los niveles simulados a partir de coeficientes de rugosidad.

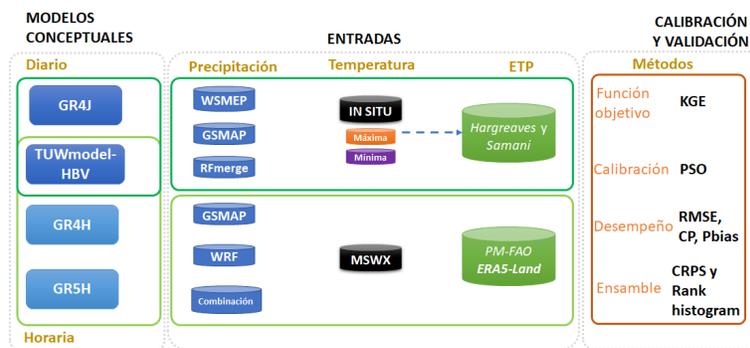
La selección e implementación de los nuevos algoritmos y la incorporación de nueva información se hizo a partir de la evaluación diferentes modelos hidrológicos y diferentes juegos de datos climáticos de entrada (precipitación, temperatura, evapotranspiración) para encontrar la combinación modelo – datos de entrada que tuviera mejores desempeños para la simulación de caudales y niveles en estaciones de aforo.

Los cuatro modelos son: GR4J, TUWmodel, GR4H y GR5H, los cuales fueron evaluados para los ríos La Colorada y Sogamoso, localizados en las subzonas hidrográficas de Opón y Sogamoso, respectivamente. Cada modelo fue evaluado desde una perspectiva multinivel, es decir y para este caso el forzamiento de la variable precipitación tuvo tres productos

GSMAP, MSWEP y RFmerge (i.e., mezcla de productos y datos in situ) a nivel diario, mientras que los productos WRF, GSMAP y una combinación estadística simple se usaron para la modelación horaria (únicamente en el río La Colorada). En cuanto a la temperatura únicamente se evaluó el producto MSWX (Beck et al., 2021) a una resolución de cada tres horas y su validación se realizó con los valores máximos y mínimos diarios de las estaciones en la zona estudio y disponibles en la plataforma DHIME.

Esta aproximación multinivel permitió construir ensambles hidrológicos y evaluar la capacidad que tiene esta estrategia para mejorar la estimación de caudales como consecuencia de la habilidad de los modelos y productos de compensar las debilidades de unos en función de las fortalezas de los demás. En la Figura 2.62 se muestran los elementos que conforman la modelación hidrológica nivel diario y horario que se realizó en las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso.

Figura 2.62. Resumen de los modelos, forzamientos y métodos de evaluación de simulaciones hidrológicas a nivel diario y horario en las SZH de los ríos Opón y Sogamoso



Fuente: elaboración propia.

A nivel diario se usaron los modelos hidrológicos GR4J y TUWmodel (basado en HVB) y a nivel horario GR4H, GR5H y TUWmodel que requieren como variables de entrada precipitación, temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP). De estas variables

únicamente cambia la precipitación que podría ser un producto o una combinación, por lo que las modelaciones serán mezclas entre productos de precipitación y modelos. Cada mezcla consideró como función objetivo el KGE calibrado mediante el algoritmo PSO.



Se evaluó el modelo hidráulico unidimensional MIKE 11 que permite simulaciones rápidas de desborde del cauce y de niveles mínimos para el análisis de navegación y dragado. La evaluación comprendió las etapas de ajuste de la topología, condiciones de frontera, y la incorporación de estructuras hidráulicas para simular los desbordamientos. Una vez ajustado el modelo, se evaluó en estaciones con registros históricos de niveles y caudales, y se hicieron nuevos ajustes (por ejemplo, el alineamiento del cauce, incorporación de nuevas secciones transversales y de estructuras hidráulicas para simular desbordamientos). Los niveles simulados se ajustaron a partir de la definición y calibración de coeficientes de rugosidad, en tramos y abscisas de secciones transversales.

Se definieron umbrales de alerta roja, alerta naranja, alerta amarilla y de alerta de

niveles bajos, los cuales están referenciados a las lecturas de mira en cada una de las estaciones analizadas. Estos umbrales fueron incorporados a la plataforma FEWS.

2. 8. 2. Resultados de la modelación e implementación en la plataforma FEWS

El análisis de series históricas de estaciones de caudales de los tributarios del río Magdalena en el tramo de estudio permitió la caracterización hidrológica de la zona. En la tabla 2. 38 se presenta la relación de caudales medios, mínimos y máximos para los cinco ríos tributarios del tramo analizado del río Magdalena, y se observa que en promedio el aporte de caudal de los cinco ríos tributarios en el río Magdalena es 985.5 m³/s, lo que equivaldría aproximadamente al 29 % del caudal que transporta este río en el tramo de estudio.

Tabla 2. 38. Relación de caudales en los ríos tributarios del río Magdalena (tramo de estudio)

Estación	Río	Período	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal medio (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)
La Bodega [23107020]	San Bartolomé	01/01/2007 – 17/11/2011	23.6	79.0	566.7
Barretero Finca [23127050]	Carare	01/01/2007 – 17/11/2011	42.5	301.2	1124.0
Puente Ferrocarril [23147020]	Opón	01/01/2007 – 17/11/2011	6.6	90.3	506.0
Puente Sogamoso [24067020]	Sogamoso	01/01/2007 – 17/11/2011	73.7	433.2	2625.0
El Bagre [23177010]	Cimitarra	01/01/1977 – 24/08/1990	0.5	81.9	475.5

Fuente: elaboración propia.

El análisis multitemporal de imágenes de satélite permitió la caracterización morfodinámica del tramo de estudio del río Magdalena, específicamente la dinámica de orillas (figura 2.63) y de barras aluviales (figura 2.64). Se concluye que en términos generales sobre el tramo analizado el río Magdalena tiene una dinámica muy amplia, divagando siempre sobre depósitos arcillosos o arenosos, destacando fácilmente aquellas zonas relativamente duras sobre las demás.

Se realizó el cálculo de la resistencia relativa a la erosión fluvial de acuerdo con la

metodología de Vargas (2012), en la cual se le asigna un valor de resistencia a diferentes materiales expuestos a la dinámica de los ríos. Este valor está dado en función del tipo de material constitutivo de la roca o de la geoforma que está siendo afectada por el cuerpo de agua. En la tabla 2. 39 se presenta la caracterización de la resistencia a la erosión fluvial en función del tipo de roca o geoforma, de acuerdo con Vargas (2012).

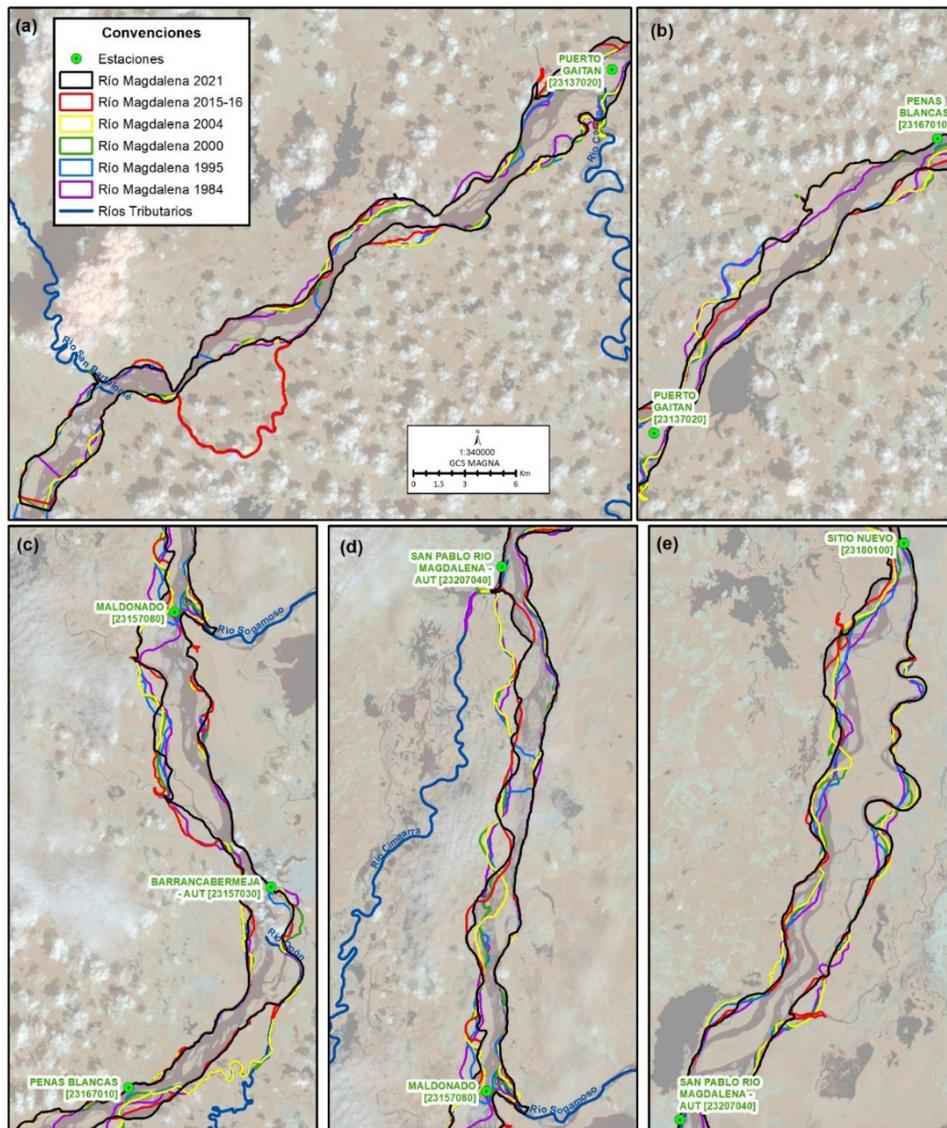
Habiendo definido y actualizado las geoformas fluviales del área de interés, se procedió a clasificar cada unidad en función de la



tabla 2. 39, cuyos resultados se aprecian en la figura 2.65. En la figura se logra identificar que donde más tasa de erosión o acreción tiene el río es donde menor resistencia a la erosión fluvial existe; por el contrario, aquellas zonas con geoformas y/o materiales duros son las que menor movilidad presentan. También se puede señalar que las unidades con mayor resistencia a los procesos fluviales se encuentran

hacia el sur del área de trabajo, en donde las geoformas montañosas revelan rocas más duras y, por ende, más difíciles de ser afectadas por la erosión fluvial. Hacia el norte, por el contrario, se observan geoformas planas que son producto de la dinámica propia del río, las cuales son muy poco consolidadas y ofrecen una baja resistencia a la erosión fluvial.

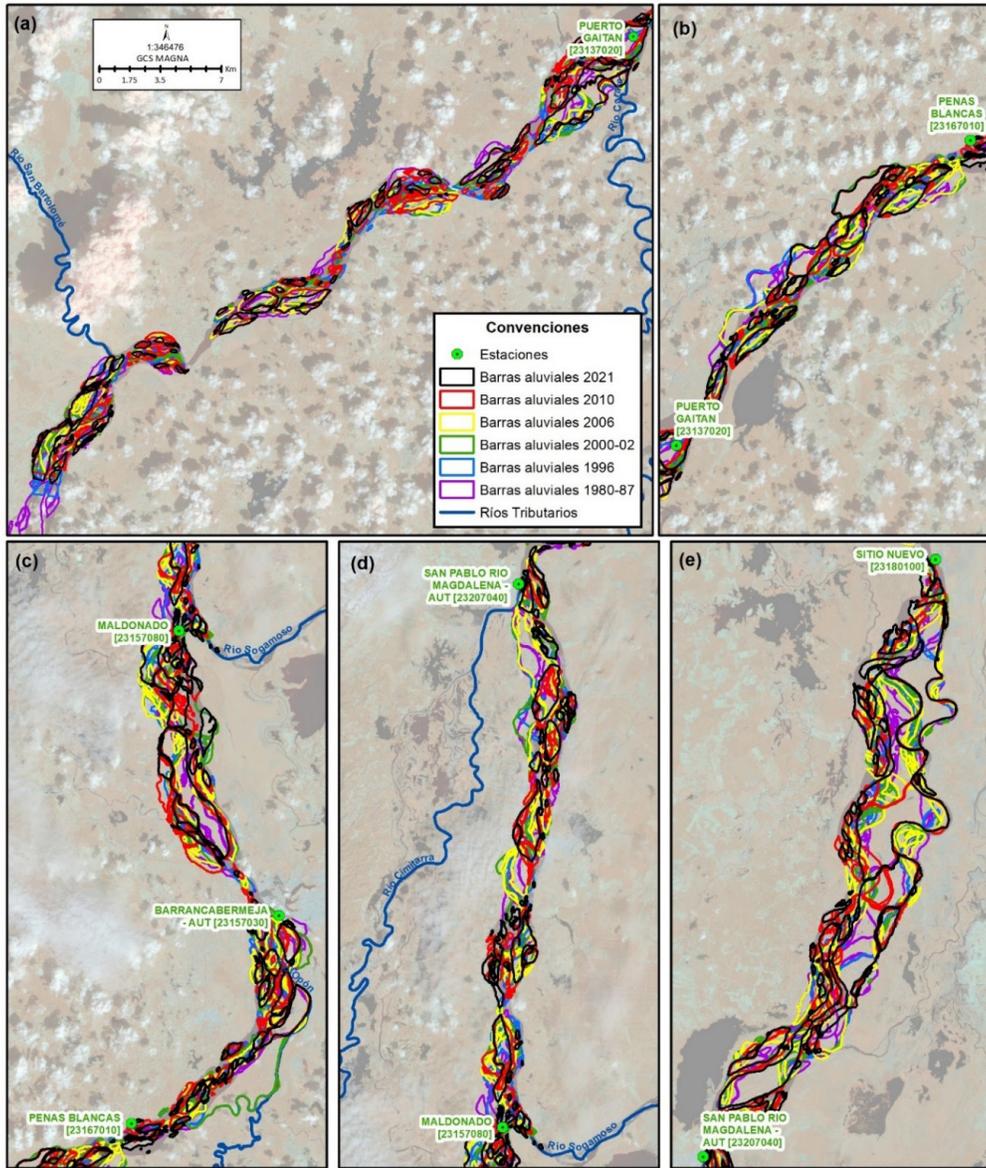
Figura 2.63. Dinámica fluvial del río Magdalena: Puerto Berrío - Sitio Nuevo



Fuente: elaboración propia.



Figura 2.64. Análisis de barras aluviales en el río Magdalena:
Puerto Berrío - Sitio Nuevo



Fuente: elaboración propia.



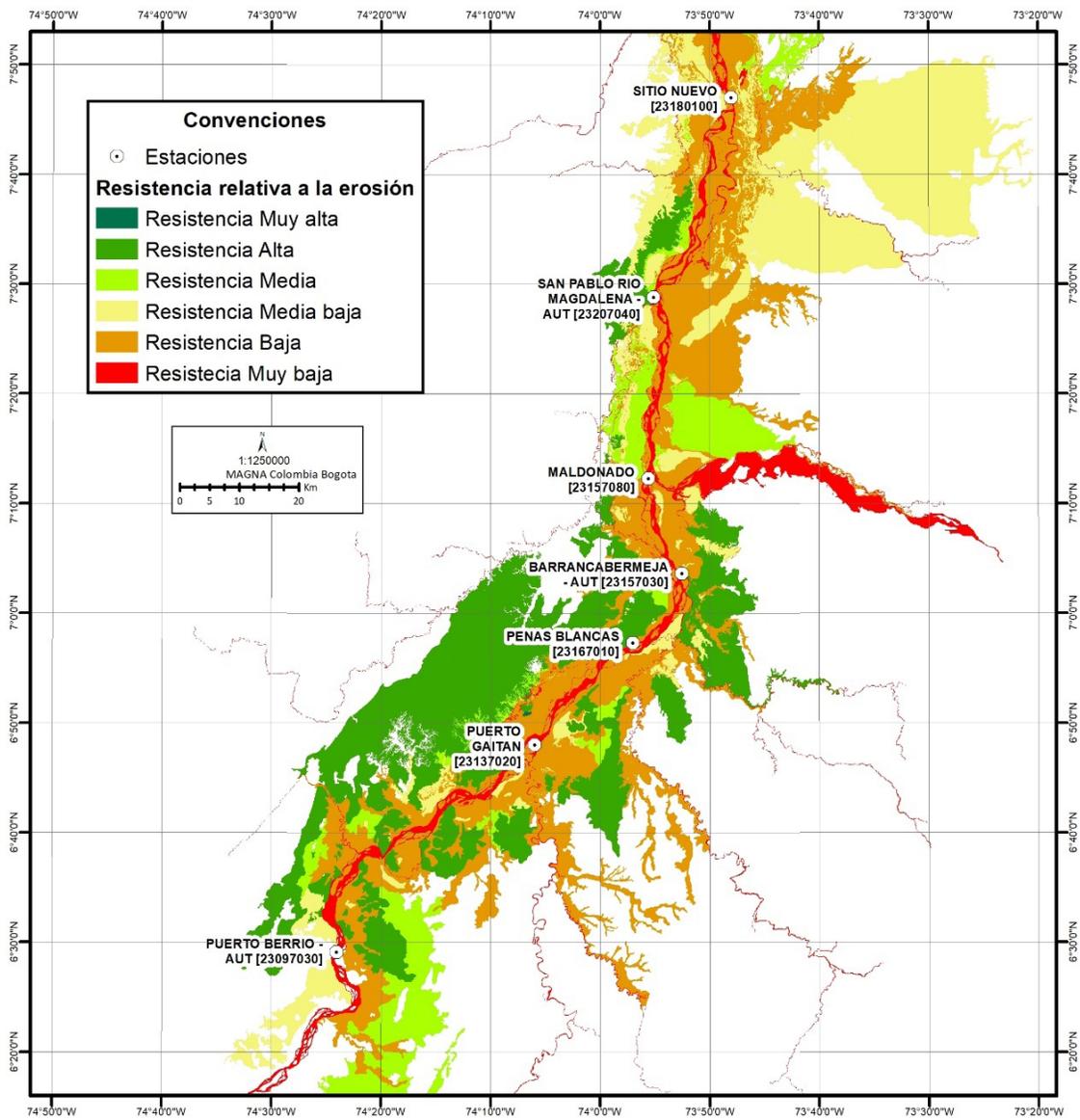
Tabla 2. 39. Caracterización de la resistencia a la erosión fluvial

Clase de material litológico	Tipo de material	Sensores	Resistencia a la erosión	
			Símbolo	Descripción
Rocas cristalinas	Rocas ígneas (granitos, riolitas, granodioritas, gabros, basaltos, etc.) y rocas metamórficas (neises, esquistos, filitas, cuarcitas, etc.)	Colinas, cerros y cadenas montañosas denudacionales y estructurales	RMA	Resistencia muy alta
Rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias químicas y detríticas con cemento (cherts, cuarzoarenitas, calizas, etc.)	Colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales		
Rocas piroclásticas y rocas sedimentarias detríticas	Cenizas, tobas y aglomerados piroclásticos, y rocas sedimentarias, detríticas o clásticas (conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas no cementadas)	Escarpes, terrazas, colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales	RA	Resistencia alta
Depósitos no consolidados de origen aluvial	Conglomerados, arenas, limos y/o arcillas	Terrazas aluviales, planicies aluviales, diques aluviales	RM	Resistencia media
Depósitos no consolidados de origen fluvio lacustre	Arcillas, limos y lodos orgánicos	Llanuras de inundación recientes y subrecientes, cubetas de ciénagas, manglares, marismas, etc.	RMB	Resistencia media baja
Depósitos aluviales subrecientes	Arenas y limos con niveles de conglomerados moderadamente compactos	Vegas de divagación subrecientes, islas fluviales subrecientes y terrazas bajas	RB	Resistencia baja
Depósitos aluviales de canal activo	Arenas, limos y gravas	Barras de arena, islas fluviales recientes, playas, lechos activos, vegas de divagación recientes	RMMB	Resistencia muy baja

Fuente: Vargas (2012).



Figura 2.65. Zonificación de la resistencia relativa a la erosión fluvial en el área de interés



Fuente: elaboración propia.

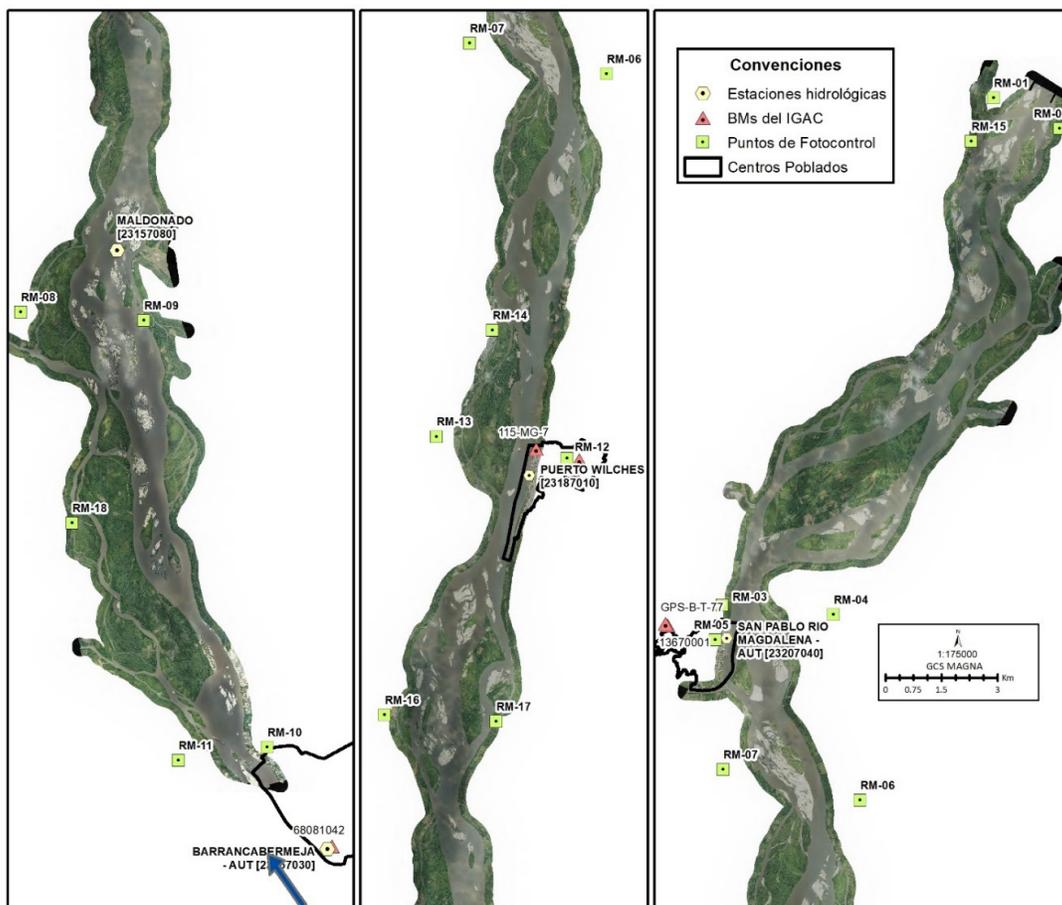


Los productos de las actividades de campo, que incluyeron batimetrías y un levantamiento topográfico con tecnología LIDAR (ver figura 2.66), se integraron en un solo producto.

Se procesó el MDT mediante el método de TIN (Red Irregular de Triángulos), tomando como insumos las secciones transversales generadas a partir de las batimetrías realizadas en la zona, y la nube de puntos LiDAR recortada únicamente con la clasificación de terreno. Finalmente, se efectuó el control de calidad a la superficie generada (verificación de secciones, perfiles, etc.) y se exportó la triangulación

generada a formato ráster (GEOTIFF de 32 bits y punto flotante), con la resolución espacial o tamaño de píxel de 0.50 m x 0.50 m). En la figura 2.67 se muestra el Modelo Digital de Terreno que tiene unificada la información del levantamiento LiDAR con la información del levantamiento batimétrico. A partir del Modelo Digital de Terreno unificado se establecieron 63 secciones transversales en el tramo en el que se hizo el levantamiento topo batimétrico (LiDAR y batimetría), con separaciones de aproximadamente un kilómetro.

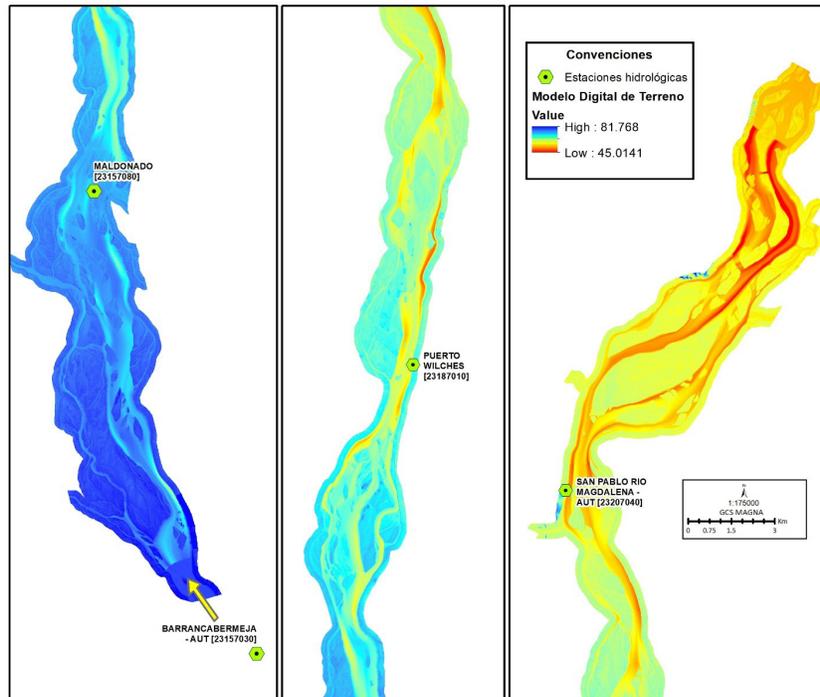
Figura 2.66. Ortofoto de la zona del levantamiento LiDAR



Fuente: elaboración propia.



Figura 2.67. Modelo Digital de Terreno con el acople de la batimetría y el levantamiento LiDAR



Fuente: elaboración propia.

Para cada una de las nuevas secciones transversales definidas se determinó el perfil de la sección (distancia – cota) a través del programa ArcGIS (herramienta 3D Analyst). Estas secciones se incorporaron en el modelo hidráulico.

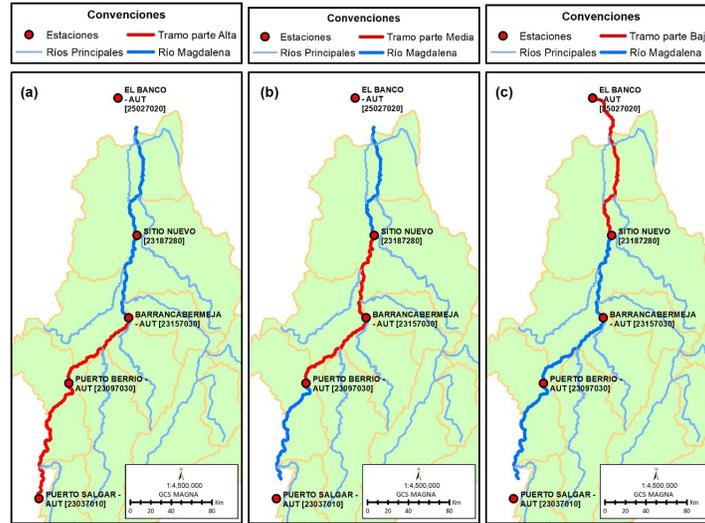
En la plataforma FEWS-Colombia, para la modelación y pronóstico del río Magdalena, se cuenta con tres modelos hidráulicos: (1) uno de la parte alta, entre las estaciones de Puerto Salgar [23037010] y Barrancabermeja [23157030]; (2) uno de la parte media, entre las estaciones de Puerto Berrío [23097030] y Sitio Nuevo [23187280]; y (3) uno de la parte baja, entre las estaciones de Sitio Nuevo [23187280] y El Banco [25027020]; como

se representa en la figura 2.68. Los modelos hidráulicos de los tres tramos se encuentran configurados en el programa MIKE 11, los cuales son modelos unidimensionales en estado no permanente.

De la figura se observa que el tramo de la parte alta y el tramo de la parte media tienen un traslape entre las estaciones de Puerto Berrío y Barrancabermeja, lo cual permite mejorar las condiciones de frontera y resultados del pronóstico; sin embargo, para los tramos medio y bajo tienen la estación Sitio Nuevo en común, fin de un tramo e inicio del otro, lo cual puede influir en las condiciones de frontera de esos dos modelos.



Figura 2.68. Tramos de modelación hidráulica del río Magdalena:
(a) parte alta, (b) parte media y (c) parte baja

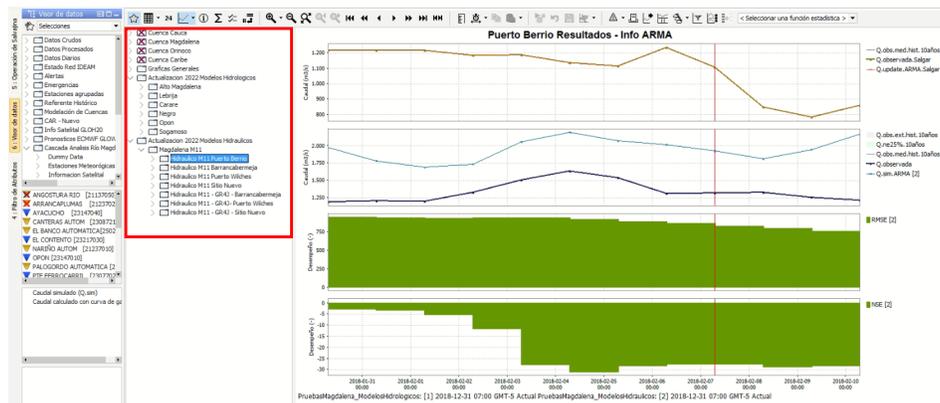


Fuente: elaboración propia.

Toda la cascada de procesos configurada en el proyecto se pone a prueba en el sistema Stand Alone (Ver figura 2.69). Para las pruebas de acople se seleccionó un año específico de análisis, y para este período se ejecutó todo el proceso de cálculo tratando de simular las condiciones del sistema operacional. Inicialmente, las pruebas se realizaron

para el entorno histórico, de esta manera se pudo evaluar la configuración de la cascada de procesos antes de iniciar el análisis del pronóstico. El año de evaluación seleccionado fue el 2018, período que coincide con la calibración del modelo hidráulico, permitiendo comparar los resultados en condiciones operacionales y de modelación tradicional.

Figura 2.69. Configuración de la cascada de procesos en la plataforma FEWS-Colombia



Fuente: elaboración propia.

2. 8. 3. FEWS Colombia

Los eventos de inundación entre el año 2010 y el 2011 llevaron al gobierno colombiano a tomar acciones a nivel regional y nacional para desarrollar un nuevo marco para lidiar con los riesgos ante este fenómeno. Dentro de estas acciones se encontraba el fortalecimiento de un sistema de alerta temprana de eventos hidrometeorológicos. En respuesta a esta recomendación, el Ideam inició la implementación de un sistema para el pronóstico hidrológico de manera operacional. Esto incluyó la actualización de la red en tiempo real de estaciones meteorológicas e hidrológicas (las cuales siguen en constante expansión), la instalación de radares climáticos, el consumo de información de base de datos globales y el desarrollo e implementación de capacidades para el pronóstico hidrológico.

Inicialmente, la Plataforma FEWS Colombia fue implementado como un sistema de pronóstico piloto en respuesta a una iniciativa del gobierno nacional frente a la ocurrencia del Fenómeno de La Niña del 2010-2011. Esta iniciativa contó con la participación del IDEAM, la CVC y la CAR Cundinamarca, y Deltares e IHE Delft, quienes adelantarían la implementación en tres cuencas del país. “Desde el 2014 a la fecha se han acoplado alrededor de 20 modelos, entre hidráulicos, hidrológicos y estadísticos. Estos modelos proveen el pronóstico hidrológico en más de 90 de puntos de monitoreo del IDEAM, CAR y CVC con un horizonte de pronóstico de 3 días. Estos modelos generan pronóstico para los cauces principales de los ríos Magdalena, Cauca, Meta, San Jorge, Lebrija, La Vieja, ente otros” (IDEAM, 2019).

Actualmente, el sistema apoya la toma de decisiones del grupo de pronosticadores de la Oficina de Servicios de Pronostico y Alertas (OSPA) del Ideam. El sistema produce información necesaria para la elaboración de los boletines hidrológicos y de alerta hidrológica diarias, reportes específicos de

condiciones hidrológicas en zonas específicas (Río Chicamocha, Ituango, etc.), y reportes específicos, como el elaborado para RTVC Sistema de Medios Públicos. También presenta la información histórica y de pronóstico en estaciones meteorológicas e hidrológicas. Así mismo, procesa la información para agregarla a nivel de subzona hidrográfica (nivel hasta donde el Ideam tiene responsabilidad de presentarla). El FEWS Colombia también es usado por la CVC para ejecutar su principal modelo hidrológico operacional que es proveer pronósticos de flujos de entrada al embalse de Salvajina.

Desde su lanzamiento, el IDEAM ha venido ampliando la cobertura del pronóstico e incorporado nueva información observada, estimada y pronosticada de fuentes nacionales y globales, así como, el acople de nuevos algoritmos para la generación de pronóstico hidrológico. De esta misma manera, ha venido avanzando en mejoras sustanciales en su plataforma tecnológica, dando una mayor estabilidad al servicio que se presta.

El FEWS Colombia integra información en tiempo real de la red del IDEAM, y también de muchas otras fuentes. Esta incluye, datos de pronósticos numéricos del clima (NWP), evaluaciones ENSO, información satelital, así como, información en tiempo real de otras redes incluyendo las de las CARs, países vecinos (Perú y Ecuador). En este sentido, tiene un rol de integrador de información. En este rol, el sistema FEWS Colombia provee de una interfaz de servicios web que permite que la información en la base de datos del FEWS Colombia sea accesible para otros sistemas remotos. De la misma manera, el IDEAM provee un servicio de información a través del internet (<http://www.ideam.gov.co/web/agua/fews>) donde actores externos a IDEAM pueden visualizar y consumir información relacionada al pronóstico hidrológico a lo largo de todo el territorio colombiano.

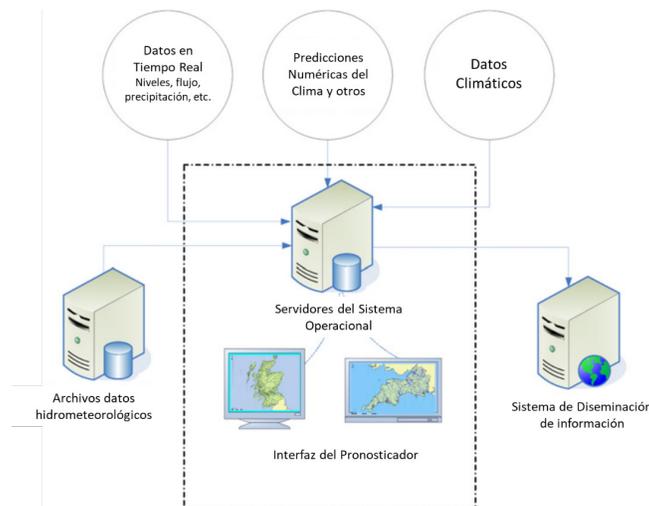


2. 8. 3. 1 Descripción del sistema

El sistema FEWS Colombia es un sistema extenso y complejo, que está basado en el Delft FEWS, se trata de un sistema avanzado de pronóstico hidrológico desarrollado por Deltares. Este es altamente personalizable y está diseñado para integrar una amplia variedad de fuentes de datos e información hidro-meteorológica, permitiendo realizar predicciones hidrológicas y apoyar en la toma de decisiones para la gestión de eventos hidrológicos extremos. Delft FEWS es conocido por su capacidad para manejar y procesar grandes cantidades de datos en tiempo real, su capacidad de acoplar una gran variedad de modelos de simulación y simular operacionalmente eventos de hidrológicos con alta precisión (Werner et al., 2013).

Los sistemas de pronóstico requieren la capacidad de integrar información, en tiempo real, de redes hidrometeorológicas de observación y diseminar los resultados de las predicciones. El uso de información en tiempo real amerita entonces la ejecución de rutinas, dentro del sistema, para el control de calidad de los datos. Así mismo, dentro de los sistemas operativos puede haber modelos hidrológicos e hidráulicos, o estadísticos, para realizar predicciones, y por lo tanto estos sistemas deben tener la capacidad para soportar la ejecución de estos modelos en tiempo real (Ver figura 2.70). Estos hacen uso de información hidrometeorológica procesada a una escala temporal y espacial adecuada (Werner et al., 2013).

Figura 2.70. Estructura esquemática de un sistema de pronóstico hidrológico y sus enlaces a otros servicios de importancia para el sistema operacional



Fuente: adaptado de Werner et al. (2013).

El FEWS Colombia tiene configurados más 500 módulos encargados de importar, procesar y hacer control de calidad de información hidrometeorológica, y realizar simulaciones

hidrológicas varias veces al día. Estos módulos se encuentran agrupados en más de 90 cascadas de procesamiento de información, y en términos generales se encargan de:



- Importar información diversa (de estaciones automáticas, convencionales, satelital, posprocesada y pronóstico) proveniente de diferentes fuentes de datos.
- Hacer un control de calidad adecuado a las condiciones operativas del sistema,
- y procesar información para adecuar los datos a los requerimientos de los modelos de simulación; para ello se han configurado rutinas de interpolación espacial y temporal, unión de series de tiempo, entre otras.
- Ejecutar operacionalmente (varias veces al día) modelos hidrológicos e hidrodinámicos en una estructura de cascada.
- Implementar métodos estadísticos para la corrección del sesgo de los resultados, mediante modelos autoregresivos (por ejemplo: AutoRegressive Moving Average - ARMA).
- Calcular indicadores para el seguimiento de series de tiempo de pronóstico.
- Preparar reportes y exportar datos.

El sistema gestiona en paralelo dos grandes flujos de trabajo, el histórico (de actualización) y el de pronóstico. En el primero se importan, se procesan y se hacen simulaciones hidrológicas e hidrodinámicas empleando información medida y reportada a través de las estaciones automáticas. Este flujo de trabajo está encargado también de generar estados iniciales de los modelos empleados para el pronóstico. En el segundo flujo de trabajo, el de pronóstico, se importa información meteorológica pronosticada, esta es procesada y empleada en los modelos hidrológico e hidrodinámico. Y de esta manera genera predicciones a lo largo de los tramos de ríos donde se han implementado los modelos. Finalmente, luego de hacer las simulaciones, el sistema posee módulos de post procesamiento y reporte.

FEWS Colombia trabaja de manera continua; es decir, este ejecuta rutinas diarias, algunas recurrentes cada hora, como los procesos de importación de información, validación y procesamiento, y otras que se ejecutan una vez al día, como los módulos que activan la modelación matemática, flujos de trabajo históricos y de pronóstico.

FEWS-Colombia emplea la interfaz gráfica configurable del Delft FEWS, a partir de la cual el equipo de los centros de regionales de pronóstico y los pronosticadores de la OSPA interactúan y consumen información. Esta interfaz puede incluir mapas con la ubicación de estaciones de medición, gráficas con series de tiempo creadas en los flujos de trabajo, series de tiempo ráster con información hidrometeorológica, esquemas, entre otros. Para el público general se ha creado un sistema de información web, donde las personas interesadas pueden acceder a información hidrológica y pronósticos a través del internet. Este servicio es conocido como FEWS-Colombia versión web.

2. 8. 3. 2 FEWS Colombia versión web

Esta herramienta permite la consulta y seguimiento, en tiempo real, del estado de los niveles de los ríos durante los últimos seis meses, y permite ver una proyección de los siguientes tres días. Esta herramienta emplea gráficas dinámicas, búsquedas por localización, y también facilita la descarga de datos en formatos planos, mejorando la consulta automática por usuarios dentro y fuera del país. Desde el 2018, la aplicación ha sido consultada por más de 15.000 usuarios de manera anual, a nivel diario las visitas oscilan entre 40 y 100. La página es consultada en un 92 % por usuarios colombianos, el porcentaje restante corresponde a usuarios de Estados Unidos,



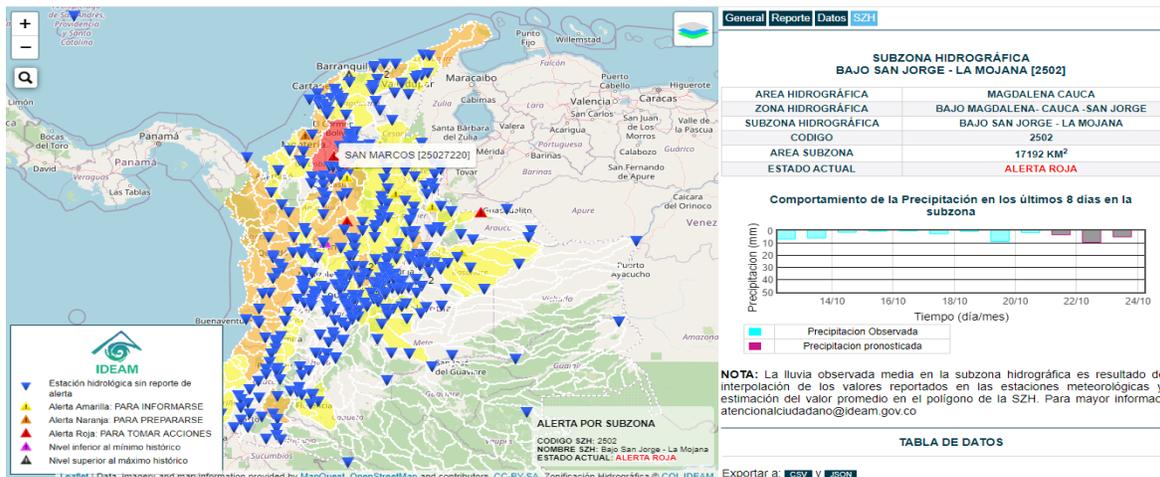
Venezuela, Perú, Holanda, Inglaterra, Suiza y Finlandia, entre otros.

Para la versión web se han desarrollado dos opciones de visualización:

1. Un visor de alertas hidrológicas (figura 2.71) donde se puede observar de manera dinámica el nivel de alerta seleccionado por parte de los pronosticadores de la OSPA para cada subzona hidrográfica

del territorio colombiano. De la misma manera, se pueden visualizar las condiciones de precipitación, de niveles y caudal para diferentes estaciones de medición de interés; y si los valores han cruzado umbrales específicos establecidos de acuerdo con las condiciones locales de cada estación. Finalmente, los usuarios pueden descargar información en formatos de texto para su posterior procesamiento.

Figura 2.71. Alertas hidrológicas por subzonas para usuarios externos, disponibles en FEWS Colombia versión web

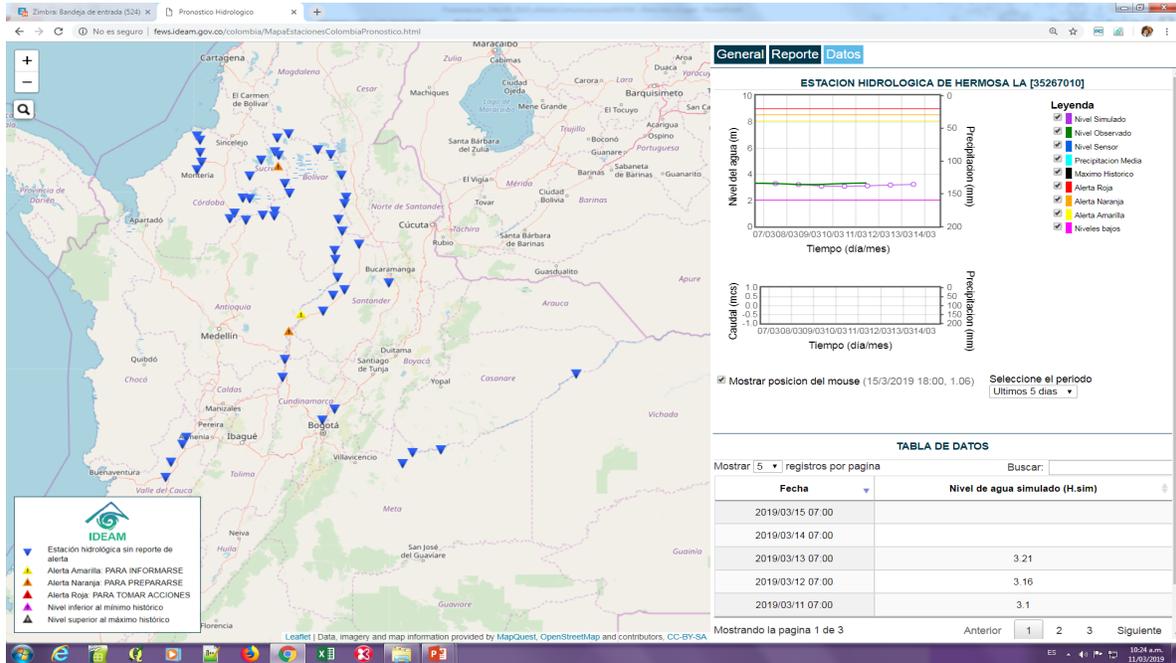


Fuente: elaboración propia.

2. Un visor de pronósticos hidrológicos donde se muestran los resultados provenientes de las cascadas de pronóstico que se ejecutan automáticamente, y de manera diaria, en el sistema FEWS-Colombia. Dentro

de estas visualizaciones se presentan los resultados provenientes de las cascadas de pronósticos para distintas estaciones (aproximadamente 60), distribuidas en el territorio colombiano.

Figura 2.72. Funcionalidades de consulta y descarga de datos para usuarios externos en FEWS-Colombia versión web



Fuente: elaboración propia.

El FEWS-Colombia versión web incluye alertas hidrológicas y los valores de lluvia media observada y pronosticada por

subzona hidrográfica; esto provee más información a los usuarios externos para la toma de decisiones.





3. FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD TÉCNICA DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER (CAS) EN EL MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO

3.1. Estado actual de la red de monitoreo hidrometeorológico y de calidad del agua superficial, y de cantidad y calidad del agua subterránea de la CAS

El diagnóstico del estado actual de la red de monitoreo hidrometeorológico y de calidad del agua superficial, y de cantidad y calidad del agua subterránea de la CAS abarca todas las etapas de generación del dato: desde la planificación de los puntos que se desean monitorear, la instalación y operación de estaciones hidrometeorológicas, y de calidad del agua superficial, el proceso de la toma de

muestras en campo, la recepción de la información y su tratamiento primario, así como su almacenamiento. Este diagnóstico pretende ser un punto de partida para la formulación del Pirma en la CAS y para la identificación de las brechas del diseño de las redes.

De la red nacional Ideam se identificaron 127 estaciones climatológicas en nueve de diez subzonas hidrográficas, y 74 estaciones hidrológicas en ocho de diez subzonas hidrográficas del área de la CAS.

El objetivo general de la red de monitoreo hidrometeorológica es proporcionar información adecuada sobre las características de las variables que permitan conocer la cantidad del recurso hídrico. En este contexto, se



entiende por “características de las variables” la distribución espacial y los datos cuantitativos de valor central y de varianza de los registros, como los promedios y extremos que definen el comportamiento temporal de las variables.

Es importante destacar que en la red nacional Ideam existen estaciones en la jurisdicción de la CAS instaladas desde el año 1931, y se cuenta con 121 estaciones activas y 80 suspendidas; de las 121 estaciones activas, 30 son hidrológicas y 91 son estaciones meteorológicas. A nivel individual las estaciones más numerosas son las pluviométricas (44 %), seguidas por las limnimétricas (25 %), limnigráficas (12 %) y por las climatológicas ordinarias (10 %). Del total, 24 estaciones activas son automáticas con telemetría, una automática sin telemetría y 96 son estaciones convencionales (figura 3. 1.).

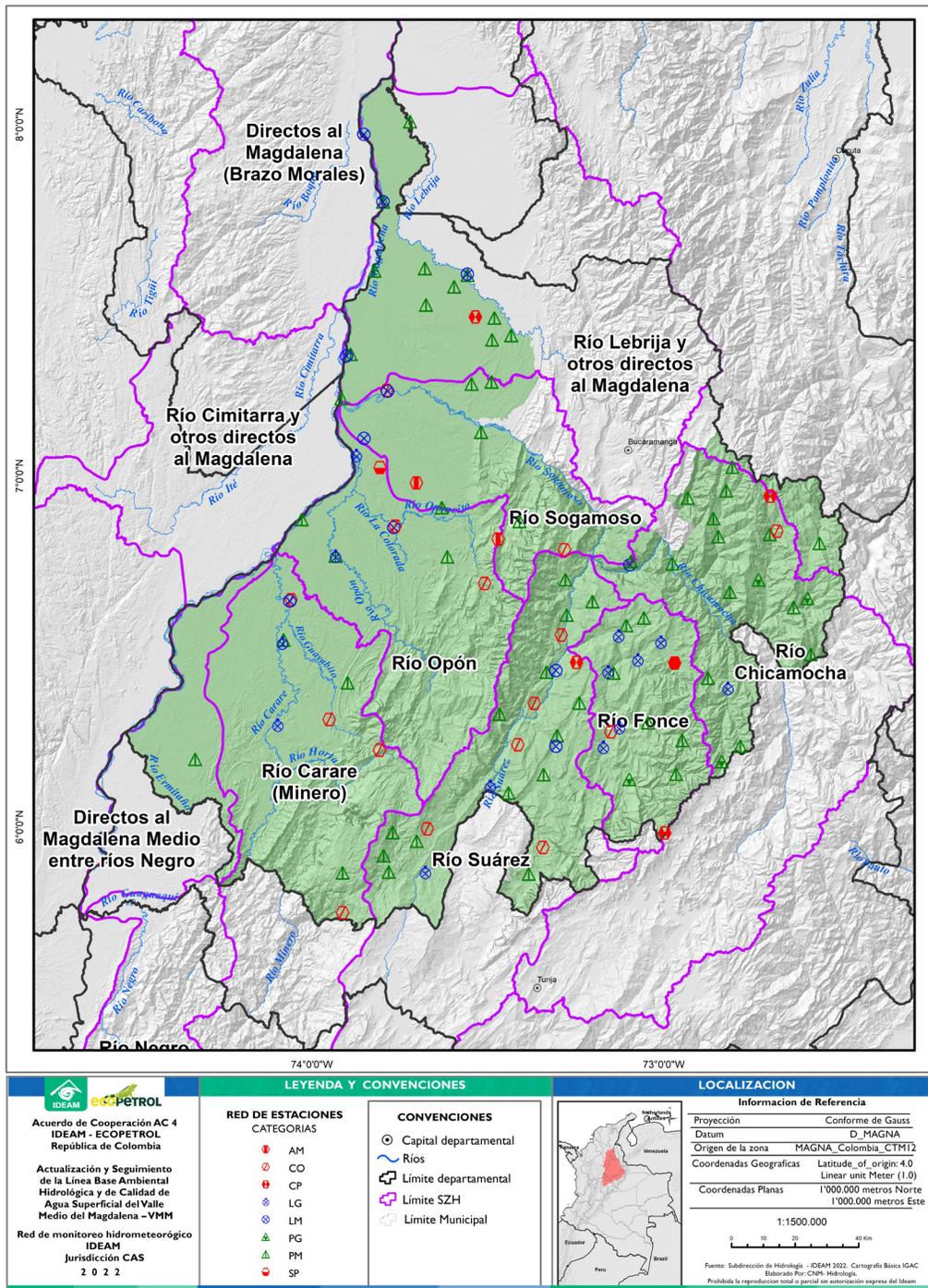
En la tabla 3. 1 se presenta un resumen de las variables que actualmente están siendo monitoreadas en las diferentes subzonas hidrográficas que hacen parte de la jurisdicción de la CAS. De acuerdo con esta, las SZH que tienen más cobertura en cuanto a variables medidas son las del río Fonce, río Lebrija, río Suárez, río Opón, río Chicamocha y río Sogamoso. En la SZH del río Carare son

monitoreadas aproximadamente la mitad de las variables analizadas, y en las SZH directos al Magdalena Medio entre los ríos Negro y Carare, río Chítaga y río Cobugón solo se mide una o ninguna de las variables analizadas; sin embargo, se debe tener en cuenta que estas SZH presentan un área muy reducida dentro de la jurisdicción de la CAS, en donde se hizo el análisis.

Por otra parte, en la jurisdicción se han identificado 568 puntos de monitoreo de calidad del agua, los cuales, en su mayoría, han sido monitoreados de forma puntual desde 2013 hasta la actualidad. Se destacan los puntos de la red nacional de referencia de calidad del agua operada por el Ideam. Esta red nacional consta de 10 puntos (figura 3. 2) que han sido monitoreados con una frecuencia semestral desde 2015 y donde se han monitoreado, al menos, 15 variables de calidad. Adicionalmente, el Ideam ha monitoreado otros 4 puntos durante algunos años.



Figura 3. 1. Distribución de las estaciones hidrometeorológicas activas de la Red Nacional - Ideam



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. 1. Variables monitoreadas actualmente en cada SZH

SZH	Nivel*	Nivel **	Precipitación *	Precipitación **	Temperatura*	Temperatura**	Humedad aire*	Humedad aire **	Velocidad y dirección del viento*	Velocidad y dirección del viento **	Evaporación*	Brillo solar*	Presión Atmosférica*	Temperatura suelo *	Nubocidad*
2311			X												
2312	X	X	X	X	X	X	X	X							
2314	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
2319	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
2401	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
2402	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2403	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
2405	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
3701			X												
3703															

*Datos diarios.

**Datos instantáneos.

2311: directos al Magdalena Medio, entre los ríos Negro y Carare.

2312: río Carare (Minero).

2314: río Opón.

2319: río Lebrija.

2401: río Suárez.

2402: río Fonce.

2403: Río Chicamocha

2405: río Sogamoso.

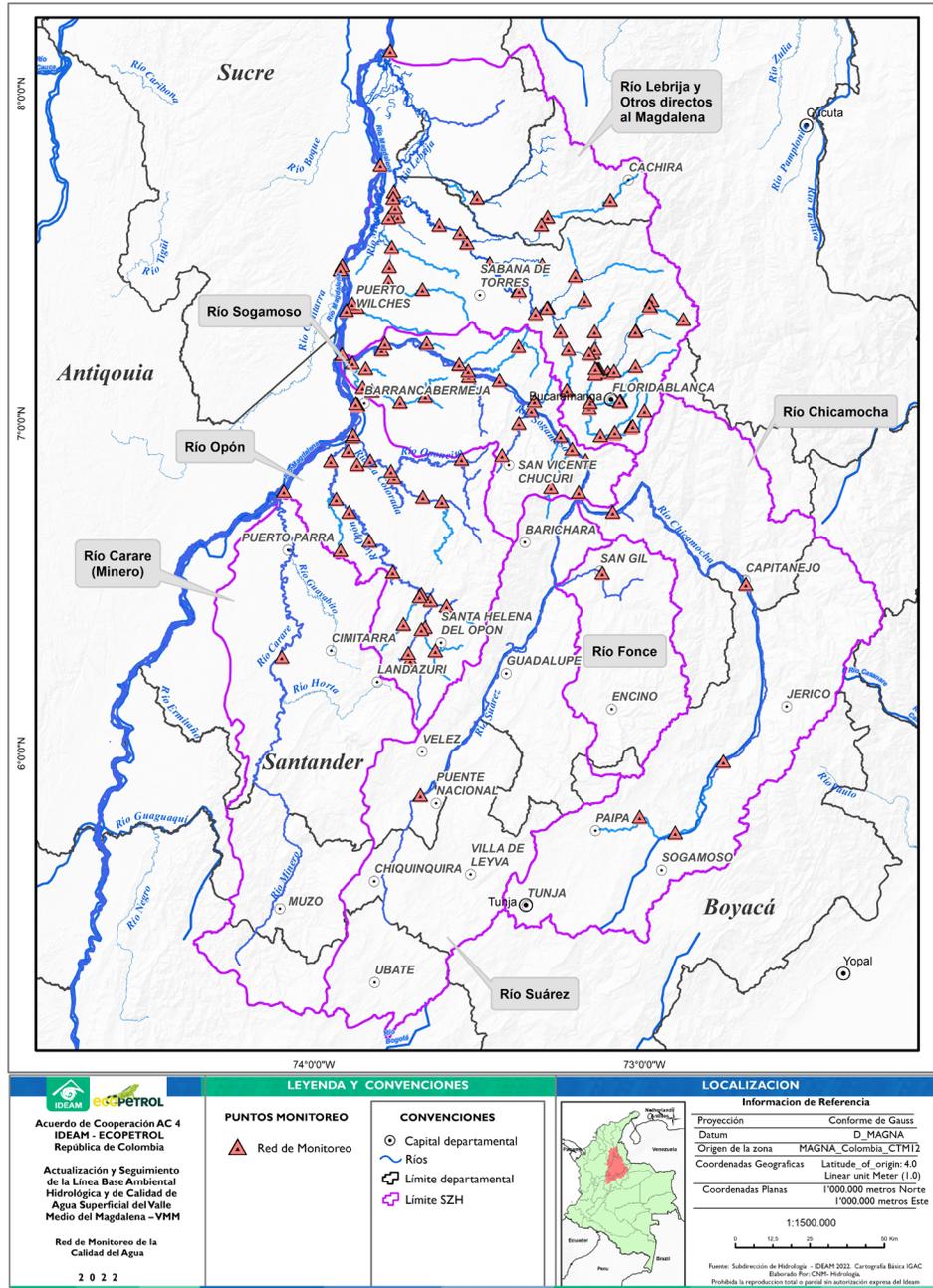
3701: río Chitagá.

3703: río Cobugón - río Cobaría.

Fuente: elaboración propia.



Figura 3. 2. Mapa con los puntos de monitoreo de calidad del agua presentes en la jurisdicción de la CAS



Fuente: elaboración propia.

La CAS no cuenta con una red regional de calidad del agua, sin embargo, existe información sobre monitoreos relacionados con metas globales de cargas contaminantes e instrumentos de planificación como PORH y POMCA (CAS, 2014; CAS, 2016; CAS, 2017a; CAS, 2017b; CDMB & CAS, 2018; CDMB, 2019). Esta información consta de monitoreos puntuales realizados para las fases de diagnóstico de los instrumentos de planificación. Adicionalmente, existe información de puntos de monitoreo puntuales reportada por la ANLA, de acuerdo con los datos suministrados por las licencias ambientales otorgadas (figura 3.2.). En el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación” puede consultarse el detalle de los monitoreos realizados.

Por otra parte, la Corporación no cuenta con una red de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea.

Respecto al flujo de información de monitoreo al interior de la CAS se pudo establecer que la Corporación ha cargado, desde el 2018 hasta mayo de 2021, un total de 26.312 registros en el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). De igual forma, del análisis de las diferentes fuentes de información se puede afirmar que el SIRH es la única plataforma tecnológica en la que la Corporación almacena directamente algunos de los datos relativos a la gestión del recurso hídrico en la región.

El portal web de la CAS requiere fortalecer la presentación de datos de interés temático, técnico y de información ambiental relevantes de su jurisdicción. Si bien existe una opción de menú principal denominado “Servicios de información”, en general los pocos datos asociados a temáticas ambientales presentados se encuentran en rutas complejas para su ubicación, e inmersos en documentos

técnicos en formato PDF, limitando de esta forma el acceso a la información de manera ágil y oportuna. Es escasa la información asociada al monitoreo de los recursos hídricos; se encuentran algunas definiciones, datos e información geográfica dispersa en el portal.

Adicionalmente, la Corporación dispone de un visor geográfico abierto al público, que presenta, sobre un mapa base de OpenStreetMap, la capa político administrativa de la jurisdicción. En cuanto a sus funcionalidades, el visor dispone de un menú básico que permite cargar puntos de GPS en formato GPX, la búsqueda de coordenadas y las herramientas de dibujo básicas de geometrías tipo polígono, línea y punto; siendo estos los recursos mínimos para la exploración adecuada de la información. Se resalta la disposición de capas de drenajes sencillos y dobles, corrientes codificadas, se presentan puntos de vertimientos de agua, pero únicamente para San Gil, con datos del predio y las coordenadas geográficas. El visor no cuenta con información de puntos de monitoreo, estaciones hidrológicas o puntos de agua subterránea. No se identifica información del metadato de la capa que permita a un usuario conocer sobre su construcción y estado de actualización.

En síntesis, este diagnóstico permite evidenciar que la CAS no cuenta actualmente con un monitoreo integral continuo del recurso hídrico, soportado por la definición de unos objetivos de monitoreo establecidos por un sistema de observación, medición y vigilancia operativo, por sistemas de información interoperables con el sistema de información del recurso hídrico, razón por la cual se establece la necesidad de formular e implementar un Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua (Pirma).



3. 2. Alternativas de mejora de la capacidad regional para el monitoreo integral del agua de la CAS

El diagnóstico realizado sobre el sistema de observación, medición y vigilancia del monitoreo del agua en la CAS permitió evidenciar la necesidad de fortalecer las redes de monitoreo de cantidad y calidad del agua superficial y subterránea, el flujo de información al interior de la CAS y su interoperabilidad con el SIRH, la capacidad regional de la Corporación para realizar el monitoreo del agua, y la comunicación de los datos provenientes de este. Todos estos componentes fueron abordados por medio de la formulación del Programa Institucional Regional del Monitoreo del Agua (Pirma) de la CAS.

El Pirma se constituye como el documento rector que establece el quehacer del monitoreo del agua en una región. Este orienta e integra estrategias y acciones para mejorar la generación de información y conocimiento para la gestión integral del agua en la jurisdicción de la Autoridad Ambiental, en concordancia con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y su Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico.

El Pirma debe ser elaborado e implementado por las Autoridades Ambientales. Para su elaboración se deben surtir dos fases fundamentales: planificación y formulación. Luego, procede la fase de implementación donde se ejecutan las actividades acordadas para

fortalecer el monitoreo. En lo que sigue de este capítulo se sintetizarán los principales resultados de la fase de planificación y formulación. Para mayor detalle se puede consultar el documento resultante de estas fases en el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”.

Finalmente, se muestran las actividades realizadas en el marco de la implementación.

La fase de planificación fue desarrollada en el 2021. En ella fueron realizados los talleres de análisis de capacidad institucional, de actores, de problemas y alternativas de solución, y la Matriz de Marco Lógico (MML) y hoja de ruta con el equipo de la CAS. Estos talleres permitieron obtener los insumos necesarios para el diagnóstico del estado del monitoreo integral del agua en la jurisdicción de la Corporación, así como la construcción de la MML y el Plan Operativo Integrado (POI) con su evaluación financiera. Adicionalmente, se construyó una propuesta de Sistema de Seguimiento y Evaluación (SSE) del Pirma.

De acuerdo con el Marco Lógico, a 2032, la CAS tendrá implementado un Pirma, alineado con el PNMRH y la PNGIRH, que permita contar con información oportuna, accesible, confiable y sistematizada para propiciar una adecuada toma de decisiones por parte de los actores sociales, gremiales e institucionales que lo requieran.

Para lograr este propósito se establecieron las siguientes cuatro líneas estratégicas o resultados (tabla 3. 2).



Tabla 3. 2. Resultados del Pirma con sus respectivos indicadores verificables

Código	Objetivo/Resultados	Indicador Verificable Objetivamente (IVO)
Resultado 1	A diciembre del 2032, el monitoreo del agua en la jurisdicción de la CAS se realiza de manera integral, sistemática y articulada con actores, soportado en un esquema organizacional con recursos técnicos, humanos y económicos adecuados.	A diciembre de 2032, se han implementado acciones y estrategias articuladas con actores para fortalecer un monitoreo integral que responde a los objetivos y alcances del Pirma.
Resultado 2	A diciembre del 2032, la CAS ha implementado un Sistema de Observación, Medición y Vigilancia del agua (SOMV) que cuenta con los procesos y procedimientos que cumplen con los estándares del Sistema Integrado de Gestión (SIG), para generar información suficiente, válida y oportuna que esté disponible en el sistema de información de la CAS y en el SIRH.	A diciembre de 2032, la CAS cuenta con un SOMV y un Sistema de Información en el marco del Pirma que reporta a los usuarios información de referencia, pronósticos y alertas del recurso hídrico de acuerdo con el diseño previo que se realizó del sistema y recibe datos de usuarios que realizan monitoreo en el área de jurisdicción.
Resultado 3	A diciembre del 2032, la CAS tendrá implementado un plan de capacitación, investigación e innovación tecnológica continua en monitoreo integral del agua, soportado en alianzas con otras entidades.	A diciembre de 2032, la CAS cuenta con un equipo de trabajo entrenado y capacitado, ambientes de aprendizaje continuo, y proyectos de investigación e innovación que favorecen el monitoreo integral del agua en el área de jurisdicción de la CAS.
Resultado 4	A diciembre del 2032, la CAS habrá implementado una estrategia de comunicación y difusión de resultados y acciones de monitoreo integral del agua para usuarios internos, actores involucrados y comunidades.	A diciembre de 2032, la CAS ha desarrollado los instrumentos y herramientas previstos en su estrategia de comunicación para difundir resultados y novedades del Pirma a los usuarios internos y externos de su jurisdicción.

Fuente: elaboración propia.

El detalle de la Matriz de Marco Lógico puede ser consultado en el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”.

La fase de formulación fue desarrollada en el año 2022, en la cual se elaboraron los componentes estratégico, programático, tecnológico y financiero.

En el **componente estratégico** se abordaron los objetivos de monitoreo. El objetivo general del monitoreo regional de la CAS consiste en soportar la evaluación, planificación del recurso hídrico y la toma de decisiones de

la CAS en temas relacionados con la administración y la gestión integral del recurso hídrico a partir de información confiable, oportuna y disponible para los usuarios institucionales, gremiales y sociales.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Disponer de datos e información de monitoreo del agua para el otorgamiento de permisos, licencias, concesiones, derechos de uso y aprovechamiento, y otros instrumentos relacionados con disponibilidad del recurso hídrico.



- Brindar de manera oportuna información validada para el seguimiento, control y vigilancia del estado y dinámica del recurso hídrico en el área de jurisdicción de la CAS.
- Fortalecer los Sistemas de Alerta Temprana relacionados con amenazas hidrológicas (inundación, crecientes súbitas, avenidas torrenciales y sequías) en áreas prioritizadas del departamento de Santander.
- Disponer datos e información confiable y oportuna del monitoreo del agua a los usuarios institucionales, gremiales y sociales que la requieran.

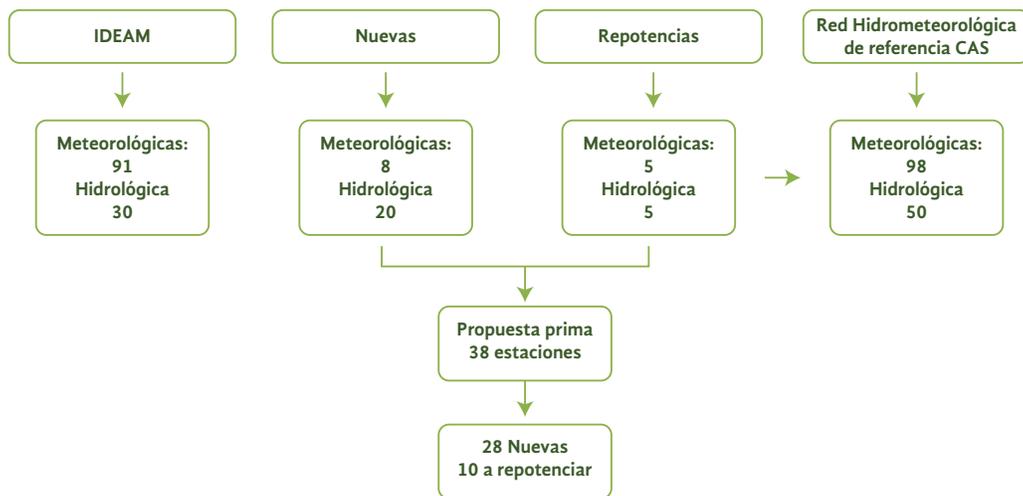
El **componente programático** se enfoca en la forma operativa del monitoreo del agua, con énfasis en los elementos del Sistema de Observación, Medición y Vigilancia (SOMV) (diseño de redes, frecuencia de monitoreo, variables y protocolos, entre otros), y en la gestión de la información proveniente del monitoreo. Este componente plantea el diseño de las redes de monitoreo, así como los

requerimientos para su articulación con el Sistema de Información del Recurso Hídrico, partiendo del diagnóstico de las redes existentes.

Teniendo en cuenta la metodología planteada (ver anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”) y los diferentes talleres entre el Ideam y la CAS, se propuso el diseño de red hidrometeorológica de referencia de la CAS, presentado en las figuras 3. 3. y 3. 4. El objetivo general de la red consiste en disponer de información que permita estimar y hacer seguimiento a la oferta y disponibilidad hídrica en la jurisdicción de la CAS.

Por otra parte, la red de referencia regional de calidad del agua tiene por objetivo general “Generar información y conocimiento sobre la calidad del agua de las principales corrientes hídricas en la jurisdicción de la CAS”. Fueron definidos 38 puntos de monitoreo ubicados en las principales corrientes hídricas de la jurisdicción (figura 3. 5).

Figura 3. 3. Propuesta de diseño para la red de referencia de monitoreo hidrometeorológico de la CAS



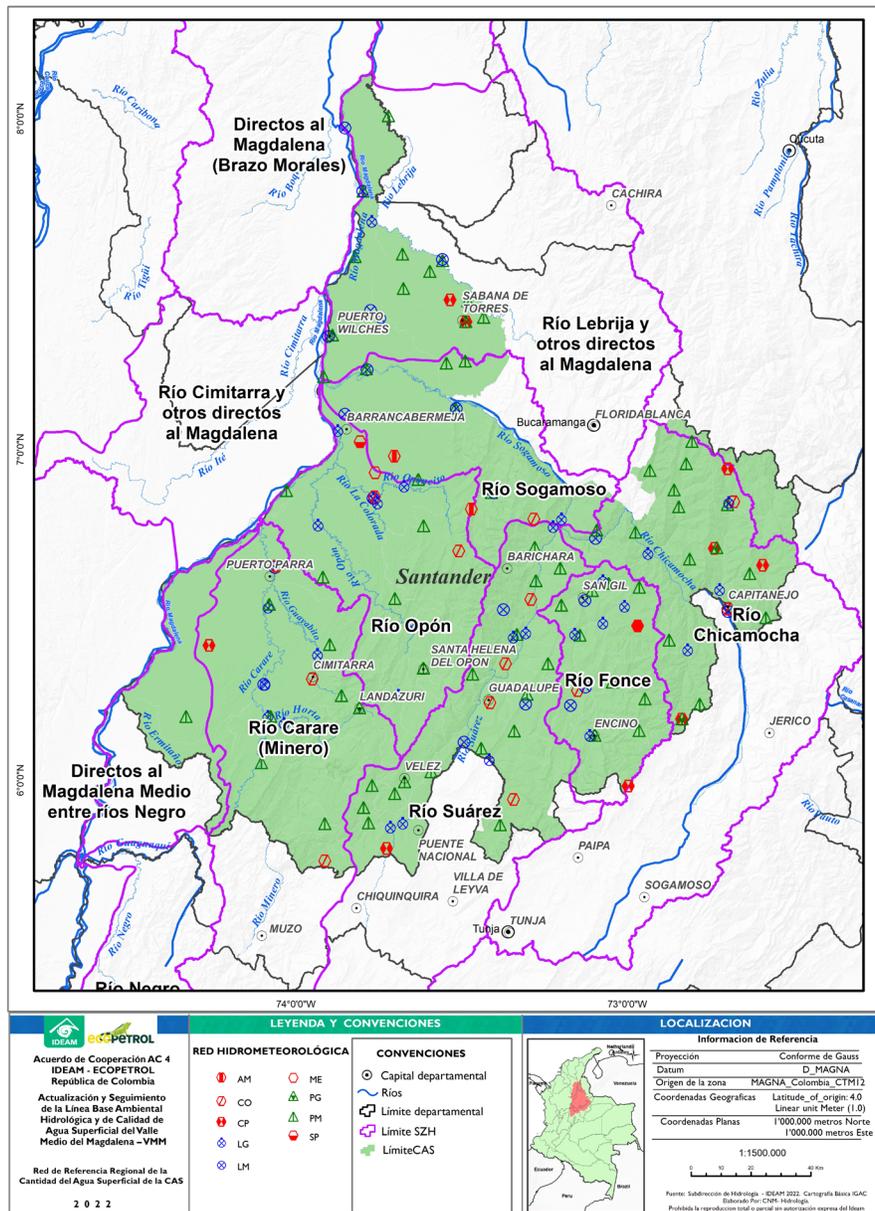
Fuente: elaboración propia.



El objetivo de la red regional de aguas subterráneas consiste en conocer, con fines de planificación y gestión ambiental, el estado natural y el comportamiento general del agua subterránea de los sistemas acuíferos del área de jurisdicción de la CAS. Se priorizó el Sistema

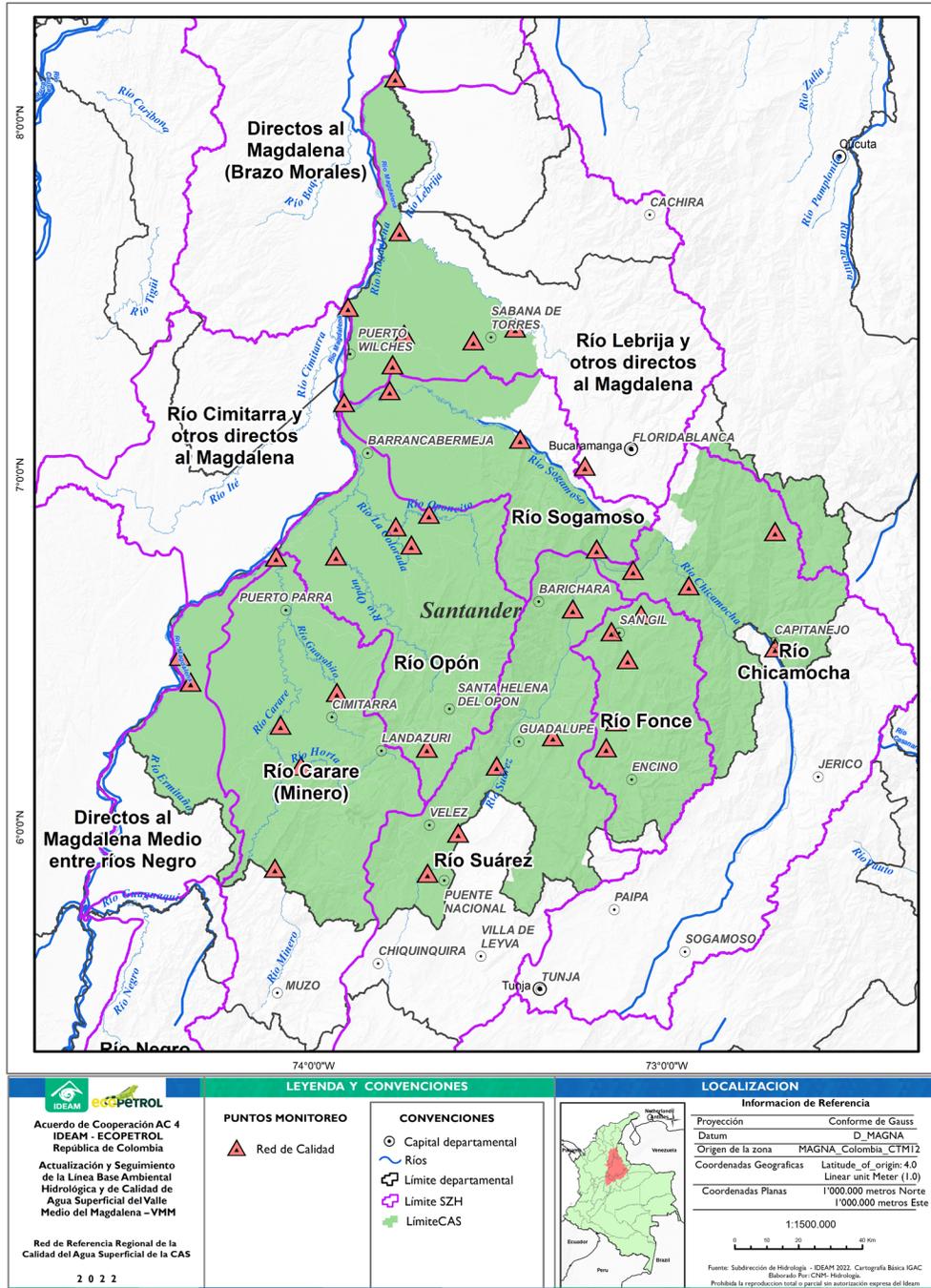
Acuífero del Valle Medio del Magdalena. Se definieron en total 38 puntos de monitoreo con profundidades inferiores a 40 m (figura 3. 6) y 36 puntos de monitoreo para profundidades mayores a 100 m (figura 3. 7).

Figura 3. 4. Diseño de la red hidrometeorológica de referencia CAS



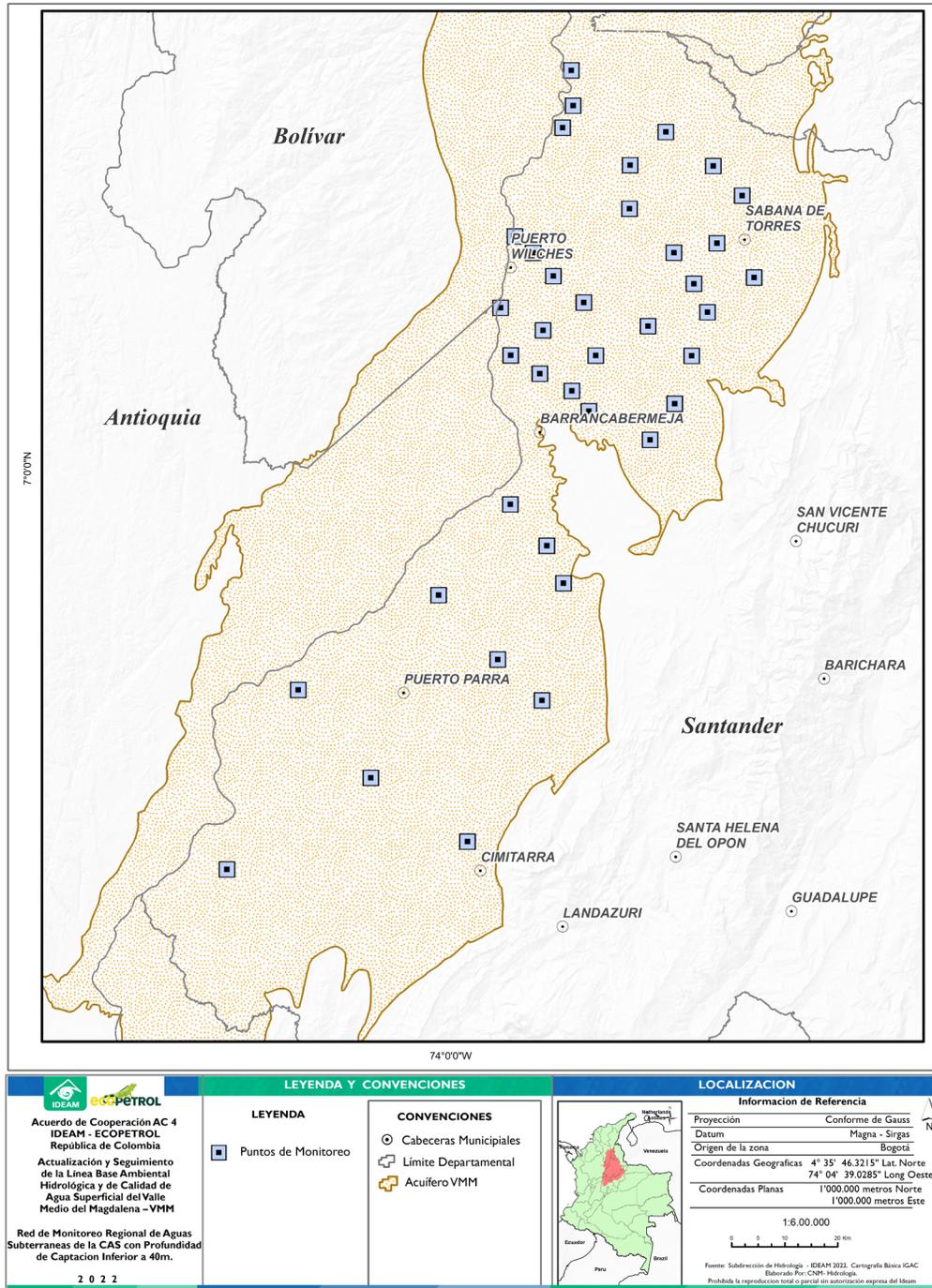
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. 5. Ubicación de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de la calidad del agua superficial del Pirma de la CAS



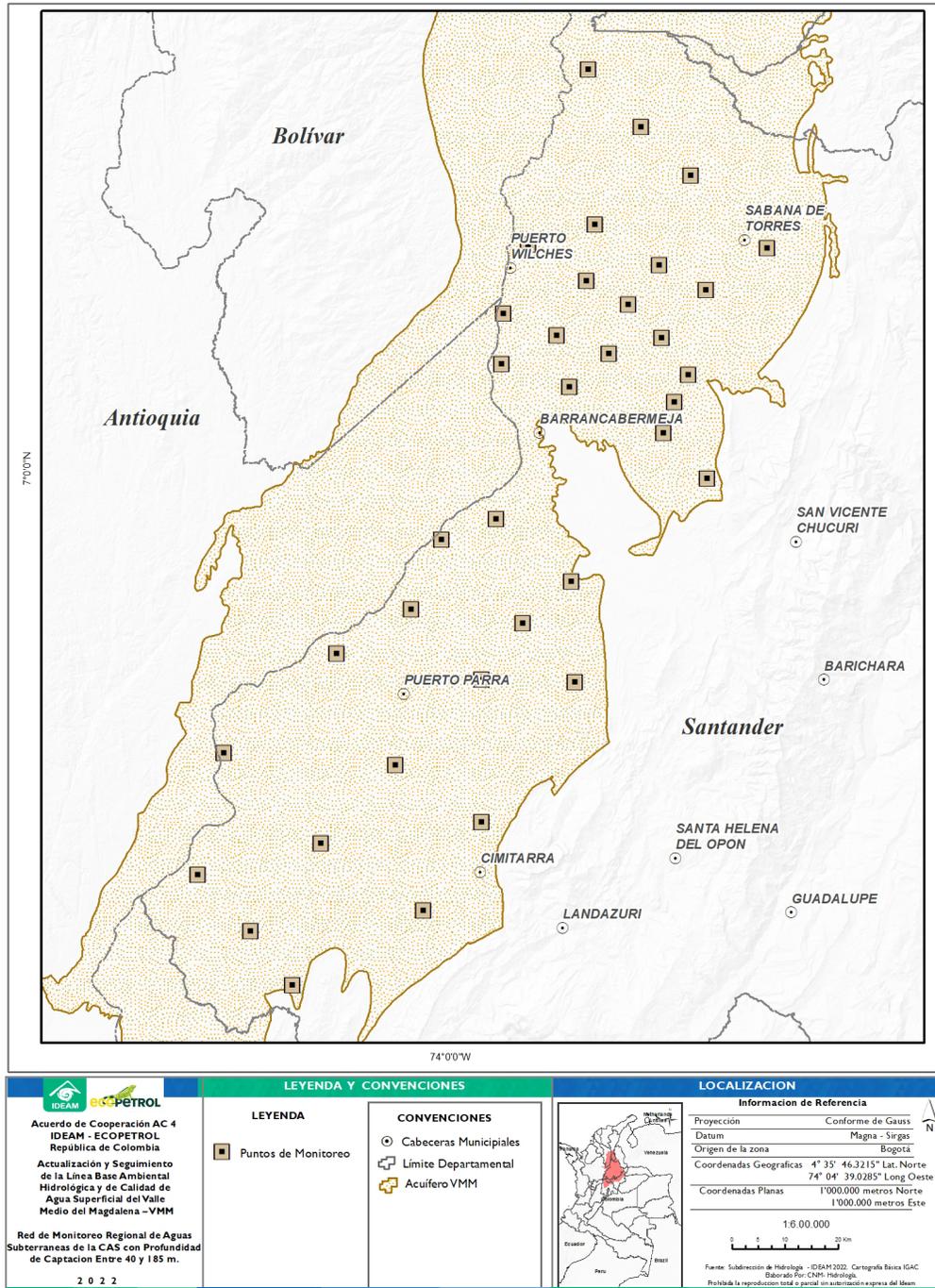
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. 6. Red de monitoreo regional de aguas subterráneas en la CAS con profundidad de captación inferior a los 40 m



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. 7. Red de monitoreo regional de aguas subterráneas en la CAS con profundidad de captación entre 40 y 185 m



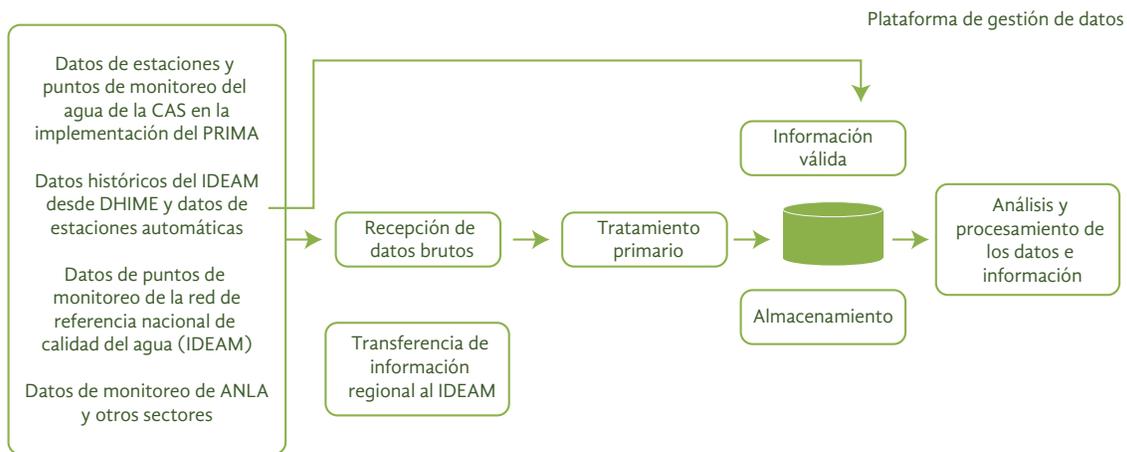
Fuente: elaboración propia.

De manera transversal, se destaca la importancia de fortalecer los flujos de información al interior de la CAS. La gestión de la información está constituida por el flujo de los datos y la información de monitoreo al interior de la Corporación. Partiendo del diagnóstico actual de la gestión de la información de la CAS se recomienda optar por una plataforma de gestión de datos similar a la propuesta en el

piloto del Pirma, realizado en la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) (figura 3. 8).

Las variables de monitoreo, frecuencia y documentación de cada una de las redes pueden ser consultadas en el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”.

Figura 3. 8. Flujo de los datos e información del monitoreo integral del agua en la CAS



Fuente: adaptado de CAM & Herencia Hídrica (2020).

La CAS contará a futuro con diferentes fuentes de información del monitoreo: redes a nivel nacional operadas por el Ideam, estaciones hidrometeorológicas y de calidad operadas y mantenidas en el marco de la implementación del Pirma, y otros sectores que aportarán información (figura 3. 8).

La plataforma de gestión de datos debe recibirlos y procesarlos de todas estas fuentes y, además, ser compatible con el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). Los datos hidrometeorológicos de las estaciones de la CAS, incluidas las nuevas estaciones en

el Pirma, se transmitirán directamente a través de la plataforma de gestión de datos que, además de recibirlos, debe explorar las series de datos históricos y presentar valores esperados de las variables, variación máxima esperada de una variable entre las observaciones sucesivas y la diferencia máxima; y también debe tener la posibilidad de hacer correlaciones con series de estaciones cercanas para validar su coherencia.

Posterior a esta transmisión, los datos recolectados deben ser objeto de un tratamiento



primario por parte de los técnicos de la CAS. Este tratamiento, de acuerdo con las indicaciones de la Organización Meteorológica Mundial y el protocolo de monitoreo del Ideam (Ideam & Invemar, 2021), comprende varias etapas necesarias para preparar los datos con el fin de almacenarlos o archivarlos, de modo que puedan ser utilizados a corto o largo plazo (OMM, 2011). Posteriormente, estos datos validados podrán ser almacenados y utilizados para su respectivo análisis y procesamiento, con relación a los objetivos de monitoreo propuestos.

El **componente tecnológico** en el marco del Pirma busca orientar sobre los equipos y tecnologías necesarios para asegurar la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos hidrometeorológicos de las estaciones automáticas, y en las aguas subterráneas. En el componente de calidad del agua superficial se sugiere la utilización de nuevas tecnologías que podrían mejorar el monitoreo de esta. Dentro de ellas se encuentran: la utilización de drones para la toma de muestras y el uso de imágenes satelitales para la evaluación de la calidad del agua.

El **componente financiero** será presentado más adelante en este documento.

La fase de implementación del Pirma inició en el 2023. Si bien esta es responsabilidad de la CAS, se brindó apoyo en las siguientes actividades:

- Realizar una capacitación sobre el monitoreo de las aguas subterráneas y sobre el uso de la hidrología isotópica en el conocimiento de estas para personal técnico de la CAS.
- Realizar una capacitación teórico-práctica sobre el monitoreo de calidad del agua superficial en la CAS
- Documentar la programación, seguimiento y evaluación en el cumplimiento de la

operación de las redes regionales de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas, definiendo los indicadores de la operación, indicando los puntos de monitoreo, fechas de campañas, entre otros.

- Documentar los procedimientos técnicos para el registro y la validación necesarios en la gestión del dato de monitoreo proveniente de la red regional de referencia del agua subterránea y de calidad del agua superficial del Pirma de la CAS, con base en el Protocolo de Monitoreo del Agua del Ideam.
- Realizar la priorización de los puntos de monitoreo de calidad del agua superficial y subterránea.
- Apoyar la gestión de la adquisición de estaciones hidrometeorológicas priorizadas por la CAS.

3. 3. Plan de financiamiento del PIRMA

El plan financiero para el fortalecimiento del Pirma tiene por objeto general orientar estrategias metodológicas de financiamiento para la consecución de recursos que permitan implementar los resultados, actividades y subactividades de este programa.

El plan fue elaborado por medio de un conjunto de actividades enfocadas en las acciones necesarias para aplicar los métodos definidos por el Estado para la formulación de proyectos y planes de inversión pública. Estas actividades son:

- Recolección de información: requerida para el entendimiento del contexto, de las necesidades o problemas por resolver, para definir la magnitud del problema, determinar las alternativas de solución, los objetivos, las actividades, los productos o servicios a desarrollar y entregar los costos de su ejecución. La información recopilada está relacionada con los resultados de



la fase de planificación y formulación del Pirma, especialmente en lo concerniente a la evaluación financiera del plan operativo del Pirma y lo establecido en el componente programático y tecnológico del mismo.

- Actualizar costos: revisar la estructuración de los costos de las actividades y proyectos de la Matriz de Marco Lógico del Pirma, incluido el componente programático relacionado con el Sistema de Observación, Medición y Vigilancia.
- Identificar fuentes de financiamiento: identificar y documentar las fuentes de financiación que son requeridas y a las que podría acceder la CAS para la implementación del Pirma.

- Elaborar plan de financiamiento: establecer y documentar un plan financiero en donde se resalten los lineamientos estratégicos que permitan focalizar y obtener recursos para la implementación del Pirma. Esto se estructuró en un documento a la medida de las necesidades de la CAS, mediante el cual se pueden gestionar recursos ante las autoridades que permitan viabilizar la inversión pública para cumplir con los propósitos del Pirma.

La estructura de los costos tuvo como base la Metodología de Marco Lógico en la que se consideró un esquema de resultado - actividades y subactividades. A continuación, se presentan los costos de cada resultado (tabla 3. 3).

Tabla 3. 3. Costos de los resultados del Pirma de la CAS

Resultado	Descripción	Productos	Presupuesto 2022-2032
Resultado 1.	A diciembre del 2032, el monitoreo del agua en la jurisdicción de la CAS se realiza de manera integral, sistemática y articulada con actores, soportado en un esquema organizacional con recursos técnicos, humanos y económicos adecuados.	Un esquema organizacional que soporta la implementación de las acciones y estrategias del Pirma.	\$ 678.753.900
Resultado 2.	A diciembre del 2032, la CAS ha implementado un Sistema de Observación, Medición y Vigilancia del agua (SOMV) que cuenta con los procesos y procedimientos que cumplen con los estándares del Sistema Integrado de Gestión (SIG), para generar información suficiente, válida y oportuna que esté disponible en el sistema de información de la CAS y en el SIRH.	El Sistema de Observación Medición y Vigilancia del Agua (SOMV) y el sistema de información responden a los objetivos de monitoreo de la Corporación, formulados en el Pirma.	\$36.704.611.100
Resultado 3.	A diciembre del 2032, la CAS tendrá implementado un plan de capacitación, investigación e innovación tecnológica continua en monitoreo integral del agua, soportado en alianzas con otras entidades.	Plan de capacitación y plan de investigación del Pirma.	\$ 3.225.761.100
Resultado 4.	A diciembre del 2032, la CAS habrá implementado una estrategia de comunicación y difusión de los resultados y acciones del monitoreo integral del agua para usuarios internos, actores involucrados y comunidades.	Estrategia de comunicaciones y difusión de resultados de las acciones del monitoreo integral del agua.	\$ 1.548.108.600
Total del costo: Pirma CAS 2023-2032			\$ 42.157.234.700

Fuente: elaboración propia.



El costo asociado a cada resultado por cada vigencia, entre 2021 y 2032, se presenta en la tabla 3.4

Tabla 3. 4. Costos anualizados de los resultados del Pirma
(cifras en millones de pesos)

Concepto	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	Total
Resultado 1	0,0	0,0	213,8	43,5	46,6	48,9	50,4	51,9	53,5	55,1	56,7	58,4	678,8
Resultado 2	0,0	671,50	5.001,43	4.599,22	4.597,09	3.508,85	3.084,87	3.042,21	3.294,06	2.878,26	2.967,53	3.059,58	36.704,61
Resultado 3	30,6	261,8	269,8	249,4	266,9	280,2	288,6	297,3	306,2	315,4	324,9	334,6	3.225,8
Resultado 4	0,0	0,0	217,4	23,8	25,4	167,2	172,3	177,4	182,8	188,2	193,9	199,7	1.548,1
Total	30,6	891,3	5.744,4	4.916,0	4.936,0	4.005,3	3.596,2	3.568,8	3.836,5	3.437,0	3.543,0	3.652,3	42.157,2

Fuente: elaboración propia.

En el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación” puede consultarse el detalle del costo de los resultados. La CAS debe incluir en su planeación institucional el desarrollo de los objetivos y las acciones encañados a la implementación del Pirma, así como las fuentes de financiación para su ejecución y cumplimiento.

Por otra parte, fueron identificadas las fuentes de financiación aplicables al Pirma, con base en el marco legal de las autoridades ambientales. Estas fuentes se describen a continuación:

- **Recursos propios**

Corresponden a los ingresos generados por las actividades misionales de la CAS o aquellos contemplados en la normatividad destinados a su funcionamiento. En la tabla 3.5, se describen las fuentes de financiación propias con las que cuenta la CAS y que se encuentran establecidas en el decreto 1076 de 2015 del sector ambiente y desarrollo sostenible, y que podrán ser destinadas a la implementación del Pirma.



Tabla 3. 5. Fuentes de financiamiento por recursos propios

Fuente	Descripción	Periodicidad
Sobretasa ambiental	Es un ingreso tributario que se obtiene de manera directa cuando se gravan los ingresos o el patrimonio de personas naturales y jurídicas (en un impuesto directo se identifica al contribuyente y se conoce su capacidad de pago mediante la información relativa a sus rentas y patrimonio). Particularmente la sobretasa ambiental corresponde a lo que fijen los municipios y distritos, entre el 1,5 por mil y el 2,5 por mil, sobre el avalúo de los bienes que sirven de base para liquidar el impuesto predial.	Semestral
Contribución del sector eléctrico	Corresponde al porcentaje que deben transferir las empresas generadoras de energía hidroeléctrica, así como las centrales térmicas, de acuerdo con lo establecido en el artículo 45 de la ley 99 de 1993. De acuerdo con este artículo las empresas generadoras de energía hidroeléctrica, cuya potencia nominal supera los 10.000 kilovatios, deben transferir el 6 % de las ventas brutas de energía por generación propia de acuerdo con las distribuciones establecidas por la ley. En el caso de las centrales térmicas el porcentaje de los recursos a transferir es del 4 %. Los destinatarios de estos recursos son: las corporaciones autónomas regionales o los parques nacionales naturales que tengan jurisdicción en el área donde se encuentra localizada la cuenca hidrográfica, el área de influencia del proyecto o donde esté ubicada la central térmica, y los municipios y distritos localizados en la cuenca que surte al embalse de las generadoras de energía hidroeléctrica, o el municipio donde esté ubicada la central térmica.	Cada vigencia
Tasas y derechos administrativos	Las tasas y derechos administrativos son ingresos derivados de la prestación directa y efectiva de un servicio público individualizado y específico, adquirido de forma voluntaria por un tercero. En el caso de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) la entidad tiene derecho a efectuar el cobro de las siguientes tasas y derechos administrativos: evaluación y seguimiento de licencias y trámites ambientales, , tasa por uso del agua y tasa retributiva.	Cada vigencia

Fuente: elaboración propia.

• **Recursos del decreto 1900 de 2006**

Corresponde al 1 % que debe destinar todo proyecto que involucre en su ejecución el uso del agua tomada directamente de fuentes naturales y que esté sujeto a la obtención de una licencia ambiental. La destinación de los recursos se realizará en la cuenca hidrográfica que se encuentra en las áreas de influencia del proyecto objeto de licencia ambiental, de acuerdo con lo dispuesto en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica que incluya la respectiva fuente hídrica de la que se toma el agua. La periodicidad de la fuente es por cada vigencia.

• **Recursos de la nación**

Corresponde a los aportes asignados con recursos que suministra la nación para los gastos de funcionamiento o de inversión de la CAS. Para acceder a estos recursos la CAS debe realizar la solicitud en el anteproyecto de presupuesto anual, el cual debe atender los lineamientos establecidos por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Para el caso de los gastos de funcionamiento se podrán financiar aquellos relacionados con la operación y sostenibilidad del Pirma.



Respecto a los recursos de inversión se podrán financiar aquellas actividades que comprenda la etapa de pre inversión, diagnóstico, diseño y puesta en marcha del Pirma. Tratándose de la implementación del Pirma de un proyecto que cuenta con un horizonte a diez (10) años, y que algunas actividades programadas superan las vigencias fiscales (comprendidas entre el 1º de enero y el 31 de diciembre), se recomienda utilizar el mecanismo de solicitud de autorización de vigencias futuras. Esto permitirá lograr la continuidad en la ejecución de las actividades y en algunos casos ahorros en la contratación. Lo anterior de conformidad con lo que establece el estatuto presupuestal de la CAS.

Para la solicitud de estos recursos se debe utilizar la Metodología General Ajustada (MGA). Con este fin el Gobierno nacional dispone de una aplicación informática que sigue un orden lógico para el registro de la información más relevante, resultado del proceso de formulación y estructuración de los proyectos de inversión pública. Su sustento conceptual se basa en la Metodología de Marco Lógico y en los principios de preparación y evaluación económica de proyectos. Esto ayuda de forma esquemática y modular en los procesos de identificación, preparación, evaluación y programación de los proyectos de inversión pública. La MGA tiene como fin principal registrar y presentar la formulación y estructuración de los proyectos de inversión pública, para su gestión ante los entes nacionales y territoriales.

Por otra parte, se tiene el Sistema General de Regalías (SGR). Las regalías son la contraprestación económica que recibe el Estado por la explotación de recursos naturales no renovables, las cuales pueden ser recaudadas en dinero. El SGR es un esquema de coordinación entre el Gobierno nacional y las entidades territoriales, en donde se determina

la distribución, los objetivos, la administración, la ejecución, el control y la destinación de estos ingresos.

Todo proyecto de inversión que se presente para ser financiado con cargo a los recursos del Sistema General de Regalías deberá estar debidamente viabilizado e inscrito en el Banco de Proyectos de Inversión del Sistema General de Regalías, que administra el Departamento Nacional de Planeación (DNP), creado en virtud de lo dispuesto en la Ley 1530 de 2012.¹

El funcionamiento de este Banco de Proyectos de Inversión será definido por el reglamento que para tales efectos expida el Departamento Nacional de Planeación.

Los proyectos deben estar formulados de acuerdo con las metodologías establecidas por el DNP, es decir, con la Metodología General Ajustada (MGA).

También se encuentra el Fondo Nacional Ambiental (Fonam), el cual es un sistema especial de manejo de cuentas de Minambiente, con personería jurídica, patrimonio independiente, sin estructura administrativa ni planta de personal y con jurisdicción en todo el territorio nacional. Con este fondo se pueden financiar la ejecución de actividades, estudios, investigaciones, planes, programas y proyectos, de utilidad pública e interés social, encaminados al fortalecimiento de la gestión ambiental, a la preservación, conservación, protección, mejoramiento y recuperación del medioambiente y al manejo adecuado de los recursos naturales renovables y de desarrollo sostenible.

1 Ley 2056 de 2020, Artículo 136. Banco de Proyectos de Inversión del Sistema General de Regalías.



- **Cooperación internacional**

Acción conjunta para apoyar el desarrollo económico y social del país, mediante la transferencia de tecnologías, conocimientos, experiencias o recursos por parte de países con igual o mayor nivel de desarrollo, organismos multilaterales, organizaciones no gubernamentales y de la sociedad civil. También se conoce como cooperación para el desarrollo y es un concepto global que comprende diferentes modalidades de ayuda que fluyen hacia los países de menor desarrollo relativo. Los recursos que se obtengan de esta fuente deben ser gestionados por la Agencia Presidencial de Cooperación Internacional (APC), entidad encargada de gestionar, orientar y coordinar técnicamente la cooperación internacional pública, privada, técnica y financiera no reembolsable que reciba y otorgue el país; así como ejecutar, administrar y apoyar la canalización y ejecución de recursos, programas y proyectos, atendiendo los objetivos de política exterior y el Plan Nacional de Desarrollo².

Por medio de este plan de financiamiento la CAS cuenta con una herramienta de planificación económica robusta para implementar el Pirma. Será necesario que el comité de monitoreo de la CAS haga un seguimiento constante a estas fuentes de financiamiento, con el fin de ser eficientes en su obtención. Se recomienda priorizar el financiamiento de recursos propios y el presupuesto de la nación, dado que son fuentes más recurrentes y que dependen exclusivamente de las acciones de la CAS y de los recursos del Estado, mientras que cooperación internacional depende de la disponibilidad de países externos.

2 Decreto 4152, Artículo 5.

3. 4. Fase de implementación del PIRMA en la CAS durante el 2023

Durante el 2021 se llevó a cabo la fase de planificación del Pirma de la CAS, y a lo largo del 2022 se llevó a cabo la fase de formulación. Durante el 2023 se iniciaron las primeras actividades de la fase de implementación del Pirma desde sus diferentes componentes. En este numeral se resumen las actividades abordadas durante los primeros meses del 2023, con relación a la implementación del Pirma de la CAS. Se presentan los avances en los componentes de hidrometeorología, calidad del agua superficial y cantidad y calidad de aguas subterráneas.

3.4.1. Componente hidrometeorológico

3.4.1.1 Apoyo en el proceso de adquisición e instalación de cuatro estaciones hidrológicas

Teniendo en cuenta el diseño obtenido en la fase de formulación del Pirma de la CAS para la red de monitoreo hidrometeorológico, la CAS tiene como objetivo para el 2023 la instalación de cuatro estaciones automáticas de tipo hidrológico, en diferentes corrientes de las subzonas hidrográficas de los ríos Fonce y Suárez.

Se realizó un acompañamiento por parte del Ideam para la formulación del proyecto, considerando la experiencia del Instituto con relación a la instalación y operación de estaciones hidrometeorológicas en el país. A partir de reuniones entre el Ideam y personal de la CAS se propuso la instalación de las estaciones listadas en la figura 3. 9.



Figura 3. 9. Estaciones recomendadas para instalar en el 2023

Q. Curití



Río Pienta



Q. Santa Rosa



Q. Cinco Mil



Fuente: elaboración propia.

De las estaciones propuestas por parte del Ideam se recomienda reemplazar la estación de la quebrada Cinco Mil por otra de las planteadas en el diseño de la red hidrometeorológica; ya que esta no cuenta con las condiciones adecuadas para la instalación de una estación automática, se propuso una convencional.

3.4.1.2. Elaboración de la hoja de ruta para la certificación de variables hidrometeorológicas de la CAS

Para lograr un monitoreo efectivo es necesario contar con información estadística de calidad. Es decir, información oficial, confiable, con el mayor grado de desagregación posible (nivel

local), que permita una comparabilidad con datos de otras fuentes. Contar con información de calidad permitirá a los tomadores de decisiones generar políticas públicas efectivas basadas en evidencias, considerando las características particulares y el contexto de la sociedad. A su vez, contar con información estadística de fácil acceso para todo aquel que lo requiera fomentaría su uso, incrementando así la confianza de la ciudadanía en los datos y en las instituciones generadoras de estos.

De acuerdo con lo anterior, es importante que una vez la CAS inicie con la implementación de sus redes de monitoreo y la producción de información asociada al recurso hídrico,



esta cuenta con un alto grado de calidad para que sea confiable y pueda ser utilizada por diferentes actores del territorio.

De este modo, se considera relevante que la Corporación lleve a cabo el proceso de certificación de las variables hidrometeorológicas ante el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), que es el ente encargado en Colombia de regular la captación, procesamiento y publicación de información estadística del país. Para esto, en la implementación del Pirma se elaboró una hoja de ruta, indicando las principales actividades a realizar, sugeridas en la CAS. En el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación” puede consultarse el documento.

3.4.1.3. Taller sobre certificación de variables hidrológicas

Se adelantó un taller en la sede de la CAS, en el cual se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Verificación de los datos provenientes de la red regional de referencia de la calidad del agua superficial
- Verificación de los datos provenientes de la red regional de aguas subterráneas
- Certificación de variables hidrológicas

Al finalizar se realizó un ejercicio para identificar, de manera preliminar, algunos potenciales usuarios de la información hidrológica que será generada por la CAS, una vez esté en funcionamiento la red de monitoreo hidrometeorológico (ver tabla 3.6).

Tabla 3. 6. Usuarios potenciales para el uso de la información hidrológica identificados por la CAS

Usuario	Necesidad de información
Empresas consultoras o del sector privado	Desarrollo de proyectos y análisis de información en sus zonas de influencia
Universidades	Proyectos de investigación
Grupos ambientalistas, ONG, fundaciones, veedurías	Identificar fuentes de contaminación o afectación al recurso hídrico para emprender acciones populares
Servicio Geológico, ministerios, SENA, ICA, Ideam	Información para investigación, elaboración de estudios, toma de decisiones

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Componente de calidad del agua superficial

3.4.2.1. Capacitación sobre calidad del agua superficial

Esta capacitación se dividió en la verificación de los datos *in situ*, los datos provenientes del laboratorio y su validación temática.

Así mismo, se suministraron unos conceptos básicos sobre la información proveniente del monitoreo y análisis de muestras hidrobiológicas, con el fin de facilitar la comprensión de los funcionarios y contratistas de la CAS para la contratación de servicios de laboratorio con este propósito.



Además, se realizó la capacitación en campo de monitoreo de la calidad del agua superficial. En esta capacitación se hizo la explicación de la medición de variables *in situ* de temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad con una sonda multiparamétrica, la toma de muestras fisicoquímicas y microbiológicas, la toma de muestras de perifiton y de macroinvertebrados. Todo ello de acuerdo con el Protocolo de Monitoreo del Agua de Ideam, y teniendo como ejemplo de formatos de campo una síntesis de los usados por el laboratorio de calidad.

3.4.2.2. Priorización de puntos de monitoreo de la red de calidad del agua

La red de referencia regional de calidad del agua superficial del Pirma de la CAS consta de 38 puntos de monitoreo, a los cuales se debe hacer seguimiento con una frecuencia de cuatro veces al año. Dada la magnitud de la implementación de esta red, ya que la CAS no cuenta con una red regional previa, se plantea una implementación progresiva de los puntos de monitoreo con el objetivo de tener la red completa implementada en el 2029 (tabla 3. 7).

Tabla 3. 7. Red de referencia regional de la calidad del agua superficial del Pirma de la CAS

ID		Coordenada N	Coordenada W	SZH	Corriente	Objetivo
1	Los Chorros	7°41'37,85"	73° 45' 36,03"	Lebrija	Lebrija	Seguimiento
2	Provincia	7°25'14,97"	73° 25' 49,29"	Lebrija	Lebrija	Seguimiento
3	La Gómez aguas abajo	7° 24' 9,34"	73° 44' 47,11"	Lebrija	Quebrada La Gómez	Seguimiento
4	La Gómez aguas arriba	7°23'4,60"	73°32'59,58"	Lebrija	Quebrada La Gómez	Referencia
5	Desembocadura Lebrija	8° 7'51,67"	73°46'23,25"	Lebrija	Lebrija Desembocadura	Seguimiento
6	San Pablo	7°28'45,49"	73°54'23,18"	Lebrija	San Pablo	Seguimiento
7	Quebrada La Trece	7°18'59,42"	73°46'46,01"	Lebrija	Quebrada La Trece	Seguimiento
8	Juncal	6° 47' 36,30"	73° 11' 56,22"	Sogamoso	Sogamoso	Seguimiento
9	Aguas arriba embalse	7° 1'43,97"	73° 13' 56,48"	Sogamoso	Sogamoso	Referencia
10	Aguas abajo embalse	7° 6'20,52"	73°24'58,29"	Sogamoso	Sogamoso	Seguimiento
11	Puente Sogamoso	7° 14' 35,25"	73° 47' 13,87"	Sogamoso	Sogamoso	Seguimiento
12	Desembocadura Sogamoso	7°12'31,06"	73°54'59,01"	Sogamoso	Sogamoso	Seguimiento
13	Río Quiratá	6° 13' 40,34"	73° 40' 46,79"	Opón	Río Quiratá	Seguimiento
14	Río Cascajales	6°48'15.85"	73°43'30.16"	Opón	Río Cascajales	Seguimiento



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

ID		Coordenada N	Coordenada W	SZH	Corriente	Objetivo
15	Río Oponcito	6°53'30,61"	73°40'30,61"	Opón	Río Oponcito	Seguimiento
16	Puente Ferrocarril	6° 46' 22,96"	73° 56' 18,74"	Opón	Opón	Seguimiento
17	Ayacucho	6°51'22,38"	73°46'9,62"	Opón		Seguimiento
18	Desembocadura Carare	6° 46' 12,65"	74° 6' 31,16"	Carare	Carare	Seguimiento
19	Río Minero	5° 53' 9,89"	74° 6' 36,37"	Carare	Río Minero	Seguimiento
20	Santa Rosa	6° 17' 33,21"	74° 5' 42,26"	Carare	Carare	Seguimiento
21	Río Guayabito	6°23'7,04"	73°56'8,89"	Carare	Río Guayabito	Seguimiento
22	Río Horta	6° 10' 36,01"	74° 2' 14,45"	Carare	Río Horta	Seguimiento
23	Caño Negro aguas arriba	6°24'48,82"	74°21'1,55"	2311	Caño Negro	Referencia
24	Caño Negro aguas abajo	6°29'14,85"	74°22'52,55"	2311	Caño Negro	Seguimiento
25	Güepesa	5°59'13,81"	73°35'28,82"	Suárez	Río Suárez	Seguimiento
26	Río Suárez aguas arriba	6°10'38,20"	73°28'56,64"	Suárez	Río Suárez	Referencia
27	Oibita	6° 15' 38,13"	73° 19' 21,07"	Suárez	Río Oibita	Seguimiento
28	Río Suárez Barichara	6°37'23,70"	73°16'0,27"	Suárez	Río Suárez	Seguimiento
29	Puente Nacional	5°52'22,31"	73°40'40,45"	Suárez	Río Suárez	Seguimiento
30	Playita	6° 18' 12,95"	73° 8' 36,42"	Fonce	Río Fonce	Seguimiento
31	Nemizaque	6°13'46,00"	73°10'18,00"	Fonce	Río Pienta	Seguimiento
32	Mogoticos	6° 28' 48"	73° 6' 39,40"	Fonce	Quebrada Mogoticos	Seguimiento
33	Quebrada Curití	6°36'24,85"	73° 4'23,50"	Fonce	Quebrada Curití	Referencia
34	Fonce San Gil	6°33'32,80"	73° 9'25,18"	Fonce	Río Fonce	Seguimiento
35	Capitanejo	6° 30' 46,41"	72° 41' 33,42"	Chicamocha	Río Chicamocha	Seguimiento
36	Servitá Cerrito	6°50'36,27"	72° 41' 32,77"	Chicamocha	Río Servitá	Seguimiento
37	Chicamocha Cepitá	6°41'22,03"	72°56'14,53"	Chicamocha	Río Chicamocha	Seguimiento
38	Jordán	6° 44' 0,04"	73° 5' 44,10"	Chicamocha	Río Chicamocha	Seguimiento

Fuente: elaboración propia.



El Pirma contempla una implementación progresiva de la red aumentando en 5 puntos de monitoreo al año hasta 2028, y en 8 puntos a

2029. Adicionalmente, esta hoja de ruta contempla otras actividades necesarias para la implementación (ver tabla 3.8).

Tabla 3. 8. Hoja de ruta de la implementación de la red de referencia regional de calidad del agua superficial propuesta en el Pirma de la CAS

Año	Actividades
2023	Desarrollo de formatos, protocolos y metodologías indicadas en la documentación Adquisición de equipos de monitoreo Capacitación del personal técnico de la CAS de acuerdo con el plan de capacitación del Pirma Seguimiento de 5 puntos de monitoreo
2024	Aumento de la red en 5 puntos de monitoreo, para un total de 10 Capacitación del personal técnico de la CAS de acuerdo con el plan de capacitación del Pirma
2025	Aumento de la red en 5 puntos de monitoreo, para un total de 15 Capacitación del personal técnico de la CAS de acuerdo con el plan de capacitación del Pirma
2026	Aumento de la red en 5 puntos de monitoreo, para un total de 20 Capacitación del personal técnico de la CAS de acuerdo con el plan de capacitación del Pirma
2027	Aumento de la red en 5 puntos de monitoreo, para un total de 25
2028	Aumento de la red en 5 puntos de monitoreo, para un total de 30
2029	Aumento de la red en 8 puntos de monitoreo, para un total de 38

Fuente: elaboración propia.

Además, se definieron los criterios para la priorización de los puntos de monitoreo, los cuales están basados en la disponibilidad presupuestal de la CAS y en los avances

de los instrumentos de planificación de la Corporación. Esto lleva a un planteamiento inicial de la priorización (ver tabla 3.9).

Tabla 3. 9. Concepción de la priorización de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de la calidad del agua del Pirma de la CAS

Año	Puntos
2023	Fonce, La Gómez, Chicamocha 2 monitoreos Red nacional -> monitoreos Ideam
2024	Fonce, La Gómez, Chicamocha 4 monitoreos Red nacional -> monitoreos Ideam, a complementar por la CAS
2025	Puntos restantes Sogamoso
2026	Puntos restantes Lebrija
2027	Opón
2028	Suárez
2029	Carare y directos al Magdalena (2311)

Fuente: elaboración propia.



Finalmente, se llevó a cabo el ejercicio de definir exactamente los puntos de monitoreo a implementar anualmente para cumplir con el objetivo de tener la red completa para 2029. Como se puede observar en la siguiente tabla se contempla la implementación de un número mayor de puntos de monitoreo en los dos primeros años, dado que la CAS indica que pueden ser monitoreados en el marco de

instrumentos de planificación y en asocio con el Ideam. En 2023 se contempla una frecuencia de monitoreo menor que será aumentada a 4 veces al año en 2024. Desde 2025 a 2029 se aumentan los puntos de monitoreo de la red, de acuerdo con las subzonas, con el fin de facilitar el transporte y la ejecución de las campañas de seguimiento (tabla 3. 10).

Tabla 3. 10. Priorización de los puntos de monitoreo de la red de referencia regional de calidad del agua superficial del Pirma de la CAS

Año	Puntos	Frecuencia monitoreo / año
2023	3 La Gómez aguas abajo	2
	4 La Gómez aguas arriba	
	30 Playita	
	31 Nemizaque	
	32 Mogoticos	
	33 Quebrada Curití	
	34 Fonce San Gil	
	35 Capitanejo	
	36 Servitá Cerrito	
	37 Chicamocha Cepitá	
	38 Jordán	
	6 San Pablo	
	11 Puente Sogamoso	
	16 Puente Ferrocarril	
	20 Santa Rosa	
29 Puente Nacional		
2024	3 La Gómez aguas abajo	4
	4 La Gómez aguas arriba	
	30 Playita	
	31 Nemizaque	
	32 Mogoticos	
	33 Quebrada Curití	
	34 Fonce San Gil	
	35 Capitanejo	
	36 Servitá Cerrito	
	37 Chicamocha Cepitá	
	38 Jordán	
	6 San Pablo	
	11 Puente Sogamoso	
	16 Puente Ferrocarril	
	20 Santa Rosa	
29 Puente Nacional		
2025	7 Quebrada La Trece	4
	8 Juncal	
	9 Aguas arriba embalse	
	10 Aguas abajo embalse	
	12 Desembocadura Sogamoso	



Año	Puntos	Frecuencia monitoreo / año
2026	1 Los Chorros	4
	2 Provincia	
	5 Desembocadura Lebrija	
	7 Quebrada La Trece	
2027	13 Río Quiratá	4
	14 Río Cascajales	
	15 Río Oponcito	
	17 Ayacucho	
2028	25 Güepsa	4
	26 Río Suárez aguas arriba	
	27 Oibita	
	28 Río Suárez Barichara	
2029	23 Caño Negro aguas arriba	4
	24 Caño Negro aguas abajo	
	18 Desembocadura Carare	
	19 Río Minero	
	21 Río Guayabito	
	22 Río Horta	

Fuente: elaboración propia.

Basado en esta priorización se desarrolla un documento con la programación, seguimiento y evaluación en el cumplimiento de la operación de la red, definiendo los indicadores de operación, indicando los puntos de monitoreo, fechas de campañas y otros (anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”).

3.4.3. Componente de aguas subterráneas

3.4.3.1. Capacitación sobre conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas y el uso de la hidrología isotópica en el conocimiento de estas

Se realizó una capacitación sobre el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas y el uso de la hidrología isotópica en el conocimiento de estas (anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”).

Esta capacitación estuvo dirigida al personal de la CAS y de otras autoridades ambientales regionales que están interesadas en fortalecer sus conocimientos en temas de monitoreo e hidrología isotópica. El objetivo general de dicha capacitación consistió en fortalecer los conocimientos sobre el monitoreo del agua subterránea a nivel regional y los conceptos básicos de la hidrología isotópica.

3.4.3.2. Priorización de puntos de monitoreo de la red de aguas subterráneas

En el 2024 se propone realizar 10 monitoreos de la red con profundidad de captación inferior a los 40 m y 10 monitoreos de puntos que se encuentran entre los 40 y 185 m. Luego, en el 2025 se tendrían 10 puntos adicionales para cada red y en el 2026 se tendría la red operando completamente (tabla 3. 11).



Tabla 3. 11. Puntos seleccionados para la red de monitoreo con profundidad de captación inferior a los 40 m y el año del inicio del monitoreo

Identificador	Fuente	Tipo de punto de agua	Formación geológica	Profundidad de captación (m)	X (m)	Y (m)	Año de perforación	Año de inicio del monitoreo
SAM1.1.1	SGC	Aljibe	Qal	4,4	1.033.430	1.297.471	N/A	2025
SAM1.1.2	SGC	Aljibe	Qal	3,8	1.053.806	1.287.457	N/A	2025
SAM1.1.3	SGC	Aljibe	N1r	10,0	1.034.450	1.276.913	N/A	2025
SAM1.1.4	SGC	Aljibe	N1r	19,0	1.046.015	1.271.544	N/A	2025
SAM1.1.5	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo	N1r	38,0	1.050.414	1.306.942	N/A	2025
SAM1.1.6	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo	N1r	32,0	1.041.994	1.315.218	N/A	2024
SAM1.1.7	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo	Qal	35,0	1.063.262	1.317.750	N/A	2024
SAM1.1.8	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	5,0	1.023.857	1.306.837	N/A	2025
SAM1.1.9	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	4,1	1.027.670	1.302.440	N/A	2025
SAM1.1.10	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	5,0	1.045.555	1.293.063	N/A	2025
SAM1.1.11	BD_MEGIA	Pozo	N1r	19,0	1.054.213	1.301.074	N/A	2025
SAM1.1.12	BD_MEGIA	Pozo	N1r	17,0	1.056.761	1.295.706	N/A	2025
SAM1.1.13	BD_MEGIA	Pozo	Qal	18,0	1.065.583	1.302.268	N/A	2024
SAM1.1.14	BD_MEGIA	Pozo de monitoreo	Qal	4,6	1.020.399	1.309.953	N/A	2025
SAM1.1.15	BD_MEGIA	Pozo	Qal	12,0	1.029.345	1.330.509	N/A	2026
SAM1.1.16	BD_MEGIA	Pozo	Qal	23,0	1.042.111	1.323.450	N/A	2024
SAM1.1.17	BD_MEGIA	Pozo de monitoreo	N1r	27,0	1.058.523	1.308.731	N/A	2024
SAM1.1.18	BD_MEGIA	Pozo	Qal	18,0	1.031.327	1.334.702	N/A	2024
SAM1.1.19	BD_MEGIA	Pozo	Qal	20,0	966.311	1.190.168	N/A	2026
SAM1.1.20	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	5,0	993.412	1.207.535	N/A	2026
SAM1.1.21	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	6,0	1.025.716	1.222.215	N/A	2026
SAM1.1.22	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	4,3	1.017.329	1.229.955	N/A	2026
SAM1.1.23	BD_MEGIA	Aljibe	N1r	6,0	1.026.580	1.251.478	N/A	2026
SAM1.1.24	BD_MEGIA	Aljibe	N1r	4,0	1.029.700	1.244.400	N/A	2026
SAM1.1.25	BD_MEGIA	Aljibe	N1r	14,0	1.031.228	1.280.787	N/A	2026
SAM1.1.26	BD_MEGIA	Pozo	Qal	12,0	1.019.660	1.287.463	N/A	2026
SAM1.1.27	BD_MEGIA	Aljibe	N1r	13,0	1.025.160	1.284.002	N/A	2026
SAM1.1.28	BD_MEGIA	Aljibe	N1r	6,0	1.050.654	1.278.372	N/A	2026
SAM1.1.29	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	6,0	1.017.740	1.296.458	N/A	2026
SAM1.1.30	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	6,0	1.025.758	1.292.191	N/A	2026
SAM1.1.31	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	7,0	1.035.707	1.287.459	N/A	2026



Identificador	Fuente	Tipo de punto de agua	Formación geológica	Profundidad de captación (m)	X (m)	Y (m)	Año de perforación	Año de inicio del monitoreo
SAM1.1.32	BD_MEGIA	Pozo	Qal	25,0	1.048.817	1.329.753	N/A	2024
SAM1.1.33	BD_MEGIA	Pozo	Qal	20,0	1.057.821	1.323.337	N/A	2024
SAM1.1.34	BD_MEGIA	Aljibe	Qal	15,0	1.030.956	1.341.371	N/A	2024
SAM1.1.35	PUNTO NUEVO	Piezómetro a construir	Qal	40	979.702	1.224.108	2025	2026
SAM1.1.36	PUNTO NUEVO	Piezómetro a construir	Qal	40	1.011.716	1.195.533	2024	2024
SAM1.1.37	PUNTO NUEVO	Piezómetro a construir	Qal	40	1.006.160	1.242.100	2025	2026
SAM1.1.38	PUNTO NUEVO	Piezómetro a construir	Qal	40	1.019.654	1.259.298	2025	2026

La priorización de los puntos de monitoreo con profundidad de captación entre los 40 y 185 m es similar y está establecida en la tabla 3.12.

Tabla 3. 12. Puntos que conforman la red de monitoreo de aguas subterráneas con captación superior a los 40 m de profundidad

Identificador	Fuente	Tipo de punto de agua	Formación geológica	Profundidad de captación (m)	Uso actual	X (m)	Y (m)	Año de perforación	Año de inicio del monitoreo
SAM1.1.39	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo	N1r	60	No registra	1.050.532	1.278.832	N/A	2025
SAM1.1.40	BD_MEGIA	Pozo de monitoreo	Qal	71	No registra	1.022.897	1.308.552	N/A	2025
SAM1.1.41	BD_MEGIA	Pozo	Qal	80	Abastecimiento público	1.028.301	1.291.369	N/A	2025
SAM1.1.42	BD_MEGIA	Pozo	Qal	75	Agrícola	1.034.154	1.341.572	N/A	2024
SAM1.1.43	BD_MEGIA	Pozo	Qal	72	Abastecimiento público	1.035.467	1.312.342	N/A	2024
SAM1.1.44	BD_MEGIA	Pozo	Qal	73	No registra	1.044.155	1.330.758	N/A	2024
SAM1.1.45	BD_MEGIA	Pozo	Qal	72	Doméstico	1.053.602	1.321.698	N/A	2024
SAM1.1.46	BD_MEGIA	Pozo	N1r	78	Doméstico	1.056.754	1.264.495	N/A	2025
SAM1.1.47	BD_MEGIA	Pozo profundo	Qal	76,5	Uso industrial	1.068.070	1.307.970	N/A	2024
SAM1.1.48	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo profundo	N1r	80	No registra	1.041.849	1.297.196	N/A	2024
SAM1.1.49	ISOTOPOS-MEGIA	Pozo profundo	Qal	100	No registra	1.038.152	1.287.918	N/A	2025
SAM1.1.50	SGC	Pozo	Qal	52	No registra	1.048.118	1.291.004	N/A	2024



LÍNEA BASE AMBIENTAL HIDROLÓGICA Y DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA
Acuerdo de Cooperación Ecopetrol – Ideam

Identificador	Fuente	Tipo de punto de agua	Formación geológica	Profundidad de captación (m)	Uso actual	X (m)	Y (m)	Año de perforación	Año de inicio del monitoreo
SAM1.1.51	SGC	Pozo	N1r	60	No registra	1.030.808	1.281.609	N/A	2025
SAM1.1.52	SGC	Pozo	N1r	90	No registra	1.033.872	1.301.696	N/A	2025
SAM1.1.53	SGC	Pozo	N1r	56	No registra	1.047.631	1.304.703	N/A	2024
SAM1.1.54	SGC	Pozo	N1r	70	No registra	1.056.494	1.299.994	N/A	2024
SAM1.1.55	SGC	Pozo	Qal	84	No registra	1.053.144	1.283.970	N/A	2024
SAM1.1.56	SGC	Pozo	N1r	71	No registra	1.048.487	1.272.950	N/A	2025
SAM1.1.57	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.017.892	1.285.975	N/A	2025
SAM1.1.58	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.018.249	1.295.513	N/A	2025
SAM1.1.59	BD_MEGIA	Pozo	Tmm	100	Doméstico	965.752	1.212.349	N/A	2026
SAM1.1.60	BD_MEGIA	Pozo	Tmm	80	Abastecimiento Público	1.014.304	1.226.347	N/A	2026
SAM1.1.61	BD_MEGIA	Pozo	Qal	70	Abastecimiento Público	1.022.044	1.237.019	N/A	2026
SAM1.1.62	BD_MEGIA	Piezómetro	N1r	43	Doméstico	1.031.250	1.244.966	2025	2026
SAM1.1.63	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.017.006	1.256.643	2025	2026
SAM1.1.64	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.031.981	1.225.913	2025	2026
SAM1.1.65	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.006.663	1.252.747	2025	2026
SAM1.1.66	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.001.028	1.239.564	2025	2026
SAM1.1.67	Por construir	Piezómetro	N1r	100	N/A	984.085	1.195.433	2025	2026
SAM1.1.68	Por construir	Piezómetro	N1r	100	N/A	1.003.399	1.182.733	2025	2026
SAM1.1.69	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	960.801	1.189.348	2025	2026
SAM1.1.70	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	970.855	1.178.764	2025	2026
SAM1.1.71	Por construir	Piezómetro	N1r	100	N/A	978.682	1.168.623	2025	2026
SAM1.1.72	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	986.946	1.231.164	2025	2026
SAM1.1.73	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	998.074	1.210.184	2025	2026
SAM1.1.74	Por construir	Piezómetro	Qal	100	N/A	1.014.346	1.199.468	2025	2026

Fuente: elaboración propia.



3.4.3.3. Taller sobre validación de datos provenientes de la red de aguas subterráneas

El taller sobre la verificación de los datos provenientes de la red regional de aguas subterráneas consistió en mostrar los aspectos relacionados con la verificación de variables como el nivel piezométrico, los parámetros *in situ* y los iones mayoritarios.

3.4.4. Avances transversales a los componentes hidrometeorológicos, de calidad del agua superficial y de aguas subterráneas

3.4.4.1. Cartilla para la verificación del dato proveniente de la red de monitoreo regional de calidad del agua superficial y subterránea de la CAS

El objetivo general de la guía consiste en presentar los procedimientos necesarios para la verificación de los datos de monitoreo generados en la red de referencia regional, tanto de calidad del agua superficial como de la subterránea (calidad y cantidad).

La guía está dirigida a los profesionales de la CAS, que comienzan con la verificación de la información, considerando las principales variables de monitoreo de calidad del agua superficial y de cantidad y calidad del agua subterránea a nivel regional establecidas en el Pirma. La guía está enfocada en presentar de manera clara, concreta y precisa los procedimientos de análisis primarios necesarios para la verificación de los datos generados a partir de los monitoreos de estas variables.

En el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS.

Fase de planificación y formulación” se puede consultar el detalle de la guía.

3.4.4.2. Recopilación de formatos para el monitoreo hidrometeorológico, de calidad del agua y de aguas subterráneas

Como parte de las actividades para apoyar la implementación del Pirma de la CAS se construyó un documento en el cual se recopilan los diferentes formatos relevantes para la implementación de las redes de monitoreo del recurso hídrico. El uso adecuado de dichos formatos y su correcto diligenciamiento para las diferentes actividades relacionadas con el monitoreo hidrometeorológico, de calidad del agua y aguas subterráneas es la base para que el proceso de recolección y gestión de datos y divulgación de la información se realice de manera adecuada, y garantizando un nivel alto de calidad.

Para la recopilación de dichos formatos asociados al monitoreo hidrometeorológico se revisó el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (Ideam & Invemar, 2021), guías de la OMM (Organización Meteorológica Mundial, 2020) y formatos del mapa de procesos del Ideam (Ideam, 2023).

A partir de esta revisión se construyó un documento que recopila estos formatos e incluye una guía para el correcto diligenciamiento de cada uno de estos (ver anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”).

A continuación, se enumeran los formatos incluidos dentro del documento:

- Formato de lista de chequeo para el monitoreo del recurso hídrico
- Formato de relación de equipos y herramientas para comisión



- Formato de resumen de aforo y cálculo del caudal
- Formato de cartera de aforos
- Libreta para observaciones mensuales de niveles, temperaturas del agua y muestreo de sedimentos en suspensión
- Formato de cartera de nivelación
- Formato diario de observaciones pluviométricas y fenómenos atmosféricos
- Formato de acta de instalación de estaciones hidrometeorológicas automáticas
- Formato de acta de otorgamiento de permiso para uso de predio
- Formato de instalación, mantenimiento y verificación de estaciones hidrometeorológicas
- Formato de informe técnico de visita a estaciones hidrometeorológicas
- Formato de hoja de vida de instrumentos y equipos
- Formato de captura de datos en campo para agua superficial (parámetros físico-químicos)
- Formato de captura de datos en campo para macroinvertebrados acuáticos y diatomeas
- Formato de toma de niveles de agua subterránea
- Formato de pruebas de bombeo
- Formato de toma de datos de calidad de aguas subterráneas
- Formato de toma de muestras de isótopos en agua lluvia
- Formato de toma de muestras mensuales de isótopos en agua lluvia

- Formato de toma de muestras de isótopos en agua superficial
- Formato de toma de muestras de isótopos en agua subterránea

3.4.4.3. Documento con la programación, seguimiento y evaluación del cumplimiento de la operación de la red regional de calidad del agua superficial y de aguas subterráneas

En el marco de la fase de planificación del Pirma se desarrolló un sistema de seguimiento y evaluación de su implementación, en el cual se incluye el Sistema de Observación, Medición y Vigilancia. El objetivo de ese sistema consiste en medir y analizar el desempeño de las actividades de la Matriz de Marco Lógico del Pirma y su plan operativo, así como los proyectos y actividades de su fase de formulación, a fin de gestionar con mayor eficiencia los resultados, efectos y productos de la MML, identificar deficiencias en la implementación y proponer acciones correctivas.

Basado en este contexto se plantearon los siguientes momentos para el seguimiento y la evaluación:

- Informes anuales de seguimiento que incluyen el análisis del cumplimiento de las metas anuales y productos establecidos en los Planes de Acción Anual de la CAS, en relación con la implementación del Pirma, la MML y el POI, teniendo como base la información recabada en los formatos de seguimiento establecidos. Estos informes estarán a cargo del Comité de Seguimiento del Monitoreo del Agua o el grupo de trabajo que defina la CAS.
- Informe de revisión cada tres años, acorde con los períodos y en el marco de los Planes de Acción Trianales coincidentes con el período establecido para la



implementación del Pirma (2022-2032). Este informe incluye el seguimiento y la evaluación del Programa, en particular de las metas, productos e hitos del Pirma, así como el porcentaje de avances e indicadores en el marco de la MML y su plan operativo. Igualmente, el informe debe presentar en qué medida se están cumpliendo los objetivos específicos del Pirma y generar recomendaciones para que se tomen acciones correctivas si se considera necesario. Esta tarea estará a cargo del Comité de Seguimiento del Monitoreo del Agua o el grupo de trabajo que defina la CAS, y será revisada por los subdirectores de las dependencias con funciones en el monitoreo y en el Pirma, así como por la secretaría general.

- Informe de evaluación intermedia del Programa. En el quinto año de implementación del Pirma, es decir, en 2027, se elaborará un documento riguroso, en lo posible por un actor independiente a la CAS, para determinar en qué medida se lograron los objetivos estipulados e identificar deficiencias y acciones correctivas que permitan alcanzar los resultados estipulados para el final del periodo de implementación (2032). Los insumos serán suministrados por el Comité Coordinador del Monitoreo del Agua, o el grupo de trabajo que defina la CAS, y la secretaría general, y pasará a ser revisado por el Comité Directivo de la Corporación.
- Informe final de evaluación del Programa. Al final del período de implementación del Pirma (2032), se elaborará un documento

con una valoración rigurosa, amplia y objetiva, para determinar en qué medida se lograron los objetivos estipulados y estos contribuyeron a la toma de decisiones. Este informe será realizado, en la medida de lo posible, por un actor independiente a la CAS, con los insumos del Comité Coordinador del Monitoreo del Agua, o el grupo de trabajo que defina la CAS, y la Secretaría General, y pasará a revisión del Comité Directivo de la Corporación. Este documento servirá como insumo para la actualización del Pirma.

Respecto a la operación de las redes de monitoreo se debe realizar un informe de evaluación anual, con base en los indicadores presentados en los siguientes párrafos, así como el trianual y el final.

En cada uno de estos momentos se deben presentar la evaluación y seguimiento en el cumplimiento de la operación de la red regional de aguas subterráneas, bajo el Sistema de Observación, Medición y Vigilancia del Pirma (SOMV). Para ello se propone un formato específico para el seguimiento y evaluación (tabla 3.13) de aguas subterráneas, y otro para la red de calidad del agua superficial (tabla 3.14). Estos formatos consideran la implementación del SOMV, no solo en el seguimiento de los puntos de las redes de monitoreo, sino también en el avance y cumplimiento en la instalación de las estaciones, incluyendo la perforación y adecuación de piezómetros.



Tabla 3.13. Propuesta de formato de seguimiento y evaluación para la implementación del SOMV

Red de monitoreo regional de aguas subterráneas												
Año	% de avance de piezómetros instalados	% de cumplimiento en el monitoreo de niveles piezométricos	% de cumplimiento en el monitoreo hidrogeológico y de calidad	% de cumplimiento en el monitoreo isotópico	% de mantenimiento de pozos y piezómetros	% de cumplimiento en la frecuencia de monitoreo de niveles piezométricos	% de cumplimiento en la frecuencia de monitoreo hidrogeológico, de calidad e isotópico	% de cumplimiento en las variables hidrogeoquímicas y de calidad				
								Básicas	Área agrícola	Sector de hidrocarburos	Pecuaria	Saneamiento básico
2024												
2025												
2026												
2027												
2028												
2029												
2030												
2031												
2032												

Tabla 3.14. Propuesta de formato de seguimiento y evaluación para la implementación del SOMV

Año	% de puntos monitoreados	% de campañas de monitoreo	% de cumplimiento en las variables físico-químicas en el agua	% de cumplimiento en las variables microbiológicas	% de cumplimiento en las variables hidrobiológicas	% de cumplimiento en las variables en sedimentos
2023						
2024						
2025						
2026						
2027						
2028						
2029						
2030						
2031						
2032						



Las tablas 3.13 y 3.14 deben ser completadas anualmente y estarán a cargo del Comité de Monitoreo del Agua. Para cada indicador se debe colocar el porcentaje calculado y se propone el siguiente esquema de colores para facilitar la evaluación del cumplimiento de la operación de la red:

- Verde: porcentaje de avance mayor al 70 %

- Naranja: porcentaje de avance entre el 50 y el 70 %
- Rojo: porcentaje de avance menor al 50 %

El detalle de los indicadores puede consultarse en el anexo “Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación”.





4. BOLETINES DE PRONÓSTICO Y ALERTA EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

4. 1. Generación de información hidrometeorológica y de calidad del agua superficial a través del Centro Regional de Pronóstico y Monitoreo

Hidrometeorológico del Valle Medio del Magdalena

En la tabla 4. 1 se muestra el número desglosado por año de boletines para el Valle Medio del Magdalena, que suman un total de 635 boletines.

Tabla 4. 1. Boletines emitidos durante la ejecución del acuerdo de cooperación AC 04

Año	Boletín Del Valle Medio Del Magdalena	
	Número serial de boletines emitidos	Total De Boletines Emitidos Por Año
2021	1-159	159
2022	1- 428	428
2023	429-635	207

Fuente: elaboración propia (2023).

Inicialmente, el área cubierta por los boletines correspondió a las siguientes subzonas hidrográficas:

- SZH del río Lebrija
- SHZ Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena Medio
- SZH del río Sogamoso
- SHZ del río Chicamocha
- SZH del río Fonce
- SZH del río Suárez
- SZH del río Opón
- SHZ del río Carare
- SZH Directos al Magdalena entre los ríos Negro y Carare
- SZH del río Chitagá



Posteriormente, se amplió el área de influencia del acuerdo de cooperación AC 4 y se incluyeron las siguientes subzonas hidrográficas:

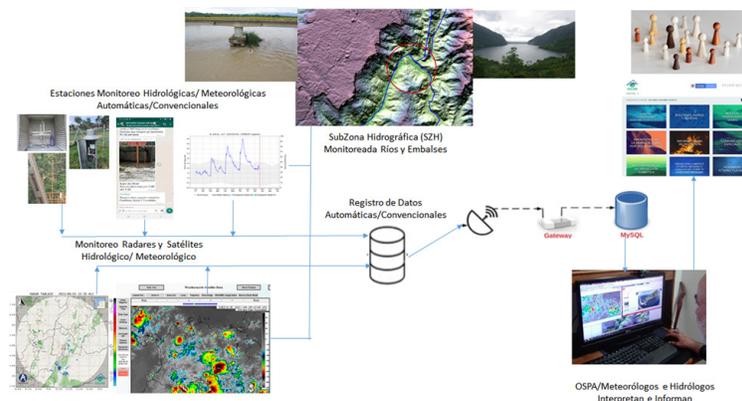
- SZH Río Cimitarra
- SZH Directos al Magdalena entre los ríos Seco y Negro
- SZH Río Negro
- SZH Directos al Magdalena (Brazo Morales)

El esquema metodológico generalizado del pronóstico de alertas comprende dos grandes

componentes: el meteorológico y el hidrológico, que se explicarán a continuación. Dentro del esquema metodológico, en forma complementaria, se tienen en cuenta toda una serie de parámetros propios de cada SZH, a partir de análisis geográficos locales y resultados de los reportes diarios de previsiones de deslizamientos y de incendios.

En la figura 4.1. se muestra el esquema metodológico adoptado para la generación de pronósticos y alertas hidrometeorológicas.

Figura 4. 1. Esquema metodológico general de pronóstico de alertas



Fuente: Ideam (2023).

4. 1. 1. Componente meteorológico para el pronóstico del tiempo

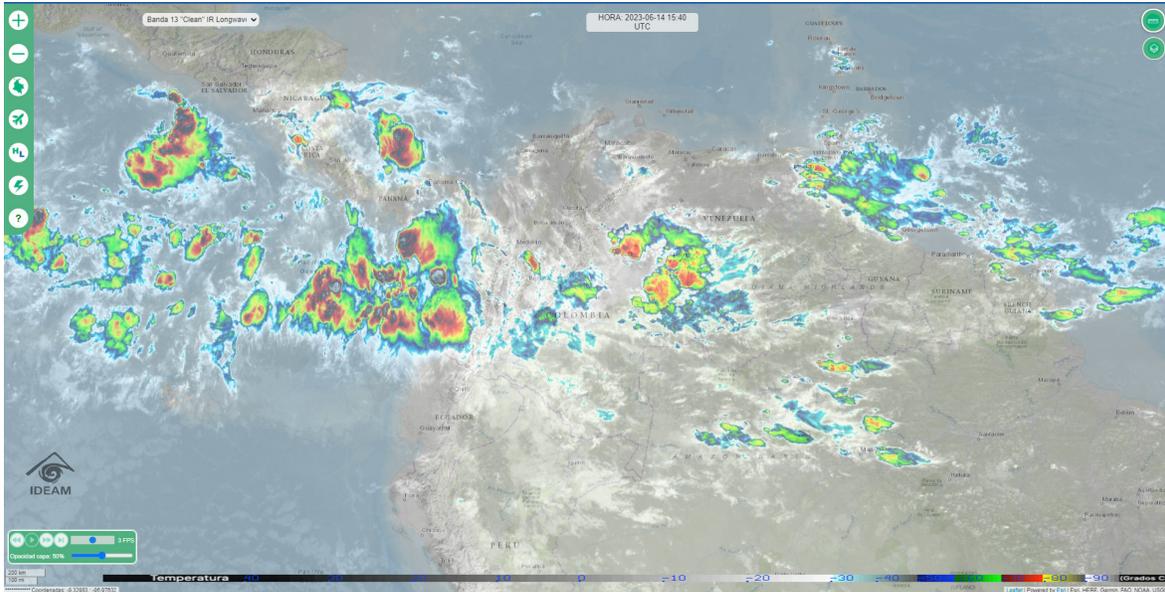
Se realiza un monitoreo de las condiciones meteorológicas actuales de escalas sinópticas a diferentes escalas espaciales, con ayuda de imágenes de radar (Barrancabermeja y Tablazo), y de imágenes satelitales en los canales infrarrojo, visible y vapor de agua, respectivamente. Estas son proporcionadas por el Ideam, además de otras fuentes de imágenes satelitales externas de uso público³.

Con la participación de la Oficina del Servicio de Pronósticos y Alertas del Ideam (OSPA), se analizan los productos emitidos por el Ideam y otros modelos diferentes de pronóstico del tiempo, entre ellos: GFS, GEM, ICON y ECMWF. Adicionalmente, se tiene en cuenta la carta de superficie y el análisis de vientos en diferentes niveles de altura, como 850 hPa, 700 hPa y 200 hPa, para identificar las zonas de convergencia y divergencia, los sistemas de alta y baja presión, entre otros. Todo ello corresponde al análisis de la situación sinóptica a nivel de macro y microescala para hacer un diagnóstico de la tendencia del estado del tiempo proyectado a tres días (ver figuras 4.2, 4.3 y 4.4).

3 Entre ellas: <https://rammb2.cira.colostate.edu/>, <https://re.ssec.wisc.edu/> y <https://www.weathernerds.org/>.

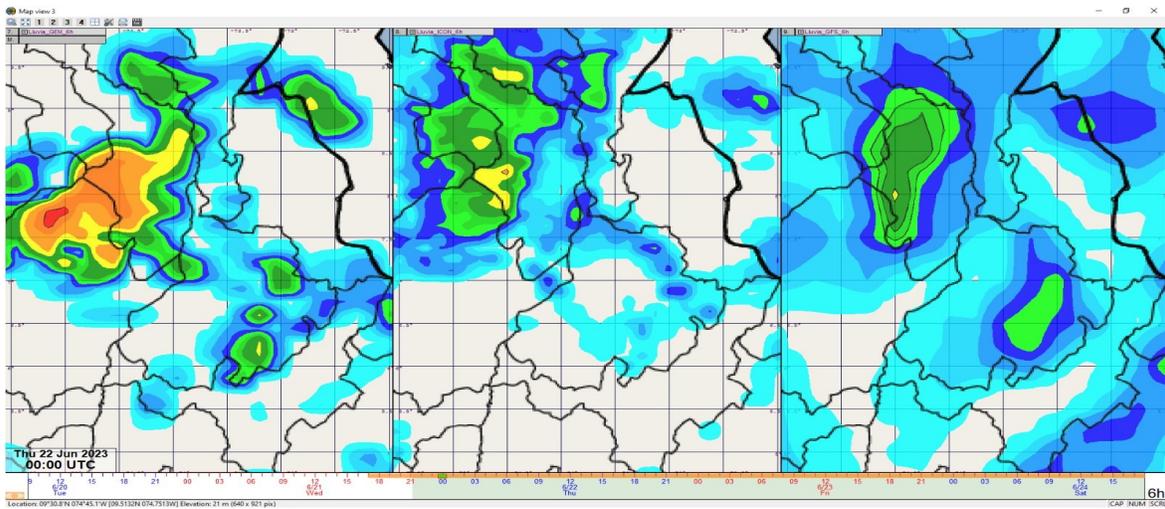


Figura 4. 2. Previsiones de precipitaciones. Imagen canal IR.



Fuente: Ideam (2023).

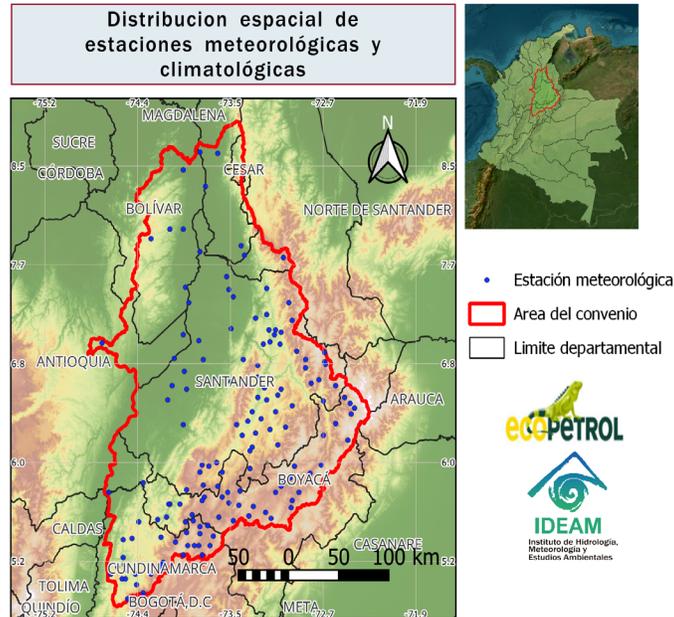
Figura 4. 3. Herramienta Smartmet. Modelos de pronóstico.
Imagen de la derecha: GEM, centro: ICON, izquierda: GFS.



Fuente: Ideam (2023).



Figura 4. 4. Distribución espacial de las estaciones del Ideam



Fuente: elaboración propia, 2023.

4. 1. 2. Componente hidrológico para el pronóstico y alertas

Los datos de precipitación y de los niveles de los ríos que se presentan en las subzonas hidrográficas (SZH) del área de estudio son reportados por estaciones automáticas y convencionales. Estos datos se centralizan e integran con series históricas en el centro operativo de la OSPA, donde se depuran, analizan e interpretan para finalmente generar reportes de las condiciones hidrológicas de cada subzona hidrográfica, y luego son divulgados a las comunidades de interés.

La información hidrometeorológica que recibe el centro operativo de la OSPA se integra en el Sistema Operacional de Pronóstico Hidrológico para Colombia-plataforma FEWS, desarrollada con fines de pronóstico hidrológico a escala nacional para hacer seguimiento y modelación de los cuerpos hídricos por subzona hidrográfica. Mediante esta plataforma el Ideam gestiona los procesos de pronóstico hidrológico (modelación hidrológica, hidráulica

y estadística), e integra los datos de series de tiempo de diferentes fuentes y formatos provenientes del mismo Instituto y de las corporaciones autónomas regionales del Valle del Cauca (CVC) y la de Cundinamarca (CAR).

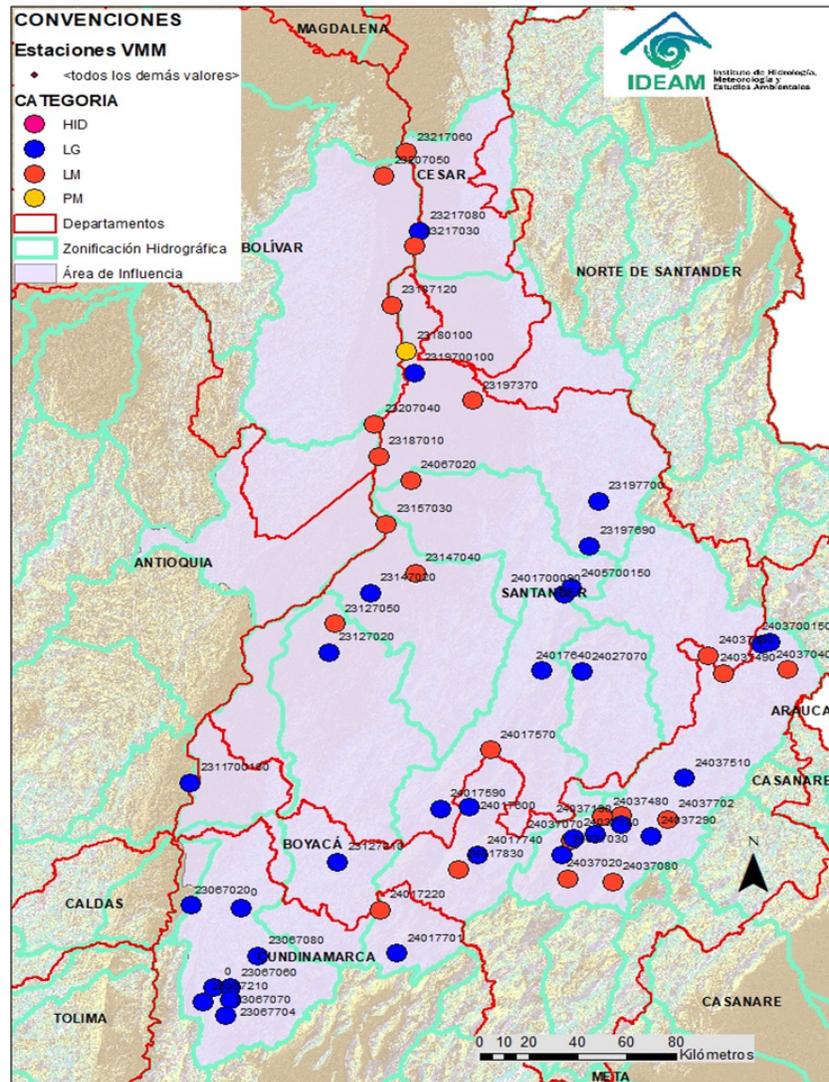
La plataforma FEWS posee una versión de escritorio utilizada por los hidrólogos como herramienta para llevar a cabo las labores operativas en torno al pronóstico hidrológico y la emisión de alertas tempranas. Además, existe una versión web de la plataforma FEWS4 para consulta de los usuarios externos, en la que se puede conocer el estado de las alertas hidrológicas y visualizar el nivel del agua de algunas estaciones usadas para hacer el monitoreo.

En la figura 4.5 se muestra la red de estaciones del Ideam disponibles para el seguimiento del nivel de los ríos dentro del área de influencia del estudio.

4 <http://fews.Ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>.



Figura 4.5. Distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas disponibles en el área de interés



Fuente: elaboración propia (2023), a partir de información de Dhime y FEWS.

En el proceso de análisis jerárquico y heurístico se evalúan los registros de las lluvias acumuladas para los intervalos de 1, 3, 6, 12 y 24, y 48 y 72 horas, y se realiza un monitoreo de los niveles de las corrientes de los ríos a partir de estaciones automáticas y convencionales, y vertimientos de represas a corrientes (como el embalse de Topocoro).

Dentro de los análisis que se llevan a cabo en el componente hidrológico para el pronóstico de alertas se participa activamente en dos briefings hidrológicos, a las 8:00 a. m. y a las 2:00 p. m. para analizar de manera conjunta el estado de las SZH entre el hidrólogo nacional de turno de la OSPA y el hidrólogo regional, quienes hacen uso de las herramientas anteriormente mencionadas.



4. 2. Componentes del boletín

A continuación, se presenta el contenido del boletín de alertas hidrometeorológicas para el Valle Medio del Magdalena con una breve descripción de cada componente.

La página inicial del boletín corresponde a la presentación de este, donde se indica su título, número serial del boletín y fecha de publicación (figura 4. 6).

Figura 4. 6. Sección de presentación del boletín

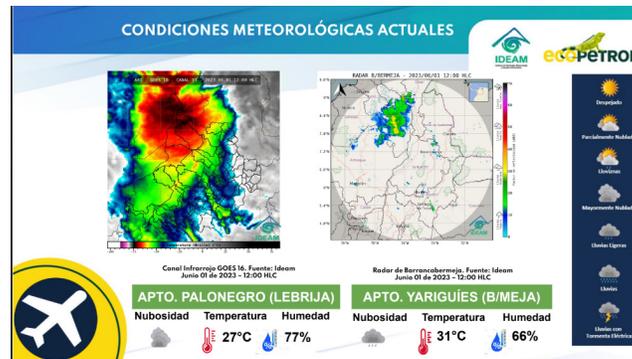


Fuente: Ideam (2023).

Las condiciones meteorológicas actuales contiene las imágenes del canal infrarrojo del satélite GOES - 16 y del radar de Barrancabermeja, proporcionadas por el Ideam, que se presenta en la figura 4. 7. Así

mismo, datos de temperatura, humedad relativa y tipo de nubosidad que reflejan las condiciones del momento de elaboración del boletín para los aeropuertos de Lebrija y Barrancabermeja.

Figura 4. 7. Sección de condiciones meteorológicas actuales. Imagen satelital IR/VIS, imagen de radar y datos de los aeropuertos de Lebrija y Barrancabermeja.



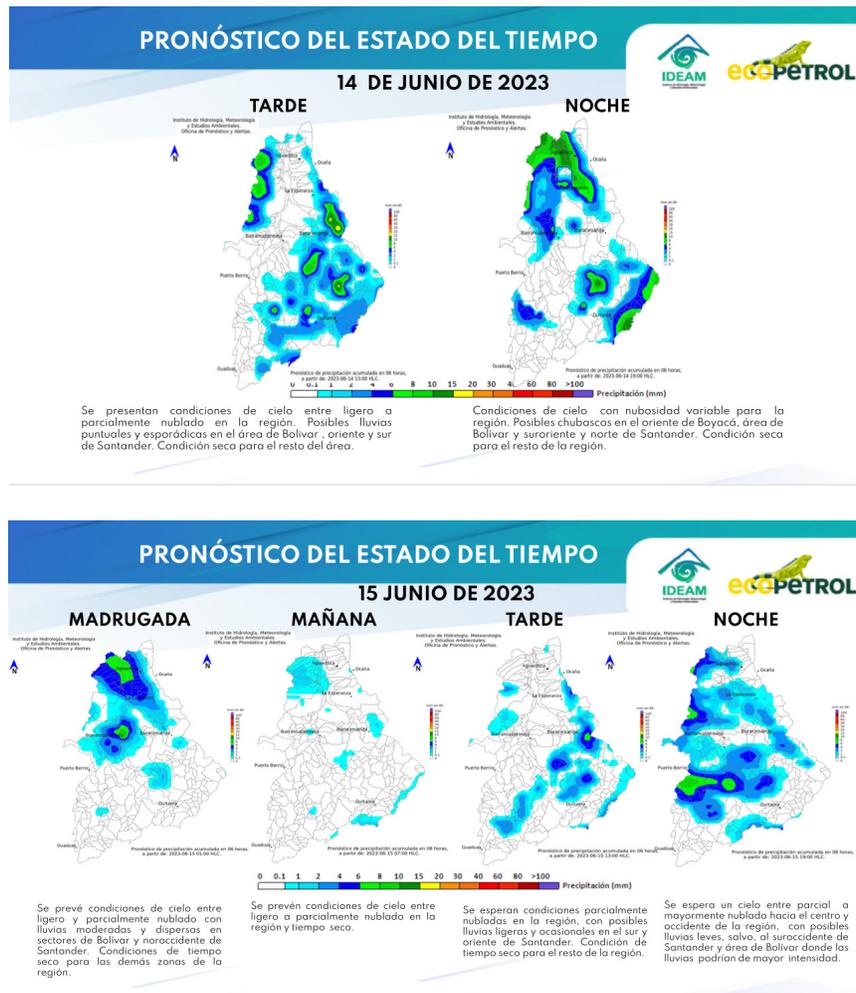
Fuente: Ideam (2023).



El estado del tiempo contiene el pronóstico para la tarde y la noche del día consultado, y las cuatro jornadas del día siguiente, adjuntando el mapa de pronóstico para cada una de las jornadas respectivas que proporciona la

Oficina del Servicio de Pronósticos y Alertas (OSPA), una vez está desarrollado el análisis sinóptico como se aprecia en la figura 4.8. Así mismo, se acompaña con una descripción textual del pronóstico.

Figura 4.8. Sección de pronóstico del estado del tiempo. Mapas de pronóstico de la herramienta Smartmet.



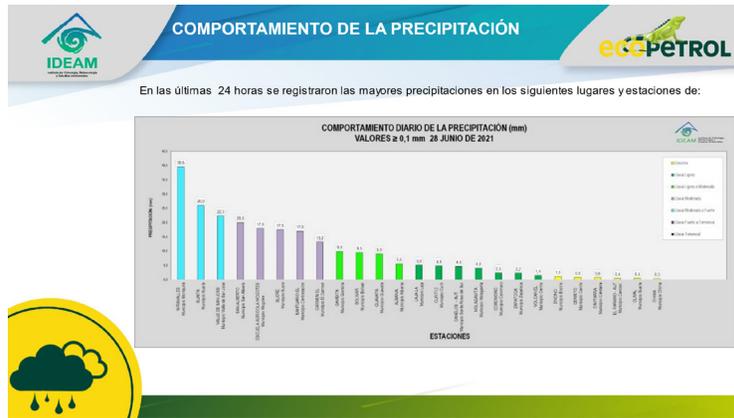
Fuente: Ideam (2023).

La sección de comportamiento de la precipitación presenta la precipitación del último día meteorológico reportado por estaciones

meteorológicas y climatológicas, tanto convencionales como automáticas (ver figura 4.9).



Figura 4.9. Sección del comportamiento de la precipitación acumulada del último día meteorológico, desde las 7:00 a. m. del día anterior hasta las 7:00 a. m. del día siguiente.

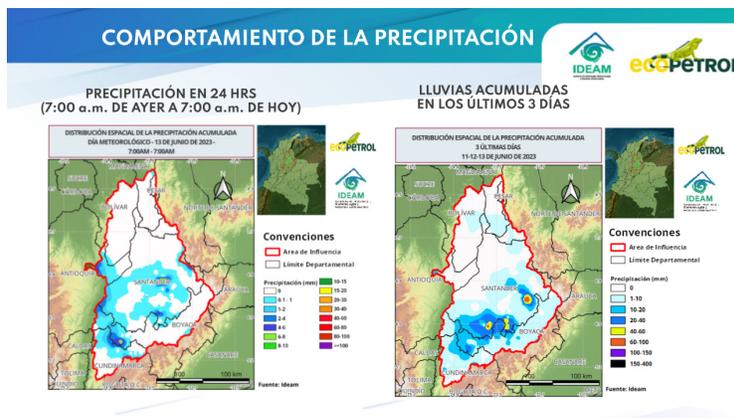


Fuente: Ideam (2023).

La sección de precipitación de las últimas 24 horas y 72 contiene los mapas de precipitación del día meteorológico y la acumulada

de los últimos tres días, donde se muestra la distribución espacial de la precipitación en el área de estudio, como se ve en la figura 4.10.

Figura 4.10. Sección del comportamiento de la precipitación del último día meteorológico y las 72 horas anteriores



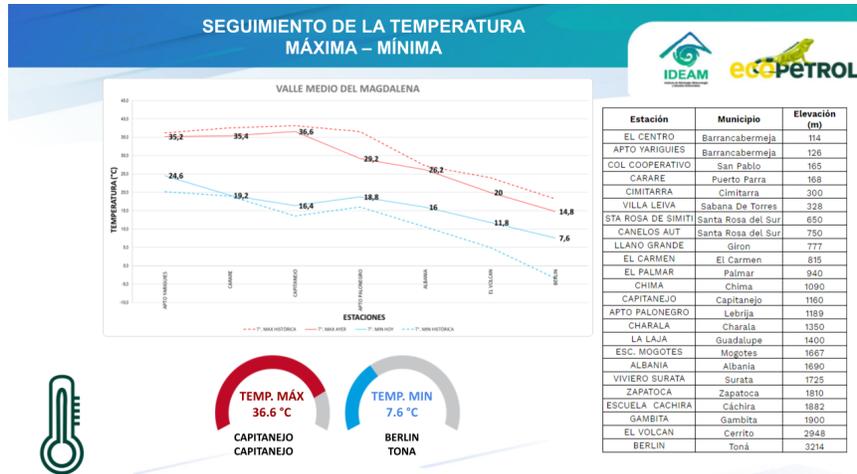
Fuente: Ideam (2023).

La sección de seguimiento de la temperatura máxima contiene el comportamiento de las temperaturas máximas (del día anterior) y mínimas (del día consultado) de estaciones

climatológicas con datos, generando una gráfica comparativa con sus registros históricos mensuales que se puede apreciar en la figura 4.11.



Figura 4.11. Sección del seguimiento a temperaturas máximas y mínimas



Fuente: Ideam (2023).

En la sección de alertas hidrológicas vigentes se presentan las alertas de las 13 subzonas hidrográficas que se encuentran dentro del área de influencia del estudio del Valle Medio del Magdalena, las cuales son:

- SZH Río Cimitarra
- SZH Directos al Magdalena entre los ríos Seco y Negro
- SZH Río Negro
- SZH Directos al Magdalena entre los ríos Negro y Carare
- SZH Río Carare
- SZH Río Opón
- SZH Río Suárez
- SZH Río Fonce
- SZH Río Chicamocha
- SZH Río Lebrija
- SZH Directos al Magdalena (Brazo Morales)

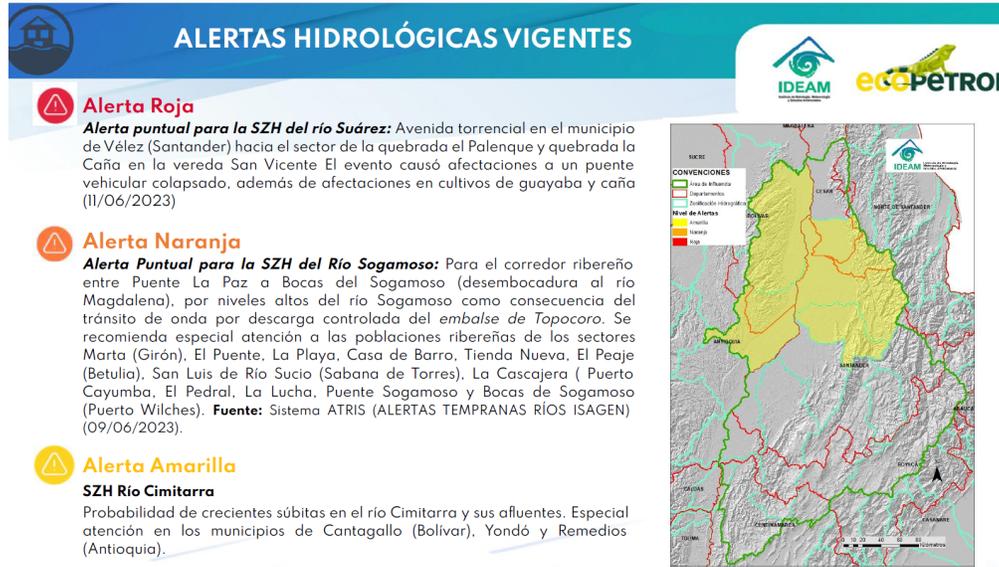
- SZH Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena Medio

Las alertas hidrológicas vigentes se presentan por grupos de alertas: roja, naranja, amarilla, condiciones normales y niveles bajos, indicando cuáles SZH se encuentran en cada grupo, junto con las alertas puntuales de cada SZH generadas por un evento catastrófico de origen hidrológico.

La clasificación y emisión de las alertas hidrológicas vigentes se lleva a cabo a través de la verificación de los niveles de los ríos monitoreados, teniendo en cuenta los umbrales de alerta, niveles máximos y mínimos, eventos catastróficos de origen hidrológico actuales y el pronóstico de la precipitación en cada SZH.

En la figura 4.12 se muestra el formato de las páginas correspondientes a las alertas hidrológicas vigentes, clasificadas por el nivel de alerta y con el mapa de las alertas respectivas por subzona hidrográfica, dentro del área de influencia del estudio.

Figura 4.12. Sección de alertas hidrológicas vigentes



Fuente: Ideam (2023).

En la sección de seguimiento de niveles de los ríos se muestran ocho estaciones que por sus condiciones hidrológicas son del interés para

el área de influencia del estudio, las cuales se encuentran ubicadas en diferentes subzonas hidrográficas, como se muestra en la tabla 4. 2.



Tabla 4. 2. Estaciones utilizadas para el seguimiento de los niveles de los ríos

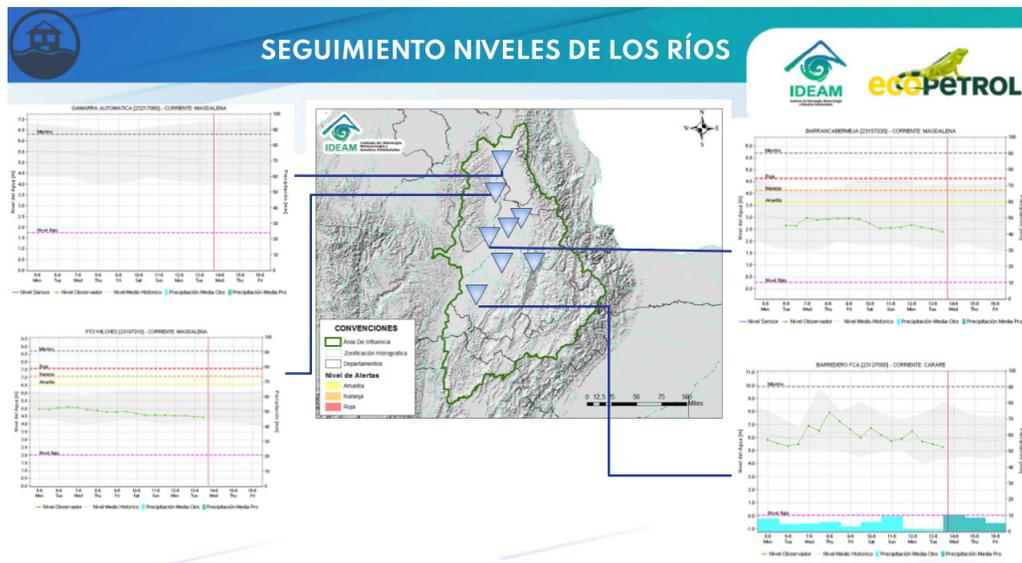
Subzona Hidrográfica	Estación
SZH Río Carare	Barredero Finca [23127050]
SZH Río Opón	Barrancabermeja - Aut [23157030]
	Puente Ferrocarril [23147020]
SZH Sogamoso	El Juncal - Aut [2405700149]
	San Rafael [23197370]
SZH Río Lebrija	Puerto Wilches [23187010]
	Palogordo - Aut [23197690]
SZH Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena Medio	Gamarra - Aut [23217080]

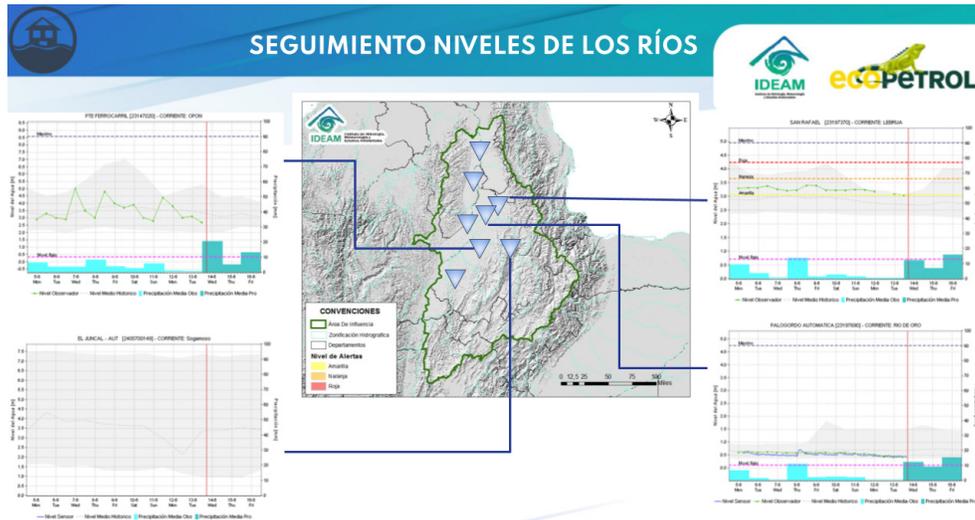
Fuente: elaboración propia (2023).

En la figura 4.13 se presentan las páginas correspondientes al seguimiento de los niveles de los ríos. La información presentada en cada gráfica corresponde al registro del nivel del agua de los últimos diez (10) días del cuerpo

hídrico analizado, junto con los umbrales de alerta (amarilla, naranja y roja), además de los niveles promedio máximos y mínimos históricos.

Figura 4.13. Sección de seguimiento de los niveles de los ríos





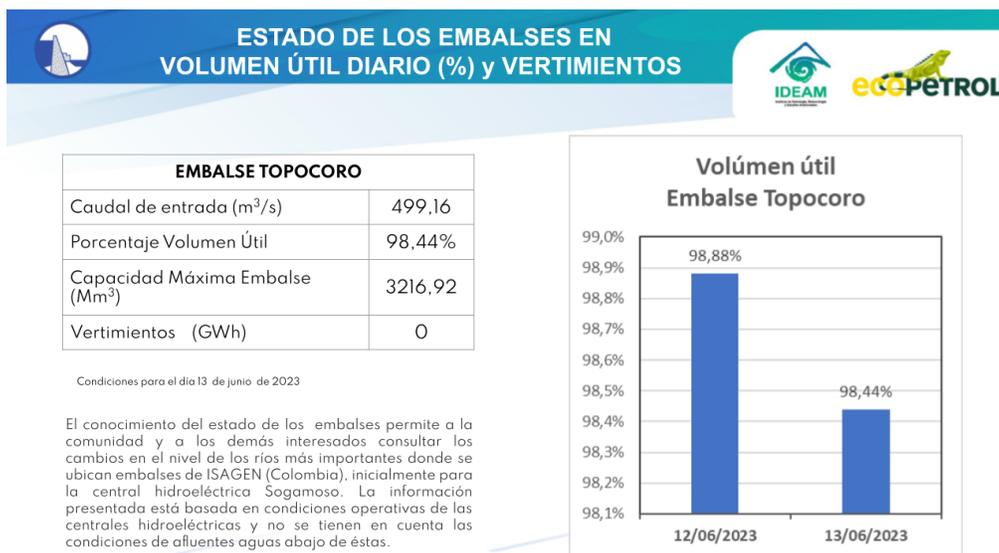
Fuente: Ideam (2023).

La sección de estado de los embalses permite a la comunidad y a los demás interesados consultar los cambios en el nivel de los ríos más importantes donde se ubican embalses de Isagén, inicialmente para la central hidroeléctrica Sogamoso, correspondiente al embalse del Topocoro.

haciendo énfasis en el volumen útil, el caudal de entrada, la capacidad máxima y sus vertimientos. La información presentada está basada en las condiciones operativas de las centrales hidroeléctricas y no se tienen en cuenta las circunstancias de los afluentes aguas abajo de estas.

En la figura 4.14 se muestra la página correspondiente al estado del embalse del Topocoro,

Figura 4.14. Sección del estado de los embalses



Fuente: Ideam (2023).



En la figura 4.15 se muestra la iconografía utilizada en las secciones de alertas hidrológicas vigentes, seguimiento de los niveles de los ríos

y estado de los embalses, con el fin de ampliar la información de lo que se mostró en las secciones anteriores.

Figura 4.15. Sección iconografía de términos hidrológicos



ICONOGRAFÍA DE TÉRMINOS HIDROLÓGICOS

ALERTAS HIDROLÓGICAS



 **Alerta ROJA**
 **Alerta NARANJA**
 **Alerta AMARILLA**
 **CONDICIONES NORMALES**

PARA TOMAR ACCIÓN Advierte a los sistemas de prevención y atención de desastres sobre la amenaza que puede ocasionar un fenómeno con efectos adversos sobre la población, el cual requiere la atención inmediata por parte de la población y de los cuerpos de atención y socorro. Se emite una alerta sólo cuando la identificación de un evento extraordinario indique la probabilidad de amenaza inminente y cuando la gravedad del fenómeno implique la movilización de personas y equipos, interrumpiendo el normal desarrollo de sus actividades cotidianas.

PARA PREPARARSE Indica la presencia de un fenómeno. No implica amenaza inmediata y como tanto es catalogado como un mensaje para informarse y prepararse. El aviso implica vigilancia continua ya que las condiciones son propicias para el desarrollo de un fenómeno, sin que se requiera permanecer alerta.

PARA INFORMARSE Es un mensaje oficial por el cual se difunde información. Por lo regular se refiere a eventos observados, registrados o pronosticados y puede contener algunos elementos de pronóstico a manera de orientación. Por sus características pretéritas y futuras difiere del aviso y de la alerta, y por lo general no está encaminado a alertar sino a informar.

CONDICIONES NORMALES La información que se suministra se encuentra dentro de los rangos normales.

FEWS COLOMBIA
SISTEMA DE PRONÓSTICO HIDROLÓGICO Y ALERTAS TEMPRANAS

Nota 1: Es probable que los eventos hidrológicos reportados en las alertas emitidas no se estén presentando sobre los ríos principales sino sobre sus afluentes.
Nota 2: El IDEAM le recomienda a la población ribereña estar muy atenta al comportamiento de los niveles de los ríos y atender las recomendaciones que la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (emita para la implementación de medidas de contingencia ante posibles afectaciones por desbordamientos e inundaciones.

Consulte aquí el estado de los niveles en los ríos del país:
<http://fews.ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>



ICONOGRAFÍA DE TÉRMINOS HIDROLÓGICOS

RÍOS Y CORRIENTES



CONVENCIONES

	Lluvias	Lluvias antecedentes intensas o continuas y/o pronostico de las mismas, las cuales pueden generar crecientes súbitas en los ríos principales y sus afluentes.
	Niveles bajos	Nivel de referencia del río cuyos valores iguales o inferiores pueden generar restricciones para navegabilidad, captación de agua para acueductos, actividades de pesca entre otros sectores que pudieran verse afectados por la disminución de los caudales.
	Niveles altos	Nivel de referencia del río cuyos valores iguales o superiores pueden generar afectaciones en las zonas ribereñas.
	Creciente súbita	Fenómeno natural que se presenta en los ríos de montaña como consecuencia de la ocurrencia de lluvias intensas o torrencales en zonas de alta pendiente del cauce principal y sus afluentes.
	Transito de crecientes	Es el desplazamiento de una onda de creciente de aguas arriba hacia aguas abajo de la comente.
	Creciente por desembalse	Proceso de transito del flujo de agua por descarga controlada desde un embalse.
	Inundación	Aumento en los niveles y/o caudales de los ríos que superan la capacidad máxima de transporte o modificación de la sección transversal que la reduce, ocasionando el desbordamiento e inundación en zonas aledañas al cauce principal.

EMBALSES

Icono que representa la tendencia del nivel del río dentro del periodo.

 Estable
 Ascendente
 Descendente

El icono representa el nivel del río para el periodo, así:

Nivel bajo 
 Nivel medio 
 Nivel alto 

FEWS COLOMBIA
SISTEMA DE PRONÓSTICO HIDROLÓGICO Y ALERTAS TEMPRANAS

Consulte aquí el estado de los niveles en los ríos del país: <http://fews.ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>

Fuente: Ideam (2023).

202

Debido a condiciones de alta precipitación y saturación de la humedad en los suelos, en la sección de pronóstico de la amenaza por deslizamientos de tierra (ver figura 4.16) se emiten las correspondientes amenazas en cada municipio, según su probabilidad (alta, moderada o baja):

- Probabilidad alta de deslizamiento de tierra. Esta notificación se hace para que se tome acción.

- Probabilidad moderada de deslizamiento de tierra. Esta notificación se hace para que las autoridades y comunidades se preparen.
- Probabilidad baja de deslizamiento de tierra. Esta notificación se hace para informar.

Figura 4.16. Sección de pronóstico de la amenaza por deslizamiento de tierra



Fuente: Ideam (2023).



Debido a una baja precipitación y temperatura máxima, se presentan condiciones de algún tipo de amenaza por probabilidad (alta, moderada o baja) de ocurrencia de incendios en la cobertura vegetal, la cual es presentada en esta sección (figura 4.17.).

- Probabilidad alta de ocurrencia de incendios para tomar acción.

- Probabilidad moderada de ocurrencia de incendios para prepararse.
- Probabilidad baja de ocurrencia de incendios para informarse.

Figura 4.17. Sección de pronóstico de la amenaza por incendios



Fuente: Ideam (2023).



CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de este estudio son de gran utilidad para abordar los diferentes instrumentos de planificación y gestión del recurso hídrico en el Valle Medio del Magdalena, enmarcados en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, como los Estudios Regionales del Agua (ERA), los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca) y los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH).

En este capítulo se presentan las consideraciones finales a partir de los resultados obtenidos, y se resalta la importancia de estos para la región del Valle Medio del Magdalena. Además, se exponen recomendaciones para actualizar el estado del recurso hídrico.

Consideraciones acerca del monitoreo del recurso hídrico superficial

Para la actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad del agua superficial del Valle Medio del Magdalena (VMM) se visitaron treinta (30) puntos

ubicados en cuerpos de agua lóticos y uno en un cuerpo léntico (ciénaga San Silvestre). Para cada punto se realizaron máximo ocho (8) monitoreos en el período 2021-2023. El objetivo fue hacer seguimiento a los diferentes regímenes hidrológicos y estacionales (aguas altas y aguas bajas), aunque el período coincidió con un fenómeno de La Niña prolongado (de agosto de 2020 a marzo de 2023), con lluvias por encima de los promedios históricos. Ningún punto se considera de referencia natural libre de presiones por intervención antrópica.

De las sesenta (60) variables determinadas, veintidós (22) cuentan con los valores criterio de alarma propuestos por el Grupo de Evaluación Hidrológica del Ideam para algún uso del recurso. El porcentaje de alarma calculado para los treinta y uno (31) puntos de monitoreo considera el número de veces que la magnitud presentó un valor que excedió el criterio de admisibilidad. Y doce (12) variables presentaron valor de alarma en al menos uno de los monitoreos.



El monitoreo de cantidad se efectuó en las estaciones de la red básica del Ideam, ubicadas en las subzonas de interés. Se generaron series históricas de caudales y niveles con resolución diaria, las cuales se encuentran validadas, almacenadas y disponibles en la plataforma DIHME, además de aforos líquidos y sólidos. Por último, se efectuaron actividades de operación, supervisión, ajuste y mantenimiento de las estaciones.

En relación al monitoreo de calidad del agua, para futuros proyectos con el sector de hidrocarburos se recomienda integrar a la red de referencia nacional puntos de monitoreo de interés en el VMM para continuar el seguimiento a las tendencias de presión a la calidad. Además, es recomendable el trabajo conjunto entre el Laboratorio de Calidad Ambiental del IDEAM y el Grupo de Evaluación Hidrológica para proveer, a través del visor FEWS, más información de calidad y optimizar las salidas para la consulta oportuna de usuarios externos, y proponer valores de alarma por estación y por subzona hidrográfica para variables de calidad que no cuentan en la normatividad colombiana actual (con un criterio o referencia de admisibilidad para algún uso del recurso o simplemente adoptando el concepto de aguas ambientales, es decir, agua natural no tratada, como lo define UN-Water [2017]).

Consideraciones acerca de la evaluación de la oferta hídrica

La evaluación de la oferta hídrica se efectuó a partir de la implementación del modelo hidrológico SWAT en las subzonas hidrográficas de Opón, Sogamoso y Lebrija. Esta implementación comprendió la revisión de información hidroclimática y de características físicas de la cuenca, la calibración y validación del modelo en estaciones hidrológicas de la zona pertenecientes a la red del Ideam, la utilización de

diferentes fuentes de información de precipitación, evapotranspiración y temperatura para recalibrar el modelo, y la estimación de series simuladas en zonas correspondientes al nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas. Esta modelación de la oferta sirvió de insumo para la estimación de indicadores hídricos y del caudal ambiental.

Cabe mencionar que el modelo de oferta hídrica implementado puede utilizarse para diferentes propósitos. Por ejemplo, se puede usar la configuración utilizada en el SWAT para efectuar análisis a escalas de mayor detalle en cuencas y subcuencas que tengan algún interés en particular. Además, es posible efectuar análisis de cambios antrópicos (por ejemplo, cambios en los usos del suelo) y climáticos, y su impacto en las dinámicas hidrológicas de las cuencas de la zona de estudio.

La modelación de la oferta hídrica es un ejercicio dinámico que es necesario actualizar. Al modelar el ciclo hidrológico en una zona se hace uso de datos e información hidroclimática, y de características físicas de la cuenca dependientes de la geología, los suelos, los usos y las coberturas de la tierra. La forma de tomar datos y acceder a ellos está cambiando constantemente. Además de los datos, los conceptos y metodologías adoptados en el modelo cambian según el estado del arte del conocimiento del ciclo hidrológico. Por lo tanto, se hace necesario recalibrar el modelo cada cierto tiempo. Se recomienda actualizar la modelación de la oferta hídrica en la zona cada dos años.

Consideraciones acerca del caudal ambiental

Con relación a la evaluación y estimación del caudal ambiental, se efectuaron dos aproximaciones diferentes: una a escala de tramo, la cual es más demandante en información y



análisis, pero más precisa en los resultados; y otra a escala de cuenca hidrográfica, la cual solo considera el componente hidrológico del caudal ambiental. En la escala de tramo se implementaron los componentes hidrológicos, hidrobiológicos e hidráulicos (solo en el tramo del río Sogamoso) de la metodología propuesta por Minambiente y el Ideam para la cuenca del río Bogotá. En la escala de cuenca se estimaron caudales ambientales de cuencas del nivel subsiguiente a la subzona hidrográfica, siguiendo la metodología implementada en los Estudios Nacionales del Agua a partir de los resultados del modelo hidrológico implementado en la evaluación de la oferta hídrica.

La estimación del caudal ambiental es de suma importancia para la evaluación integral de los recursos hídricos, pues permite determinar el régimen de caudales mínimos para que las corrientes mantengan en el cauce natural una cantidad de agua que asegure la conservación de los ecosistemas. En este sentido, el caudal ambiental se puede considerar, en términos de usos del recurso, como la demanda de agua de los ecosistemas y se debe integrar en los indicadores de presión (por ejemplo, en el índice de uso). En el actual estudio este uso considera la demanda hídrica de los ecosistemas (o el caudal ambiental).

Para la estimación del caudal ambiental en escala de tramos no se consideró la calidad del agua, ni su demanda y uso. Se recomienda que se implemente e integre un modelo de calidad de agua y un modelo de usos actuales y potenciales para definir posibles conflictos en su utilización, y de esta forma el caudal ambiental se pueda adaptar a la gestión integral del recurso hídrico en la zona del estudio. Además, se hace necesario incluir información de topo - batimetría en los tramos analizados para mejorar en las estimaciones hidráulicas de interés ecológico el tránsito de

crecidas y caudales a banca llena en períodos de caudales máximos, y analizar la conectividad longitudinal del flujo en períodos de caudales mínimos. Puesto que la estimación del caudal ambiental a escala de cuenca es un resultado derivado de la modelación de recursos hídricos, se recomienda que se actualice cada dos años, período recomendado también para la actualización de la modelación.

Consideraciones acerca de la evaluación de la demanda del agua

Con respecto a la evaluación de la demanda del agua se estimó y se efectuó un análisis de esta para las subzonas hidrográficas Sogamoso, Opón y Lebrija medio - bajo (incluido el 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. La unidad de análisis consistió en cuencas del nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas.

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 la relación oferta-demanda se articula con la regulación de agua.

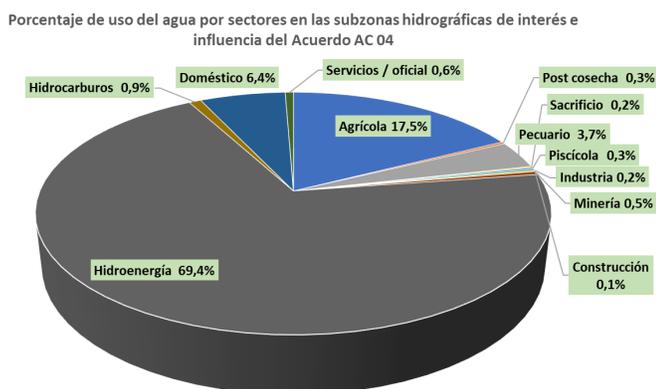
La figura 5.1 muestra que el sector que más usa el agua es el de hidroenergía con el 69.4 %



del uso total del recurso, en gran medida debido al embalse Topocoro en el río Sogamoso y de la utilización derivada de pequeñas centrales hidroeléctricas. El sector agrícola usa el 17.5 % del agua, el sector doméstico, el 6.4 %,

y el sector pecuario, el 3.7 %. Entre estos sectores cuatro usan el 97 % del agua en la zona del estudio. Por su parte, el sector de hidrocarburos usa el 0.9 % del agua total.

Figura 5. 1. Porcentajes de uso del agua total por sector, en las subzonas hidrográficas de interés e influencia del acuerdo



Fuente: elaboración propia.

Se recomienda actualizar esta estimación cada dos años, teniendo en cuenta las dinámicas socioeconómicas de la región.

Consideraciones acerca de la evaluación de la calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua consistió en hacer un reconocimiento de esta en 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 desembocaduras 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 estas tienen los ríos Chicamocha, Suárez, Fonce, Carare, Brazo Morales y Cimitarra (zonas de influencia).

Se identificaron los escenarios temporales y espaciales para la evaluación de la calidad del agua, asociados a la variabilidad del régimen hidrológico. Se caracterizó el estado actual de las presiones sobre los sistemas hídricos por uso de agua y carga contaminante proveniente de los sectores usuarios del recurso en las unidades de análisis. Se caracterizaron las condiciones actuales de la calidad del agua en las corrientes y cuerpos de agua en las unidades de análisis. Por último, se hizo un análisis aplicando el cálculo de los índices de la calidad del agua y de alteración potencial, y demás indicadores que permitieron interpretar la influencia que ejercen los diferentes sectores usuarios del recurso.



De acuerdo con la disponibilidad de información, se calculó el ICA para 5, 6, y 7 variables, evidenciando sobre los 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. 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 están generando degradación en la calidad del agua.

Los resultados del ICA no son concluyentes, aunque sí marcan tendencias y reflejan condiciones críticas de la calidad de los cuerpos de agua en ciertos sectores, producto de la agregación y/o acumulación de cargas y caudales.

Por otra parte, 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, indirectamente a los sistemas de alcantarillado o al suelo. Se requiere entonces más información y análisis, así como de la definición de metodologías para los monitoreos que reduzcan las 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 identificar necesidades de programación, coordinación, complementación y de inversión.

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 complementos 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, haciéndolos coincidir con el inicio de la fase de seguimiento.

Cuando se comparan 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 se armonicen los diferentes instrumentos y mecanismos disponibles, y se puedan tener 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, otros, además, 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 se permitan diferenciar los efectos regionales de los locales. Un sector que también amerita un capítulo aparte, pero integrador, es la minería, que, aunque cuenta con pocos registros puntuales, quizá esté influyendo en aportes distribuidos, como el sector agropecuario, los cuales deben ser objeto de análisis particulares.



El ICA de seis (6) variables se tomó como eje de la evaluación, puesto que se dispone de la mayor información para su cálculo y 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, esto deberá ser objeto de una atención especial.

Consideraciones acerca de la evaluación de la composición isotópica de la precipitación

Como parte del estudio en el Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena fueron evaluados datos hidrogeoquímicos e isotópicos de los Depósitos Recientes y del Grupo Real, del agua superficial en las principales corrientes y datos isotópicos de la precipitación.

La información secundaria, en especial la concerniente a la descripción del modelo hidrogeológico conceptual y el inventario de puntos de aguas subterráneas, fue el punto de partida para definir las redes de monitoreo. Para lo anterior se tuvieron en cuenta criterios técnicos, como el conocimiento de la unidad que captaba cada punto de agua subterránea, lo cual resultó ser la principal dificultad para incorporar puntos de monitoreo al estudio.

La evaluación hidrogeoquímica permitió evidenciar procesos hidrogeoquímicos presentes en el área de interés del acuífero del Valle Medio del Magdalena, relacionados con la hidrólisis del $\text{CO}_2(\text{g})$, alteración de silicatos como anortita, albita y ferromagnesianos, y el intercambio catiónico. También puede ocurrir la incorporación de sulfatos como producto de disolución de trazas de yeso y jarosita. Estos procesos manifiestan la interacción entre los flujos de precipitación, es decir, la recarga y el agua subterránea. Se considera pertinente continuar con el monitoreo

hidrogeoquímico por parte de la autoridad ambiental, mejorando la cobertura del monitoreo con captaciones dispuestas para este fin que respondan a preguntas como:

- ¿Cuáles son las trayectorias de flujo del agua subterránea en los Depósitos Recientes y en el Grupo Real?
- ¿Existe conexión hidráulica entre los Depósitos Recientes y el Grupo Real?
- ¿Cuál es el efecto de actividades antrópicas en la química del agua subterránea?

Este estudio constituye un punto de partida para fortalecer el conocimiento del flujo del agua en esta región; sin embargo, será necesario continuar con la mejora del conocimiento hidrogeológico y del monitoreo.

La composición isotópica en la zona de interés presenta una influencia marcada del efecto de cantidad, mostrando valores más empobrecidos en la época lluviosa y valores más enriquecidos en la época seca. De hecho, fue posible observar el efecto del fenómeno de La Niña, ocurrido en gran parte del año 2022, donde se evidenciaron lluvias más empobrecidas incluso en las zonas más planas. Por esta razón, el efecto de altitud se vio enmascarado.

La Línea Meteorológica Regional presentó una pendiente de 8,022 e intercepto de 12,984, mostrando que gran parte de los procesos que originan la lluvia en este sector se producen sin evaporación secundaria y, además, que existiría un aporte importante de procesos de reciclaje. También se considera pertinente que las autoridades ambientales continúen con este monitoreo, dado que entre más extensa sea la serie, más seguridad se tendrá sobre los datos, especialmente cuando las nuevas estaciones instaladas en diciembre de 2021 estuvieron marcadas por el fenómeno de La Niña.



El agua subterránea en este estudio presenta una variabilidad de -5,97 a -8,72 ‰ $\delta^{18}O$. El agua superficial registra un rango de variación de -5,34 a -9,84 ‰ para el $\delta^{18}O$. Los valores son similares a lo reportado por estudios del Ecopetrol y del proyecto Megia. Los resultados muestran que efectivamente existe recarga de la precipitación al acuífero; sin embargo, se considera pertinente fortalecer y darle continuidad al monitoreo. Estos primeros resultados no muestran grandes diferencias entre los Depósitos Recientes y el Grupo Real. Existe un pozo profundo que capta el Grupo Real, que presenta una composición isotópica más empobrecida, la cual sería resultado de un agua que se recarga a una mayor altura, o agua recargada hace mucho tiempo cuando la temperatura del ambiente era menor. Se recomienda realizar datación del agua subterránea, con carbono 14 y carbono 13 para confirmar esa hipótesis.

Consideraciones acerca de la modelación para el pronóstico y generación de alertas tempranas

Se hizo una revisión profunda de la cadena de procesos del sistema FEWS Colombia para el río Magdalena. Se hicieron ajustes de incidentes y se pudo estructurar una cadena de procesos nueva que consistió en el desarrollo, modificación, actualización e implementación de módulos específicos para la cascada encargada del pronóstico en el Valle Medio del Río Magdalena. Se desarrollaron módulos nuevos en torno a la importación de nuevas fuentes de información (JAXA-GSMAP, GLOH20-MSWX, GLOH20-MSWEP), se implementaron procesos para la estimación de evapotranspiración potencial, se hizo el desarrollo y acople de modelos nuevos hidrológicos conceptuales (GR4J) para las cuencas

del río Opón y Sogamoso, y también la articulación del modelo hidráulico actualizado en el tramo del río Magdalena entre Puerto Berrio y Sitio Nuevo, se implementó la estructuración de nuevos modelos de corrección de error ARMA, y se desarrollaron todos los módulos de transformación adicionales requeridos en la articulación de la cascada de procesos.

Se llevó a cabo un proceso de estimación de evapotranspiración basado en la ecuación de Hargreaves; para esta estimación, hace uso de información de la temperatura proveniente de la fuente de datos GLOH20-MSWX.

Adicionalmente, se realizó el acople de los modelos hidrológicos actualizados para el río Opón y Sogamoso, y se incorporó el modelo actualizado DHI Mike11 en el tramo del río Magdalena entre Puerto Berrio hasta Sitio Nuevo. Los ajustes incluyeron la actualización de secciones transversales del río y las orillas, la inclusión de desbordes y la actualización de niveles de alertas.

El uso de diferentes fuentes de información dentro del sistema FEWS conllevó la configuración de varias cascadas de procesos (flujos de trabajo) que se ejecutarán de manera paralela. En modo histórico se ejecutan cinco (5) cascadas de procesos, cada una alimentada por una fuente de información distinta: estaciones de monitoreo (cuasi real) del Ideam y los productos JAXA-GSMAP, GLOH20-MSWX, GLOH20-MSWEP. Adicionalmente, existe una quinta cascada compuesta por la unión, a través del promedio simple, de los productos antes mencionados.

Al evaluar los resultados de la cascada de procesos se puede observar que los modelos hidrológicos tienen una ventana importante de mejora. Los modelos hidrológicos pueden ser robustecidos mediante la calibración más detallada que se enfoque en reproducir



las señales y separación entre el caudal base y el caudal superficial. Actualmente, muchos de los modelos (producto de calibraciones automáticas, aunque se requiere una valoración más detallada) funcionan mayormente con el componente de caudal base. Si bien con esta configuración los modelos reproducen las señales hidrológicas (con sus incertidumbres asociadas), una calibración más detallada mejoraría de manera importante los resultados de los modelos y las simulaciones hidráulicas.

De otro lado, en los modelos hidrodinámicos se observa un comportamiento óptimo. Sin hacer evaluaciones de incertidumbre detalladas se puede inferir que la mayor parte de estas en sus resultados deben provenir de su propagación en los modelos hidrológicos que alimentan los modelos hidrodinámicos. La nueva configuración fue cargada al sistema operacional sin inconvenientes. Sin embargo, es importante considerar que esta debe ser observada de cerca por un tiempo para verificar que esté funcionando de manera adecuada.

Si bien los procesos se han probado en profundidad dentro del sistema Stand Alone del FEWS Colombia y en el sistema operacional, siempre existe la posibilidad que hayan pequeñas inconsistencias (“bugs”). Para ello, se recomienda mantenerlo en observación en condiciones operativas (en un entorno de pruebas), de tal manera que se pueda verificar su óptimo funcionamiento. En términos generales, se recomienda que este sistema esté bajo observación al menos seis (6) meses antes de establecer que es óptimo para formar parte del sistema operativo.

Se recomienda no realizar recalibraciones del modelo hidráulico antes de que se haya realizado una recalibración detallada de los modelos hidrológicos. Los resultados del modelo hidráulico, de manera desacoplada del sistema FEWS Colombia muestran su

adecuado desempeño. Una vez realizadas las recalibraciones a los modelos hidrológicos se puede verificar la pertinencia de someter el modelo hidráulico a procesos de mejora.

En cuanto se tengan los diversos modelos robustecidos mediante la calibración esta debe enfocarse en los módulos ARMA para la predicción y corrección de errores en puntos específicos de la cascada de pronóstico. Actualmente los ARMA se encuentran trabajando bajo parámetros por defecto, por lo tanto, existe un espacio importante para la mejora de estos modelos de predicción del error.

Si bien en el presente proyecto no se realizó una valoración de los campos de precipitación, se debe considerar estudiar en el futuro la representación y el impacto de la estimación de los campos relativos a estos, obtenida a partir de las estaciones de medición. De esta manera se podrían proponer mejoras en los procesos de estimación operativa de los campos de precipitación.

De la misma forma, se debe valorar la calidad de la información (de precipitación) obtenida de fuentes externas (JAXA, GLOH2O), dado que se tiene la impresión de que los productos externos sobreestiman los valores de precipitación. Igualmente, se pueden proponer procesos operativos que permitan hacer correcciones (de sesgo, por ejemplo) de estos productos y conduzcan a mejores estimaciones de los estados (iniciales) y, por ende, de los pronósticos.

La calibración de los modelos tiende a degradarse con el tiempo. Se recomienda considerar la recalibración de todos los modelos hidrológicos aproximadamente cada dos años, de tal manera que se pueda incorporar nueva información medida dentro de la calibración.



Adicionalmente a la calibración y siguiendo con el estado del arte en la evolución del sistema operacional, se debería contemplar:

- Que la asimilación de datos en un sistema de pronóstico hidrológico es un proceso que combina observaciones de variables hidrológicas (como niveles de agua y precipitaciones) y un modelo numérico de cómo se espera que estas variables cambien con el tiempo. Este proceso se realiza para estimar el estado más probable del sistema hidrológico en un momento dado y predecir su evolución futura. La asimilación de datos permite mantener el modelo ‘en la pista’, corrigiéndolo constantemente con nuevas observaciones, lo que mejora la precisión de los pronósticos.
- Los ensambles multimodelos, esto quiere decir el empleo de múltiples estructuras conceptuales en cuanto a modelos hidrológicos con las fuentes de información disponible. Esto con el fin de enfrentar las incertidumbres que puedan existir en cuanto a la falta de representación de los procesos físicos existentes en la cuenca, por una estructura conceptual de algún modelo hidrológico. La idea es emplear diversos modelos, de tal manera que se pueda tener una representación y mejor entendimiento del comportamiento hidrológico sobre las cuencas (este tipo de enfoque es utilizado ampliamente al momento de evaluar las posibles trayectorias de huracanes en los sistemas de predicción climática).
- Transitar hacia un sistema de pronóstico con ensambles, donde en vez de tener un único forzamiento meteorológico (pronóstico) para una fecha específica se tienen un conjunto de estos con igual probabilidad, generados por los sistemas de predicción numérica del clima. Normalmente, los sistemas de pronósticos del clima generan alrededor de 51 forzamientos con la misma probabilidad; esto quiere decir que se

puede obtener un entendimiento de las incertidumbres ocasionadas por el comportamiento caótico de la atmósfera.

Consideraciones acerca del Pirma

El diagnóstico del estado del sistema hidrometeorológico y de calidad del agua de la CAS permitió evidenciar que no existe un monitoreo continuo y sistemático de la cantidad y calidad del agua superficial y subterránea a nivel regional. Existen monitoreos puntuales del agua superficial, los cuales generalmente obedecen a los instrumentos de planificación de las diferentes unidades hidrográficas y a procesos de licenciamiento ambiental.

Bajo este contexto se formuló el Pirma de la CAS, con un horizonte entre el año 2022 y 2032, con el propósito de tenerlo implementado y alinearlo con el PNMRH y la PNGIRH, lo que permitirá contar con la información oportuna, accesible, confiable y sistematizada para propiciar una adecuada toma de decisiones por parte de los actores sociales, gremiales e institucionales que lo requieran.

Para llegar a ese propósito general, fueron definidos cuatro resultados o líneas estratégicas que se presentan a continuación:

- Resultado 1. A diciembre del 2032, el monitoreo del agua en la jurisdicción de la CAS se realiza de manera integral, sistemática y articulada con otros actores, soportado en un esquema organizacional con recursos técnicos, humanos y económicos adecuados.
- Resultado 2. A diciembre del 2032, la CAS ha implementado un sistema de observación medición y vigilancia del agua (SOMV) que cuenta con los procesos y procedimientos que cumplen con los estándares del sistema integrado de gestión (SIG), para generar información suficiente, válida y oportuna que



esté disponible en el sistema de información de la CAS y en el SIRH.

- Resultado 3. A diciembre del 2032, la CAS tendrá implementado un plan de capacitación, investigación e innovación tecnológica continua en el monitoreo integral del agua, soportado en alianzas con otras entidades.
- Resultado 4. A diciembre del 2032, la CAS habrá implementado una estrategia de comunicación y difusión de resultados y acciones del monitoreo integral del agua para usuarios internos, actores involucrados y comunidades.

Estos resultados fueron desarrollados y entregados a la corporación bajo la estructura de Marco Lógico. Asimismo, fueron desarrollados los componentes estratégico, programático, tecnológico y financiero del Pirma. Es así como el objetivo general del monitoreo de la CAS obedece a soportar la evaluación, planificación del recurso hídrico y la toma de decisiones de la Corporación en temas relacionados con la administración y la gestión integral del recurso hídrico, a partir de información confiable, oportuna y disponible para los usuarios institucionales, gremiales y sociales.

En el componente programático fueron definidas las redes de monitoreo de la CAS: i) red de referencia de monitoreo hidrometeorológico, la cual comprende 99 estaciones meteorológicas y 50 hidrológicas, de las cuales 8 estaciones meteorológicas y 20 hidrológicas serán instaladas por la CAS. Las otras estaciones son operadas por el Ideam: ii) la red de referencia regional de calidad del agua superficial comprende 39 puntos de monitoreo y iii) la red de referencia regional de aguas subterráneas, la cual contiene 38 puntos de monitoreo en los primeros 40 m de profundidad y 36 puntos de monitoreo para una profundidad mayor a 40 m.

EL Pirma busca que la CAS fortalezca los procesos de consolidación, uso y apropiación de información del monitoreo del agua, realizando un seguimiento integral en el que se articulen las variables de cantidad y calidad de las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, con datos provenientes de diferentes fuentes como el Ideam (a través de la plataforma de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (Dhime), la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y la propia Corporación. En el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) se hace evidente la necesidad de que los datos e información provenientes del monitoreo se transmitan, se asimilen y se realice un tratamiento primario de estos. Luego, estos datos se deben almacenar en una plataforma de gestión que se comunique con una plataforma de comunicación y difusión de la información para que sea dispuesta a diferentes actores, ofreciendo servicios con valor agregado.

El componente tecnológico definió los equipos y tecnologías necesarios para asegurar la adquisición, el almacenamiento y la transmisión de los datos hidrometeorológicos de las estaciones automáticas. En resumen, para las estaciones hidrológicas y meteorológicas automáticas se identifican los siguientes componentes: sensores, plataforma registradora de datos, sistema de comunicación y telemetría, sistema de alimentación eléctrica, gabinete y protecciones eléctricas. Para el monitoreo de cantidad de aguas superficiales se propone que la CAS cuente con un correntómetro, perfilador ADCP, niveles topográficos, GPS y computadores portátiles.

Por otra parte, para el monitoreo de la calidad del agua superficial se propone que la Corporación cuente con equipos de mediciones *in situ* como un pHmetro, un oxímetro, un conductivímetro y un termómetro que pueden



ser sustituidos por equipos multiparamétricos. Adicionalmente, se proponen tres nuevas tecnologías para ser incluidas en el plan de investigación del Pirma, con el fin de evaluar la pertinencia de estas tecnologías en el monitoreo de la CAS. Estas tres tecnologías propuestas son el uso de drones para la toma de muestras, el uso de imágenes de sensores remotos para la evaluación de la calidad del agua y la automatización de la red de monitoreo.

En el caso del monitoreo de aguas subterráneas el componente tecnológico identifica todos los equipos necesarios como son una sonda de nivel piezométrico, un *datalogger* de nivel, una sonda multiparamétrica, bombas peristálticas, bombas sumergibles, una planta de energía y totalizadores.

El componente financiero estableció el costo total de la implementación del Pirma y

sus fuentes de financiación. De esta manera, la implementación del Pirma tendrá un costo aproximado de \$42.000.000.000 cuarenta y dos mil millones de pesos colombianos, de los cuales el 87 % corresponde al resultado 2.

Las fuentes de financiación sugeridas corresponden a recursos propios, recursos de la Nación, recursos enmarcados en el decreto 1900 de 2006 y de cooperación internacional.

Finalmente, se hace necesario reforzar que la implementación y éxito del Pirma depende la intención de la CAS y de realizar los esfuerzos administrativos, técnicos y financieros indispensables para su desarrollo. En este sentido, el comité de monitoreo del agua cobra un papel preponderante como instancia que realiza el seguimiento y evaluación del Pirma.





REFERENCIAS

- 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.
- AGS Ltda, 2017. POMCA Directos al Magdalena Medio entre Río Negro y Carare. Fase diagnóstico.
- AGS Ltda, 2019. POMCA Directos al Magdalena Medio entre Río Negro y Carare. Fase Formulación.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema publishers.
- 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.
- Baatz, R., Hendricks, H., Eusckirchen, E, ... (2021) Reanalysis in Earth System Science:



- Toward Terrestrial Ecosystem Reanalysis. *Reviews of Geophysics*, 1-39, 59(3)
- Baez-Villanueva, O., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., ... Tinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 111606.
- 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.
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Larraondo, P. R., McVicar, T. R., Pan, M., Dutra, E., and Miralles, D. G. MSWX: global 3-hourly 0.1° bias-corrected meteorological data including near real-time updates and forecast ensembles. Sometido para publicación, 2021.
- Beven, K. (2012). *Rainfall runoff modelling: the primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Campillo, A. K., Taupin, J. D., & Betancur, T. (2021). Usando múltiples trazadores para comprender el funcionamiento de acuíferos freáticos heterogéneos en zonas húmedas tropicales: caso del Golfo de Urabá, Colombia. Tesis de doctorado Ingeniería Ambiental de la Universidad de Antioquia y Universidad de Montpellier.
- CAS, 2014. Informe final Convenio Interadministrativo No. 302 de 2013 MADS – CAS. Contrato de Consultoría No. 004-00442-2014. Formulación del Plan de Ordenamiento del río Fonce y sus tributarios
- CAS, 2016. Mesa de Trabajo Río Fonce. Presentación de power point disponible en <http://www.santanderinnova.org.co/media/42464b3e82747670f9f-13101c8a02860.pdf> visitado el 27/05/2021.
- CAS, 2017 b. POMCA Afluentes directos al Río Lebrija Medio.
- CAS, 2017. documentos del Contrato de Consultoría N° 004-00514-2017 cuyo objeto es “Elaborar el estudio para la definición de las corrientes o tramos de corriente para el cálculo y establecimiento de la meta global de carga contaminante para el cálculo de la tarifa de la tasa retributiva (Ttr) por vertimientos puntuales en ocho (8) cuencas en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Santander CAS”. Documentos disponibles en: <http://cas.gov.co/index.php/component/content/article.html?id=741> visitado el 27/05/2021
- CAS, 2018. POMCA Río Opón aprobado mediante resolución 489 de 2018.
- CAS, 2020. Plan de Acción Cuatrienal 2020-2023 “Mejor conectados”.
- CAS; 2012. Plan de Gestión Ambiental Regional-PGAR. Convenio Número 005-00589-2010 CAS-UNISANGIL. 517 p.
- CDMB, 2019. CONSULTORÍA PARA EL AJUSTE (ACTUALIZACIÓN) DEL PLAN DE ORDENACION Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO LEBRIJA MEDIO (CÓDIGO 2319-03) DE CONFORMIDAD CON LOS TERMINOS ESTABLECIDOS POR EL FONDO DE ADAPTACION DENTRO DEL CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 021 DE 2014.
- CDMB-CAS, 2018. POMCA Río Sogamoso aprobado mediante resolución 835 de 2018 (CAS) y 1183 de 2018 (CDMB)
- 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 MAGDALENA*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Duque Gardeazabal, N. (2022). *INFORME FINAL SOBRE LA REFINACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS EN EL VMM*. 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.
- Flotemersch, J. E., Leibowitz, S. G., Hill, R. A., Stoddard, J. L., Thoms, M. C., y Tharme, R. E. (2015). A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. *River Research and Applications*.
- 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.
- Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D., & Husak, G. (2015). A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth System Science Data*, 275-287.
- García, O. Zúñiga (2021). Evaluación de la contaminación por aluminio del agua para consumo humano, región central de Colombia. *INGE CUC*, 17(2), 2. doi: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.04>
- Gat, J. E., Mook, W. G., & Meijer, H. A. (2001). Isotopos ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. Sección II- Agua Atmosférica. Israel, Holanda.
- GEMS Water, United Nations Environment Program UNEP. (2020). DOCUMENTO DE ORIENTACIÓN TÉCNICA N° 2 SOBRE EL INDICADOR 6.3.2 DE LOS ODS VALORES OBJETIVO. 20200508. 20 p
- 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-wet-net.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 Estudios 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. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014* Bogotá: IDEAM
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM, & INVEMAR. (2021). Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.
- IDEAM. (2018). Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Recursos de Agua de Texas. Servicio de Extensión El Sistema Universitario Texas A&M. Cooperativa de Texas. M L, McFarland & M C, Dozier. (2023). Problemas del agua potable: el hierro y el manganeso. (2-04), L-5451S, 6. Comunicaciones Agrícolas, El Sistema Universitario Texas A&M.
- 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.
- MinAmbiente & ANLA. (2013). Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Ministerio de medio ambiente. Colombia
- MinAmbiente & IDEAM. (2018). Metodología para la estimación del caudal ambiental en el río Bogotá. Ministerio de medio ambiente. Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS. (2015). GUÍA METODOLÓGICA



- PARA EL ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS DE CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA EN AUSENCIA DE LOS PLANES DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO - PORH. Metodología MESOCA. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. Dirección de Promoción y Prevención – Subdirección de Salud Ambiental. (2022). Información sobre riesgos del plomo.
- Mook, W. (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España- IGME.
- 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.
- Richter BD, Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Sparks RE, Stromberg JC. (2010) The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47: 769-784.
- 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.
- Rozanski, K., Froehlich, K., Mook, W. G., & Stichler, W. (s.f.). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y Aplicaciones. Sección III- Agua Superficial. Krakovia, Viena, Groningen (1993)
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., . . . Stokes, D. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1015-1058.
- 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](http://www.unesdoc.unesco.org/images/0014/001144409s.pdf).

United Nations Water. (2017). Guía para el Monitoreo Integrado del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 sobre Agua y Saneamiento. Metas e Indicadores Mundiales. New York: United Nations.

Vargas, G. C. (2012). Geología, Geomorfología y Dinámica Fluvial Aplicada a Hidráulica de Ríos. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia.

Werner a b, J. Schellekens a, P. Gijsbers a, M. van Dijk a, O. van den Akker a, K. Heynert. The Delft-FEWS flow forecasting system. Environmental Modelling & Software (2013)





ANEXOS

En el siguiente vínculo se puede acceder a los anexos:

https://drive.google.com/drive/folders/1xfhRx8vIH9jRnBCFudpS_ZA9v8tqdFYe?usp=sharing

En el vínculo se encuentran los siguientes documentos:

- Información hidrológica y de calidad del agua del VMM (actualizada al 2023).
- Modelación de oferta hídrica superficial del VMM.
- Comportamiento histórico y estado actual del recurso hídrico en las subzonas hidrográficas.
- Caudal ambiental a nivel de piloto en subzona y nivel subsiguiente en las áreas de interés de Ecopetrol.
- Composición isotópica de la precipitación para los sistemas de flujo superficial y subterráneo del área de interés de Ecopetrol, de acuerdo con la caracterización realizada.
- Evaluación del pronóstico hidrológico (modelos FEWS) en las áreas de interés de Ecopetrol en el VMM.
- Modelación hidrológica e hidráulica orientada a la caracterización de las áreas de interés de Ecopetrol en VMM.
- Programa Institucional Regional de Monitoreo del Agua de la CAS. Fase de planificación y formulación.



