



Construcción, aplicación y evaluación crítica de una caja de herramientas para la formulación del componente hidrológico de un POMCA

Victor Hernán Garzón Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023

Construcción, aplicación y evaluación crítica de una caja de herramientas para la formulación del componente hidrológico de un POMCA

Victor Hernán Garzón Rodríguez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D. Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval

Línea de Investigación:

Hidrología y Meteorología

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos - GIREH

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023

Nada en este mundo puede reemplazar la persistencia. El talento no puede hacerlo: nada es más común que hombres fracasados con talento. El genio no puede hacerlo: un genio sin recompensa es casi un proverbio. La educación no puede hacerlo: el mundo está lleno de indigentes educados. Solo la persistencia y la determinación son omnipotentes.

Calvin Coolidge

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada con el respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento, aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de revisión de integridad académica, definida por la Universidad.



Victor Hernán Garzón Rodríguez

Fecha: 16/01/2023

Resumen

Construcción, aplicación y evaluación crítica de una caja de herramientas para la formulación del componente hidrológico de un POMCA

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial publicó en el año 2010 la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH). Dentro de ella figura la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) como un elemento clave para la gestión sostenible del agua y del saneamiento básico en el país. El principal propósito de estos planes es apoyar la planeación del uso del suelo y el manejo sostenible de los recursos naturales renovables. Sin embargo, desde la expedición de la PNGIRH, el avance en la formulación de los POMCAS ha sido limitado, debido a la necesidad de generar conocimiento y a las limitaciones en la información necesaria para formular dichos planes. Para contribuir a la generación de dicho conocimiento, desde el programa de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia y como parte del trabajo aquí reportado, se desarrolló una caja de herramientas hidrológicas para apoyar la formulación de POMCAS en su componente hidrológico y para la caracterización hidrológica de las cuencas colombianas.

En este trabajo se presenta el diseño, la arquitectura, implementación y la aplicación de la caja de herramientas en tres cuencas (cuencas de los ríos Humea, Pamplonita y Chinchiná), cada una con diferentes niveles de disponibilidad de datos hidroclimatológicos y de información de características físicas. El uso de esta caja se evalúa mediante la verificación del desempeño de diferentes herramientas para obtener los productos específicos requeridos en la formulación de un POMCA. Se demuestra que la caja de herramientas tiene el potencial para apoyar la formulación de POMCAS en el país en su componente hidroclimatológico y podría contribuir a los propósitos de la PNGIRH.

Palabras clave: Gestión de recursos hídricos, Cuencas hidrográficas, Herramientas hidrológicas, POMCA.

Abstract

Construction, application and critical evaluation of a toolbox for the formulation of the hydrological component of a basin management plan (POMCA)

The Ministry of Environment, Housing and Territorial Development issued in 2010 the Policy for Integrated Water Resources Management (PNGIRH). Within it, the formulation of Basin Management Plans (POMCA) is a key component for the sustainable management of water and basic sanitation in the country. The main purpose of these plans is to support land use planning and sustainable management of renewable natural resources. However, since the expedition of the PNGIRH, the advances in the formulation of POMCAS have been limited, due to the need of generating knowledge and the limitations in the necessary information to formulate such plans. To contribute to the generation of such knowledge, from the Master's in Engineering – Hydraulic Resources program of the Universidad Nacional de Colombia and as part of the work here reported, it was developed a Toolbox to support the formulation of POMCAS in its hydrological component, and the hydrologic characterization of Colombian basins.

This work reports the design, architecture, implementation, and application of the toolbox in three basins (Humea, Pamplonita and Chinchiná river basins) each with different levels of available hydrologic, climatic and physical information. The use of the toolbox is evaluated through the verification of the performance of different tools to obtain the specific products required for the formulation of a POMCA. It is demonstrated that the toolbox has the potential to support the formulation of POMCAS in the country and could contribute to the purposes of the PNGIRH.

Keywords: Water resources management, Colombian watersheds, Hydrologic tools, POMCA.

Contenido

	Pág
Introducción	19
Objetivos.....	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos	23
Pregunta de investigación.....	23
1. Estado del arte.....	25
1.1 El POMCA como instrumento de planificación de cuencas hidrográficas	26
1.1.1 Estructura hidrográfica para la planificación de cuencas.....	26
1.1.2 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS).....	28
1.1.3 Componente Hidrológico de un POMCA.....	30
1.1.4 Metas y avances en la implementación de la política respecto a los POMCAS	30
1.2 Herramientas hidrológicas para la formulación de POMCAS.....	33
1.2.1 La selección de herramientas hidrológicas	34
1.2.2 Clasificación de las herramientas hidrológicas.....	34
1.2.3 Necesidad de información para el uso de herramientas hidrológicas.....	35
2. Metodología.....	37
2.1 Construcción de la caja de herramientas.....	37
2.2 Selección y desarrollo de casos de estudio	39
2.2.1 Subzonas hidrográficas con documento POMCA	39
2.2.2 Disponibilidad de información hidroclimatológica	40
2.2.3 Indicadores estadísticos	45
2.3 Evaluación crítica de la caja de herramientas.....	46
3. Resultados.....	47
3.1 HidroCHEP: Una caja de herramientas para la formulación de POMCAS	47
3.1.1 Selección de Herramientas	47
3.1.2 Arquitectura y diseño de HidroCHEP	49
3.1.3 Marco metodológico para el uso de HidroCHEP	51
3.1.4 Disponibilidad de la caja de herramientas.....	52
3.1.5 Limitaciones.....	53
3.2 Aplicación de HidroCHEP: Casos de estudio	54
3.2.1 Poca disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Humea	54
3.2.2 Mediana disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Pamplonita.....	70
3.2.3 Amplia disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Chinchiná	83
4. Evaluación, discusión y análisis de resultados.....	95

XII Construcción, aplicación y evaluación crítica de una caja de herramientas para la formulación del componente hidrológico de un POMCA

4.1	Marco comparativo del uso de HydroCHEP con documentos POMCA	95
4.1.1	Temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes	96
4.1.2	Temática de clima	99
4.1.3	Temática de hidrología	103
4.2	Discusión	109
4.2.1	Limitaciones e incertidumbre en el uso de herramientas	109
4.2.2	Limitaciones en las fuentes de información	109
4.2.3	Contar con una herramienta de apoyo a la selección de herramientas.....	111
4.2.4	Desarrollo de marcos genéricos en función de la disponibilidad de información	112
4.2.5	Consolidación de experiencias y apoyo en aspectos particulares del uso de las herramientas.....	113
4.2.6	Aplicación de HydroCHEP en escenarios diferentes a la elaboración de POMCAS	114
5.	Conclusiones y Recomendaciones	115
5.1	Conclusiones	115
5.2	Recomendaciones	120
5.2.1	Apoyo continuo en formación y capacitación en el uso de herramientas	120
5.2.2	Desarrollo futuro de HydroCHEP	121
5.2.3	Investigación en evapotranspiración para Colombia.....	121
A.	ANEXO: Consulta Corporaciones Autónomas Regionales	123
B.	ANEXO: Selección y clasificación de herramientas.	124
C.	ANEXO: Clasificación de subzonas hidrográficas por información hidroclimatológica.....	125
D.	ANEXO: Productos POMCA caso de estudio Subzona Hidrográfica del Río Humea.....	126
E.	ANEXO: Productos POMCA caso de estudio Subzona Hidrográfica del Río Pamplonita.	127
F.	ANEXO: Productos POMCA caso de estudio Subzona Hidrográfica del Río Chinchiná.	128
	Bibliografía	129

Lista de figuras

	Pág
Figura 1-1 Instrumentos de planificación para cada estructura hidrográfica según la PNGIRH y el Decreto 1640 de 2012.....	27
Figura 1-2 Avance en la consolidación de POMCAS a noviembre de 2021	32
Figura 2-1 Metodología del trabajo de investigación	38
Figura 2-2 Preselección de casos por Subzonas Hidrográficas con documentos POMCA	41
Figura 2-3 Clasificación de casos preseleccionados por disponibilidad de información hidroclimatológica por densidad de información (a, c y e) y longitud de registros (b, d y f).	42
Figura 3-1 Arquitectura principal de HidroCHEP	49
Figura 3-2 Estructura principal de HidroCHEP	50
Figura 3-3 Marco metodológico para la elaboración de un producto POMCA en HidroCHEP	51
Figura 3-4 Vista general de HidroCHEP en diferentes pantallazos	53
Figura 3-5 Localización Subzona Hidrográfica del río Humea.....	55
Figura 3-6 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Humea	56
Figura 3-7 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Humea	57
Figura 3-8 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Humea	58
Figura 3-9 Localización de información oficial de concesiones de agua superficial otorgadas en la cuenca del río Humea	58
Figura 3-10 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Humea. a) Mapa de caracterización hidrográfica, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal	64
Figura 3-11 Variación espacio - temporal de la precipitación (izquierda) y evapotranspiración potencial (derecha) en la subzona hidrográfica del río Humea	66
Figura 3-12 Comparación de series de tiempo de temperatura para la estación EL JAPON y del modelo FLDAS Noah Land Surface. a) series históricas 1982 – 2012, b) diagrama de dispersión.....	67
Figura 3-13 Caracterización hidrológica de la subzona hidrográfica del río Humea a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua	67

Figura 3-14 Caudales a la desembocadura del río Humea a partir de la modelación hidrológica con HEC-HMS	68
Figura 3-15 Curva de duración de caudales para la cuenca del río Humea a partir de resultados de modelación en HEC-HMS. Periodo 1982 - 2012	69
Figura 3-16 Comparación de series de tiempo de caudal para la estación EL CABLE y obtenidas con el modelo HEC-HMS. Series históricas enero a junio de 2006 y diagrama de dispersión con el modelo inicial (a y b), y con los resultados ajustados con el flujo base (c y d).....	70
Figura 3-17 Localización Subzona Hidrográfica Río Pamplonita	71
Figura 3-18 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Pamplonita.....	72
Figura 3-19 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Pamplonita	73
Figura 3-20 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Pamplonita.....	74
Figura 3-21 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Pamplonita. a) Mapa de caracterización hidrográfica, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal.....	78
Figura 3-22 Variación espacio - temporal de la precipitación (izquierda) y evapotranspiración potencial (derecha) en la subzona del río Pamplonita.	80
Figura 3-23 Caracterización hidrológica de la cuenca del río Pamplonita a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua	81
Figura 3-24 Comparación de series de tiempo de caudal modeladas con WEAP para las estaciones a) Don Juana y b) Aguas Claras	82
Figura 3-25 Localización Subzona Hidrográfica Río Chinchiná	83
Figura 3-26 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Chinchiná.....	85
Figura 3-27 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Chinchiná.	86
Figura 3-28 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Chinchiná.....	87
Figura 3-29 Localización de información oficial de concesiones de agua superficial otorgadas en la cuenca del río Chinchiná	87
Figura 3-30 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Chinchiná. a) Mapa de orden de Strahler, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal.....	90
Figura 3-31 Variación espacio - temporal de la precipitación (izquierda) y evapotranspiración potencial (derecha) en la subzona del río Chinchiná	92
Figura 3-32 Comparación de series de tiempo de Evapotranspiración Potencial para la estación AEROPUERTO LA NUBIA y de reanálisis de Deltares. a) Series históricas 1983 – 1984, b) Diagrama de dispersión	93
Figura 3-33 Caracterización hidrológica de la subzona hidrográfica del río Chinchiná a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua	93

Figura 3-34 Curva de duración de caudales para la cuenca del río Chinchiná (Estación 26157020 El Retiro). Periodo 1982 - 2012.....	94
Figura 4-1 Fragmentos de los mapas de pendientes generados para el caso del río Humea en el POMCA (izquierda) y con el uso de HidroCHEP (derecha).....	98
Figura 4-2 Localización de estaciones de monitoreo utilizadas para el análisis del clima en el POMCA del río Humea. Tomado de MADS et. al. (2019)	99
Figura 4-3 Resultados de evapotranspiración potencial para el caso de la cuenca del río Chinchiná mediante correlaciones con temperatura usadas en el POMCA (izquierda) y a partir de datos de reanálisis de sensores remotos con HidroCHEP (derecha).....	102
Figura 4-4 Presentación del comportamiento temporal de la precipitación en la cuenca del río Pamplonita. a) Gráfica promedio mensual multianual de estaciones usada en el POMCA, b) Gráfica de escala de colores para valores promedio mensuales de la cuenca usado en la aplicación de HidroCHEP	104
Figura 4-5 Inconsistencias en la generación del orden de las corrientes, para los casos de estudio del río Humea (izquierda) y del río Pamplonita (derecha)	112
Figura 4-6 Pantallazo de espacio de Foros dispuesto en HidroCHEP	114

Lista de tablas

	Pág
Tabla 1-1 Consolidado avance en la implementación de POMCAS	31
Tabla 2-1 Criterio de clasificación de Subzonas Hidrográficas por disponibilidad de información hidroclimatológica	40
Tabla 2-2 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con amplia disponibilidad de información hidroclimatológica	43
Tabla 2-3 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con mediana disponibilidad de información hidroclimatológica	43
Tabla 2-4 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con poca disponibilidad de información hidroclimatológica	44
Tabla 2-5 Criterios para evaluar el desempeño de modelos y fuentes de información y sus clasificaciones	46
Tabla 3-1 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de clima para la subzona hidrográfica del río Humea	60
Tabla 3-2 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Humea	61
Tabla 3-3 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes para la subzona hidrográfica del río Humea	62
Tabla 3-4 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Humea	62
Tabla 3-5 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes para la subzona hidrográfica del río Pamplonita	75
Tabla 3-6 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Pamplonita	76
Tabla 3-7 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Pamplonita ...	77
Tabla 3-8 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de clima para la subzona hidrográfica del río Chinchiná	88
Tabla 3-9 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Chinchiná	90
Tabla 4-1 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes	97

Tabla 4-2 Comparación de la distribución de pendientes evaluadas en porcentaje para el caso del río Humea	98
Tabla 4-3 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de la temática de clima	100
Tabla 4-4 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de la temática de Hidrología.....	105
Tabla 4-5 Comparación del desempeño de la modelación hidrológica para los diferentes casos de estudio	107

Introducción

En la actualidad, los recursos hídricos son un tema común en la escena internacional, no solamente porque las cuencas hidrográficas de más de 300 grandes ríos cubren más de la mitad de la superficie continental del planeta (Burton, 2003), sino porque se estima que 2.200 millones de personas carecen de acceso al agua potable, 4.200 millones carecen de acceso a saneamiento seguro, 2.300 millones viven en países con estrés hídrico y únicamente 24 de 153 países tienen acuerdos de operaciones para sus aguas transfronterizas (PNUMA, 2021).

Asociado con lo anterior, los ecosistemas de agua dulce han venido deteriorándose debido al constante aumento de la contaminación de las aguas continentales, la creciente demanda de agua para cubrir las necesidades básicas para alimentar las poblaciones, para cubrir las necesidades energéticas, satisfacer las necesidades industriales, y los desafíos que conlleva el cambio climático, que incrementa la variabilidad de la oferta de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico y ocasiona inundaciones y sequías más frecuentes y extremas (GWP, 2020; PNUMA, 2021).

Es por esto, que el debate con relación a los recursos hídricos en las últimas décadas pasó de un ámbito técnico, enfocado en la evaluación del recurso, a una aproximación más integrada que incluye un mayor rango de aspectos, como el social o el político. Grandes eventos como la Conferencia del Mar de Plata en 1977, la Conferencia de Dublín en 1992 y la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, constituyeron las bases y definieron los principios para el debate del manejo integral de los recursos hídricos, y constituyeron quizás el principal logro del siglo XX en términos de desarrollo sostenible: reconocer múltiples aspectos para la evaluación de los recursos hídricos (Burton, 2003).

La agenda 2030 para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, el acuerdo de París, el marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres y otros comités de carácter global, han venido generando estrategias para garantizar un futuro sostenible, entre los que tiene un papel relevante la interacción del ser humano con los recursos hídricos. Sin embargo, los resultados de la evaluación anual que realiza la Organización de las Naciones Unidas muestran que el mundo no está bien encaminado para lograr una gestión sostenible del agua y el saneamiento para 2030 (PNUMA, 2021).

De acuerdo con el más reciente reporte de progreso en el manejo integral de los recursos hídricos que realiza el Programa para el Medio Ambiente de la ONU, un total de 107 países

no están en camino de lograr la meta 6.5 de los objetivos de desarrollo sostenible¹. De ellos, entre 2017 y 2020, 55 países tuvieron avances limitados o no tuvieron y 52 países hicieron avances moderados, a pesar de sus esfuerzos para alcanzar la meta a 2030 (PNUMA, 2021).

Con relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Colombia se ubica dentro del grupo de los 52 países que han venido presentando avances moderados, pero que requieren aumentar sus esfuerzos (PNUMA, 2021).

Si bien el país, por su localización geográfica, su orografía y la gran variedad de regímenes climáticos, se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo, cuando se considera en detalle la población y las actividades socioeconómicas, se ubica dentro de las regiones con baja oferta hídrica (Correa A., 2014; Correa Assmus, 2014; MAVDT, 2010; Murillo & Silva, 2019; Peralta M. et al., 2021; Zamudio R., 2012). Como expresa el más reciente Estudio Nacional del Agua en Colombia: “Los recursos hídricos en el país son vastos, pero no están repartidos de manera uniforme en el tiempo y el espacio” (IDEAM, 2019).

La necesidad de mejorar la administración de los recursos hídricos en Colombia, y su articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ha hecho que durante las últimas décadas se venga incorporando paulatinamente normativa para entender el agua como un bien de uso público en el país (desde el Decreto – Ley 2811 de 1974 “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”), lo que ha constituido la conformación de planes y estrategias que permitan administrar el recurso de una manera sostenible. Como bien lo establece el Decreto-Ley 2811 de 1974: “Se entiende por ordenación de una cuenca la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna, y por manejo de la cuenca, la ejecución de obras y tratamientos”.

A este respecto, en marzo de 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, publicó la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), en la cual se presentan recomendaciones para la planificación y el manejo del recurso hídrico, objetivos, objetivos específicos, estrategias, e indicadores de implementación, monitoreo y evaluación.

Un componente fundamental que establece el Decreto-Ley 2811 de 1974 y que incorpora la PNGIRH para la generación de conocimiento y la planificación, es la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS). El propósito de los POMCAS es entonces evaluar y planificar la administración de los recursos naturales a

¹ Meta 6.5: “De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda” ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (N. Unidas, Ed.).

nivel de cuenca, manteniendo un balance entre la explotación socio – económica de dichos recursos y la conservación de los componentes físicos y bióticos de la cuenca. En este contexto, es responsabilidad de las autoridades ambientales, o de la comisión conjunta, según sea el caso (Decreto 1640/2012, Art 18) declarar en ordenación las cuencas de su jurisdicción y proceder a formular el POMCA directamente y/o con el apoyo técnico parcial o total externo.

En la Guía Técnica para la formulación de los POMCAS, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) mediante la Resolución 1907 de 2013, se enfatiza la necesidad de caracterizar el recurso agua en la cuenca (i.e. cuantitativa, cualitativa, suministro, oferta y demanda), generando un marco institucional, socio – económico y ambiental, que permita identificar los problemas y conflictos asociados con el recurso. A pesar de estos lineamientos, la guía no presenta orientaciones técnicas que apoyen tanto la generación del conocimiento hidrológico requerido, como su integración dentro del marco propuesto en la PNGIRH.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en Colombia hay 399 subzonas sujetas a ordenación y elegibles para la formulación de POMCAS, de las cuales, según reporte del mismo Ministerio, en el país solamente el 17% de las subzonas contaban con un POMCA aprobado a diciembre de 2019, mientras que el 55% se encontraba sin inicio y el 27% estaba en proceso de elaboración (MADS, 2022a).

Estos reportes evidencian una aplicación limitada del enfoque de la PNGIRH, causada principalmente por el desconocimiento por parte de las autoridades ambientales del recurso, de sus usuarios, de las actividades para las cuales es aprovechado y de los procedimientos utilizados para captarlo y devolverlo a los cauces (González, 2017), a lo que se suma la carencia de esquemas de gestión binacional de los recursos hídricos en cuencas transfronterizas (Burgos G. & Gómez V., 2007).

En este contexto, es clara la necesidad de desarrollar y consolidar herramientas técnicas que brinden apoyo a las autoridades ambientales, encargadas de realizar la ordenación de las cuencas desde un punto de vista que permita ampliar el conocimiento del recurso. El adecuado entendimiento de estas herramientas técnicas permitirá analizar con mejor nivel de certidumbre diferentes escenarios, apoyando la toma de decisiones en el manejo del recurso, brindando a las instituciones la capacidad de ejecutar de forma efectiva y concertada la política pública de gestión integral del recurso hídrico (Rubio G., 2019).

De esta forma, este trabajo pretende consolidar una herramienta que apoye la gestión del conocimiento hidrológico en la formulación de POMCAS en Colombia, a través de la creación, ilustración y evaluación de HidroCHEP, una caja de herramientas hidrológicas en línea que busca cubrir diferentes aspectos abordados por la hidrología, y que se aspira sirva, entre otros, de apoyo para la etapa de diagnóstico del componente hídrico en cualquier POMCA.

HidroCHEP está compuesta por un amplio conjunto de aplicaciones computacionales (de software libre en su mayoría) que abarcan temáticas como: pretratamiento de datos, calculadoras hidrológicas (de evapotranspiración o de tiempos de concentración), análisis de información geoespacial, metodologías de balance hídrico, herramientas de modelación matemática, análisis estadísticos de series de tiempo, herramientas de planeamiento del recurso hídrico, herramientas de estimación de caudales ambientales, incorporación de incertidumbre en los análisis hidrológicos, entre otras.

La aplicación, ilustración y evaluación de HidroCHEP se ha realizado en tres cuencas con diferentes características de disponibilidad de información, como ejemplos de cuencas colombianas, y en particular para los análisis del recurso hídrico exigidos para un POMCA. El análisis hidrológico se ha abordado según la disponibilidad de información hidroclimatológica existente en cada cuenca, por lo cual, se ha evaluado la caja de herramientas, en tres escenarios de información: poca (río Humea), mediana (río Pamplonita), y amplia (río Chinchiná); obteniendo así un marco de referencia para apoyar a las autoridades ambientales y a los profesionales que practican la hidrología en el país, en particular, en la formulación del componente hidrológico de POMCAS a través del uso y articulación de las herramientas compiladas en la caja.

En este documento, el lector podrá encontrar en el capítulo 1 una breve descripción del estado del arte relacionado con los requerimientos planteados por la Guía Técnica para la Formulación de POMCAS elaborada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2014, junto con la actualización del estado de avance en la implementación de POMCAS para las 399 subcuencas objeto de ordenación en el país. El capítulo 2 describe la metodología empleada para la construcción de la caja de herramientas y los criterios escogidos para su aplicación y evaluación. El capítulo 3 presenta el diseño y la construcción de HidroCHEP como resultado de la investigación planteada, junto con los casos de estudio analizados para ilustrar su uso y finalmente se presenta en los capítulos 4 y 5 el análisis de los resultados obtenidos, junto con las conclusiones del trabajo desarrollado.

Objetivos

Objetivo General

Construir, ilustrar y evaluar para diferentes escenarios de disponibilidad de información hidroclimatológica, el uso de una Caja de Herramientas Hidrológicas para apoyar la gestión del conocimiento hidrológico en la formulación de POMCAS en Colombia.

Objetivos Específicos

1. Conformar una Caja de Herramientas Hidrológicas que apoye técnicamente la generación de conocimiento hidrológico para la formulación de POMCAS en el país.
2. Implementar el uso de la caja de herramientas hidrológicas, para tres casos de estudio, donde se tengan diferentes niveles de información hidroclimatológica (poca, mediana, amplia).
3. Establecer los alcances que tiene la implementación de la caja de herramientas hidrológicas para la formulación de POMCAS con el fin de generar un marco comparativo con los planes y estudios elaborados a la fecha para las cuencas objeto de estudio.

Pregunta de investigación

¿La implementación de una caja de herramientas enfocada en el componente hidrológico de un POMCA permitirá apoyar la gestión del conocimiento hidrológico en el proceso de formulación y/o actualización de estos instrumentos en el país?

1. Estado del arte

Desde finales del siglo XX y principios del siglo XXI, las políticas estatales de protección de los recursos naturales renovables en Colombia, expresadas a través de normas como el Decreto ley 2811 de 1974 y sus Decretos reglamentarios 2857 de 1981, 1729 de 2002 y 1640 de 2012, como expresa Molina (2017), han venido adquiriendo un amplio protagonismo, imponiéndose como una de las principales herramientas de planificación ambiental y de conservación de la oferta ambiental.

Al respecto, Gonzalez (2017) explica que: “para la comprensión del actual patrón de gestión de los recursos hídricos en el país, es necesario hacer referencia a tres documentos entre la amplia cantidad de leyes, decretos y resoluciones que dan estructura a la administración pública del medio ambiente en Colombia: 1. El Decreto 2811 de 1974, 2. La Ley 99 de 1993 y 3. La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH). Los dos primeros configuran el marco normativo e institucional de planeación y gestión de los recursos naturales renovables, y el tercero contiene las últimas directrices y lineamientos de acción política para la gestión del agua”.

En estos documentos se evidencia que los esfuerzos que se han venido articulando para la implementación de una gestión integral del recurso hídrico en Colombia, buscan ampliar el campo de acción de los procesos de ordenación de cuencas y el perfeccionamiento, tanto técnico como jurídico de esta gestión, como un referente necesario de cara a la crisis de desabastecimiento del recurso hídrico que entidades como el IDEAM han documentado de manera detallada (Molina R., 2017).

Por ello, es importante no desconocer la necesidad de implementar modelos que permitan a las autoridades ambientales y a los tomadores de decisión, capturar cómo las acciones humanas interactúan con los sistemas naturales (Turner II et al., 1995), ayudándoles a entender los posibles resultados de diferentes elecciones.

En el presente capítulo se realiza una descripción de la estructura de planificación del recurso hídrico en Colombia implementado por la PNGIRH, junto con las fases propias de elaboración de los POMCAS, como principal instrumento de planificación, y particularmente los apartes relacionados con la caracterización hidrológica del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica. Adicionalmente, se presenta una revisión bibliográfica sobre el entendimiento del término “herramienta hidrológica” para fines de consolidación de la caja de herramientas, y finalmente se hace la descripción de la importancia de las fuentes de información para el apropiado uso de las herramientas hidrológicas.

1.1 El POMCA como instrumento de planificación de cuencas hidrográficas

El proceso de ordenación de una cuenca en Colombia es concebido, en esencia, desde un enfoque sistémico, dado que la cuenca hidrográfica se comporta como un conjunto real, complejo y abierto, el cual presenta interacciones, entre el subsistema biofísico (suelo, agua, biodiversidad, aire), y los componentes económico, social y cultural.

En el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, se define la cuenca hidrográfica como la unidad espacial de análisis y gestión, en donde el agua interactúa con los demás recursos naturales renovables, elementos ambientales y/o ecosistemas estratégicos que la integran, así como con los elementos antrópicos que influyen positiva o negativamente en la misma y los actores clave para la gestión integrada del recurso hídrico (autoridades ambientales, usuarios, entes territoriales y demás entidades, tanto públicas como privadas, que actúan en la cuenca) (MAVDT, 2010).

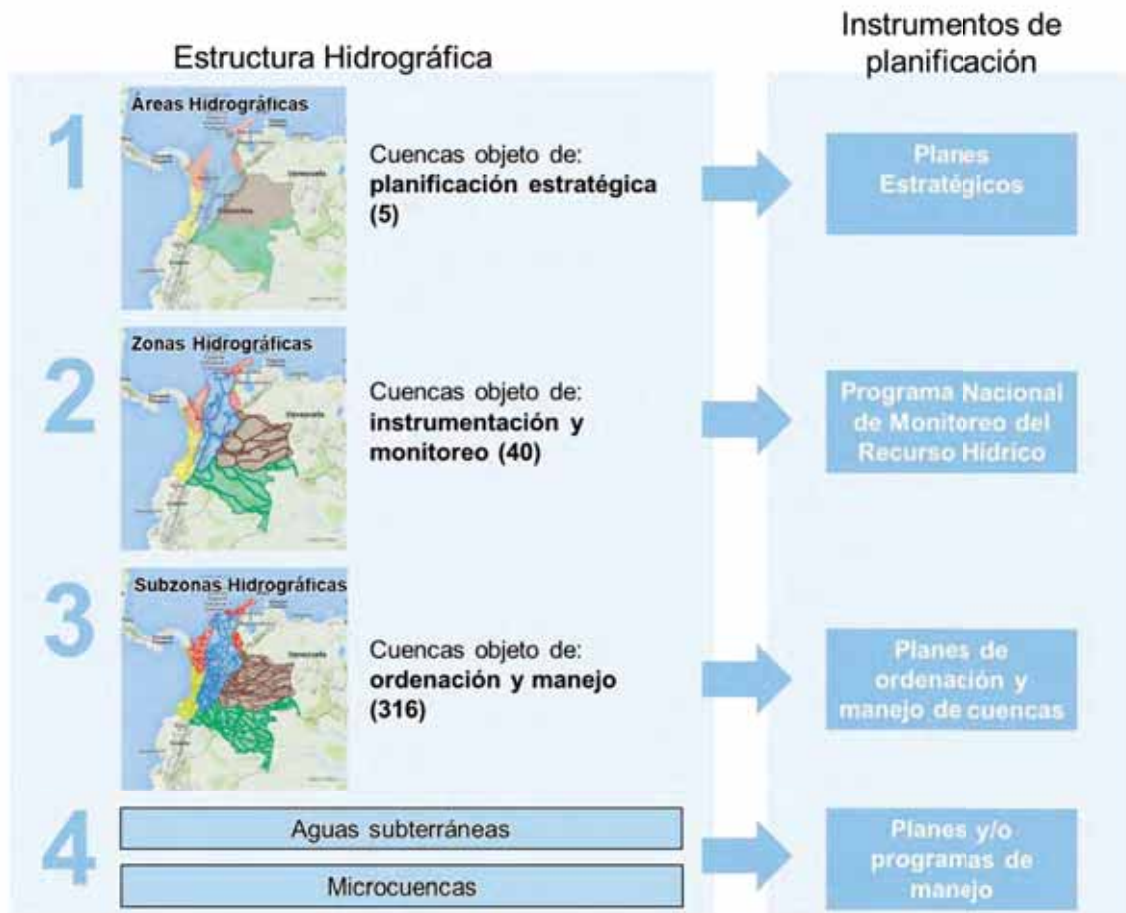
De conformidad con ello, la Presidencia de la República de Colombia expidió el Decreto 1640 de 2012, por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Esta reglamentación establece la estructura de planeación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas del país, permitiendo una mayor claridad en el nivel de gestión de estas por parte de las autoridades ambientales competentes y las diferentes entidades y actores responsables de su formulación e implementación.

1.1.1 Estructura hidrográfica para la planificación de cuencas

De acuerdo con la PNGIRH, y mediante el Decreto 1640 de 2012, la estructura para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos obedece a cuatro niveles, tal como se muestra en la Figura 1-1, los cuales a su vez resultan del proceso de zonificación de unidades hidrográficas adelantado por el IDEAM (2013), ajustado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2022a).

- Áreas hidrográficas o Macrocuencas: corresponden a las cinco macrocuencas o áreas hidrográficas del país: Magdalena – Cauca, Caribe, Orinoco, Amazonas y Pacífico, que son objeto de planes estratégicos, instrumentos de planificación ambiental de largo plazo con visión nacional y que constituyen el marco de formulación, ajuste, y/o ejecución de los diferentes instrumentos de política, planeación, gestión y seguimiento existentes en cada una de ellas. Los planes estratégicos se formulan a escala 1:500.000
- Zonas hidrográficas: corresponden a las definidas en el mapa de zonificación hidrográfica de Colombia (IDEAM, 2013), las cuales son el espacio para monitorear el estado del recurso hídrico y el impacto que sobre éste tienen las acciones desarrolladas en el marco de la PNGIRH. El instrumento de planificación de las zonas hidrográficas es el programa nacional de monitoreo de recurso hídrico.

Figura 1-1 Instrumentos de planificación para cada estructura hidrográfica según la PNGIRH y el Decreto 1640 de 2012



- Subzonas hidrográficas o su nivel subsiguiente: corresponden a las cuencas objeto de ordenación y manejo, definidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2022a), en las cuales se formularán e implementarán los POMCA.
- Microcuencas y acuíferos: corresponden a las cuencas de orden inferior a las subzonas hidrográficas o su nivel subsiguiente que no hagan parte de un POMCA, así como, los acuíferos prioritarios; estos serán objeto de Planes de Manejo Ambiental – PMA de microcuencas y Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos – PMAA, respectivamente.

De acuerdo con la zonificación realizada por el IDEAM, el país se subdivide en 5 áreas hidrográficas, las cuales contienen 40 zonas hidrográficas (IDEAM, 2013), y en estas a su vez se identifican 399 subzonas hidrográficas objeto de ordenación (MADS, 2022a).

1.1.2 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS)

Según el Artículo 18 del Decreto 1640 de 2012, el Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica (POMCA) es un “instrumento a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca entendido como la ejecución de las obras y tratamientos, en la perspectiva de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico – biótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico”.

Este mismo decreto establece a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, como los responsables de la elaboración de los POMCA de su jurisdicción, así como de la coordinación de la ejecución, seguimiento y evaluación de los mismos. Para los casos en que una cuenca hidrográfica sea común entre dos o más corporaciones, se establece una comisión conjunta a través de la cual se desarrollarán las fases del respectivo POMCA (Decreto 1640/2012, Art 18).

Como respuesta a la necesidad de incorporar los lineamientos y directrices de la PNGIRH en relación con la estructura de planificación de cuencas hidrográficas y a lo establecido en el Decreto 1640 de 2012, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió mediante la Resolución 1907 de 2013 la “Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS”, en donde se establecen los criterios, procedimientos y metodologías para orientar a las Corporaciones Autónomas Regionales en la formulación de POMCAS.

En esta guía se establece el modelo de planificación de un POMCA como el resultado de la aplicación metodológica de ciclos y fases. Las seis fases de un POMCA (aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y zonificación, formulación, ejecución, y seguimiento y evaluación) conforman un ciclo; cada ciclo marca un horizonte de tiempo para el cual el POMCA responde y su culminación marca un nuevo comienzo que da cuenta de otras circunstancias, sin perder de vista el conocimiento, la información y los logros obtenidos.

De esta forma, el POMCA tiene una dinámica permanente que reconfigura, a partir de lo ya establecido, el modelo de ordenación en un esquema de ciclos (MADS, 2014). Cada ciclo es un plan que satisface un propósito particular y alcanza resultados que son susceptibles de medirse en términos de logros, desempeño e impacto sobre el territorio de la cuenca y sus recursos naturales, especialmente el agua, convirtiéndose en un punto de referencia para el ciclo siguiente.

Un POMCA se realiza con un propósito en cada ciclo, relacionado con la problemática del momento, de forma que los procesos de planificación generan un valor agregado de conocimiento que repercute en el futuro para la toma de decisiones, haciendo que las fases del POMCA sean iterativas y no secuenciales (MADS, 2014).

1.1.2.1 Fases de un POMCA

Como se expuso anteriormente, son seis las fases que componen la formulación e implementación de un plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. De acuerdo con la Guía técnica para la formulación de POMCAS, cada fase incluye los alcances descritos a continuación:

- **Aprestamiento:** es la fase en la que se define el plan de trabajo; la identificación, caracterización y priorización de actores; la estrategia de participación; se hace la revisión y consolidación de información existente, el análisis situacional inicial; y el plan operativo detallado para la formulación del plan.
- **Diagnóstico:** en esta fase se determina el estado actual de la cuenca en sus componentes físico-biótico, socioeconómico y cultural, político – administrativo, funcional y de gestión del riesgo, que servirán de base para el análisis situacional y la síntesis ambiental de la cuenca objeto de ordenación y manejo.
- **Prospectiva y Zonificación ambiental:** dedicada a diseñar los escenarios futuros del uso coordinado y sostenible del suelo, de las aguas, de la flora y de la fauna presente de la cuenca, definidas en un horizonte mayor a 10 años, el modelo de ordenación de la cuenca, con base en el cual se formula el plan de ordenación y manejo correspondiente.
- **Formulación:** comprende la definición del componente programático, las medidas para la administración de los recursos naturales y el componente de gestión del riesgo. También como parte del componente programático, en esta fase se formulan la estructura administrativa y la estrategia financiera del POMCA, el diseño del programa de seguimiento y evaluación y las actividades conducentes a la divulgación y aprobación del POMCA.
- **Ejecución:** corresponde a las acciones de coordinación que deben adelantar las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible competentes para la ejecución del POMCA, en el escenario temporal para el que fue formulado.
- **Seguimiento y evaluación:** en esta fase se aplican los mecanismos definidos en el respectivo plan de seguimiento y evaluación definido en la fase de formulación, que permitan, como mínimo, realizar anualmente el seguimiento y evaluación del POMCA por parte de las respectivas Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible.

Las fases que componen el POMCA pretenden integrar y orientar los procesos de investigación, evaluación y monitoreo de los recursos naturales, mediante la generación de productos de información, los cuales buscan que la gestión de la información en un POMCA se constituya como un principio que soporte la planificación y toma de decisiones.

Es en la fase del diagnóstico en donde se identifican y definen los parámetros, variables, indicadores y fuentes de información útiles para realizar la caracterización de la cuenca (básica, biofísica, socioeconómica y cultural, político administrativo, funcional y de gestión del riesgo). La guía técnica del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS,

2014) presenta orientaciones técnicas que sirven de referente, incluyendo hojas metodológicas de los indicadores que consolidan la línea base del diagnóstico.

Para esto, la guía técnica presenta los productos necesarios para caracterizar la cuenca distribuidos por componentes, los cuales se dividen en temáticas y estos a su vez en actividades relacionadas con cada producto. La caracterización biofísica de la cuenca se constituye como un componente, en donde las temáticas incluyen, entre otras, la caracterización de clima, geología, hidrología, hidrografía, vegetación y flora e identificación de áreas y ecosistemas estratégicos.

1.1.3 Componente Hidrológico de un POMCA

La caracterización hidrológica, en términos generales, hace referencia a aquellos aspectos de la estructura física y ecológica que influyen la ocurrencia, distribución, movimiento y usos del agua. Para ello Blöschl et al. (2013) consideran necesario que se realice una estimación adecuada de las entradas meteorológicas requeridas para conocer la escorrentía en la cuenca (i. e. precipitación, temperatura, evaporación) y todos aquellos aspectos como la topografía, las características del suelo, la geología, la geometría de la red de drenaje, el uso y las coberturas del suelo, que influyen sobre el agua en la cuenca.

Como se expresó en la sección anterior, la caracterización biofísica de una cuenca dentro de un POMCA hace parte de la fase de diagnóstico. Esta caracterización incluye los factores y elementos que integran el medio natural, que por su importancia determinan las características y la dinámica del medio físico – biótico y su vulnerabilidad frente a las principales actividades humanas que se desarrollan en la cuenca.

Separando para este componente los aspectos físicos de los bióticos, las temáticas POMCA que establece la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014) que aportan a la caracterización hidrológica de una cuenca incluyen: geología, geomorfología, hidrogeología, hidrografía, clima, hidrología, morfometría, pendientes, calidad de agua y gestión del recurso hídrico, capacidad de uso de las tierras, cobertura y uso de la tierra.

El Anexo A de la Guía Técnica presenta en detalle los alcances de cada temática con el fin de establecer la caracterización hidrológica de la cuenca.

1.1.4 Metas y avances en la implementación de la política respecto a los POMCAS

Como expresa la PNGIRH, el logro de cada uno de los objetivos establecidos se debe verificar al cabo de los 12 años previstos como horizonte de la misma, mediante el cumplimiento de metas generales que se miden a través de indicadores diseñados específicamente para cada una de ellas. Para alcanzar estas metas la política establece

la implementación del Plan Hídrico Nacional que tiene tres fases: corto plazo (2010 a 2014), mediano plazo (2015 a 2018) y largo plazo (2019 a 2022).

Una de las metas establecidas plantea la formulación e implementación del 100% de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en las cuencas priorizadas en el Plan Hídrico Nacional. De acuerdo con el reporte de avances que presenta el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, al 31 de diciembre de 2019 de las 316 subzonas hidrográficas del país, se habían aprobado 69 POMCAS y se tenían en desarrollo 109 (MADS, 2022a).

Con el fin de actualizar la información reportada por el MADS, y como parte del trabajo aquí reportado, se realizó una consulta formal a las 33 Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, encargadas de la implementación del Plan Hídrico Nacional en materia de consolidación de POMCAS, en cuanto al estado de avance en la consolidación de los planes en las subzonas hidrográficas y de nivel subsiguiente de su respectiva jurisdicción.

De las 33 Corporaciones consultadas se contó con la respuesta de 24 de ellas, las cuales informaron de 86 POMCAS aprobados a la fecha y en ejecución, 29 en desarrollo y 23 priorizados para su futuro desarrollo (Ver Tabla 1-1 y Anexo A).

En la Figura 1-2 se muestran las subzonas hidrográficas que cuentan con POMCA en ejecución y/o en desarrollo y el estado de avance del mismo, en donde se logra evidenciar avances principalmente en las regiones Andina y Caribe, quedando rezagadas en la implementación de POMCAS las regiones del Pacífico, Amazonas y Orinoquía.

Tabla 1-1 Consolidado avance en la implementación de POMCAS

Fase	Informado CARs a Noviembre 2021		Reporte MADS a 31dic2019
	Subzonas Hidrográficas	Nivel Subsiguiente	
Priorizada	18	5	
Actividades Previas	1	1	2
Aprestamiento		2	1
Diagnóstico	1		2
Prospectiva y Zonificación	3		2
Ambiental			
Formulación	8	3	3
Ejecución, seguimiento y evaluación	45	35	6

1.2 Herramientas hidrológicas para la formulación de POMCAS

La palabra “herramienta”, desde un punto de vista genérico, es cualquier cosa utilizada como medio para cumplir una tarea o propósito. En el ámbito de los recursos naturales, diferentes autores la han definido como toda “tecnología, estrategia financiera o aproximación que sea usada en el sector de suministro de agua y sanidad” (Palaniappan et al., 2008), como un medio para cumplir una tarea o propósito que puede ser replicable como un programa de computador o un documento de algún tipo (lista de chequeo, matriz, etc.) (Trærup et al., 2014), o inclusive como un instrumento para cubrir uno o más pasos en el desarrollo de políticas o en el proceso de toma de decisiones (ECOFYS & IDS, 2011).

En este trabajo, la concepción de herramienta con fines hidrológicos debe entenderse como cualquier documento, programa de computador o sitio web que usa un conjunto de principios y técnicas que permiten apoyar la evaluación, estimación y/o construcción de parámetros que buscan entender la ocurrencia, movimiento y escurrimiento del agua en una cuenca hidrográfica. Esta definición busca enfocar las herramientas hacia un propósito más operacional, como los propuestos por la UNFCCC (2008) y Hammill y Tanner (2011).

Durante las últimas décadas se ha venido presentando una creciente disponibilidad de herramientas aplicadas en el campo de la hidrología, variando de simples a sofisticadas (Trærup et al., 2014), aplicables en más de una etapa del análisis hidrológico, o en algunas más específicas (Willows & Connell, 2003), diferenciadas por la resolución espacial y temporal, por el uso de modelos determinísticos o estocásticos, basados en filosofías “top-down” o “bottom-up”, o por ser diferentes en cualquier otro modo (Knoben et al., 2019).

Sin embargo, a pesar de la amplia gama de herramientas disponibles, Knoben et al. (2019) explican que, representar fenómenos naturales como de los que se ocupa la hidrología, se complica por diferentes aspectos de incertidumbre, asociados con las mediciones de las variables de entrada de los modelos, las mediciones de las variables de salida contra las que son comparados los resultados, la dependencia de los parámetros en la escogencia de valores “óptimos” durante la etapa de calibración, desempeño de las métricas escogidas, y en sí, la escogencia del modelo representa cierto grado de incertidumbre.

Mcleod et al. (2015) mencionan cómo la aplicación de algunas herramientas ha sido criticada por la falta de conocimiento de condiciones climáticas a escalas relevantes para comunidades locales, consideraciones limitadas de adaptaciones prácticas, y la poca disponibilidad de las herramientas para muchas comunidades por el costo o las limitadas capacidades de los tomadores de decisión para su uso; a la vez de la pobre guía que existe acerca de cómo seleccionar una herramienta apropiada para una tarea específica. En consecuencia, existe una necesidad de síntesis de herramientas, lo que ha hecho relevante la existencia de cajas de herramientas hidrológicas para la modelación y análisis de sensibilidad (Gnann et al., 2021; Mcleod et al., 2015).

1.2.1 La selección de herramientas hidrológicas

Trærup et al. (2014) proponen una serie de preguntas que deben realizarse previo a la selección de una herramienta particular para su uso, basados en la metodología propuesta por Willows & Connell (2003):

- ¿En qué contexto será usada la herramienta?: Muchas herramientas son genéricas y pueden ser aplicadas por varios usuarios y para varios objetivos, pero otras se enfocan a sectores u organizaciones específicas.
- ¿Cuál es el propósito del uso de la herramienta?
- ¿Cuál es el rol de las partes interesadas en la aplicación de la herramienta, su conocimiento y experticia?
- ¿Cuál es el costo del uso de la herramienta?: El costo asociado tanto económicamente por el acceso a la herramienta, como el costo de la asistencia técnica requerida para su uso.
- ¿Qué tiempo tomará el uso de la herramienta?
- ¿Se puede acceder a la información y datos necesarios para el uso de la herramienta?

Estas preguntas son importantes a la hora de seleccionar una herramienta con fines hidrológicos, con el fin de garantizar un uso óptimo de la misma y cumplir con el objetivo de su búsqueda.

1.2.2 Clasificación de las herramientas hidrológicas

En la literatura se presentan diferentes tipos de clasificaciones que buscan establecer un orden a tanto herramientas, como a los modelos empleados por las mismas. Refsgaard (1996) presenta una detallada descripción de los tipos de modelos y las definiciones relevantes a la modelación. Williams (1995) discute la clasificación en términos de cómo se representan los procesos, qué escalas de tiempo y espacio se usan y cuáles métodos de solución a las ecuaciones se emplean.

La iniciativa del Centro de Investigación para la Hidrología de Cuencas de Australia se basa en tres características básicas para clasificar los modelos que usan sus herramientas: la naturaleza de los algoritmos (empírico, conceptual o basado en procesos), si emplea aproximaciones estocásticas o determinísticas para identificar los parámetros del modelo, y si la representación espacial es distribuida o agregada (CRCCH, 2005).

Hamill y Tanner (2011) presentan una clasificación de acuerdo con la funcionalidad de la herramienta, clasificándolas en tres grandes grupos: herramientas que apoyan guiando procesos, herramientas que suministran datos e información, y herramientas que permiten compartir el conocimiento.

La clasificación de las herramientas resulta un hito importante en la consolidación de las cajas de herramientas. En la literatura se identifican varios trabajos de compilación de herramientas para diferentes fines, relacionados con la estimación de la ocurrencia, movimiento y drenaje del agua (Coron et al., 2017; Doczi, 2013; Garg et al., 2007; GIZ, 2009; Hammill & Tanner, 2011; Knoben et al., 2019; Mojtaba et al., 2019; Olhoff & Schaer, 2010; Palaniappan et al., 2008; Sadegh et al., 2019; Trærup et al., 2014; UNFCCC, 2008).

Esta clasificación según la funcionalidad de la herramienta constituye uno de los principales referentes en este trabajo para alcanzar el objetivo de construcción de una caja de herramientas hidrológicas para apoyar el desarrollo del componente hidrológico de un POMCA.

1.2.3 Necesidad de información para el uso de herramientas hidrológicas

Burton (2003) expone que uno de los principales pilares para el manejo integral de los recursos hídricos consiste en el conocimiento de los mismos, tanto en cantidad como en calidad, usos del agua, y características de los ecosistemas acuáticos en su interacción con las actividades humanas y con los fenómenos naturales, que deben coexistir de una manera sostenible.

De acuerdo con el último reporte de avances en la implementación del Manejo Integral de los Recursos Hídricos en el planeta, aproximadamente el 50 por ciento de los países reportan que la generación y acceso a la información en sus países es limitado (PNUMA, 2021). En el mismo reporte se señala que en muchos países se planea hacer más accesible la información, superando las dificultades en consolidar repositorios de información y su organización para que el uso sea útil a los diferentes actores interesados.

La identificación de esta necesidad de acceso y organización de la información para la formulación de POMCAS en Colombia, ha sido documentada recientemente por Molina (2017) y Rubio (2019). Estos trabajos exponen la importancia de *“trascender el enfoque basado en el manejo de sistemas de información geográfica y en los modelos de gestión de la información ambiental alimentados con datos desactualizados. Se requiere recopilar información primaria de orden biótico, físico y social que permita una verdadera gestión del conocimiento frente a las cuencas, lo cual garantizaría la toma de decisiones suficientemente informadas”*.

En Colombia se ha avanzado en la creación del sistema de información del recurso hídrico (SIRH) como módulo del sistema de información ambiental de Colombia (SIAC). Sin embargo, de acuerdo con Rubio (2019), existen grandes atrasos en el cargue de la información a estos sistemas por parte de las autoridades ambientales. Lo anterior evidencia una deficiente capacidad al nivel técnico y de gobernanza para alimentar y usar el sistema, lo que incide en la toma de decisiones coordinadas y efectivas para la gestión integral del recurso hídrico.

Adicionalmente, es importante incluir dentro de los sistemas de acceso a información las diferentes tecnologías de información emergentes, como las redes de monitoreo en tiempo real, y su integración con los modelos matemáticos y las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta integración representa un paso importante para el cumplimiento en la agenda 2030 de los objetivos de desarrollo sostenible en sus tres pilares: ambiental, social y económico (Skoulikaris et al., 2018).

2. Metodología

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados para el trabajo de investigación aquí reportado, se ha seguido una metodología estructurada en tres pasos que permiten atender cada uno de los objetivos específicos planteados y desarrollar los productos del trabajo:

- Paso 1: Diagnóstico y recopilación de la información
- Paso 2: Desarrollo e implementación
- Paso 3: Análisis y resultados

En el primer paso, se ha adelantado el ejercicio de recopilación de información a partir de fuentes bibliográficas y/o consultas a entidades competentes en relación con el desarrollo de los POMCAS en Colombia. A partir de la información recopilada, se ha procedido al desarrollo e implementación de cada uno de los productos esperados en la investigación, para con este ejercicio adelantar así los correspondientes análisis y conclusiones que deriven de su desarrollo.

Los productos esperados del trabajo de investigación están asociados con los objetivos específicos planteados así:

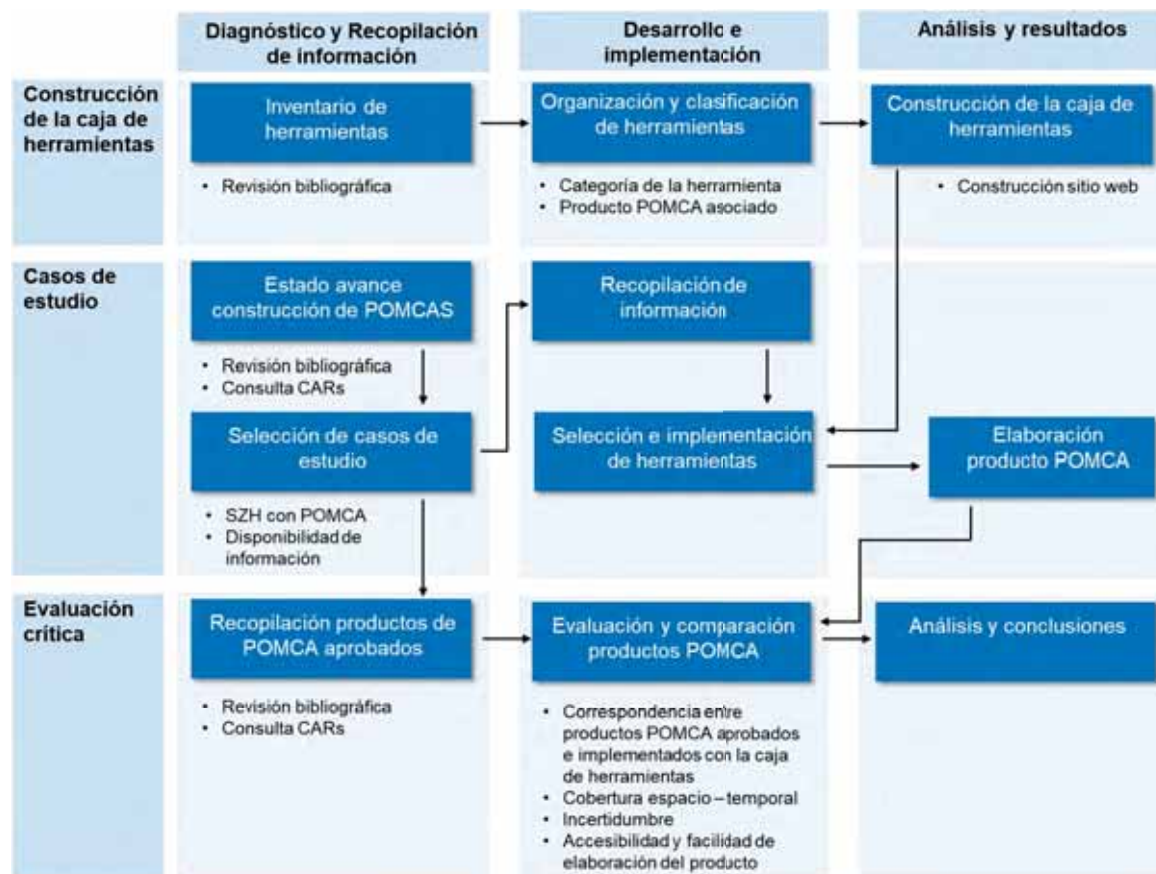
1. Construcción de la caja de herramientas.
2. Selección y desarrollo de los casos de estudio.
3. Evaluación crítica de la caja de herramientas.

Un panorama general de la implementación de la metodología para cada uno de los productos se observa en el esquema de la Figura 2-1, la cual se describe en detalle en las siguientes secciones:

2.1 Construcción de la caja de herramientas

Para la construcción de la caja de herramientas se realizó inicialmente un inventario de las herramientas disponibles que permiten abordar la construcción de los diferentes productos asociados con el componente hidrológico de los POMCA.

Figura 2-1 Metodología del trabajo de investigación



La disponibilidad de la herramienta, la validación de su uso de acuerdo con experiencias de otros investigadores, el respaldo científico brindado por los desarrolladores de la herramienta, y la existencia de material de apoyo para su uso, constituyen los principales criterios para definir su inclusión dentro del inventario.

A partir del inventario se ha adelantado el ejercicio de organización y clasificación de las herramientas seleccionadas, en función de sus capacidades y de los productos POMCA asociados al uso de la herramienta. Dado que la elaboración del POMCA constituye un ejercicio interdisciplinario con diferentes etapas, como se describió en la sección 1.1, se seleccionaron únicamente aquellas etapas y temáticas asociadas puramente con el componente hidrológico. En este sentido, se seleccionaron las temáticas de Hidrografía, Clima, Hidrología, Morfometría y Pendientes de la etapa de Diagnóstico de un POMCA, de acuerdo con la guía establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014).

Una vez definida la arquitectura de la Caja de Herramientas se procedió a su desarrollo, el cual se planteó como un sitio web de libre acceso para facilidad de consulta y distribución, con el fin de consolidar tanto las herramientas, como la información que orienta al usuario acerca de su uso e implementación, asociada con los productos POMCA, buscando:

- Facilidad de consulta
- Interfaz amigable para su uso
- Accesibilidad de cualquier actor que participe en la elaboración de un POMCA
- Disponibilidad de material de apoyo

2.2 Selección y desarrollo de casos de estudio

Con el fin de ilustrar el uso de la caja de herramientas y evaluar su efectividad, se realizó su implementación en tres casos de estudio con diferentes características de disponibilidad de información hidroclimatológica, permitiendo evidenciar la versatilidad de la misma.

Para ello, inicialmente se adelantó la etapa de recopilación de información mediante la consulta de reportes en páginas web oficiales y directamente ante las Corporaciones Autónomas Regionales.

Los casos de estudio fueron seleccionados de subzonas hidrográficas que contaban con un POMCA aprobado y en ejecución, lo que permitió comparar los resultados obtenidos a partir del uso de las herramientas de la Caja, con los productos aprobados en el documento POMCA. De acuerdo con la metodología establecida fueron dos los criterios principales para la selección de los casos de estudio: que la subzona contara con un POMCA y la disponibilidad de información para la elaboración de los productos POMCA correspondientes.

2.2.1 Subzonas hidrográficas con documento POMCA

De acuerdo con la consulta hecha a las Corporaciones Autónomas Regionales en relación con los POMCA implementados en sus jurisdicciones y el avance en la construcción de estos planes (Ver Anexo A), se tienen las siguientes características:

- **Cobertura física del Plan:** De las 138 subzonas hidrográficas del país sobre las que se encuentra en desarrollo o en ejecución un POMCA, 76 de los planes contemplan la cobertura total de la subzona y los restantes se implementan sobre niveles subsiguientes de acuerdo con la metodología de zonificación establecida por el IDEAM (IDEAM, 2013). Se seleccionaron aquellas subzonas hidrográficas cuyo POMCA tuviera cobertura sobre la totalidad de la subzona.
- **Año de aprobación del Plan:** Con el fin de hacer comparativos los casos de estudio, se tomaron las subzonas hidrográficas cuyo POMCA hubiera sido construido posterior a la implementación de la Guía Técnica para la elaboración de POMCAS del año 2013 (Resolución 1907 de 2013²). De la recopilación de

² Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución No 1907 del 27 de diciembre de 2013 “Por la cual se expide la Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas”

información se identificó que solamente 5 de los POMCA fueron aprobados e implementados antes del año 2013.

- **Etapas de consolidación del Plan:** 86 subzonas hidrográficas o de nivel subsiguiente cuentan con un POMCA en ejecución y seguimiento, con lo que se garantiza que se encuentran culminadas las etapas precedentes de acuerdo con la Guía Técnica del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014), las cuales hicieron parte de la selección.

Uniendo los criterios anteriormente expuestos, se preseleccionaron 45 subzonas hidrográficas, tal como se muestra en la Figura 2-2.

2.2.2 Disponibilidad de información hidroclimatológica

Tomando como principal fuente de información hidroclimatológica la registrada en estaciones de monitoreo, con base en el catálogo de estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021), se realizó el análisis para la clasificación de las subzonas hidrográficas preseleccionadas por documento POMCA, como se describió previamente.

Tomando como referente el criterio de clasificación por densidad de estaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008), el análisis se realizó para tres grupos de estaciones: climatológicas (agrometeorológicas, climáticas ordinarias, climáticas principales, radio sonda, sinóptica principal y sinóptica secundaria), pluviométricas (pluviométricas y pluviográficas) e hidrológicas (limnimétricas y limnigráficas), tomando como criterios la densidad de estaciones (cantidad de estaciones por kilómetro cuadrado del área de la subzona) el cual se clasificó según el rango de valores resultantes, y la longitud del periodo en que las estaciones contaban con registros, tomando los criterios señalados en la Tabla 2-1.

Los resultados de la clasificación se muestran en el Anexo C y gráficamente en la Figura 2-3, a partir de los cuales se obtuvieron 3 Subzonas Hidrográficas con amplia información hidroclimatológica, 9 con mediana y 33 con poca, las cuales se relacionan en las Tablas 2-2 a 2-4.

Tabla 2-1 Criterio de clasificación de Subzonas Hidrográficas por disponibilidad de información hidroclimatológica

Clasificación	Densidad (# estaciones / km ²)			Longitud de registros*
	Climatológica	Pluviométrica	Hidrológica	
Amplia	>0.013	>0.016	>0.014	>30 años
Mediana	0.007 – 0.013	0.010 – 0.016	0.008-0.014	10 a 20 años
Poca	<0.007	<0.010	<0.08	< 10 años

*30 años se considera típicamente en climatología como una escala de tiempo suficiente para producir un valor representativo del clima (Koutsoyiannis, 2006).

Figura 2-2 Preselección de casos por Subzonas Hidrográficas con documentos POMCA

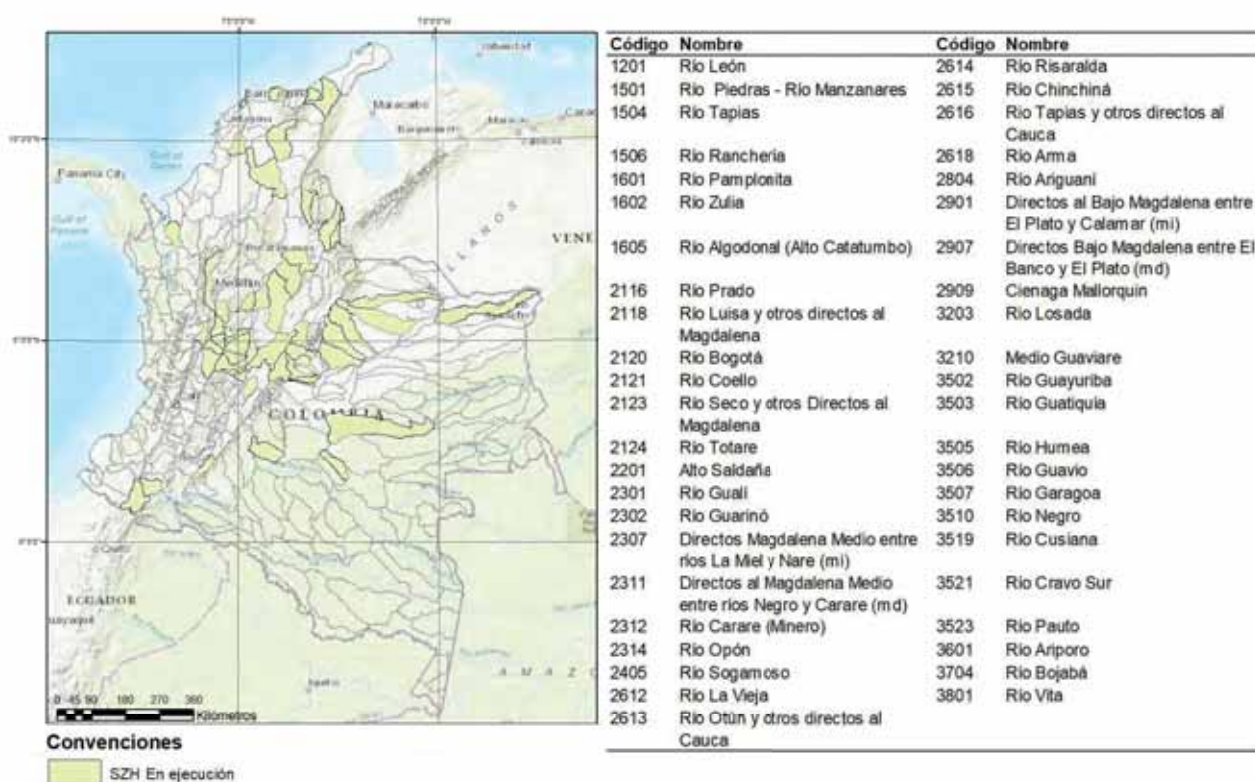
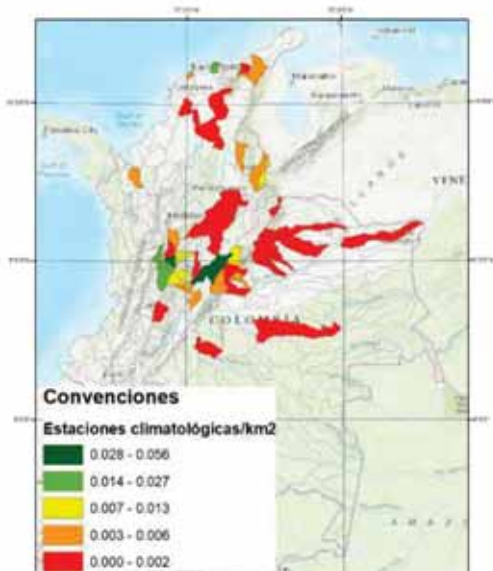
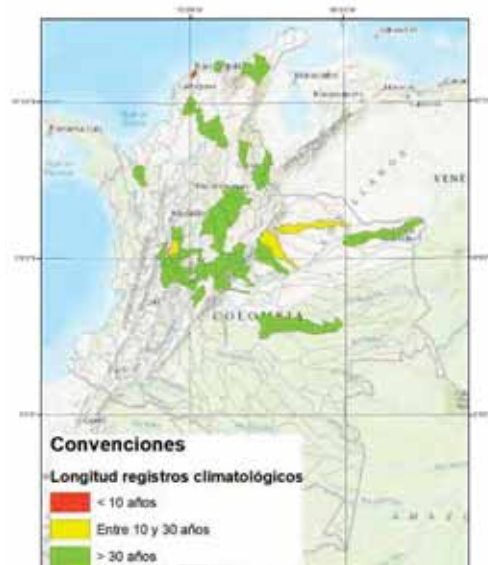


Figura 2-3 Clasificación de casos preseleccionados por disponibilidad de información hidroclimatológica por densidad de información (a, c y e) y longitud de registros (b, d y f).

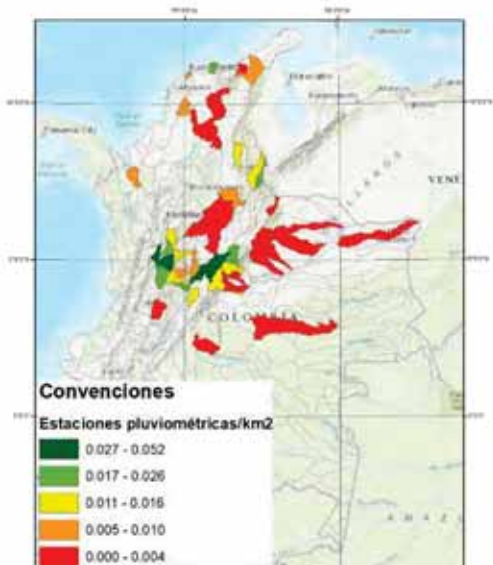
a)



b)



c)

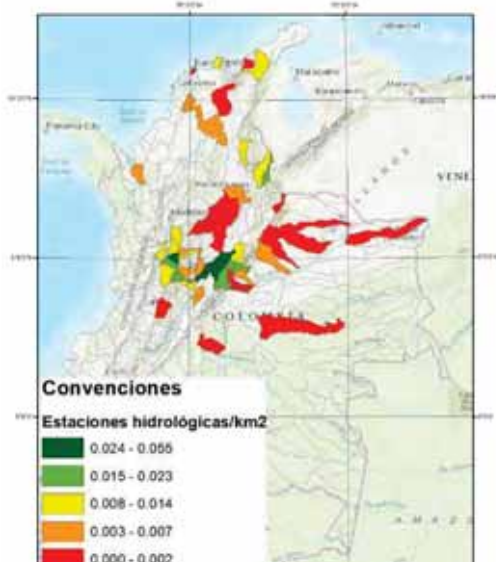


d)



Cont. Figura 2-3 Clasificación de casos preseleccionados por disponibilidad de información hidroclimatológica por densidad de información (a, c y e) y longitud de registros (b, d y f).

e)



f)



Tabla 2-2 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con amplia disponibilidad de información hidroclimatológica

Código	Nombre
2613	Río Otún y otros directos al Cauca
2615	Río Chinchiná
2120	Río Bogotá

Tabla 2-3 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con mediana disponibilidad de información hidroclimatológica

Código	Nombre
3507	Río Garagoa
2121	Río Coello
2124	Río Totare
2302	Río Guarinó
2301	Río Gualí
1601	Río Pamplonita
2614	Río Risaralda
2612	Río La Vieja
1501	Río Piedras - Río Manzanares

Tabla 2-4 Subzonas hidrográficas preseleccionadas con poca disponibilidad de información hidroclimatológica

Código	Nombre	Código	Nombre
2201	Alto Saldaña	3521	Río Cravo Sur
2116	Río Prado	3519	Río Cusiana
2118	Río Luisa y otros directos al Magdalena	3503	Río Guatiquía
2123	Río Seco y otros Directos al Magdalena	3505	Río Humea
2616	Río Tapias y otros directos al Cauca	3506	Río Guavio
3704	Río Bojabá	3502	Río Guayuriba
2618	Río Arma	1605	Río Algodonal (Alto Catatumbo)
2307	Directos Magdalena Medio entre ríos La Miel y Nare	1602	Río Zulia
2311	Directos al Magdalena Medio entre ríos Negro	3210	Medio Guaviare
2314	Río Opón	1201	Río León
2405	Río Sogamoso	1506	Río Ranchería
2312	Río Carare (Minero)	1504	Río Tapias
2901	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar	2907	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato
2804	Río Ariguaní	3203	Río Losada
3601	Río Ariporo	3510	Río Negro
3523	Río Pauto	2909	Ciénaga Mallorquin
3801	Río Vita		

A partir de la clasificación realizada, se tuvo igualmente en cuenta que al menos uno de los casos correspondiera a una subzona hidrográfica fronteriza con el fin de ampliar el marco de uso de la Caja de Herramientas. En este sentido, los casos de estudio finalmente seleccionados para la aplicación de la caja de herramientas corresponden a las Subzonas Hidrográficas 2615 – Río Chinchiná, 1601 – Río Pamplonita y 3505 – Río Humea.

Finalizada la selección de los casos de estudio, se procedió a la recopilación de la información necesaria para la elaboración de los productos POMCA para cada uno de ellos, para lo cual se utilizó la caja de herramientas consolidada como el primer producto descrito en el numeral anterior, y posteriormente a la elaboración de los productos, siguiendo las recomendaciones de la Guía Técnica del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014).

En adelante la codificación de los productos será tal como se describe a continuación:

Productos de la temática de hidrografía:

- H01 Identificación, descripción y espacialización de la red hidrográfica
- H02 Caracterización de los sistemas y patrones de drenaje

Productos de la temática de morfometría:

- M01 Cálculo de parámetros e índices morfométricos

Productos de la temática de pendientes:

- P01 Análisis de pendientes

Productos de la temática de clima:

- C01 Salida cartográfica con la representación de las isoyetas
- C02 Salida cartográfica con la representación de las isotermas
- C03 Estimación de la evapotranspiración
- C04 Mapa de índice de aridez
- C05 Mapa de zonificación climática

Productos de la temática de hidrología:

- Hi01 Descripción y evaluación de la red hidrológica en la cuenca
- Hi02 Caracterización hidrológica
- Hi03 Estimación de la oferta hídrica
- Hi04 Estimación de la demanda hídrica
- Hi05 Elaboración de balances hidrológicos
- Hi06 Estimación de índices hidrológicos

2.2.3 Indicadores estadísticos

Teniendo en cuenta que algunos de los productos POMCA se obtienen a partir de la aplicación de modelos, o de fuentes de información de sensores remotos que no han sido validadas en las regiones donde se adelantaron los casos de estudio, se emplearon indicadores o métricas estadísticas para la evaluación del desempeño, en los casos en los que se contó con información de referencia.

En la literatura se encuentran varios indicadores; para este estudio se emplearon los señalados en la Tabla 2-5, donde n representa el número total de los datos empleados, i representa las series de tiempo de las parejas de datos observados y simulados, Q_i^s y Q_i^o representan las variables simuladas y observadas respectivamente, y Q_{avg} representa el promedio de los datos observados de la variable.

Tabla 2-5 Criterios para evaluar el desempeño de modelos y fuentes de información y sus clasificaciones

Indicador estadístico	Valores de referencia	Clasificación del desempeño	Referencia
Mean Bias Error (MBE) $MBE = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i^s - Q_i^o)}{n}$	> 0 (positivo) < 0 (negativo)	Sobrestimaciones Subestimaciones	Ines & Hansen (2006)
Percentage of BIAS (PBIAS) $PBIAS = \frac{\sum Q_i^o - \sum Q_i^s}{\sum Q_i^o} \times 100$	< ± 10 $\pm 10 - \pm 15$ $\pm 15 - \pm 25$ > ± 25	Muy bueno Bueno Satisfactorio No satisfactorio	Singh et al. (2005) Chung et al. (2002)
Coeficiente de correlación (R^2) $R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum (Q_i^o - Q_{avg})^2}$	0.85 – 1.00 0.70 – 0.85 0.60 – 0.70 0.40 – 0.60 $R^2 \leq 0.40$	Muy bueno Bueno Satisfactorio Aceptable No satisfactorio	Cameron & Windmeijer (1997)
RMSE Observation Standard Deviation Ratio (RSR) $RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$ $RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_i^s - Q_i^o)^2}{n}}$	< $\frac{STDEV_{obs}}{2}$ 0.00 – 0.50 0.50 – 0.60 0.60 – 0.70 > 0.70	Satisfactorio Muy bueno Bueno Satisfactorio No satisfactorio	Singh et al. (2005) Moriassi et al. (2007)

2.3 Evaluación crítica de la caja de herramientas

Con el fin de evaluar la pertinencia de la caja de herramientas para apoyar la gestión del conocimiento en el componente hidrológico necesario para la elaboración de un POMCA, se realizó la etapa de evaluación estableciendo las principales fortalezas, ventajas y limitaciones de su uso.

Para ello se recopiló la información de los productos POMCA elaborados para la versión aprobada del Plan en ejecución en las subzonas hidrográficas de los casos de estudio seleccionados. Esto con el fin de establecer una comparación entre la información presentada en los documentos POMCA con la resultante de la aplicación de la caja de herramientas del presente trabajo, teniendo principalmente en cuenta los siguientes aspectos:

- Cobertura y resolución espacio – temporal de la información empleada.
- Incertidumbre asociada con las metodologías, herramientas e información empleadas.
- Accesibilidad y facilidad de elaboración del producto POMCA.

A partir de este análisis comparativo se han obtenido las lecciones aprendidas en el diseño e implementación de la caja de herramientas, identificando sus fortalezas y limitaciones, en función del cumplimiento de los objetivos trazados para la presente investigación.

3. Resultados

De acuerdo con los objetivos específicos planteados para la presente investigación, y con el fin de facilitar su comprensión, este capítulo se ha dividido en dos secciones, que incluyen la creación de la caja de herramientas hidrológicas, y su aplicación. El análisis y la evaluación de los resultados de la misma se presenta en el capítulo cuatro.

3.1 HidroCHEP: Una caja de herramientas para la formulación de POMCAS

Como resultado del trabajo de investigación realizado, se elaboró HidroCHEP: una caja de herramientas de hidrología para la formulación de POMCAS en Colombia. La Caja de Herramientas es un repositorio de fuentes de información, metodologías y herramientas, dispuestos con el fin de apoyar la construcción del componente hidrológico de un POMCA, de acuerdo con los lineamientos especificados en la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014).

Si bien, la creciente disponibilidad de herramientas de código abierto ha hecho comunes las cajas de herramientas en la práctica de la hidrología (Coron et al., 2017; Dawson et al., 2007; Doczi, 2013; Gnann et al., 2021; Knoben et al., 2019; Sadegh et al., 2019; Sarrazin et al., 2017), el objetivo de HidroCHEP fue consolidar un sitio web en donde se centralicen tanto fuentes de información, como herramientas de procesamiento y análisis en función de los productos que se elaboran en el componente hidrológico de los POMCAS.

3.1.1 Selección de Herramientas

En el presente trabajo se seleccionaron 87 herramientas, que si bien no representan una lista exhaustiva de todas las herramientas disponibles, se considera que representan adecuadamente las herramientas que se requieren en la consolidación de los productos del componente hidrológico requeridos en la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014).

Las herramientas se organizaron en grupos, cuya clasificación general se basa en la categorización presentada por Hammill y Tanner (2011) según la funcionalidad de la herramienta, incluyendo las siguientes categorías de clasificación:

- **Herramientas que suministran datos e información:** Constituida por todos aquellos documentos y sitios web que suministran datos e información que permiten la construcción de los productos exigidos por el POMCA para el componente hidrológico.
- **Herramientas de procesamiento de datos:** Herramientas que permiten procesar y analizar los datos típicamente empleados en aplicaciones hidrológicas.
- **Herramientas de caracterización climática:** Herramientas que permiten realizar la caracterización de las diferentes variables climatológicas exigidas en la Guía Técnica para la formulación de POMCA.
- **Herramientas de estimación de índices:** Conjunto de herramientas que permiten estimar índices empleados para caracterizar el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica.
- **Herramientas de modelos de balance hídrico:** Herramientas que permiten realizar balances hídricos en cuencas con diferentes niveles de agregación y disponibilidad de información.
- **Herramientas de modelación matemática:** Herramientas que permiten la implementación de modelos matemáticos para la simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca.
- **Herramientas de calibración – validación de modelos:** Herramientas empleadas para realizar la calibración y validación de modelos dentro del marco de modelación matemática en hidrología.
- **Herramientas de hidrografía:** Conjunto de herramientas que permiten realizar caracterizaciones de la red hidrográfica de una cuenca.
- **Herramientas de gestión del recurso hídrico:** Herramientas que incluyen componentes de oferta, demanda y gestión del recurso hídrico, para la evaluación de escenarios y respuestas hidrológicas.
- **Herramientas de estimación de caudal ambiental:** Herramientas que abarcan, desde diferentes acercamientos, la estimación del caudal ambiental como elemento fundamental en el cálculo de la oferta y en la gestión de los recursos hídricos en una cuenca.

Este esquema de clasificación busca dar un orden a las herramientas, pero las categorías no son totalmente independientes ni mutuamente excluyentes unas de otras. Una herramienta puede desempeñar diferentes funciones y haber sido diseñada para atender una gran variedad de procesos. Esto no debe ser considerado como un inconveniente sino por el contrario como un indicador de la versatilidad de la herramienta a través del amplio rango de funciones que puede atender.

En el Anexo B se muestra la selección y clasificación de las herramientas de acuerdo con las categorías descritas anteriormente, de acuerdo con los productos POMCA donde pueden ser utilizadas.

3.1.2 Arquitectura y diseño de HidroCHEP

La arquitectura principal de HidroCHEP compila fuentes de datos y herramientas que permiten realizar la caracterización hidrológica de una cuenca, las cuales se relacionan e integran con el fin de apoyar la elaboración de los productos POMCA, aportando de manera adicional guías que orientan dicha integración, tal como se muestra en la Figura 3-1.

De esta forma, HidroCHEP está compuesta por un amplio conjunto de aplicaciones computacionales (en su mayoría de software libre) que permiten realizar pretratamiento de datos, cálculos hidrológicos, análisis de información geoespacial, análisis de balance hídrico, modelación matemática, análisis estadísticos de series de tiempo, planeamiento del recurso hídrico, estimación de caudales ambientales y análisis de incertidumbre en los estudios hidrológicos.

La estructura de HidroCHEP, como se muestra en la Figura 3-2, cuenta con cuatro secciones principales en las que se puede encontrar:

Figura 3-1 Arquitectura principal de HidroCHEP

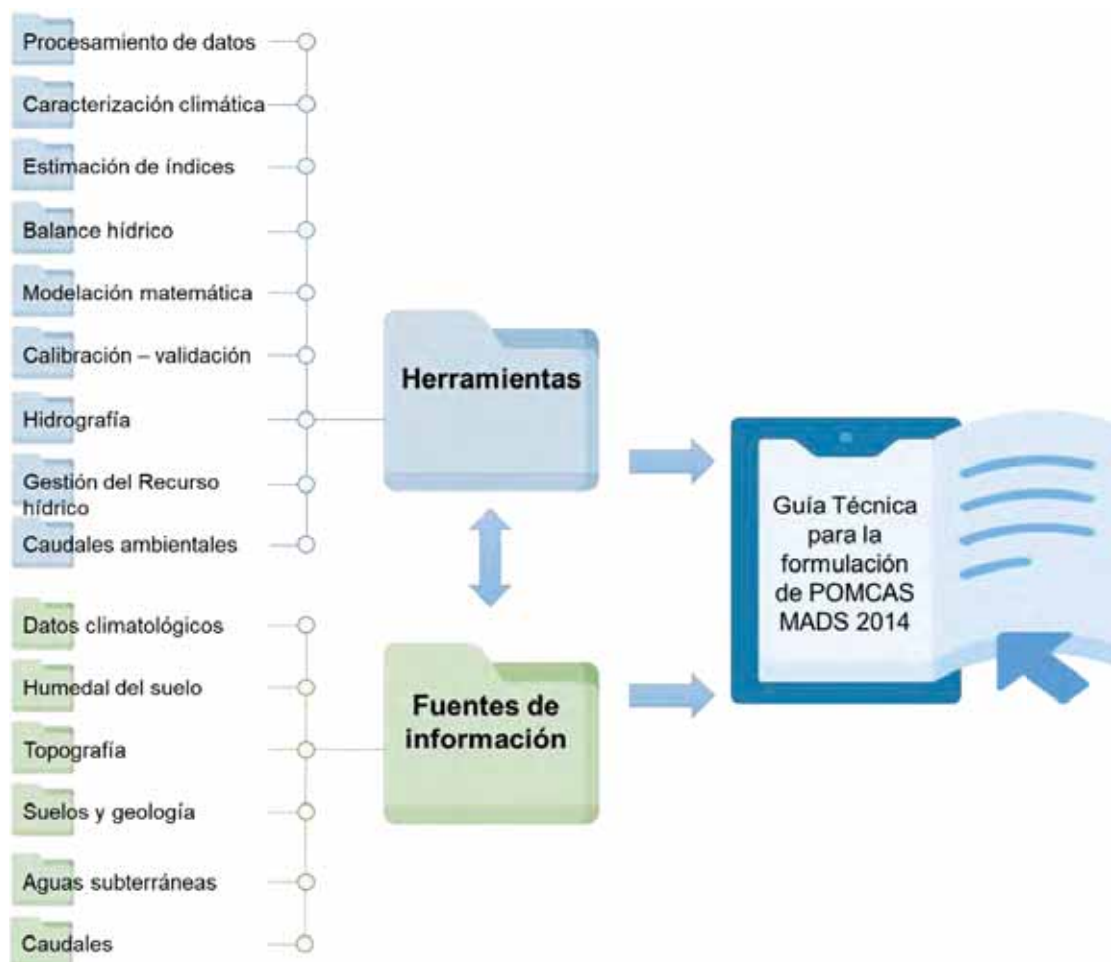


Figura 3-2 Estructura principal de HidroCHEP



- **Temáticas POMCA seleccionadas:** Cada temática y actividad relacionada con el componente hidrológico de un POMCA tiene productos específicos indicados en la Guía Técnica (MADS, 2014). La sección de las temáticas POMCA, provee al usuario de guías con el fin de brindar apoyo en la construcción de cada producto. La guía incluye la descripción de la temática, su uso en la construcción de otros productos, las herramientas e información necesaria, y una breve explicación del procedimiento requerido para desarrollar el producto. Las temáticas seleccionadas incluyen hidrografía, clima, hidrología, morfometría y pendientes.
- **Repositorio de Herramientas:** Esta sección corresponde a un repositorio de herramientas con fines hidrológicos tal como se describió en la sección 3.1.1 “Selección de Herramientas”. Las herramientas se agrupan de acuerdo con la clasificación establecida en el mismo numeral, dedicando una sección especial a la recopilación de datos, que incluye las fuentes de información meteorológica y de caracterización de la cuenca, tanto de bases de datos globales como de la red nacional de monitoreo operada por el IDEAM y la información generada por servicios nacionales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- **Casos de estudio:** Esta sección presenta los casos de estudio, en los que se relacionan las herramientas empleadas para el desarrollo de los productos requeridos por el POMCA, junto con los resultados de su aplicación. La versión actual de HidroCHEP cuenta con tres casos de estudio en las cuencas de los ríos Humea, Pamplonita y Chinchiná. La descripción de los casos de estudio se presenta en la sección 3.2 “Aplicación de HidroCHEP: Casos de estudio” del presente documento, como actividad ilustrativa del uso de HidroCHEP.
- **Soporte:** Incluye elementos de apoyo para los usuarios de la caja de herramientas como por ejemplo una guía para usuarios de primera vez, un espacio para la construcción de foros sobre el uso de herramientas de acceso libre con cuentas de correo electrónico de Gmail®, y finalmente un repositorio de las publicaciones con

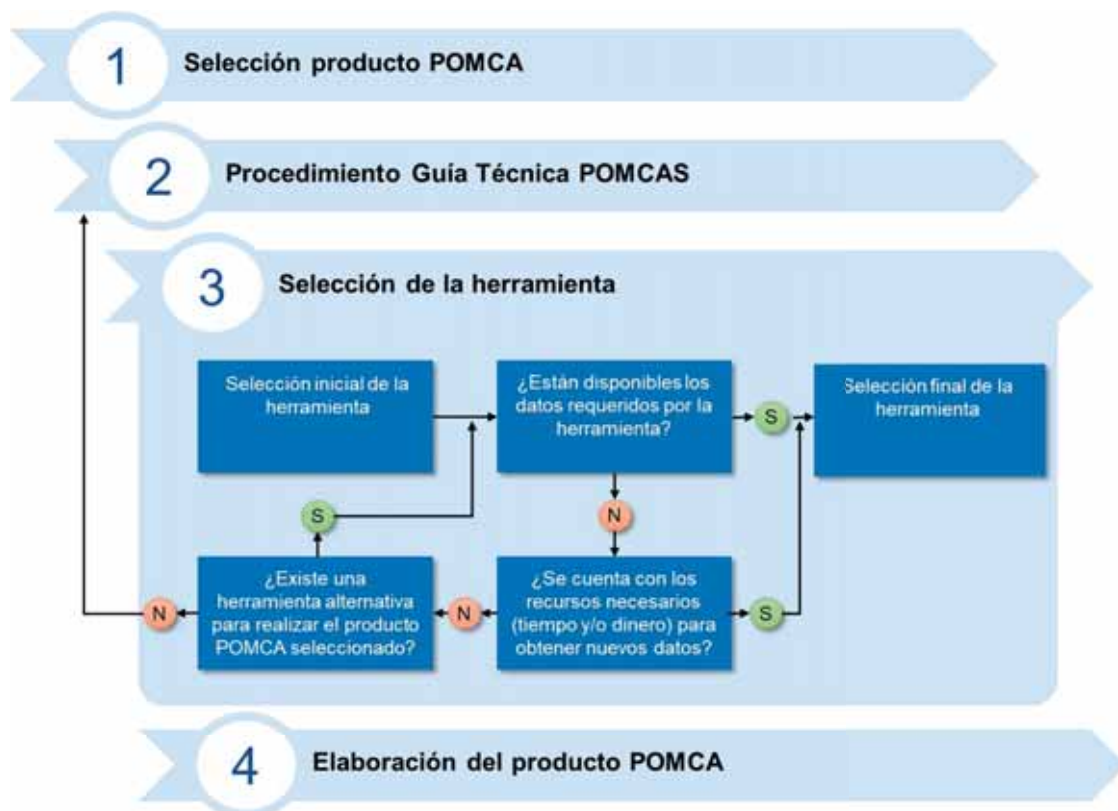
relación a la caja de herramientas HidroCHEP o que usaron su información para apoyar investigaciones y elementos descriptivos sobre la construcción de la caja de herramientas.

3.1.3 Marco metodológico para el uso de HidroCHEP

Siguiendo el objetivo principal de HidroCHEP, el esquema metodológico planteado para poder obtener un producto POMCA con el apoyo de la caja de herramientas corresponde al indicado en la Figura 3-3.

El esquema plantea que el usuario seleccione el producto POMCA a elaborar, para el cual HidroCHEP le ofrece un conjunto de instrucciones incluidas en la descripción del producto, mediante las cuales podrá realizar la selección preliminar de la herramienta a emplear. Siguiendo las recomendaciones hechas por el Cooperative Research Center for Catchment Hydrology de Australia (CRCCH, 2005), en la selección de una herramienta el usuario debe considerar tres aspectos importantes: 1. Acceso a la información requerida, 2- Acceso a la experiencia necesaria en el uso de la herramienta, y 3. Disponibilidad de recursos (tiempo y dinero).

Figura 3-3 Marco metodológico para la elaboración de un producto POMCA en HidroCHEP

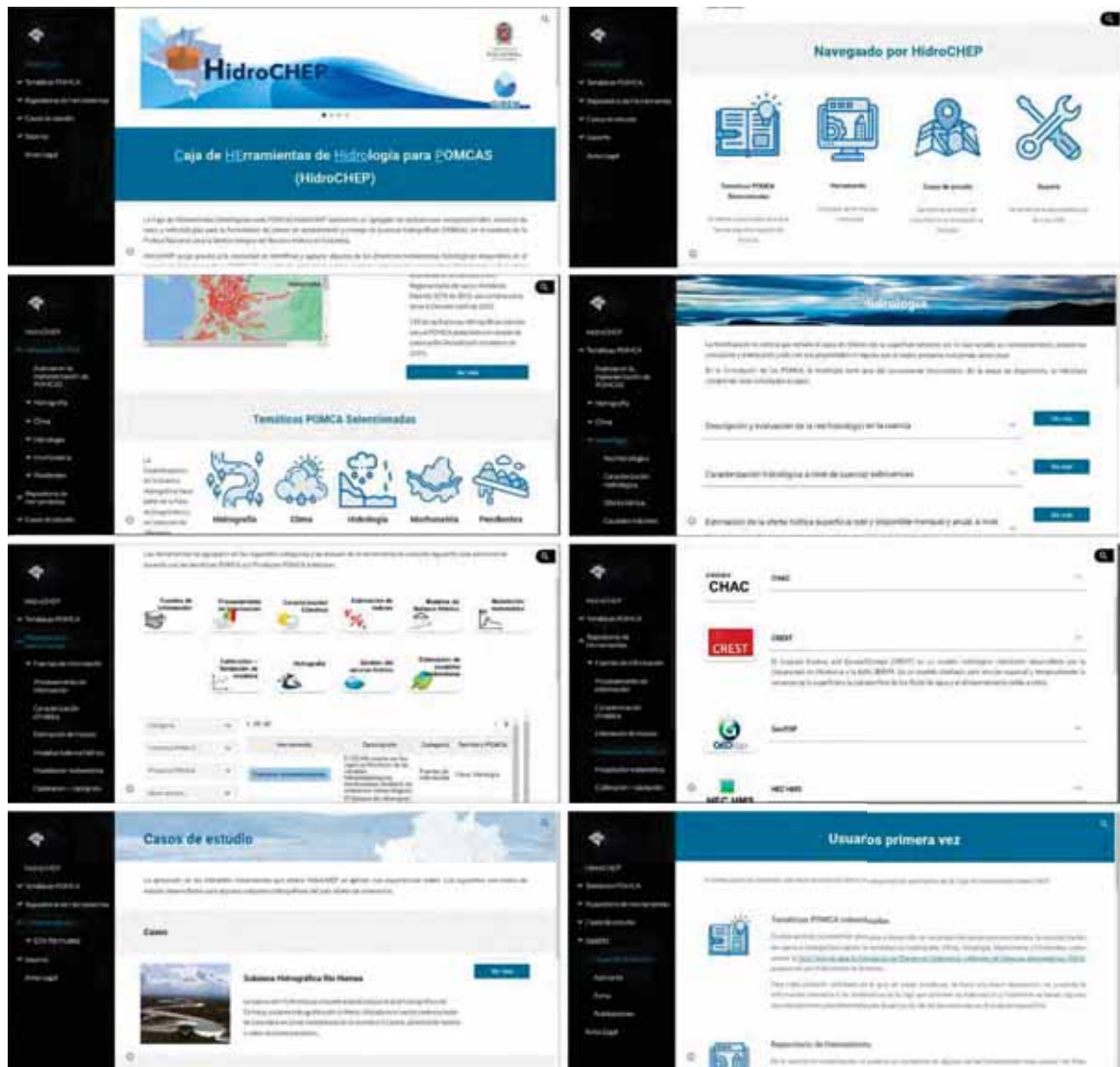


- **Acceso a la información necesaria:** La selección inicial de una herramienta conduce directamente a identificar las necesidades de información. En la selección de la herramienta el usuario debe preguntarse: ¿Los datos cuentan con la resolución espacial y temporal adecuada?, ¿Se entiende claramente el nivel de error de los datos?, ¿Se cuenta con los conocimientos adecuados para interpretar los datos?, ¿Qué tanto trabajo se requiere para hacer que los datos sean funcionales en la herramienta?
Si no se cuenta con datos, o no pueden recopilarse fácilmente, deben revisarse los alcances del producto POMCA seleccionado para la cuenca objeto de estudio.
- **Acceso a la experiencia necesaria en el uso de las herramientas:** Diferentes herramientas requieren diferentes tipos de habilidades para su uso e interpretación de los resultados. El profesional que utilice una herramienta deberá contar con habilidades en el entendimiento de los procesos físicos que ocurren dentro de la cuenca, poder interpretar el modelo o algoritmo que use la herramienta, lo cual incluye en varias ocasiones, contar con habilidades numéricas y de manipulación de los datos. Reconocer limitaciones en este aspecto, permitirá evaluar mejor la herramienta seleccionada y la necesidad de contar con usuarios especializados para el uso de las mismas.
- **Disponibilidad de recursos (tiempo y dinero):** La recopilación de información y el uso de una determinada herramienta, requieren del uso de recursos. Igualmente, la necesidad de personal experto en la interpretación de la información, junto con la obtención de nuevos datos pueden ser costosos. Es por esto, que las restricciones en tiempo y dinero para poder alcanzar los objetivos del producto POMCA deben evaluarse al seleccionar una herramienta específica, con el fin de poder alcanzar el objetivo trazado en la selección inicial.

Cuando el usuario de HidroCHEP garantice que la selección de la herramienta es la adecuada, dadas las disponibilidades de información, experiencia y recursos, podrá elaborar el respectivo producto POMCA.

3.1.4 Disponibilidad de la caja de herramientas

Todos los elementos de la caja de herramientas HidroCHEP pueden consultarse en el sitio web <https://sites.google.com/view/hidrochep>. La página web (Figura 3-4) cuenta con módulos e hipervínculos que permiten al usuario navegar entre los componentes principales de la caja de herramientas, junto con elementos multimedia de apoyo al uso de las diferentes herramientas con que cuenta.

Figura 3-4 Vista general de HidroCHEP en diferentes pantallazos

3.1.5 Limitaciones

La caja de herramientas HidroCHEP compila herramientas de uso habitual en la práctica de caracterización hidroclimatológica de cuencas hidrográficas, seleccionadas a partir de la revisión bibliográfica desarrollada en este trabajo. A pesar de la existencia de muchas otras herramientas elaboradas por diferentes autores, la selección inicial para incluirlas en HidroCHEP obedeció a un filtro que buscó contar con alternativas que permitan al usuario identificar las diferentes posibilidades para la elaboración de los productos POMCA.

Por esta razón se busca que HidroCHEP pueda continuar su desarrollo a través del trabajo del Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH) de la

Universidad Nacional de Colombia, con los diferentes aportes que pueda realizar cualquier usuario de la caja de herramientas.

Las diferentes herramientas se suministran "tal cual" se elaboraron por los propios desarrolladores, por lo que la caja de herramientas HidroCHEP se excluye de cualquier garantía, en cuanto a la exactitud, vigencia o aplicabilidad de los datos generados mediante el uso de las herramientas.

En este sentido, los resultados o la información suministrada en la caja de herramientas no representan en ningún caso, un reemplazo del criterio del profesional que los use, quien deberá siempre hacer una evaluación de los resultados que arrojan las herramientas, y es esta persona quien se hace responsable de los resultados obtenidos.

3.2 Aplicación de HidroCHEP: Casos de estudio

Con el fin de ilustrar el uso de HidroCHEP, se estudiaron los tres casos de estudio seleccionados, de acuerdo con la metodología establecida para la investigación. En este sentido, a continuación se presentan los resultados del uso de HidroCHEP en cada caso de estudio. La discusión de los resultados obtenidos y su comparación con los del POMCA aprobado en cada caso, se presenta en el Capítulo 4.

3.2.1 Poca disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Humea

La subzona hidrográfica del río Humea (código 3505) se encuentra en la zona centro oriental de Colombia (Figura 3-5), en zonas montañosas de la Cordillera Oriental, piedemonte llanero y valles aluviales estrechos, cuya área se encuentra en su mayoría dentro del Departamento de Cundinamarca (85%), municipios de Medina y Paratebueno y una pequeña porción en el Departamento del Meta (15%), en los municipios de Cabuyaro, Puerto López y Cumaral (MADS et al., 2019).

El área que abarca la cuenca del río Humea posee una abundante disponibilidad de recursos naturales, que facilitan el desarrollo de actividades productivas sostenibles, al igual que cuenta con alto potencial turístico, forestal, piscícola y cuenta con áreas disponibles para la explotación de hidrocarburos y materiales de construcción que aportan al desarrollo económico de la región (MADS et al., 2019).

En este sentido, y con ocasión de la declaratoria de emergencia económica social y ecológica realizada por el Gobierno Nacional a través del Decreto 4580 de 2010 en respuesta a los efectos del fenómeno de la Niña de los años 2010 y 2011, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Fondo de Adaptación y la Corporación CORPOGUAVIO priorizaron la cuenca del río Humea para la formulación del POMCA.

Figura 3-5 Localización Subzona Hidrográfica del río Humea

Teniendo en cuenta que el área que cubre la cuenca del río Humea cuenta con jurisdicción de tres Corporaciones Autónomas Regionales, CORPOGUAVIO, CORPORINOQUIA y CORMACARENA, estas conforman una comisión conjunta y declaran, a través de la Resolución No 01 de junio 16 de 2014, la revisión y ajuste del POMCA del río Humea, el cual es aprobado mediante Resolución Conjunta No 1160 – 2679 – 300.36 19 1903 del 23 de octubre de 2019.

Según el POMCA vigente de la cuenca del río Humea (MADS et al., 2019), la cuenca tiene una gran riqueza en biodiversidad, ecosistemas (áreas de bosques andinos, alto-andinos, subandinos, páramos, herbáceas, bosques xerofíticos y pastos naturales) y áreas protegidas, destacándose el Parque Nacional Natural Chingaza, los cuales han venido sufriendo transformaciones por acción antrópica, que de acuerdo con el POMCA se dan principalmente por la “baja recepción y asimilación por parte de las comunidades sobre la gestión del riesgo y deficientes procesos de ordenamiento territorial en los municipios que la conforman, que han permitido la ampliación de la frontera agropecuaria”.

3.2.1.1 Disponibilidad de información oficial

Para el presente estudio se considera como información oficial, aquella que es suministrada por las entidades o instituciones del orden nacional o regional, que se encargan de la recopilación y/o producción de datos de interés para la elaboración de los productos POMCA.

3.2.1.1.1 Cartografía oficial

Consultada la cartografía disponible del IGAC, se cuenta con cobertura sobre la totalidad del área de la subzona hidrográfica del río Humea de la cartografía básica a escala 1:25.000 (ver Figura 3-6), y se cuenta igualmente con el mapa de coberturas Corine Land Cover a escala 1:100.000 generado por el IDEAM (ver Figura 3-7) y el mapa de suelos a escala 1:100.000, generado por el IGAC.

3.2.1.1.2 Registros hidroclimatológicos

Se verificó el catálogo nacional de estaciones del IDEAM (IDEAM, 2021) para la disponibilidad de información de estaciones requeridas para la caracterización climática de la cuenca (agrometeorológicas, climáticas ordinarias, climáticas principales, radio sonda, sinóptica principal, sinóptica secundaria, pluviométricas y pluviográficas) y para la caracterización hidrológica (limnimétricas y limnigráficas), tomando los criterios de clasificación por longitud de años de registro presentados en la Tabla 2-1.

Dentro de la cuenca y en un área de influencia de hasta 5 km del límite, se identificaron solo cuatro estaciones para la caracterización climática, con registros de más de 30 años que permiten realizar un análisis de la variabilidad climatológica de la cuenca y dos adicionales con registros de más de 10 años, como se muestra en la Figura 3-8.

Figura 3-6 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Humea

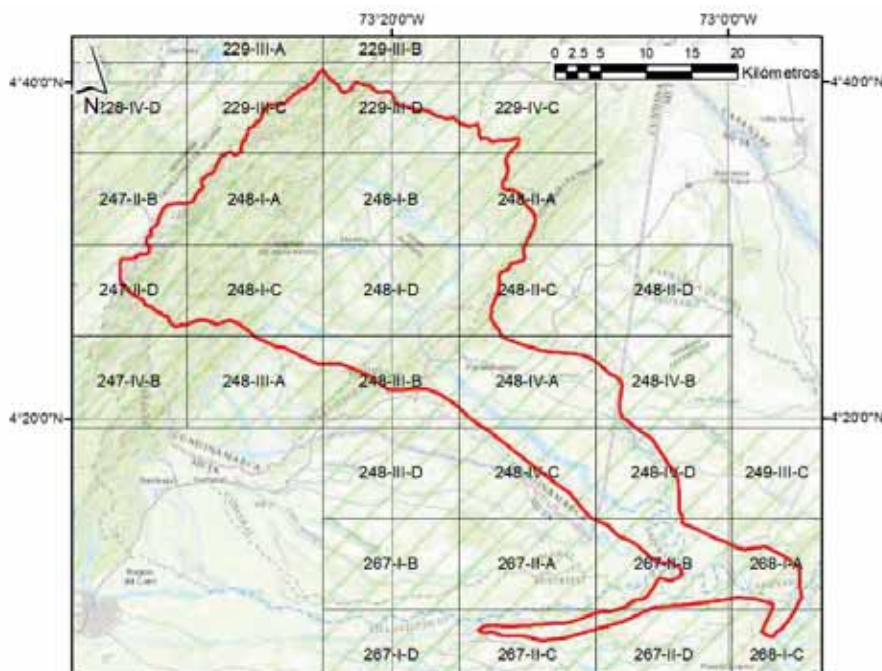
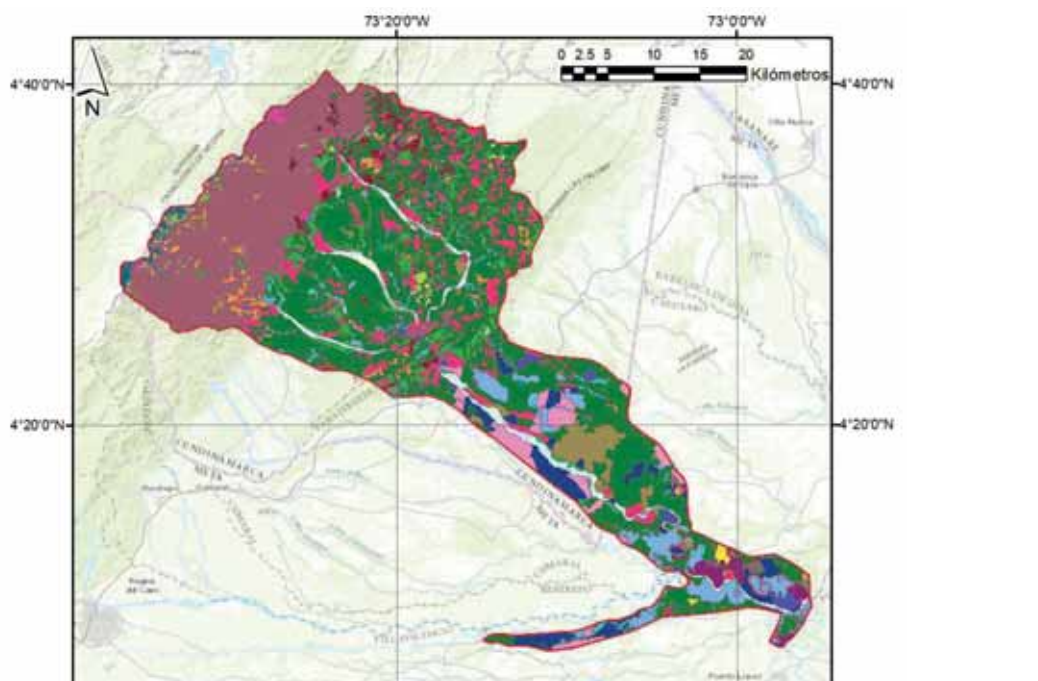


Figura 3-7 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Humea



Convenciones

Cobertura

1.1.1. Tejido urbano continuo	2.4.1. Mosaico de cultivos	3.2.2.1. Arbustal denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	3.2.2.2. Arbustal abierto
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.1.1. Otros cultivos transitorios	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	3.2.3.1. Vegetación secundaria alta
2.1.2. Cereales	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	3.2.3.2. Vegetación secundaria baja
2.1.2.1. Arroz	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.3.2. Palma de aceite	3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.3.1. Pastos limpios	3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	4.1.1. Zonas pantanosas
2.3.2. Pastos arbolados	3.1.4. Bosque de galería y ripario	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.3.3. Pastos enmalezados	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales

De estas estaciones sólo una cuenta con registros de variables diferentes a precipitación (estación EL JAPON Cod. 35055010). En cuanto a estaciones para la caracterización hidrológica sólo se identificó una estación con más de 30 años de registros (estación EL CABLE Cod. 35057010).

3.2.1.1.3 Demanda del recurso hídrico superficial

Con el fin de identificar la demanda del recurso hídrico superficial, se solicitó a las Corporaciones Autónomas Regionales que tienen jurisdicción en la cuenca del río Humea, información sobre la localización de las concesiones de agua superficial vigentes a la fecha de la elaboración del presente estudio. Solamente CORPOGUAVIO y CORMACARENA brindaron información que se presenta en la Figura 3-9.

Figura 3-8 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Humea

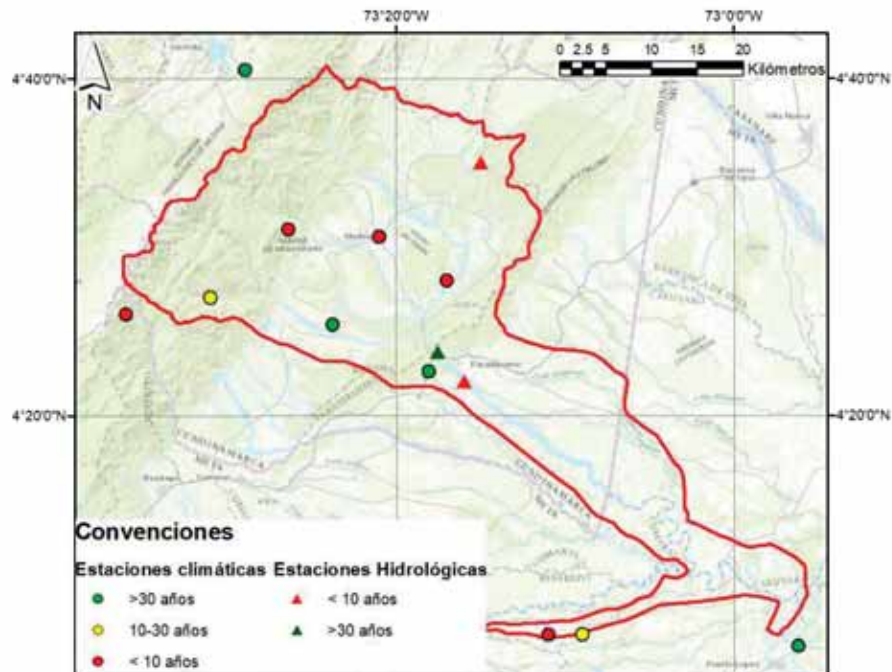
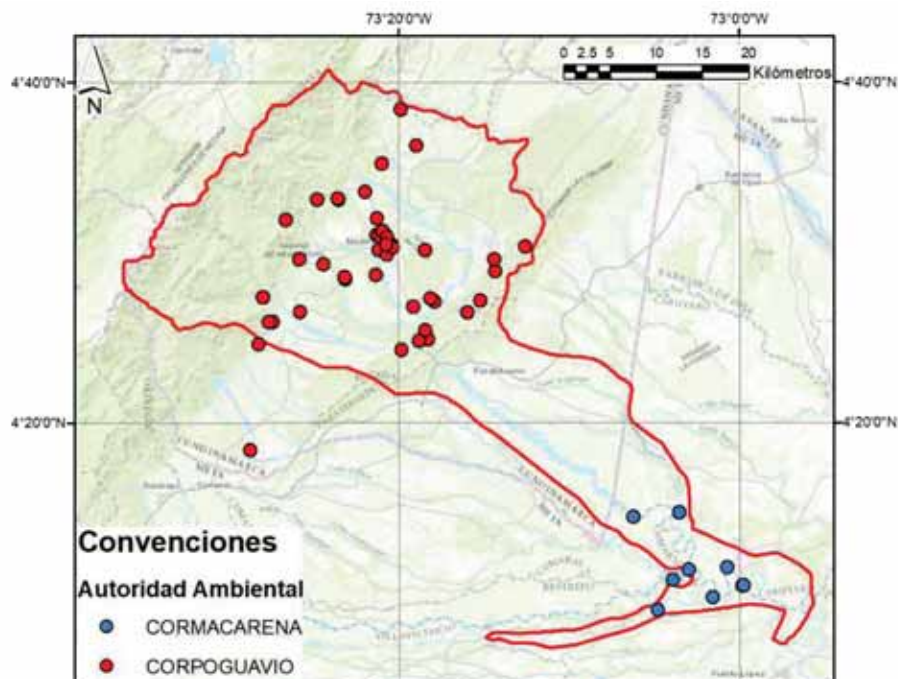


Figura 3-9 Localización de información oficial de concesiones de agua superficial otorgadas en la cuenca del río Humea



3.2.1.2 Selección de fuentes de información

Con el fin de contar con la información necesaria para la elaboración de los productos POMCA, se empleó la Caja de Herramientas para seleccionar alternativas que permitan llenar los vacíos identificados en las fuentes de información oficial.

Para los productos de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, teniendo en cuenta que la fuente principal de información de cada uno de los productos es la topografía del terreno, considerando que se cuenta con la cartografía oficial del IGAC a la escala 1:25.000 que es la recomendada por la Guía Técnica para la elaboración de POMCAS del MADS, se utiliza esta fuente.

Para la elaboración de los productos de la caracterización climática, la poca disponibilidad de información de estaciones limita el análisis de la variación espacio temporal de las variables de interés climatológico, por lo que para la elaboración del producto asociado al POMCA, en cuanto a la temática de Clima, se adelantó la selección de las fuentes posibles de información alternativas, incluidas en HidroCHEP.

En la Tabla 3-1 se muestra la clasificación asignada a las diferentes fuentes de información para la elaboración de los productos asociados con la clasificación climática, de acuerdo con la codificación de productos presentada en la sección 2.2.2, donde el principal criterio de clasificación obedeció a la resolución espacial de la información presentada.

Para la precipitación, la fuente de información que mejor resolución espacial tiene ($0.05^\circ \sim 5.5\text{km}$) son los registros del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) (Funk et al., 2014). La temperatura a partir de los registros del modelo FLDAS Noah Land Surface (NASA/GSFC/HSL, 2018) que cuenta con una resolución de 0.1° ($\sim 11.1\text{ km}$), descargados de la plataforma GIOVANNI (Acker & Leptoukh, 2007), y dado que no se cuenta con registros medidos en terreno que permitan validar la información de sensores remotos para la evapotranspiración, o estimar a partir de métodos aerodinámicos y de balance energético (p. ej. los métodos de Penman, Priestley – Taylor o Penman – Monteith), se evalúa a partir del método de Thornthwaite (Thornthwaite & Mather, 1955), el cual se basa en los registros mensuales multianuales de temperatura para su estimación.

Finalmente, para la elaboración de los productos asociados con la temática de hidrología, para la caracterización de la demanda del recurso hídrico en la cuenca, la información obtenida de las Corporaciones Autónomas Regionales se complementa con la disponible en el sistema SIRH (IDEAM, 2022), mientras que, al no contar con registros de estaciones hidrológicas, se acude a la modelación hidrológica para la elaboración de los demás productos. La clasificación de las fuentes de información para la temática de hidrología se muestra en la Tabla 3-2, que usa la codificación de productos asignada en la sección 2.2.2.

Tabla 3-1 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de clima para la subzona hidrográfica del río Humea.

Temática		Clima			Observaciones
Producto POMCA		C01	C02	C03	
Fuentes de Información	Estaciones hidrometeorológicas	●	●	●	No existe buena cobertura de estaciones hidrometeorológicas
	Planchas cartográficas del IGAC			●	Mapa de coberturas Corine Land Cover disponible a escala 1:100.000
	Earth2Observe WCI Portal	●		●	Cuenta con datos de reanálisis de evapotranspiración potencial a escala de 0.05°
	Giovanni	●	●	●	Cuenta con registros de temperatura del aire a escala de 0.5°
	CHIRPS	●			Cuenta con registros de precipitación a escala de 0.05°
	International Precipitation Group (IPWG)	●			Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 0.5°
	Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)	●			Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 2.5°
	Climatic Re4search Unit (CRU)	●			Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 5°
	Global Precipitation Climatoloy Centre (GPCC)	●			Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 1°
	Megha - Tropiques	●			Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 1°
	LandFluxEVAL			●	Sólo cuenta con registros hasta el 2005
	Global Land Cover Facility			●	Fallas en la descarga de información
	Global Land Cover Characterization			●	Resolución de 1km x 1km
	ESA Land Cover CCI			●	Resolución de 1km x 1km
	ICDE			●	Redirecciona a la información de planchas de coberturas Corine Land Cover del IGAC
	NASA Earthdata Search	●	●	●	Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 0.5°
	World View	●	●	●	Redirecciona al sitio NASA Earthdata Seach para descarga de información
		●	●	●	
		●	●	●	
		●	●	●	

● Uso recomendado
 ● Uso recomendado salvo mejor alternativa
 ● Uso no recomendado

3.2.1.3 Selección de herramientas de procesamiento

Siguiendo el marco metodológico expuesto en la sección 3.1.3, mediante la aplicación de HydroCHEP se hizo la revisión de las diferentes opciones de herramientas de procesamiento disponibles en la Caja para la elaboración de los productos POMCA.

Tabla 3-2 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Humea

Temática		Hidrología						Observaciones
Producto POMCA		Hi01	Hi02	Hi03	Hi04	Hi05	Hi06	
Fuentes de Información	Estaciones hidrometeorológicas	●						A pesar de no contar con un buen registro de estaciones, se requiere reportar como producto POMCA la disponibilidad de la información
	SIRH	●			●			Se evidencia que no cuenta con registros actualizados
	Planchas cartográficas del IGAC		●				●	Se requiere coberturas del suelo para estimación de parámetros en la modelación hidrológica
	Corporaciones Autónomas Regionales				●		●	Se contó con respuesta por parte de las Corporaciones
		●	●	Uso recomendado salvo mejor alternativa			●	Uso no recomendado

En cuanto a los productos de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, todas las herramientas de procesamiento que presenta HydroCHEP permiten la elaboración de los productos como se muestra en la Tabla 3-3, considerando que se cuenta con la información necesaria para su elaboración. En este sentido, para la selección de la herramienta, siguiendo las recomendaciones presentadas en la sección 3.1.3, se tuvo en consideración el acceso a la experiencia necesaria en el uso de la herramienta, seleccionando QGIS (QGIS Equipo de Desarrollo, 2021), al ser un software de libre distribución, fácil de usar, la amplia literatura de soporte de uso y las diferentes opciones para la presentación de resultados.

Para el procesamiento de la información en la elaboración de los productos asociados a la caracterización climática, teniendo en cuenta que la información proviene de sensores remotos, la selección de herramientas para el procesamiento se hizo considerando aquellas que permiten el manejo de información de imágenes a través de plataformas de sistemas de información geográfica, resultando igualmente en el uso de QGIS para la elaboración de estos productos.

Finalmente, para la temática de hidrología, las herramientas de procesamiento de información se dividieron en dos grupos: las herramientas que se usan para análisis cartográficos, útiles para los productos asociados a la estimación de la demanda hídrica o de los índices hidrológicos, y las herramientas que se usan para la caracterización hidrológica y la estimación de la oferta hídrica.

Como se muestra en la Tabla 3-4, varias de las herramientas de análisis cartográfico permiten la elaboración de los productos de hidrología, por lo que se opta por el uso de QGIS considerando las bondades descritas previamente.

Tabla 3-3 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes para la subzona hidrográfica del río Humea

Temática		Hidrografía		Morfometría	Pendientes	Observaciones
Producto POMCA		H01	H02	M01	P01	
Herramientas de procesamiento	SAGA GIS	●	●	●		No permite el cálculo de todos los parámetros morfométricos
	QGIS	●	●	●	●	
	TauDEM	●			●	
	HidroSIG	●				
	CartchmentSIM	●	●			Software licenciado
	Basins	●				
	ArcGIS	●	●	●	●	
	Mapwindow	●	●			
		●	●	●	●	

● Uso recomendado ● Uso recomendado salvo mejor alternativa ● Uso no recomendado

Tabla 3-4 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Humea

Temática		Hidrología						Observaciones	
		Hi01	Hi02	Hi03	Hi04	Hi05	Hi06		
Herramientas de procesamiento	Análisis cartográficos	SAGA GIS	●			●	●	●	Software licenciado
		QGIS	●			●	●	●	
		ArcGIS	●			●	●	●	
		Mapwindow	●			●	●	●	
		HidroSIG					●	●	
	Modelación hidrológica	HEC-HMS		●	●				Número de parámetros 1
		IHACRES		●	●				7
		PRMS		●	●				7
		RORB							4
		RRL		●	●				8
		SWAT		●	●				9
		Tetis		●	●				5
		TopModel		●	●				7
		Wflow		●	●				17
		VIC		●	●				10
		WEAP		●	●				2
	Construcción de la CDC	R		●	●				Requiere conocimientos en programación
		FDC (HidroOffice)		●	●				

●

 Uso recomendado

●

 Uso recomendado salvo mejor alternativa

●

 Uso no recomendado

En el caso de la subzona del río Humea, al ser una cuenca con pobre instrumentación para el monitoreo de caudales, para realizar la caracterización hidrológica se encuentra variada literatura que recomienda la implementación de métodos de regionalización para la obtención de curvas de duración de caudales (Archfield & Vogel, 2010; Castiglioni et al., 2009; He et al., 2011; Razavi & Coulibaly, 2013), con lo que se supone que las condiciones climáticas, morfométricas, y de coberturas se mantienen similares dentro de las regiones e igualmente en el tiempo (Müller & Thompson, 2016).

Otros autores recomiendan utilizar modelación hidrológica para obtener series de caudales en sitios no instrumentados, con los que luego se construye la curva de duración de caudales (Blöschl et al., 2013). Sin embargo, los modelos hidrológicos tradicionales tienen múltiples parámetros que requieren ser calibrados a partir de información de sitios instrumentados, que luego se regionalizan para su implementación en los sitios no instrumentados (Athira et al., 2016), lo que puede no ser muy aplicable en regiones con pobre disponibilidad de información (Nag & Basudev, 2019).

Sólo en algunos casos, se ha empleado modelación hidrológica con estimación de parámetros a partir de propiedades físicas de las cuencas o con modelos que no requieren calibración para la estimación de curvas de duración de caudales (Nag & Basudev, 2019; Tshimanga et al., 2011). Para el caso de estudio se opta por la selección de herramientas de modelación hidrológica como se muestra en la Tabla 3-4, y al no contar con registros para la calibración de los modelos, se tomó como criterio principal la cantidad de parámetros que tienen los modelos, buscando el modelo más parsimonioso (Koutsoyiannis, 2009).

Considerando que el modelo HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center, 2021), permite la integración de los métodos del Soil Conservation Service (Soil Conservation Service (SCS), 1956) para la estimación de pérdidas iniciales e infiltración y de transformación de precipitación efectiva en escorrentía, con el tránsito de crecientes a través del método del retardo (Pilgrim & Cordery, 1983), el único parámetro que resulta con esta alternativa es el número de curva, por lo que resulta ser el modelo más parsimonioso y se selecciona para su implementación. Para la construcción de las curvas de duración de caudales, se selecciona la herramienta FDC 2.1 (Gregor, 2020b), por su interfaz amigable y facilidad de uso.

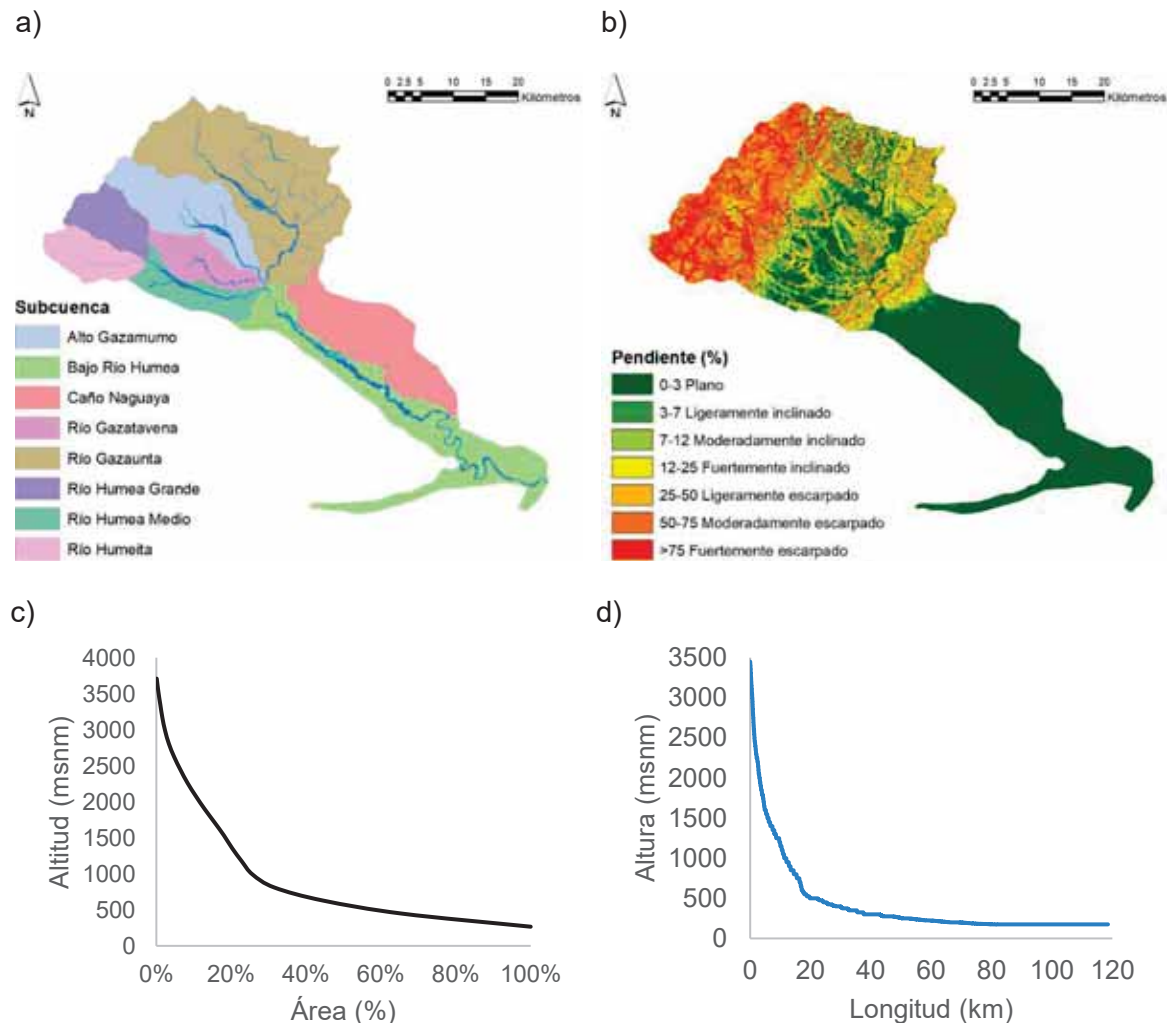
Es importante resaltar, que si bien un enfoque que se viene dando en investigaciones recientes en relación con las predicciones hidrológicas en cuencas con pobre o nula instrumentación, están relacionadas con los métodos de regionalización de parámetros, y en algunos casos en el desarrollo de modelos lluvia – escorrentía que no requieran calibración (Nag & Basudev, 2019), aún no se cuenta con métodos robustos que reduzcan la incertidumbre en los resultados, y sigue siendo el proceso de calibración, la forma de asegurar que los componentes de los modelos imiten los procesos hidrológicos y los parámetros conserven su significado físico (Pechlivanidis et al., 2011).

3.2.1.4 Resultados

A partir del ejercicio adelantado de selección de herramientas, se elaboraron los diferentes productos POMCA para la subzona hidrográfica del río Humea, tal como se detalla en el Anexo D.

Al contar con la información oficial del IGAC a la escala recomendada por la Guía del MADS (MADS, 2014), para la elaboración de los productos asociados con las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes fue necesario el preprocesamiento de la topografía para la generación de un modelo digital de terreno (DEM), el cual es requerido por la herramienta QGis para generar los productos asociados a estas temáticas. Un ejemplo de los resultados se observa en la Figura 3-10.

Figura 3-10 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Humea. a) Mapa de caracterización hidrográfica, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal



En cuanto a la caracterización climática, se tomó como periodo de análisis 1982-2012 correspondiente al periodo común de las fuentes de información empleadas. Para este ejercicio fue necesario el tratamiento de los registros de precipitación y temperatura en formato NetCDF para identificar la variación espacial y temporal. En cuanto a la evapotranspiración potencial, utilizando la herramienta de calculadora de mapas de QGIS, se realizó su estimación empleando el método de Thornthwaite (ver Figura 3-11).

La misma herramienta QGIS se utilizó para realizar la clasificación climática a través del método de Caldas – Lang (Schaufelberger, 1962) y el cálculo del índice de aridez, de acuerdo con la metodología establecida en la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014), el cual depende de la evapotranspiración potencial y de la evapotranspiración real, la cual se calculó siguiendo la metodología recomendada por el estudio de la FAO de la serie Riego y Drenaje No 56 (Allen et al., 2006), con los coeficientes de cultivo recomendados por Allen, et al. (2006) y Nistor y Porumb (2015).

En cuanto a las fuentes de información empleadas para la precipitación, ha sido reportado por Martínez y Serna (2018), que las estimaciones de CHIRPS tienen una eficiencia buena en la región de la Orinoquía, y aceptable en las regiones Andina y Caribe, por lo que se considera una fuente de información aceptable para esta variable en la cuenca del río Humea.

No se identificaron estudios que evalúen el desempeño de las series de tiempo del modelo FLDAS Noah Land Surface para la región, por lo que se adelantó una comparación con los registros de la estación EL JAPON (Figura 3-12), arrojando para el periodo de análisis un Mean Bias Error (MBE) de -1.0°C (subestimación del modelo FLDAS), un porcentaje de Bias (PBIAS) de 4% y un coeficiente de correlación de 0.82, que muestra una buena aproximación de las series del modelo FLDAS en el área de estudio, de acuerdo con los criterios de clasificación de los indicadores utilizados, presentados por Cameron y Windmeijer (1997) y Singh et. al. (2005).

Para los productos de la temática de hidrología se aplicó el método del balance hídrico de largo plazo, suponiendo cambio nulo en el almacenamiento del agua a través del tiempo en la cuenca hidrográfica, y considerando la oferta como la escurrimiento resultante de aplicar la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración (Zhang et al., 2008), empleando la herramienta de calculadora de mapas de QGIS.

A partir de la información de concesiones de agua superficial otorgadas en la subzona, y complementadas con la información consultada en la plataforma del SIRH, con QGIS se estableció el mapa de densidad de puntos, adelantando con la herramienta de calculadora de mapas la estimación del mapa de demanda hídrica y posteriormente la estimación del índice de uso de agua de acuerdo con las recomendaciones de la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014). Los principales resultados pueden observarse en la Figura 3-13, en donde se evidencia que la resolución de la información empleada como insumo para la caracterización climática (tamaño de píxel de 0.05°) influye en la visualización de la distribución espacial de los resultados.

Figura 3-11 Variación espacio - temporal de la precipitación (izquierda) y evapotranspiración potencial (derecha) en la subzona hidrográfica del río Humea

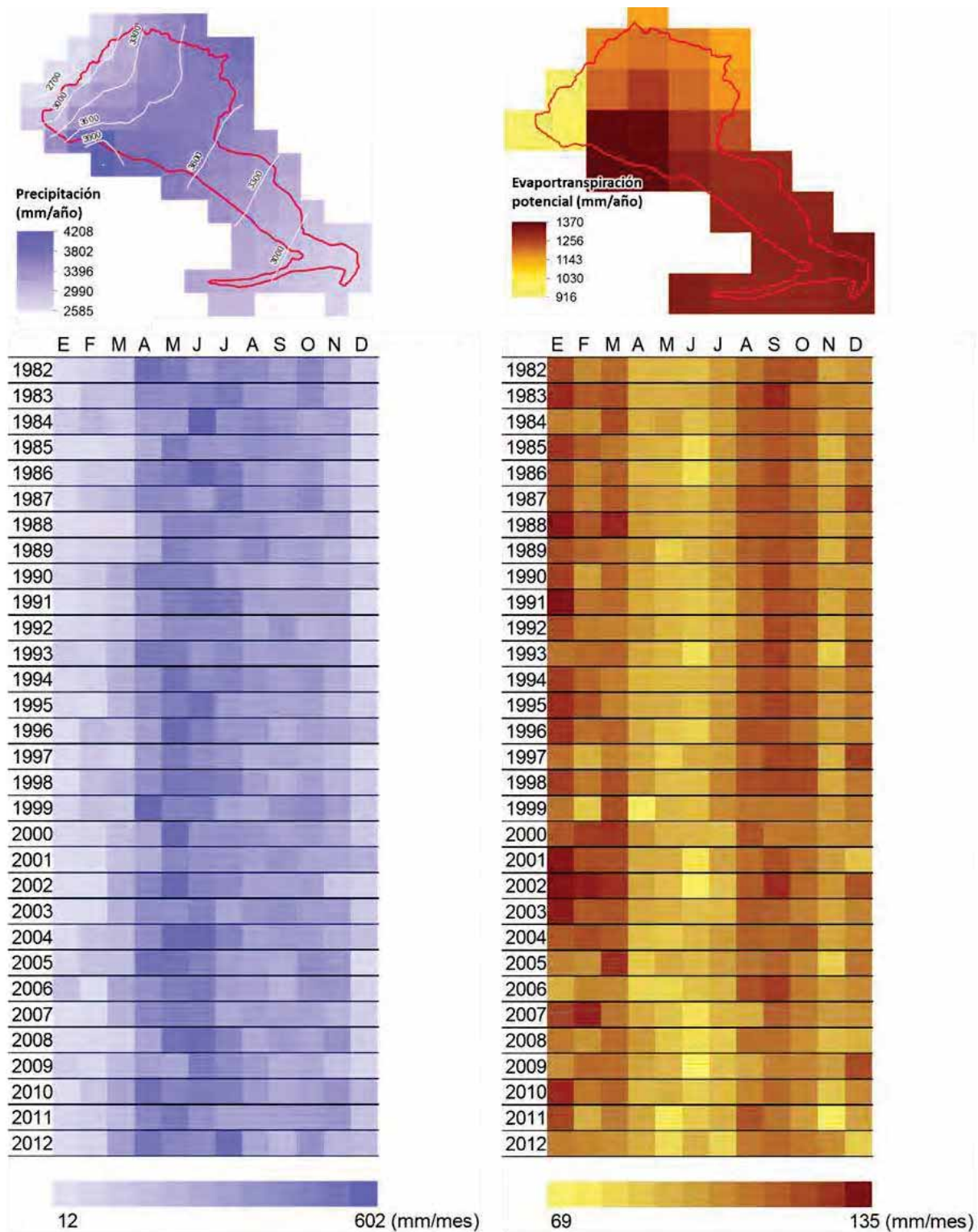


Figura 3-12 Comparación de series de tiempo de temperatura para la estación EL JAPON y del modelo FLDAS Noah Land Surface. a) series históricas 1982 – 2012, b) diagrama de dispersión

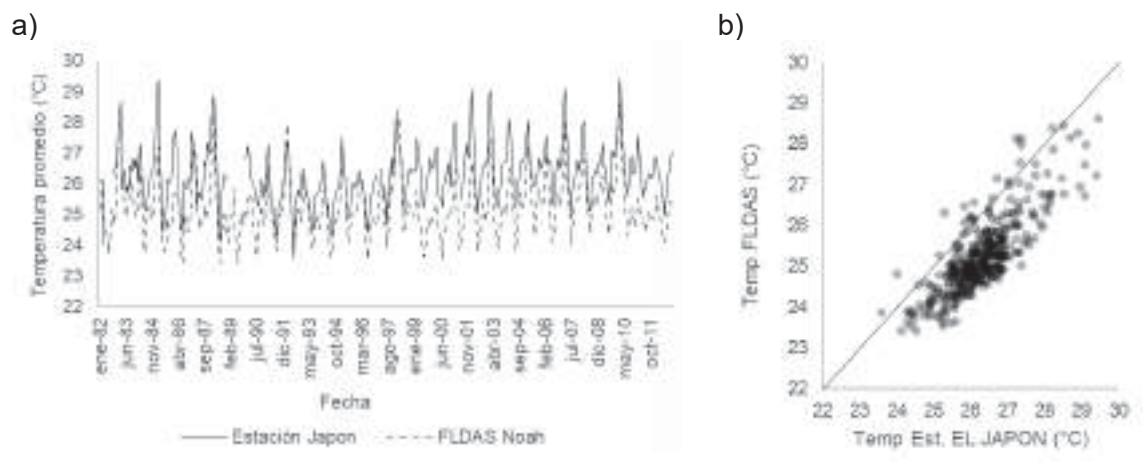
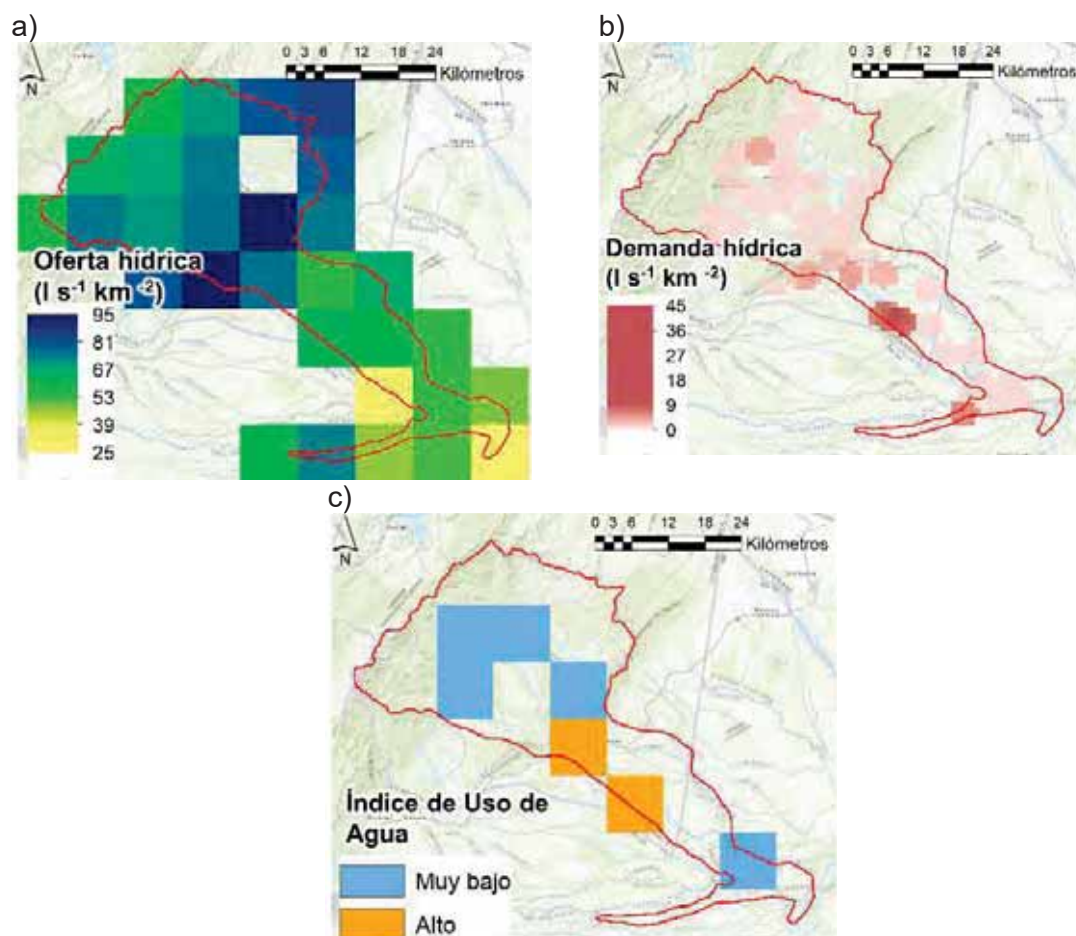


Figura 3-13 Caracterización hidrológica de la subzona hidrográfica del río Humea a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua



Finalmente, para la estimación de la oferta hídrica disponible se adelantó la modelación hidrológica usando la integración de los métodos del Soil Conservation Service (Soil Conservation Service (SCS), 1956) para la estimación de pérdidas iniciales e infiltración y de transformación de precipitación efectiva en escorrentía, con el tránsito de crecientes a través del método del retardo (Pilgrim & Cordery, 1983), que ofrece la herramienta HEC-HMS.

La modelación se hizo considerando como unidades de análisis hidrológico las subcuencas definidas en el POMCA (MADS et al., 2019), y para cada unidad se estimó el parámetro del número de curva usando los valores recomendados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (U.S. Department of Agriculture (USDA), 1986) a partir del mapa de suelos y de las coberturas utilizados para la cuenca del río Humea. Igualmente, para cada una de las unidades se estimó el tiempo de retardo a partir de las características morfométricas tomado como 0.6 veces el tiempo de concentración, el cual se calculó empleado la ecuación de Bransby-Williams (Department of Transport and Main Roads, 2010).

Con las series de tiempo de caudales generados con la modelación hidrológica (Figura 3-14), se construyeron las curvas de duración de caudales para cada año del periodo de análisis (1982 – 2012) usando la herramienta FDC 2.1, con la que se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3-15.

Figura 3-14 Caudales a la desembocadura del río Humea a partir de la modelación hidrológica con HEC-HMS

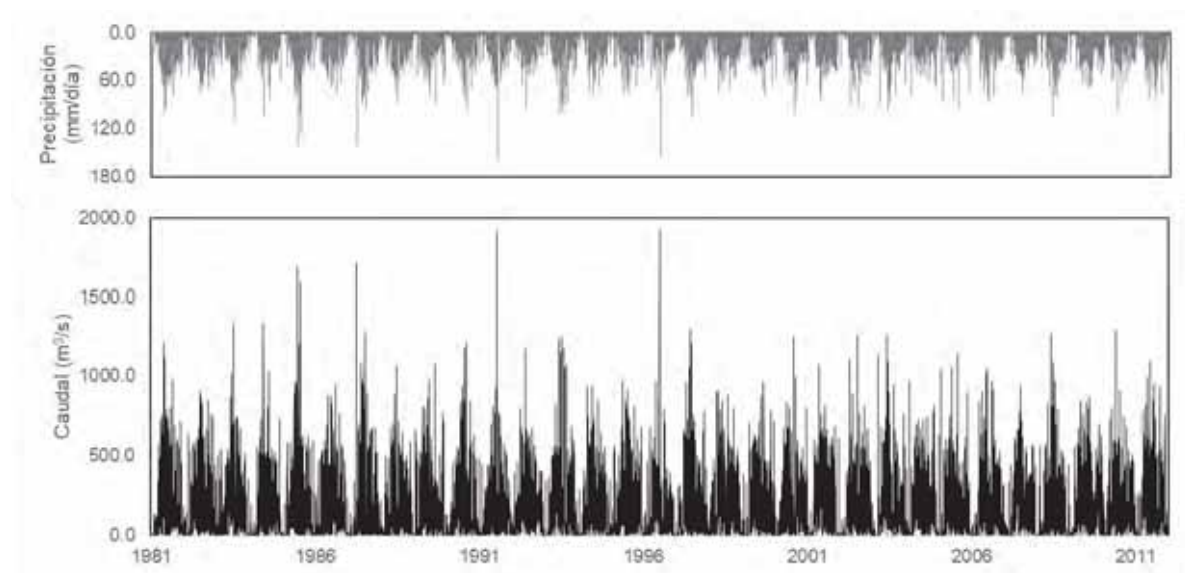
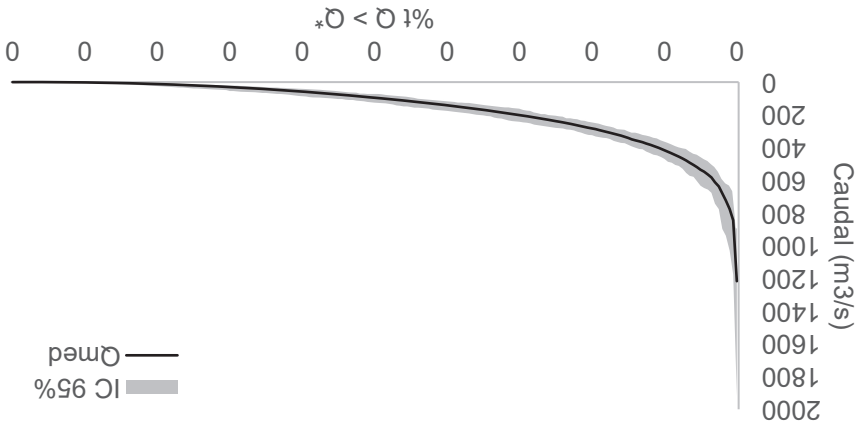


Figura 3-15 Curva de duración de caudales para la cuenca del río Humea a partir de resultados de modelación en HEC-HMS. Período 1982 - 2012



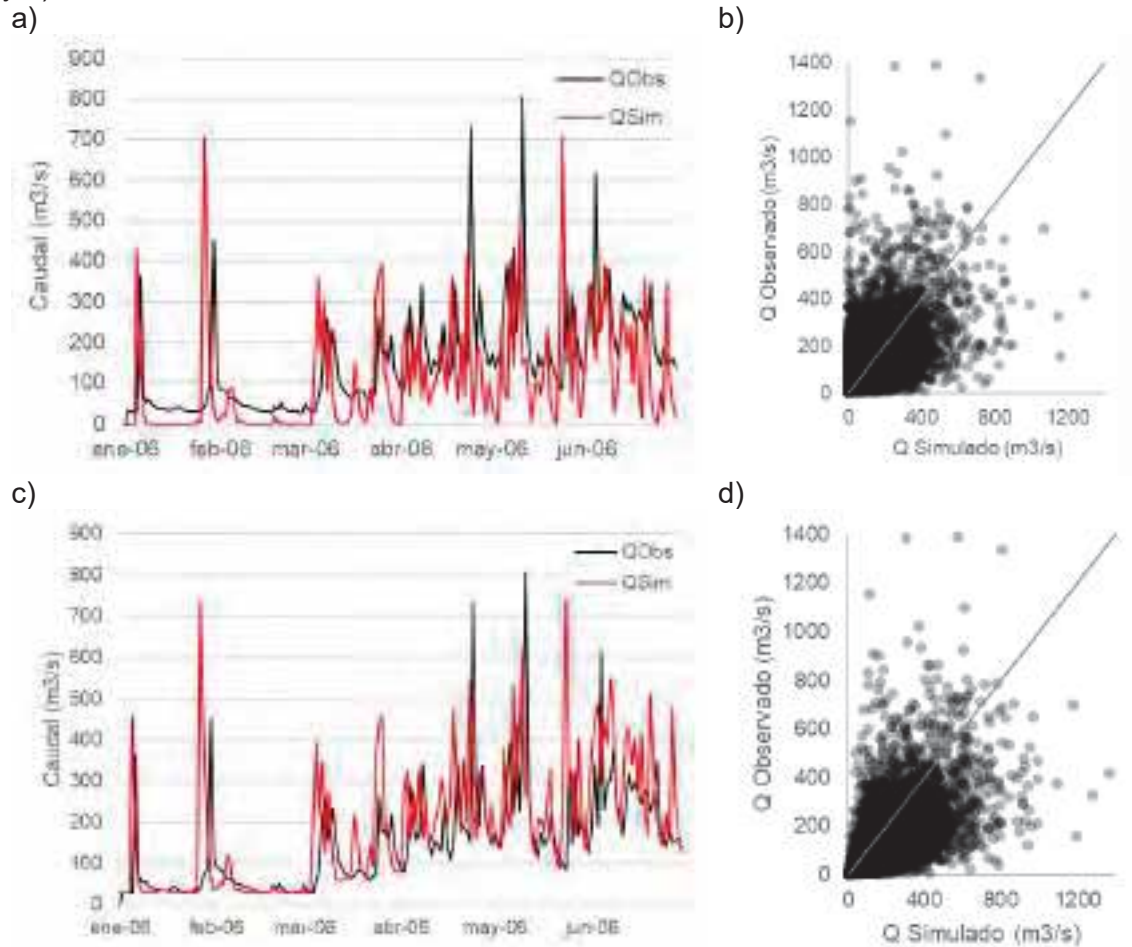
Teniendo en cuenta que la confluencia de las subcuencas de la parte alta de la subzona se encuentra en inmediaciones de la estación limnigráfica EL CABLE (Cod. 35057010), se procedió a comparar los resultados del modelo en el elemento de la confluencia, con los registros de la estación en el período 1982 – 2010, con el fin de evaluar el desempeño del modelo, usando las métricas y los criterios de desempeño del RMSE Observation Standard Deviation Ratio (RSR) y el coeficiente de correlación (Cameron & Windmeijer, 1997; Moriasi et al., 2007).

Para las métricas empleadas se obtuvo un RSR de 1.05 que indica un desempeño no satisfactorio del modelo para representar los caudales a la altura de la estación EL CABLE, y un coeficiente de correlación de 0.53 que resulta aceptable en términos de la relación que mantienen las simulaciones y las observaciones al presentarse tanto subestimaciones como sobreestimaciones del caudal.

Se observa particularmente que el modelo empleado, al no contemplar un flujo base, representa únicamente los impulsos generados por los eventos de precipitación, lo que hace que los caudales bajos estén subestimados como se muestra en la Figura 3-16-a para el primer semestre del año 2006.

Se realiza una segunda iteración del modelo contemplando el flujo base, para el que se utiliza la herramienta BFI+ 3.0 (Gregor, 2020a) disponible en HidroCHEP, la cual cuenta con varios métodos para la estimación del flujo base en una serie de tiempo de caudales, del cual se utilizó el método de algoritmo de Chapman y Maxwell (1996). Al observar los resultados se identifica una mejor aproximación en los caudales bajos (ver Figura 3-16-c), sin embargo, el RSR sigue mostrando un desempeño no satisfactorio del modelo al obtener un valor de 1.06. Al incluir el flujo base, si se logró un mejor desempeño en cuanto a la relación de las simulaciones y las observaciones al obtener un coeficiente de correlación satisfactorio de 0.63 como se puede evidenciar comparativamente en los diagramas de dispersión de las figuras 3-16 b y d.

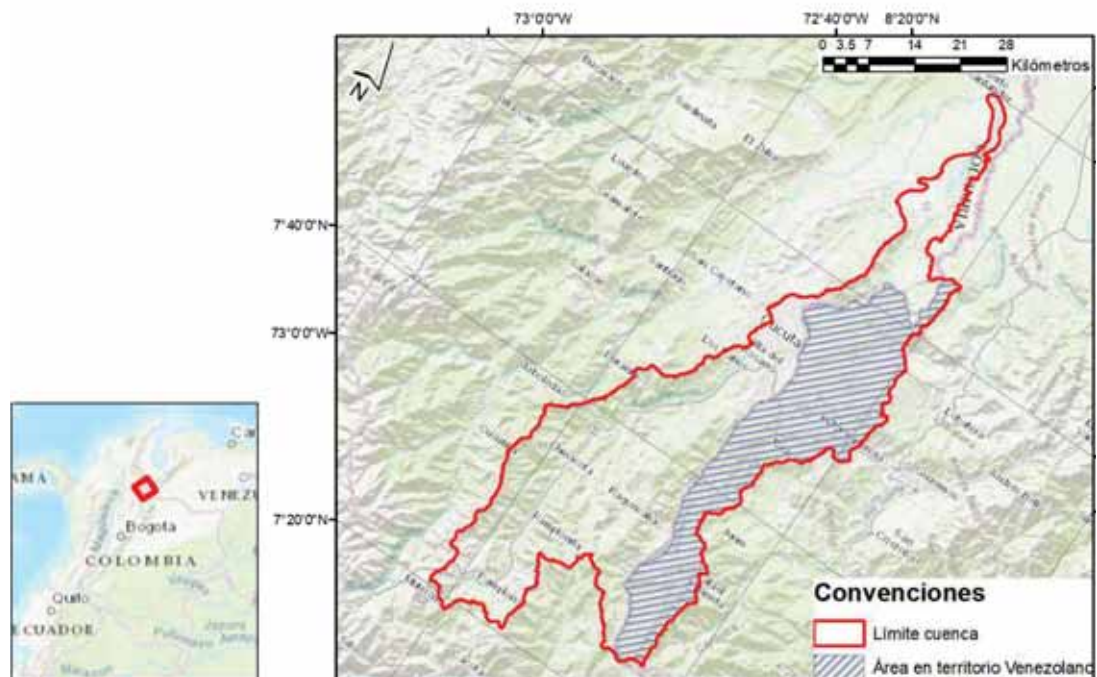
Figura 3-16 Comparación de series de tiempo de caudal para la estación EL CABLE y obtenidas con el modelo HEC-HMS. Series históricas enero a junio de 2006 y diagrama de dispersión con el modelo inicial (a y b), y con los resultados ajustados con el flujo base (c y d)



En el capítulo 4 se discutirá más detalladamente sobre los resultados del ejercicio de la modelación efectuada para el caso de estudio, en el contexto de la evaluación de la implementación de la caja de herramientas.

3.2.2 Mediana disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Pamplonita

La subzona hidrográfica del río Pamplonita se encuentra localizada en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental de los Andes, al sureste del Departamento de Norte de Santander (Figura 3-17), y corresponde a una de las cuencas transfronterizas que tiene Colombia, en donde el 33.2% de su área pertenece a territorio venezolano, y el restante a 10 municipios del Departamento de Norte de Santander, incluyendo la ciudad de San José de Cúcuta, que es la séptima ciudad con mayor población de Colombia (DANE, 2020).

Figura 3-17 Localización Subzona Hidrográfica Río Pamplonita

Debido a las afectaciones que generó la ola invernal del 2010 – 2011 en la cuenca del río Pamplonita, y aunado a los efectos del cambio climático, la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), identificó problemáticas en el área de la cuenca hidrográfica asociadas principalmente con (CORPONOR, 2012):

- La alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo acelerando el periodo de erosión y pérdida de productividad de ellos.
- La modificación en los regímenes hidrológicos de las corrientes ubicadas en la cuenca, causando alteraciones extremas en los periodos de invierno y verano.
- Daños en la estructura vial y de las captaciones y obras de suministro de los acueductos municipales y veredales.
- Disminución en la calidad y cantidad de disponibilidad del recurso hídrico.
- Alteración de los ecosistemas presentes en la cuenca.
- Deterioro del paisaje

En este sentido, y teniendo en cuenta que en el año 2010, el gobierno de los Países Bajos y la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS), suscribieron el acuerdo de contribución No BOG0113303 que tuvo como objeto la implementación y retroalimentación del componente de planificación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, se consideró importante adelantar el ajuste del POMCA de la cuenca del río Pamplonita, el cual se desarrolló bajo el convenio derivado de asociación y cooperación No 00036 de 2014 celebrado entre ASOCARS, CORPONOR y la Universidad Francisco de Paula Santander.

Tras adelantar las diferentes etapas, se adopta el ajuste del POMCA del río Pamplonita mediante Resolución No 00761 del 18 de diciembre de 2014.

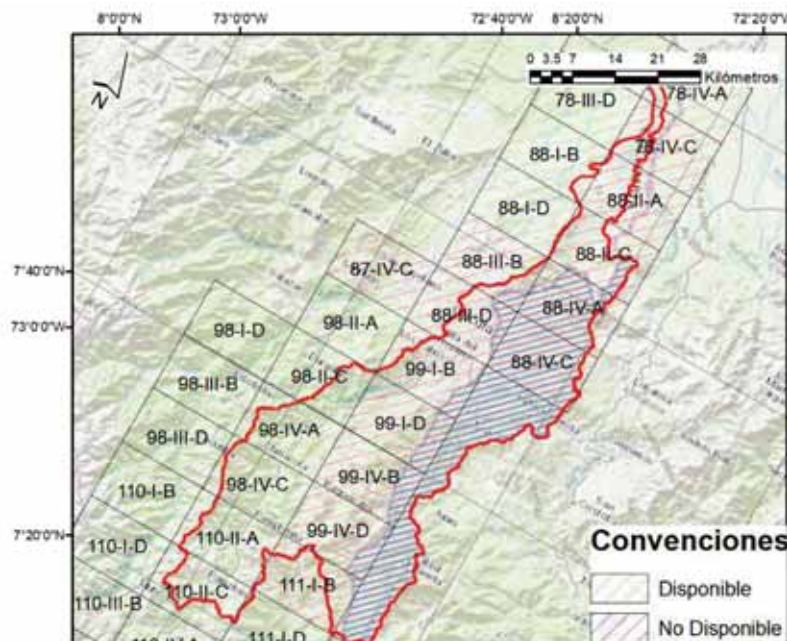
De acuerdo con la caracterización física del POMCA vigente, la cuenca cuenta con paisajes de montaña, lomeríos y valles aluviales que presentan una variedad de zonas de vida que favorecen una gran oferta ambiental expresada en numerosas especies de flora y fauna, lo que se traduce en un potencial de biodiversidad importante, que se ha venido alterando por procesos antrópicos como la tala y la roza, alterando y destruyendo procesos naturales de los ecosistemas, haciendo cada vez más vulnerable la existencia de especies de flora y fauna (ASOCARS et al., 2014).

3.2.2.1 Disponibilidad de información oficial

3.2.2.1.1 Cartografía oficial

Tras verificar la disponibilidad de información cartográfica oficial, no se cuenta con acceso a la cartografía del territorio que pertenece a Venezuela, y adicionalmente, la cartografía del IGAC en inmediaciones a la frontera cuenta con reserva legal, por lo que acceder a ella requiere de tramitar permisos ante el Ministerio de Defensa Nacional. En este sentido sólo se cuenta con 7 planchas de 18 requeridas para el área de la cuenca que corresponde al territorio colombiano, como se muestra en la Figura 3-18.

Figura 3-18 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Pamplonita



En cuanto a las coberturas del suelo, para toda el área del territorio colombiano se cuenta con el mapa de coberturas Corine Land Cover a escala 1:100.000 elaborado por el IDEAM (ver Figura 3-19).

3.2.2.1.2 Registros hidroclimatológicos

De acuerdo con el catálogo nacional de estaciones del IDEAM (IDEAM, 2021), para el área del territorio colombiano de la cuenca y en un área de influencia de hasta 5km del límite, como se muestra en la Figura 3-20, se cuenta con 17 estaciones con registros de precipitación de más de 30 años en un periodo de tiempo común, y 8 estaciones con registros de temperatura en el mismo periodo de tiempo. En cuanto a la disponibilidad de registros de caudales en estaciones de monitoreo se identificaron cuatro estaciones operadas por el IDEAM que tienen más de 30 años de registros de caudal, mientras que las demás pertenecen a CORPONOR, con quienes no fue posible la obtención de la información.

Figura 3-19 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Pamplonita

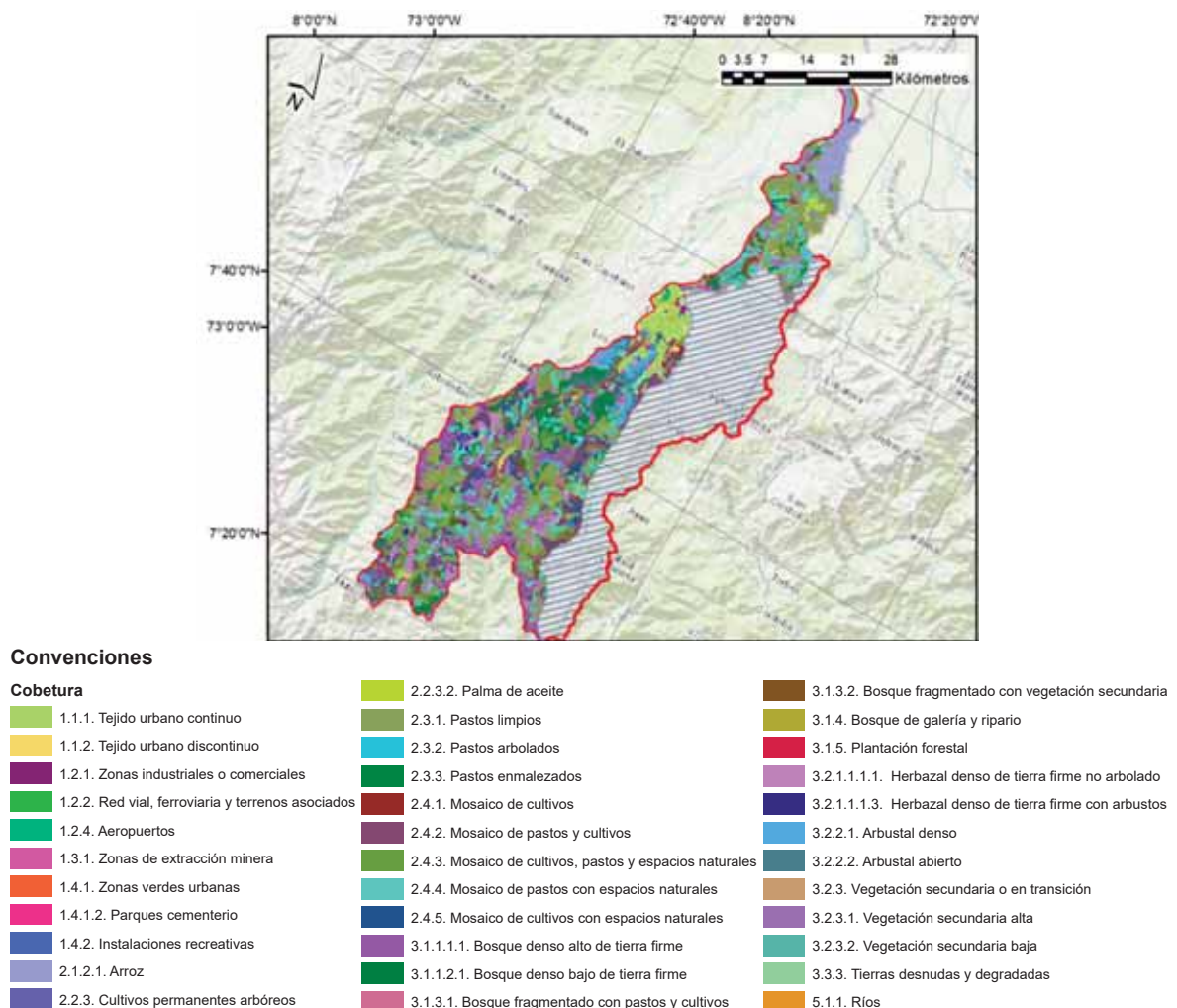
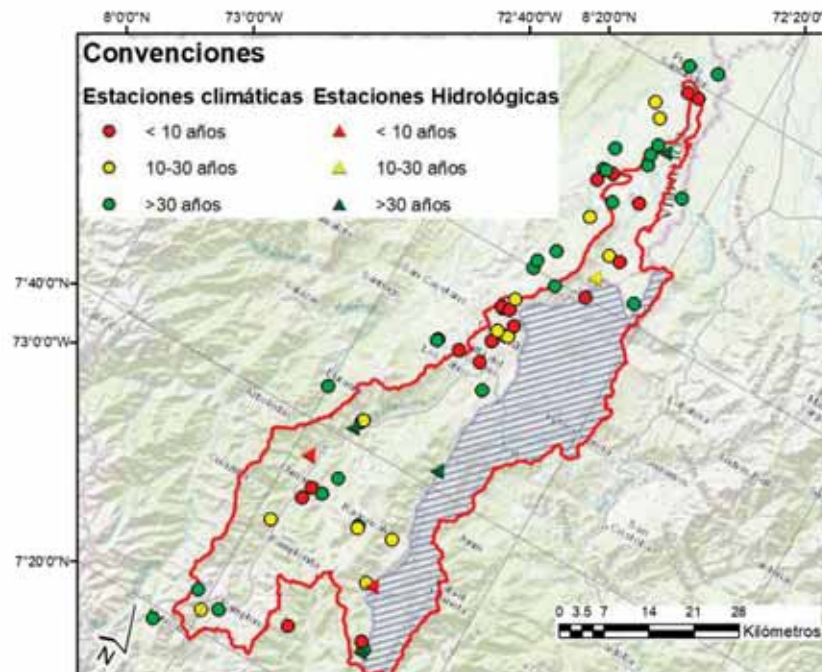


Figura 3-20 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Pamplonita



3.2.2.1.3 Demanda del recurso hídrico superficial

La entidad encargada de administrar los recursos hídricos superficiales dentro del territorio colombiano de la cuenca del río Pamplonita es la corporación CORPONOR, con quienes no fue posible obtener respuesta en cuanto al inventario de concesiones otorgadas dentro de la cuenca.

3.2.2.2 Selección de fuentes de información

Dada la carencia de información oficial en el caso de estudio para la elaboración de los productos POMCA seleccionados, se utilizó la Caja de Herramientas HydroCHEP con el fin de seleccionar fuentes complementarias de información.

En cuanto a la topografía necesaria para la elaboración de los productos de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, se consultaron las diferentes alternativas tomadas de imágenes satelitales de acceso libre, realizando el análisis presentado en la Tabla 3-5 asociado con la codificación asignada a los productos de las temáticas que se presentaron en la sección 2.2.2. Del análisis se concluyó acerca del uso del modelo digital de terreno de ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2015), al ser el de mejor resolución entre las opciones investigadas.

Tabla 3-5 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes para la subzona hidrográfica del río Pamplonita.

Temática		Hidrografía		Morfometría	Pendientes	Observaciones
Producto POMCA		H01	H02	M01	P01	
Fuentes de Información	Planchas cartográficas del IGAC	●	●	●	●	No tiene cobertura total del área de la cuenca
	SIGOT	●	●	●	●	No tiene cobertura total del área de la cuenca Redirección a sitio principal del IGAC
	EarthExplorer USGS	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (STRM) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:100.000)
	ICDE	●	●	●	●	No tiene cobertura total del área de la cuenca Redirección a sitio principal del IGAC
	Landviewer	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (Landsat) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:56.700)
	Sentinel HUB	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (Copernicus30) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:100.000)
	NASA Earthdata Search	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (ASTER) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:100.000)
	World View	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (ASTER) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:100.000)
	Google Earth	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:340.200)
	ASF Data Search	●	●	●	●	Imágenes con mejor resolución (ALOS PALSAR) generan escala de trabajo distante de la recomendada (aprox 1:47.250)

● Uso recomendado
 ● Uso recomendado salvo mejor alternativa
 ● Uso no recomendado

Para la elaboración de los productos de la temática de clima se utilizaron los registros de las estaciones del IDEAM, al estar distribuidas a lo largo de la cuenca, por lo que es posible generar mapas de isoyetas e isotermas con una resolución similar a la que ofrecen fuentes de información como sensores remotos, considerando el área de la cuenca.

Tabla 3-6 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Pamplonita

Temática		Hidrología						Observaciones
Producto POMCA		Hi01	Hi02	Hi03	Hi04	Hi05	Hi06	
Fuentes de Información	Estaciones hidrometeorológicas	●	●	●				A pesar de no contar con un buen registro de estaciones, se requiere reportar como producto POMCA la disponibilidad de la información
	SIRH	●			●			Se evidencia que no cuenta con registros actualizados
	Planchas cartográficas del IGAC		●				●	No tienen la cobertura sobre toda el área de la cuenca
	Global Land Cover Facility		●				●	
	Global Land Cover Characterization		●				●	
	ESALand Cover CCI		●				●	Cuenta con cobertura sobre toda el área de la cuenca
	Corporaciones Autónomas Regionales				●		●	No se contó con respuesta por parte de las Corporaciones
		●	●		●		●	
		Uso recomendado salvo mejor alternativa						Uso no recomendado

En relación con las fuentes de información necesarias para la elaboración de los productos de la temática de hidrología, se utilizó la información de las estaciones hidrometeorológicas como insumo para la calibración del modelo hidrológico, se utiliza el mapa de coberturas de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2017) con el fin de contar con registros en el área de la cuenca que pertenece al territorio venezolano, y se utilizó la información reportada en el SIRH (IDEAM, 2022) para la caracterización de la demanda del recurso hídrico en el área de la subzona que corresponde al territorio colombiano. En la Tabla 3-6 se muestra el análisis realizado para la selección de las fuentes de información.

3.2.2.3 Selección de herramientas de procesamiento

Para la selección de las herramientas de procesamiento, siguiendo un análisis similar al elaborado para el caso de la Subzona del río Humea (ver Tabla 3-3), la herramienta SIG utilizada para la elaboración de los productos de hidrografía, morfometría y pendientes, y los análisis espaciales requeridos para los productos de clima e hidrología fue QGis (QGis Equipo de Desarrollo, 2021), tomando como criterio principal de selección el acceso a la experiencia necesaria en el uso de la herramienta.

Para la caracterización hidrológica, si bien se cuenta con una estación limnigráfica en inmediaciones de la desembocadura del río Pamplonita (AGUAS CLARAS Cod. 16017010), la información disponible de las demás estaciones hidrológicas en la cuenca aún resulta insuficiente para lograr una caracterización adecuada a nivel de subcuencas.

En este sentido, siguiendo las recomendaciones de Blösh et al. (2013) se acude a la modelación hidrológica para la obtención de series de caudales, con las cuales se pueda obtener la curva de duración de caudales que represente el comportamiento de la oferta de agua en la cuenca y subcuencas. Se realiza entonces la revisión de las diferentes herramientas de modelación hidrológica, buscando un modelo parsimonioso, al no contar con suficientes registros que permitan calibrar los distintos parámetros del modelo, como recomienda Koutsoyiannis (2009).

Teniendo en cuenta que se tienen los registros de estaciones limnigráficas para la calibración de los parámetros del modelo, el análisis para la selección de la herramienta condujo al uso del software WEAP (Sieber, 2019), ya que tiene métodos de modelación hidrológica que sólo tienen dos parámetros y cuenta con PEST (Doherty, 2018) como herramienta integrada de apoyo para la calibración de modelos.

Como se muestra en la Tabla 3-7, si bien cualquiera de las herramientas de modelación hidrológicas listadas se podría utilizar para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pamplonita, la selección de WEAP se basó en parte en su entorno amigable, facilidad de uso y el libre acceso con fines académicos, sin que esta selección indique que el modelo WEAP sea el que mejor representa el comportamiento de la cuenca. Para ello, se debería adelantar una comparación de los resultados de la calibración utilizando diversos modelos, lo cual no hace parte del alcance de esta investigación.

Tabla 3-7 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Pamplonita

Temática		Hidrología						Observaciones
Producto POMCA		Hi01	Hi02	Hi03	Hi04	Hi05	Hi06	
Herramientas de procesamiento	Modelación hidrológica							Número de parámetros
	HEC-HMS		●	●				1
	IHACRES		●	●				7
	PRMS		●	●				7
	RORB		●	●				4
	RRL		●	●				8
	SWAT		●	●				9
	Tetis		●	●				5
	TopModel		●	●				7
	Wflow		●	●				17
	VIC		●	●				10
	WEAP		●	●				2
Herramientas de calibración	MCAT		●	●				
	PEST		●	●				Está vinculado a la herramienta de modelación recomendada

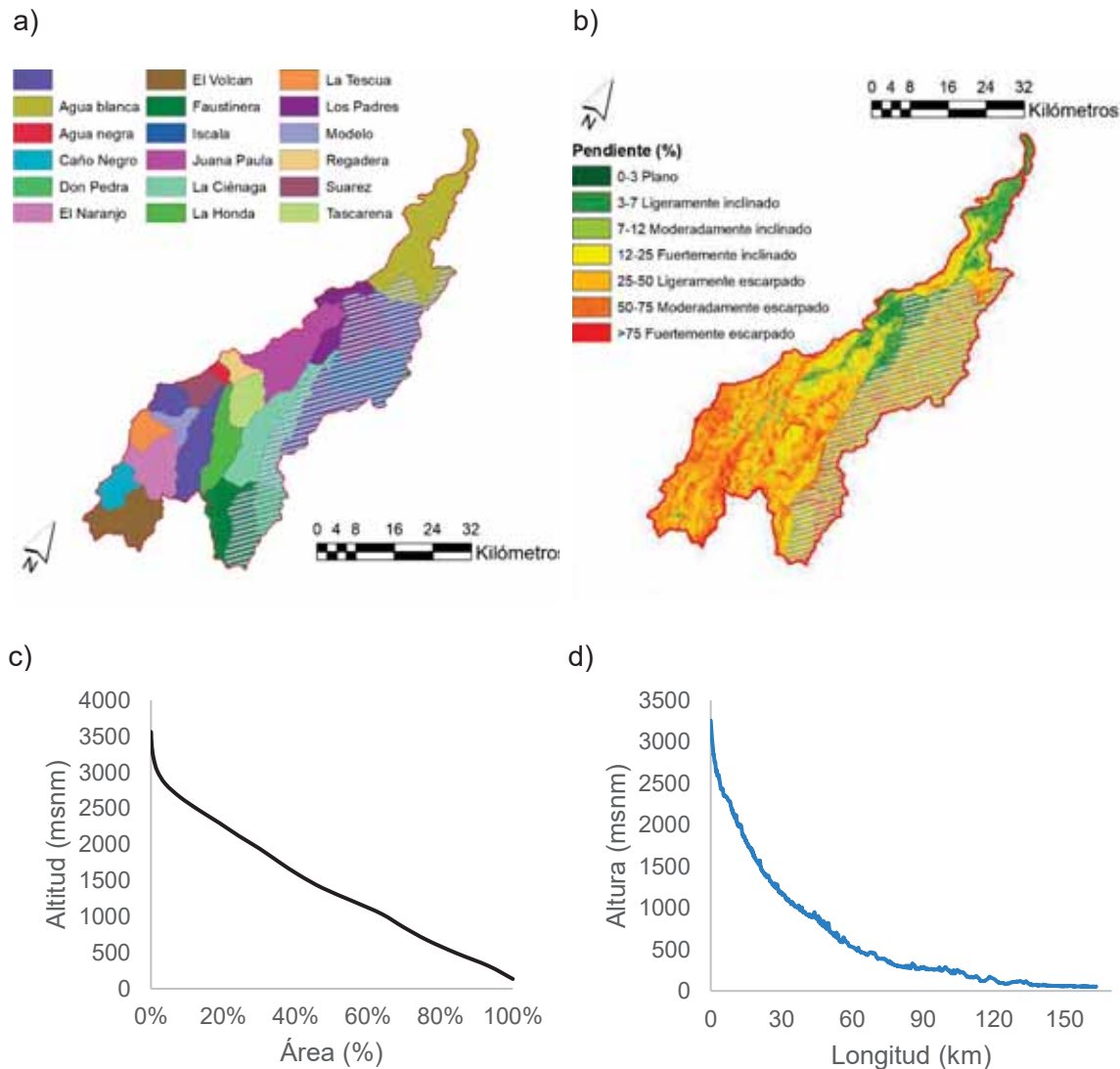
● Uso recomendado
 ● Uso recomendado salvo mejor alternativa
 ● Uso no recomendado

3.2.2.4 Resultados

Los resultados de los productos POMCA para la cuenca del río Pamplonita se detallan en el Anexo E.

Usando el modelo digital de terreno ALOS PALSAR y la herramienta QGis se elaboraron los productos asociados con las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, los cuales teniendo en cuenta la resolución de las imágenes (12.5 m) se asocian a una escala de trabajo aproximada 1:50.000, según la relación de tamaño de píxel y escala de trabajo recomendada por Hengl (2006). En la Figura 3-21 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para estas temáticas.

Figura 3-21 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Pamplonita. a) Mapa de caracterización hidrográfica, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal



Para la caracterización de las variables climáticas se tomó como periodo de análisis 1982-2012, realizando el pretratamiento de los datos de las estaciones y generando la distribución espacial para la creación de isoyetas e isotermas mediante las herramientas de interpolación de QGis. Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, utilizando la calculadora de mapas de QGis se estimó utilizando la ecuación de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), usando los valores de radiación extraterrestre para la latitud de la cuenca del río Pamplonita (8° Norte) y del día 15 de cada mes siguiendo las recomendaciones del estudio No 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (Allen et al., 2006), obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 3-22.

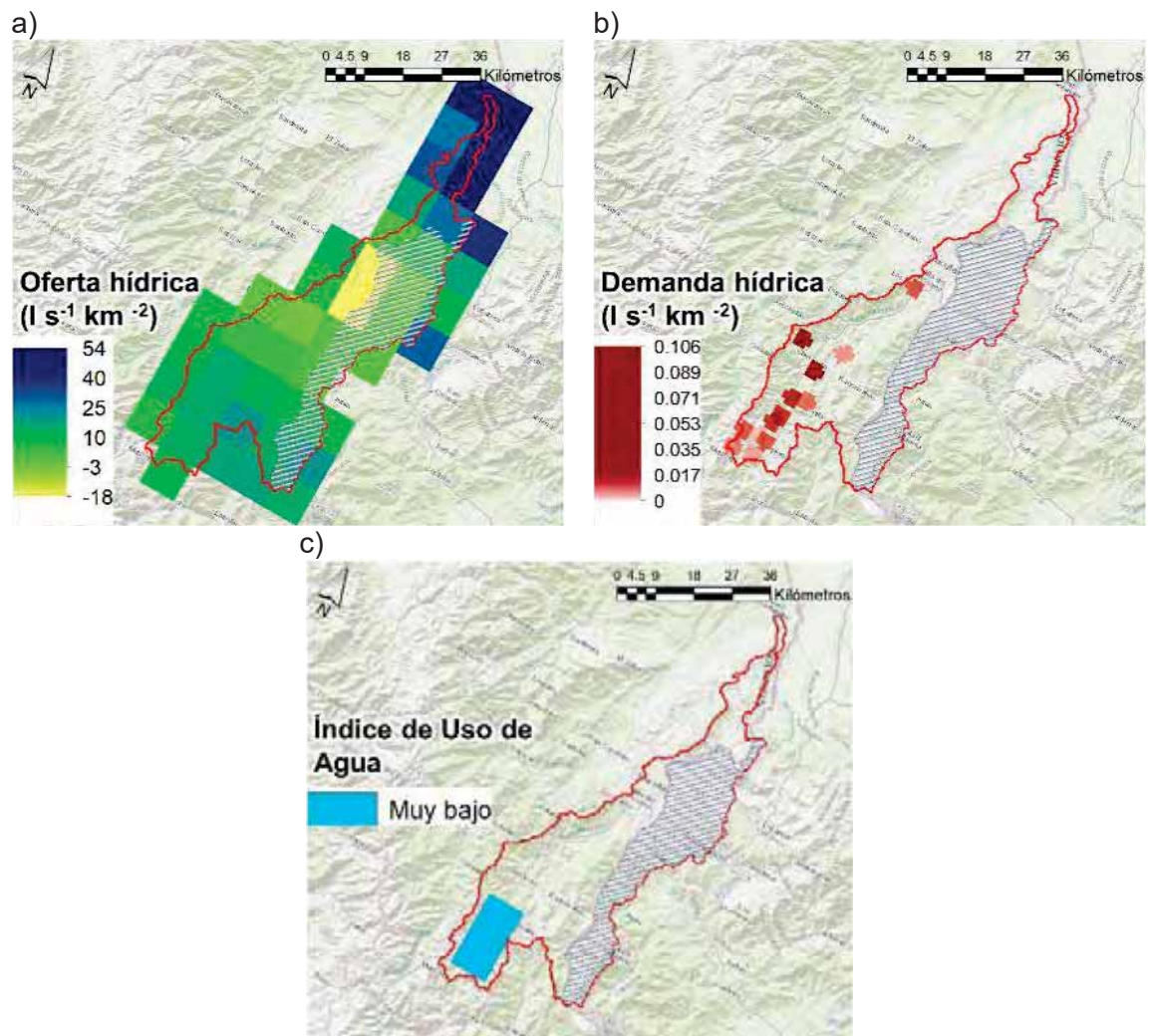
A partir de estos resultados, usando igualmente la herramienta de calculadora de mapas de QGis, se realizó la clasificación climática a través del método de Caldas-Lang, y se calculó el índice de aridez, estimando la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo de acuerdo con los valores de referencia recomendados por Allen, et. al (2006) y Nistor y Porumb (2015) según las coberturas del suelo.

En cuanto a la caracterización hidrológica, la oferta se estimó utilizando la herramienta de calculadora de mapas de QGis, mediante el método de balance hídrico de largo plazo, y la misma herramienta resultó útil para la estimación del índice de uso de agua, tomando como insumo el mapa de oferta y el mapa de densidad de puntos asociado con las demandas reportadas por la plataforma SIRH, cuyos resultados se muestran en la Figura 3-23, donde puede evidenciarse que la baja densidad de puntos de la demanda, conlleva a que el cálculo del índice de uso de agua, sea posible aplicarse únicamente en la región en donde se reportan las concesiones.

Para la estimación de la oferta hídrica disponible en la cuenca, se realizó la modelación hidrológica de la cuenca del río Pamplonita, usando el modelo de coeficiente simplificado para demandas por irrigación de la herramienta WEAP, la cual estima la esorrentía como el resultado del balance hídrico de la precipitación menos la evapotranspiración real calculada mediante la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo (Sieber, 2019), afectada por un factor de precipitación efectiva que oscila de 0% a 100%, el cual representa la esorrentía que se convierte en caudal de los ríos y quebradas.

La topología del modelo consideró las subcuencas definidas en el POMCA (ASOCARS et al., 2014), tomando como parámetros de cada una, el área definida en la caracterización morfométrica y los coeficientes de cultivo empleados para la estimación de la evapotranspiración real en la caracterización climática. A cada subcuenca se asociaron igualmente las series de tiempo de precipitación y evapotranspiración de referencia calculadas también en la caracterización climática mediante el método de Hargreaves.

Figura 3-23 Caracterización hidrológica de la cuenca del río Pamplonita a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua



Tomando las series de tiempo de caudal de las estaciones Aguas Claras (Cod. 16017010) y Don Juana (Cod. 16017020) se utilizó el módulo PEST de la herramienta WEAP para la calibración de los factores de precipitación efectiva de cada una de las subcuencas del modelo.

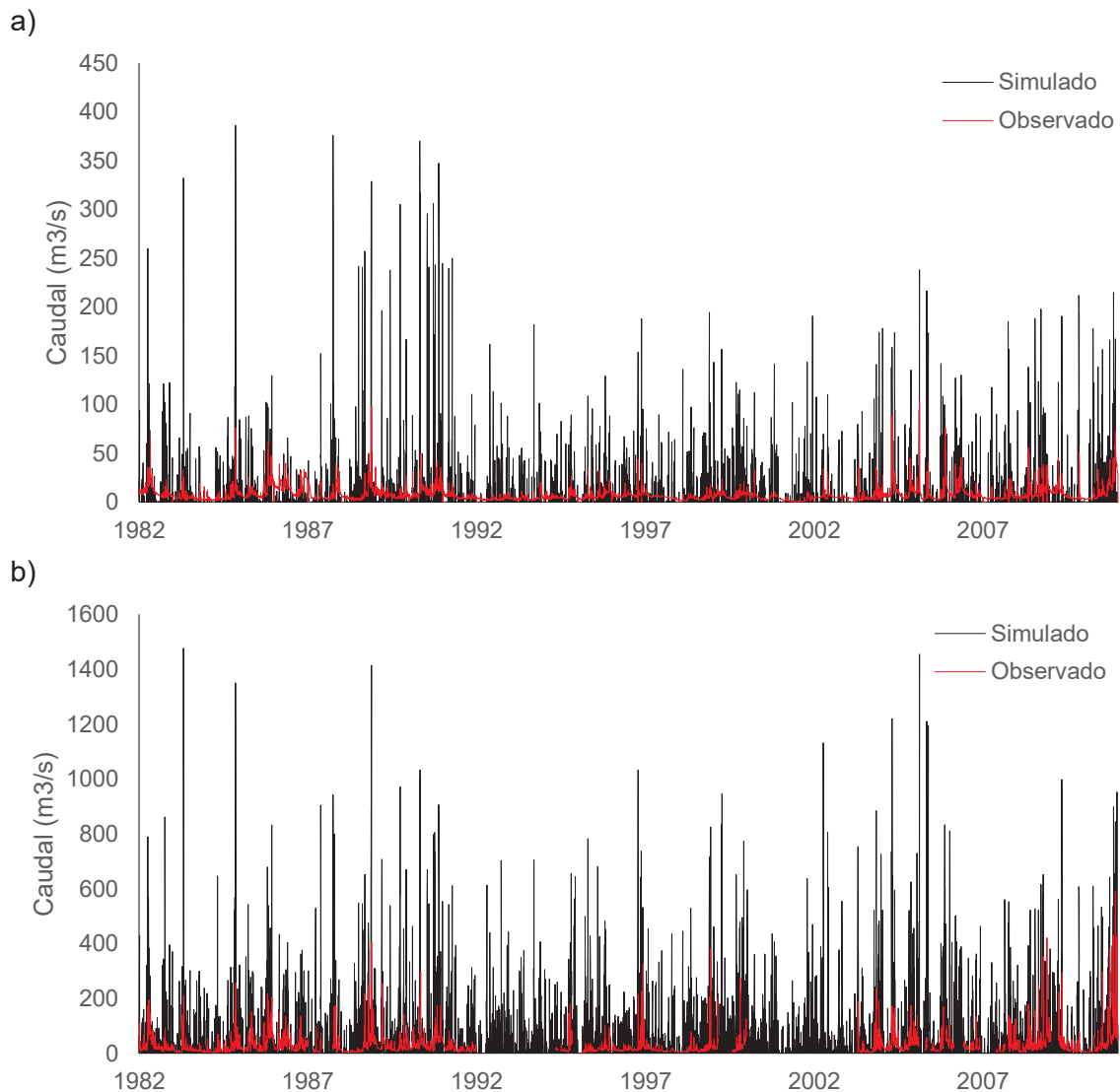
Tras utilizar la herramienta PEST, al evaluar el desempeño del modelo usando las métricas y los criterios del RMSE-Observation Standard Deviation Ratio (RSR) y el coeficiente de correlación (Cameron & Windmeijer, 1997; Moriasi et al., 2007) se identificó un bajo desempeño obteniendo valores de RSR de 3.4 y correlación de 0.21 para la estación Don Juana, y RSR de 3.1 y correlación de 0.24 para la estación Aguas Claras.

Al observar comparativamente los resultados en la Figura 3-24, se evidencia que el modelo presenta una sobrestimación de los caudales que influye significativamente en las métricas

empleadas para evaluar su desempeño, lo cual puede estar influenciado por el uso de una única serie de datos de precipitación y evapotranspiración para las diferentes unidades de análisis hidrológico del modelo, lo cual desconoce la variación espacial de estas variables de entrada en relación con la discretización empleada en el modelo del río Pamplonita en WEAP.

Para futuros trabajos puede explorarse alternativas para mejorar el desempeño del modelo, evaluando opciones como el uso de series de tiempo de las variables de entrada, discretizadas de acuerdo con las unidades de análisis que se planteen en la topología del modelo.

Figura 3-24 Comparación de series de tiempo de caudal modeladas con WEAP para las estaciones a) Don Juana y b) Aguas Claras



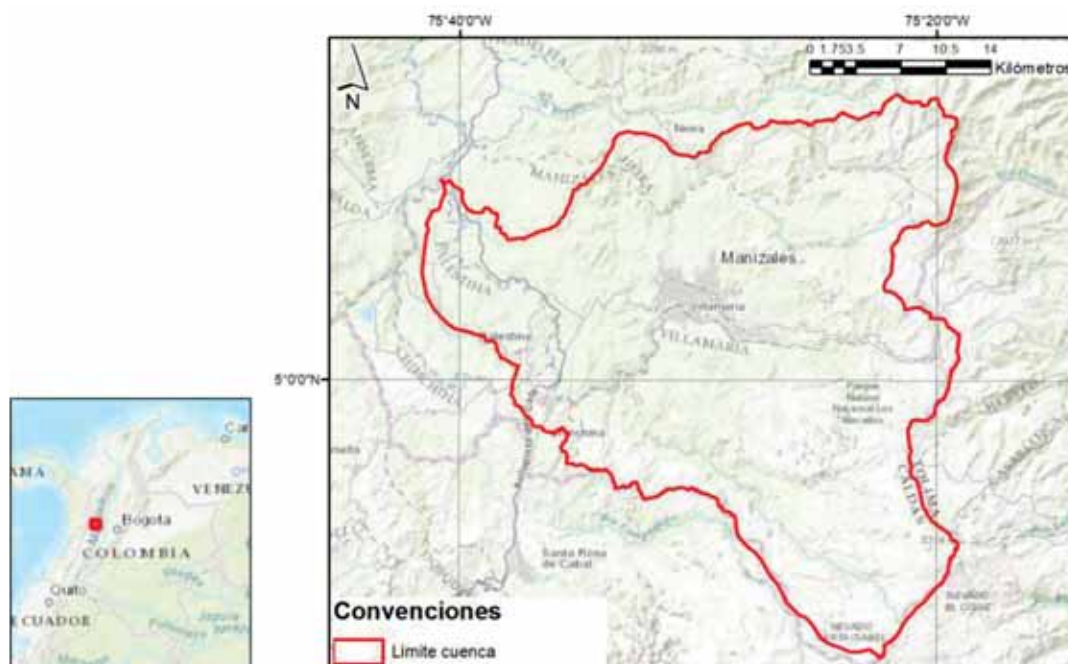
3.2.3 Amplia disponibilidad de información hidroclimatológica: Subzona hidrográfica del Río Chinchiná

La subzona hidrográfica del río Chinchiná está localizada en la región centro – sur del Departamento de Caldas, sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central, conformada por los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná, Palestina y Neira (Figura 3-25) y se consolida como una de las más importantes del río Cauca en su margen derecha, como describe el POMCA de la cuenca (Universidad Nacional de Colombia et al., 2014). Aproximadamente el 14% de la cuenca se encuentra en jurisdicción de Parques Nacionales Naturales, mediante zona de reserva que tiene como objetivo la conservación de la cuenca alta que brinda servicios ecosistémicos fundamentales para la región (MADS, 2022b).

La cuenca se extiende desde los puntos más elevados de la Cordillera Central, a los 5200 msnm ubicados en el Volcán Nevado del Ruiz y descende a una altura de 796 msnm sobre la margen derecha del río Cauca, generando presencia de todos los pisos térmicos, predominando el clima húmedo. Se caracteriza por una topografía abrupta, por lo que el río presenta características típicas de una corriente de montaña: altas pendientes y lecho rocoso (Universidad Nacional de Colombia et al., 2014).

Según el Centro Internacional para la Investigación del fenómeno de El Niño (CIIFEN), el territorio de la cuenca del río Chinchiná, se ve afectado constantemente por eventos asociados generalmente a fenómenos climáticos, cuyo impacto es bastante fuerte debido a que las condiciones ambientales económicas y sociales, no guardan una adecuada relación (CIIFEN & Corporación cuenca río Chinchiná, 2019).

Figura 3-25 Localización Subzona Hidrográfica Río Chinchiná



Estos elementos fueron detonantes para que en el año 2010 se conformara la Comisión Conjunta del río Chinchiná, entre la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales, y mediante Acuerdo 002 de 2010 se declara en ordenación la Cuenca Hidrográfica del río Chinchiná.

Aunado a lo anterior, la situación vivida por la ciudad de Manizales, que concentra en su casco urbano cerca del 70% de la población de la cuenca, y que entre los meses de octubre y noviembre de 2011 estuvo sin provisión del servicio de acueducto durante 19 días, resultado del colapso de la infraestructura correspondiente ante un evento erosivo asociado con torrencialidad de la corriente y el uso inadecuado del suelo (CIIFEN & Corporación cuenca río Chinchiná, 2019).

Por ello, dentro del marco del acuerdo de contribución B0G0113303 suscrito entre el Estado de los Países Bajos y ASOCARS, en noviembre de 2011 se suscribió un Convenio de Asociación entre CORPOCALDAS, ASOCARS y la Universidad Nacional de Colombia, para adelantar la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Chinchiná, del cual derivó la formulación del POMCA del río Chinchiná, el cual se adoptó mediante Resolución No 411 del 03 de octubre de 2016.

3.2.3.1 Disponibilidad de información oficial

3.2.3.1.1 Cartografía oficial

Se realizó la verificación de la disponibilidad de la cartografía oficial del IGAC a escala 1:25.000, encontrando que para la Subzona Hidrográfica del río Chinchiná se tiene una importante zona con restricción de consulta por tener reserva legal. En la Figura 3-26 se muestran las planchas disponibles para la subzona y en la Figura 3-27 la disponibilidad de cartografía de cobertura de suelo de Corine Land Cover a escala 1:100.000 del IDEAM.

3.2.3.1.2 Registros hidroclimatológicos

Dentro de la subzona hidrográfica del río Chinchiná y en un área de influencia de hasta 5 km alrededor del límite, se identifica la buena instrumentación con que cuenta la cuenca, tal como se muestra en la Figura 3-28.

En gran medida, la buena instrumentación obedece a la instalación de estaciones que han hecho entidades como CENICAFÉ, la Central Hidroeléctrica de Caldas y CORPOCALDAS, quienes en conjunto tienen 108 estaciones con registros de precipitación y de clima, de las 141 identificadas, mientras que las 31 restantes pertenecen al IDEAM cuya información es de libre acceso, a diferencia de las demás entidades, que requieren de trámites adicionales para su acceso.

Figura 3-26 Cobertura de cartografía básica a escala 1:25.000 del IGAC en la subzona hidrográfica del río Chinchiná



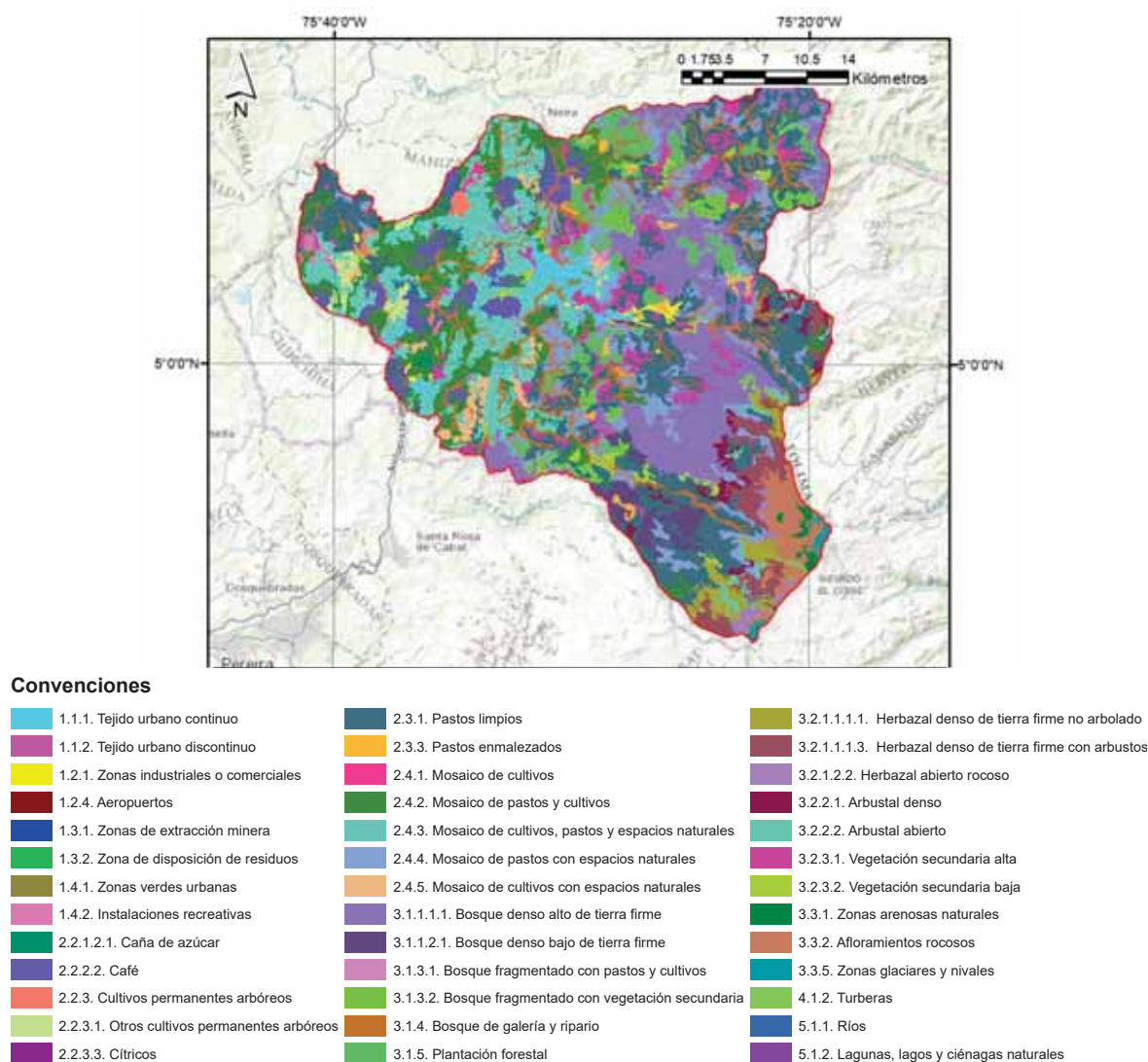
De las estaciones del IDEAM, 11 cuentan con registros de precipitación de más de 30 años con un periodo de registro similar, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de la cuenca, permitiendo realizar un adecuado análisis espacio – temporal de esta variable. Mientras que para la temperatura, se cuenta únicamente con cuatro estaciones con registros en un periodo similar de más de 30 años, ubicadas principalmente en la cuenca alta, dejando espacios sin información en las cuencas media y baja.

En la identificación de la disponibilidad de registros de caudales de estaciones de monitoreo, la cuenca del río Chinchiná cuenta con una amplia red que llega a las 56 estaciones, sin embargo, de éstas solamente 11 cuentan con más de 30 años de registros. Si bien sigue siendo un número importante, sólo tres de éstas son operadas por el IDEAM, y las demás son administradas por la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A., con quienes no fue posible acceder a los registros.

3.2.3.1.3 Demanda del recurso hídrico superficial

La información asociada con las concesiones de agua superficial fue suministrada por la corporación CORPOCALDAS, quienes remitieron el listado, con la localización y caudal concesionado dentro de la cuenca del río Chinchiná, para caudal uno de los puntos otorgados, los cuales se muestran en la Figura 3-29.

Figura 3-27 Mapa de coberturas Corine Land Cover, escala 1:100.000 del IDEAM en la subzona hidrográfica del río Chinchiná.



3.2.3.2 Selección de fuentes de información

Debido a que se tiene carencia de algunas fuentes de información oficiales necesarias para la elaboración de los productos POMCA, como la información cartográfica a escala 1:25.000 y los registros de las estaciones que componen la red de monitoreo de la cuenca, operadas por entidades como CENICAFÉ, la Central Hidroeléctrica de Caldas y CORPOCALDAS, se revisaron las alternativas disponibles en HidroCHEP para llenar los vacíos de información.

Inicialmente, debido a la falta de información topográfica por las restricciones de acceso a algunas de las planchas cartográficas 1:25.000 del IGAC en el área de la cuenca, se revisaron las alternativas de imágenes satelitales de acceso libre, realizando el mismo

análisis del caso de estudio del río Pamplonita, para el que se opta por el uso del modelo digital de terreno de mejor resolución (12.5m) dentro de las alternativas de la Caja de Herramientas, el cual corresponde al modelo ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2015).

Figura 3-28 Localización de estaciones hidroclimatológicas en la subzona hidrográfica del río Chinchiná

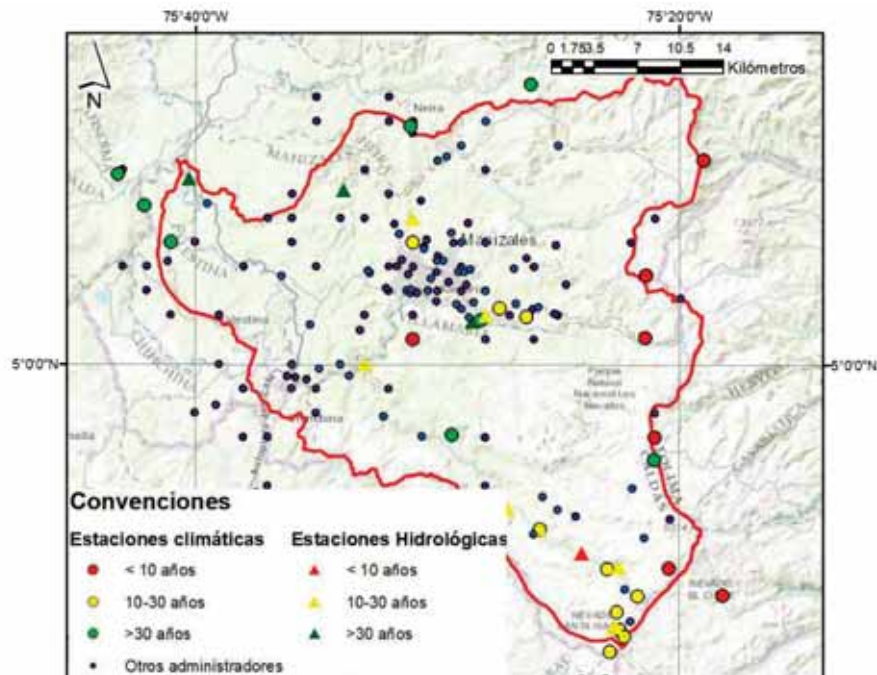


Figura 3-29 Localización de información oficial de concesiones de agua superficial otorgadas en la cuenca del río Chinchiná



Para la caracterización climática se utilizan los registros de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM para la caracterización espacial de la precipitación, y dado que no se cuenta con una distribución adecuada de las estaciones climatológicas con registros de otras variables, se evaluaron otras fuentes de información disponibles en la caja de herramientas, tal como se muestra en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Revisión de fuentes de información para elaboración de productos POMCA de la temática de clima para la subzona hidrográfica del río Chinchiná

Temática		Clima			Observaciones
Producto POMCA		C01	C02	C03	
Fuentes de Información	Estaciones hidrometeorológicas				No existe buena cobertura de estaciones hidrometeorológicas para la estimación de la temperatura ni de la evapotranspiración
	Planchas cartográficas del IGAC				Mapa de coberturas Corine Land Cover disponible a escala 1:100.000
	Earth2Observe WCI Portal				Cuenta con datos de reanálisis de evapotranspiración potencial a escala de 0.05°
	Giovanni				Cuenta con registros de temperatura del aire a escala de 0.5°
	CHIRPS				Cuenta con registros de precipitación a escala de 0.05°
	International Precipitation Group (IPWG)				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 0.5°
	Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 2.5°
	Climatic Re4search Unit (CRU)				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 5°
	Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 1°
	Megha - Tropiques				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 1°
	LandFluxEVAL				Sólo cuenta con registros hasta el 2005
	Global Land Cover Facility				Fallas en la descarga de información
	Global Land Cover Characterization				Resolución de 1km x 1km
	ESA Land Cover CCI				Resolución de 1km x 1km
	ICDE				Redirecciona a la información de planchas de coberturas Corine Land Cover del IGAC
	NASA Earthdata Search				Cuenta con registros de precipitación de escala mínima de 0.5°
	World View				Redirecciona al sitio NASA Earthdata Search para descarga de información
		 Uso recomendado	 Uso recomendado salvo mejor alternativa	 Uso no recomendado	

Tomando como criterio principal de selección la resolución de la información satelital, se utilizaron para la temperatura los registros del modelo FLDAS Noah Land Surface (NASA/GSFC/HSL, 2018) que tiene una resolución de 0.1° ($\sim 11.1\text{km}$), descargados de la plataforma GIOVANNI (Acker & Leptoukh, 2007), y para la caracterización de la evapotranspiración se utilizaron los registros de reanálisis elaborados por Deltares (Sperna et al., 2015), descargados del sitio web del proyecto Earth2Observe (Calton, 2014), el cual presenta la información de evapotranspiración en formato NetCDF a escala de 0.05° ($\sim 5.5\text{km}$) estimada mediante el método de Penman-Monteith, el cual ha sido reportado por distintos autores como el método que produce mejores resultados (Doorenbos & Pruitt, 1977).

En cuanto a los productos de hidrología se cuenta con información suficiente para la caracterización de la demanda, y con el fin de ilustrar el uso de herramientas disponibles para cuencas instrumentadas, se elaboraron los productos de esta temática mediante el análisis estadístico de las series de tiempo de las estaciones hidrológicas.

3.2.3.3 Selección de herramientas de procesamiento

Mediante el uso de HidroCHEP se verificaron las diferentes opciones para las herramientas de procesamiento de información, con el fin de consolidar los productos POMCA para la subzona hidrográfica del río Chinchiná. De igual manera que en los casos anteriores la herramienta SIG que se seleccionó para los análisis espaciales de las diferentes temáticas y la consolidación de los productos de hidrografía, morfometría y pendientes fue QGIS, siguiendo el análisis presentado para los dos casos de estudio precedentes.

En cuanto al procesamiento de la información de los registros de las estaciones hidrológicas, las diferentes herramientas de análisis de datos que presenta HidroCHEP permiten la elaboración de estos productos. Se seleccionan las herramientas FDC 2.1 (Gregor, 2020b) y BFI+ 3.0 (Gregor, 2020a) del paquete HydroOffice, teniendo en cuenta su entorno amigable, sencillo de manejo y facilidad de exportación de los resultados para análisis posteriores. En la Tabla 3-9 se presenta el análisis realizado para la selección de las herramientas de análisis estadístico de datos de caudales.

3.2.3.4 Resultados

Los productos POMCA elaborados para la subzona hidrográfica del río Chinchiná se detallan en el Anexo F del presente documento.

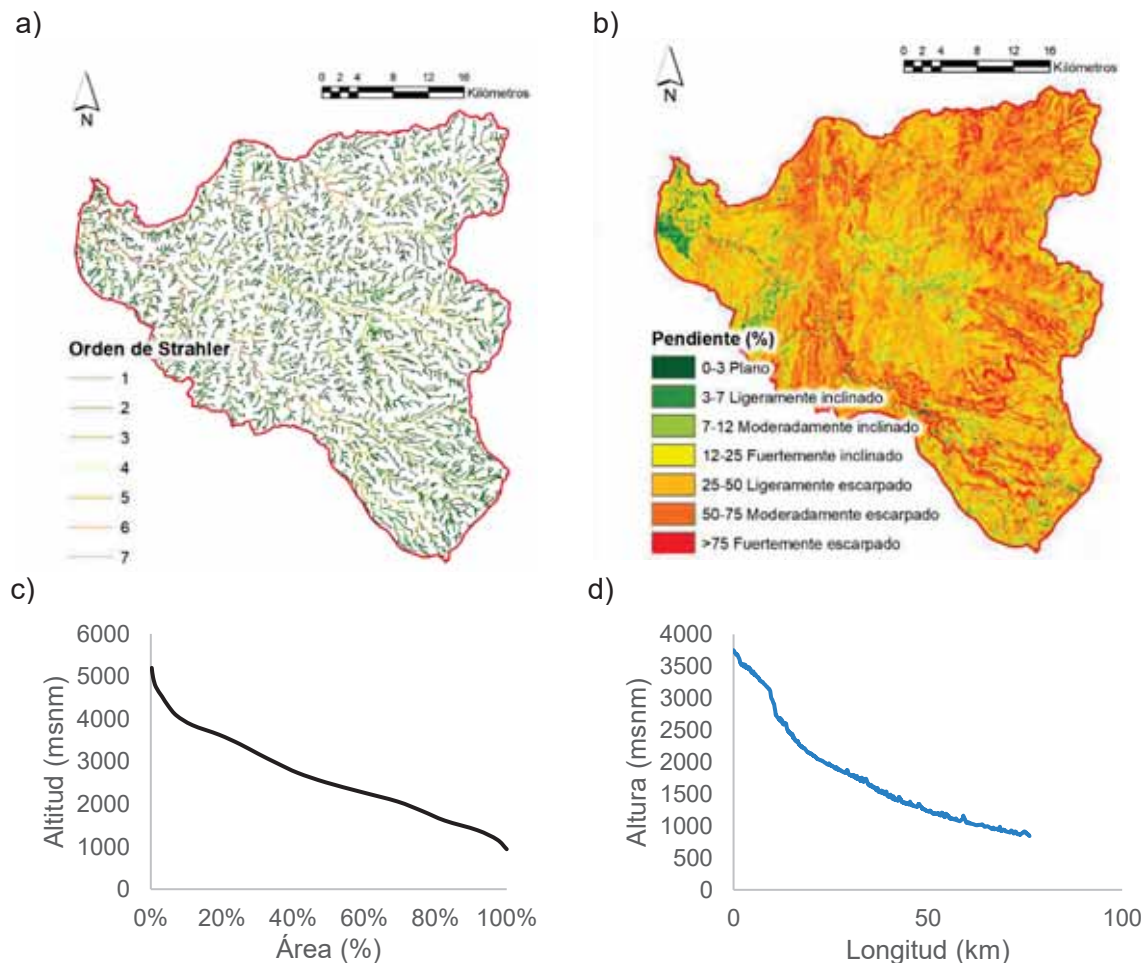
En cuanto a los productos elaborados para las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, la resolución de la fuente de información influyó en la escala resultante de los productos, los cuales corresponden a una escala aproximada 1:50.000, de acuerdo con la relación propuesta por Hengl (2006), lo cual no corresponde con la escala recomendada de la Guía Técnica para la formulación de POMCAS del Ministerio de Ambiente (MADS, 2014). En la Figura 3-30 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para estas temáticas.

Tabla 3-9 Revisión de herramientas de procesamiento para elaboración de productos POMCA de la temática de hidrología para la subzona hidrográfica del río Chinchiná

Temática		Hidrología						Observaciones
		Hi01	Hi02	Hi03	Hi04	Hi05	Hi06	
Herramientas de procesamiento	R		●	●				Requiere conocimientos en programación
	RAP		●	●				
	FDC		●	●				Utilizado para la generación de curvas de duración de caudales
	BFI+		●	●				Utilizado para la separación del flujo base
	FlowComp		●	●				
	HEC EFM		●	●				
	HEC SSP		●	●				

● Uso recomendado
 ● Uso recomendado salvo mejor alternativa
 ● Uso no recomendado

Figura 3-30 Resultados de la caracterización hidrográfica, morfométrica y de pendientes caso de estudio río Chinchiná. a) Mapa de orden de Strahler, b) Mapa de pendientes, c) Curva hipsométrica, d) Perfil del cauce principal



Para la caracterización de las variables climáticas se seleccionó el periodo 1982-2012, y utilizando QGIS se procesaron los registros de precipitación de las estaciones para la obtención de mapas de distribución espacial de la variable, y la misma herramienta permitió el procesamiento de la información disponible para la caracterización de la temperatura y la evapotranspiración, en formato NetCDF de las fuentes consultadas.

A partir del procesamiento de la información, se obtuvieron resultados como los mostrados en la Figura 3-31, en donde puede identificarse la variación espacial y temporal de las variables hidroclimatológicas, en las que por el tamaño de la cuenca y la resolución de la información utilizada para variables como la evapotranspiración (píxel de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$), hace que el resultado no tenga la resolución esperada que permita identificar variación espacial a nivel de subcuencas o microcuencas.

Con el fin de verificar el desempeño de los datos de evapotranspiración a partir del ejercicio de reanálisis presentado por Sperna et al. (2015), no se identificó literatura asociada a validación en la región de estudio, por lo que se realizó una comparación con la evapotranspiración estimada mediante el método de FAO-Penman Monteith (Allen et al., 2006), a partir de los registros de la estación AEROPUERTO LA NUBIA, ubicada en la ciudad de Manizales y administrada por el IDEAM.

El método de FAO-Penman Monteith toma como datos de entrada los registros de temperatura, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento. De esta última variable sólo se contó con registros de los años 1983 y 1984, por lo que la comparación se realizó para estos dos años.

De acuerdo con los resultados señalados en la Figura 3-32, los datos de reanálisis muestran una sobrestimación en relación con los calculados con los registros de la estación AEROPUERTO LA NUBIA (Mean Bias Error MBE de 0.43), y una correlación deficiente, con métricas de porcentaje de BIAS (PBIAS) del -21% y coeficiente de correlación de 0.21. A pesar del bajo desempeño según las métricas empleadas, es importante contemplar validaciones con estaciones que cuenten con mayor longitud de registros, como las administradas por CENICAFÉ o la Central Hidroeléctrica de Caldas, con lo que se pueda identificar si el desempeño de los datos de reanálisis de Sperna et al. (2015) mantienen un bajo desempeño en periodos más largos de análisis.

Para los productos de la temática de hidrología, fue igualmente utilizada la herramienta QGIS para la estimación de la oferta, la demanda hídrica y el índice de uso del agua que se muestran en la Figura 3-33, a partir de los mapas obtenidos para precipitación, evapotranspiración y densidad de puntos de concesiones otorgadas en la cuenca, siguiendo la metodología descrita para los casos de estudio precedentes. En estos productos, a pesar de la resolución obtenida del balance hídrico para la estimación de la oferta, al contar con buena información sobre las concesiones otorgadas dentro de la cuenca, es posible identificar las regiones con mayor presión sobre el recurso hídrico, lo cual puede derivar en acciones y proyectos específicos que permitan gestionar adecuadamente los recursos en estas regiones.

Figura 3-31 Variación espacio - temporal de la precipitación (izquierda) y evapotranspiración potencial (derecha) en la subzona del río Chinchiná

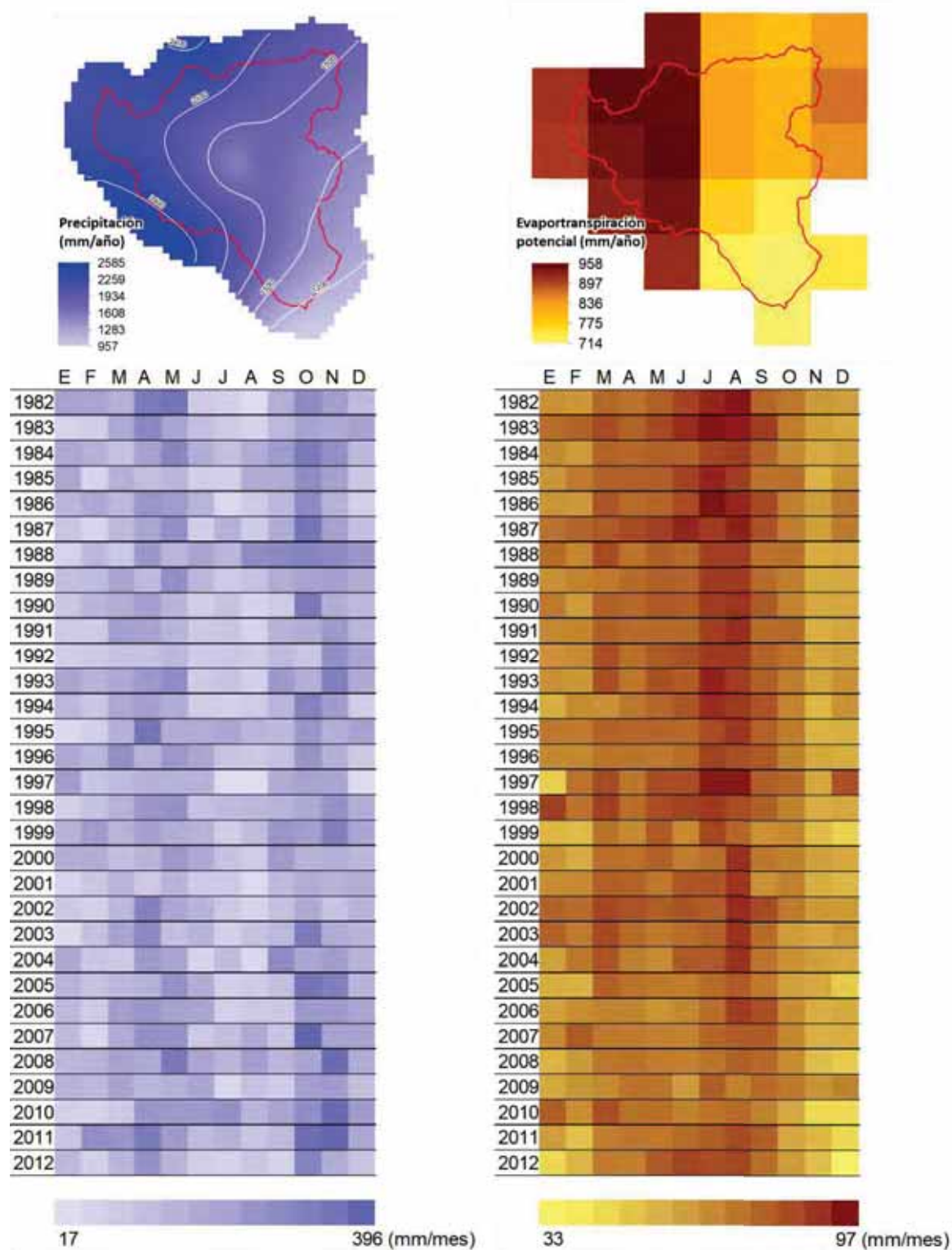


Figura 3-32 Comparación de series de tiempo de Evapotranspiración Potencial para la estación AEROPUERTO LA NUBIA y de reanálisis de Deltares. a) Series históricas 1983 – 1984, b) Diagrama de dispersión

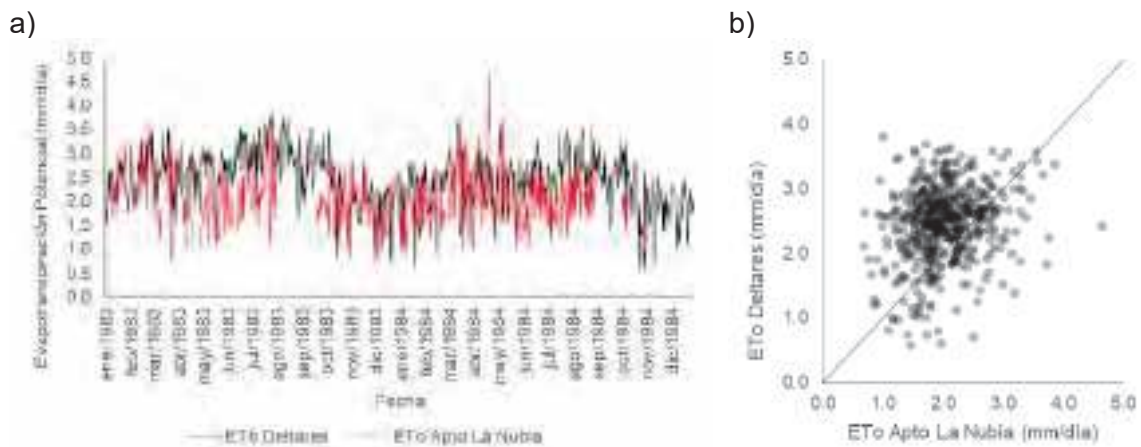
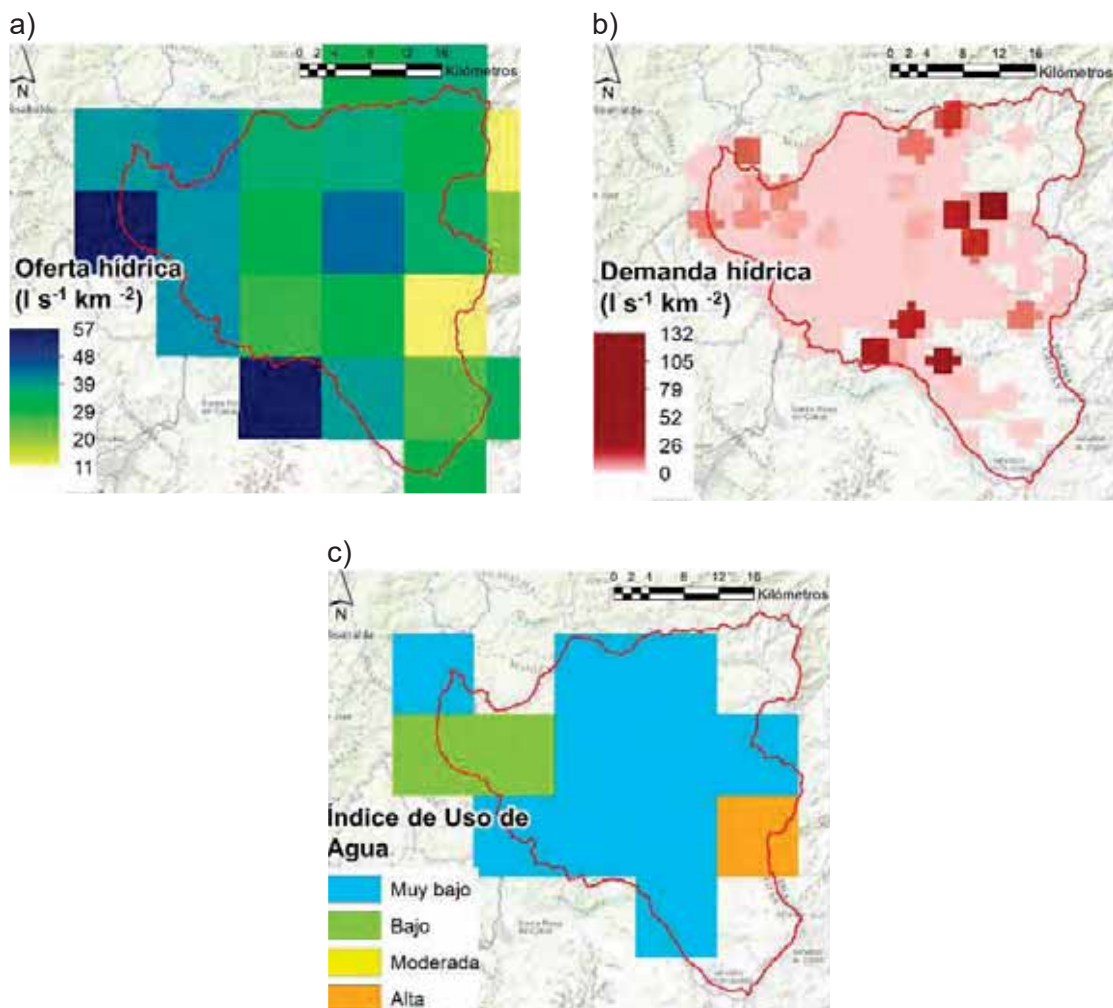
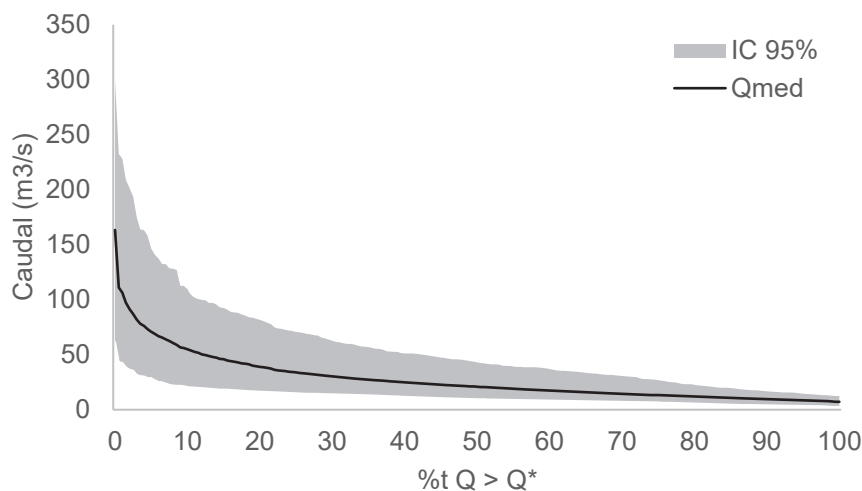


Figura 3-33 Caracterización hidrológica de la subzona hidrográfica del río Chinchiná a partir de la estimación de a) oferta hídrica, b) demanda hídrica, c) índice del uso de agua



Finalmente, a partir de la información de las estaciones hidrológicas de la cuenca, se estimaron las curvas de duración de caudales diarios como puede verse en la Figura 3-34 para la estación El Retiro (Cod 26157020) que se encuentra en inmediaciones a la desembocadura del río Chinchiná, cerca de su desembocadura en el río Cauca. La herramienta FDC 2.1 (Gregor, 2020b) del paquete HydroOffice, permitió estimar igualmente el intervalo de confianza del 95% para la curva de duración de caudales, mostrando la alta variabilidad en los caudales con probabilidad de excedencia menor al 50%, lo cual permite hacer análisis posteriores sobre la probabilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales y conducir a toma de decisiones sobre la formulación de proyectos enfocados a mitigar los impactos que estos eventos puedan generar en la cuenca.

Figura 3-34 Curva de duración de caudales para la cuenca del río Chinchiná (Estación 26157020 El Retiro). Periodo 1982 - 2012



4. Evaluación, discusión y análisis de resultados

En este capítulo se presenta el análisis comparativo de las metodologías utilizadas en los documentos POMCA aprobados a la fecha para los tres casos de estudio, con las implementadas a través del uso de HidroCHEP. Igualmente, se contrastan los resultados obtenidos por parte de los consultores que desarrollaron los tres POMCAS con lo obtenido a través del uso de HidroCHEP. Al final del capítulo se presentan los principales hallazgos, derivados de un análisis crítico de la caja de herramientas.

4.1 Marco comparativo del uso de HidroCHEP con documentos POMCA

Los documentos POMCA que se han utilizado para realizar la comparación fueron obtenidos de las páginas web oficiales de las Corporaciones Autónomas Regionales de las jurisdicciones correspondientes, de acuerdo con las versiones aprobadas y en implementación de cada caso, tal como se especifica a continuación

- Subzona río Humea con POMCA aprobado mediante Resolución Conjunta CORPOGUAVIO, CORPORINOQUIA, CORMACARENA No 1160 – 2679 – 300.36 19 1903 del 23 de octubre de 2019.
- Subzona río Pamplonita con POMCA aprobado mediante Resolución CORPONOR No 00761 del 18 de diciembre de 2014.
- Subzona río Chinchiná con POMCA aprobado mediante Resolución CORPOCALDAS No 411 del 03 de octubre de 2016.

Para estos documentos, solamente fue posible acceder a los informes de los resultados, y no a los archivos o datos fuente que permitieran establecer comparaciones numéricas para cada uno de los productos, por lo que el ejercicio que se adelanta se basa en lo reportado en los diferentes informes elaborados por los consultores.

El marco comparativo se ha dividido en tres grupos de temáticas (fisiografía, climatología e hidrología), considerando las fuentes de información y herramientas de procesamiento utilizadas.

4.1.1 Temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes

En la Tabla 4-1 se presentan los criterios tenidos en cuenta para evaluar el desempeño de la caja de herramientas en los tres casos de estudio para los productos POMCA de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes.

Se identificó en los documentos POMCA de los tres casos de estudio, que una práctica común en la elaboración de los productos de estas temáticas, corresponde al procesamiento de modelos digitales de terreno a través de herramientas SIG, por lo que es importante que el usuario de estas herramientas reconozca que existe cierto grado de incertidumbre en las estimaciones realizadas, que depende de la fuente del modelo digital de terreno utilizado y de la herramienta SIG que se utiliza para su procesamiento.

Del ejercicio adelantado sólo para la aplicación de HidroCHEP en el caso de la Subzona del río Humea fue posible trabajar a la escala 1:25.000, que es la recomendada por la Guía Técnica de los POMCAS, dado que fue el único caso de estudio en donde se contó con acceso a la cartografía oficial del IGAC a dicha escala, lo cual no fue aplicado en el POMCA, donde los autores optaron por trabajar con imágenes ALOS PALSAR, cuya resolución se asocia a 1:50.000. Debido a las limitaciones de acceso a la información para los casos de estudio de las subzonas hidrográficas de los ríos Pamplonita y Chinchiná, la alternativa seleccionada para la aplicación con HidroCHEP con mejor resolución de información fueron las imágenes ALOS PALSAR, mientras que los autores usaron modelos digitales de terreno de 30m de tamaño de píxel, cuya escala asociada dista considerablemente de la recomendada por la Guía Técnica de POMCAS (1:112.500).

En este sentido, para los tres casos de estudio, contar con HidroCHEP permitió elaborar los productos de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes a una mejor escala que la usada en los documentos POMCA aprobados.

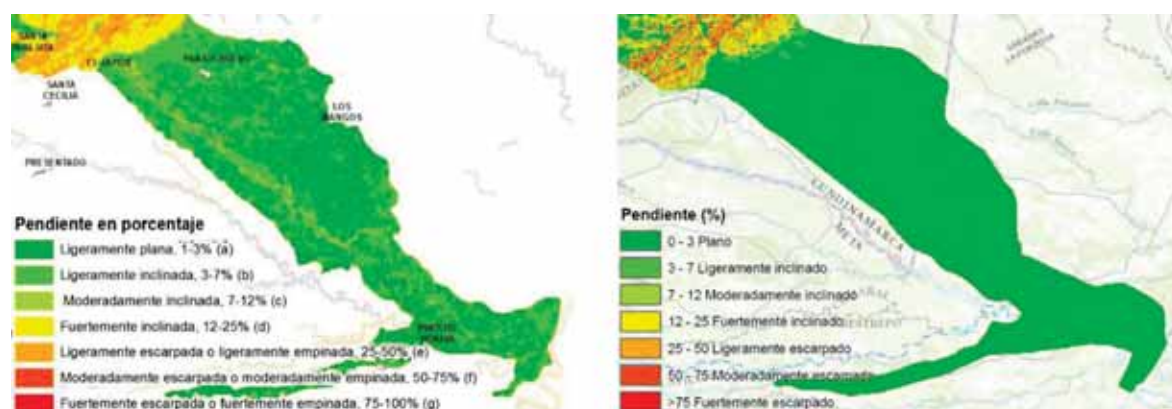
En cuanto a las fuentes de información utilizadas, se identificaron estudios (por fuera de los casos de estudio analizados) que reportan errores asociados con distorsiones de escala para el caso de las imágenes ALOS PALSAR (Andrades & Rossetti, 2011), o errores en la validación de alturas para las imágenes ASTER GDEM (Burgos, 2012), que requieren ser considerados a la hora de identificar la incertidumbre asociada con la generación de los productos POMCA.

Como ejemplo del impacto de la resolución de las fuentes de información en los resultados de los productos, se puede apreciar la diferencia en los mapas de pendientes elaborados para el caso del río Humea que tiene gran parte de su área en los llanos orientales, donde las bajas pendientes son predominantes. Como se muestra en la Tabla 4-2 y en la Figura 4-1, las principales diferencias en las fuentes de información empleadas por el POMCA (ALOS PALSAR) y con el uso de HidroCHEP (cartografía IGAC 1:25.000) se presentan en las zonas de bajas pendientes, lo que puede conducir a diferencias en evaluaciones posteriores como de las amenazas asociadas a estas regiones con bajas pendientes.

Tabla 4-2 Comparación de la distribución de pendientes evaluadas en porcentaje para el caso del río Humea

Rangos de pendiente	POMCA		HidroCHEP		Diferencia
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	
0 - 3%	263.09	18.6%	688.00	47.8%	-29.2%
3 - 7%	293.43	20.7%	58.59	4.1%	16.7%
7 - 12%	19.70	1.4%	42.74	3.0%	-1.6%
12 - 25%	235.01	16.6%	128.99	9.0%	7.6%
25 - 50%	340.70	24.1%	242.51	16.9%	7.2%
50 - 75%	136.57	9.7%	144.35	10.0%	-0.4%
> 75%	125.97	8.9%	132.91	9.2%	-0.3%

Figura 4-1 Fragmentos de los mapas de pendientes generados para el caso del río Humea en el POMCA (izquierda) y con el uso de HidroCHEP (derecha)



Por otra parte, en relación con las herramientas de procesamiento utilizadas por los POMCA e HidroCHEP, es importante mencionar que, a pesar de ser software ampliamente validados, las herramientas SIG como ArcGIS y QGIS difieren en algunos algoritmos para la generación de ciertos productos (Benduch, 2017), que pueden conducir a diferencias en los resultados, dependiendo del software que se utilice. Identificar cuál arroja los mejores resultados dependerá de adelantar validaciones en campo, con levantamientos topográficos detallados que permitan verificar en puntos de control, el grado de aproximación de los resultados de los procesamientos realizados con las diferentes herramientas SIG.

Finalmente, herramientas como QGIS y ArcGIS, cuentan con una amplia comunidad de soporte, que brinda material de apoyo como tutoriales, ejemplos y solución a problemas típicos que pueden presentarse en su uso, por lo que la selección entre estas herramientas dependerá principalmente del acceso, siendo ArcGIS licenciado y QGIS un software libre.

4.1.2 Temática de clima

Para la evaluación del desempeño de HidroCHEP en la elaboración de los productos POMCA en la temática de clima, se tuvieron en cuenta los criterios señalados en la Tabla 4-3. Dado que las herramientas de procesamiento corresponden igualmente a las herramientas SIG, la evaluación del desempeño es la misma que la presentada en la sección 4.1.1, y en esta sección se discutirá principalmente sobre las fuentes de información.

Los documentos POMCA de los tres casos de estudio emplearon los registros de estaciones de monitoreo. Sólo en el caso de la subzona del río Chinchiná se contaba con una buena distribución de las estaciones para los registros de precipitación, temperatura y humedad relativa. Para el POMCA del río Pamplonita, no se contó con registros para el área perteneciente a Venezuela, y en el caso del río Humea, no se contó con registros suficientes dentro de la cuenca o en un área de influencia que permitiese inferir el comportamiento de las variables climatológicas en la misma, como se evidencia en la localización de las estaciones empleadas para el análisis del POMCA en la Figura 4-2.

Si bien los resultados presentados en los documentos POMCA, presentan información sobre la variabilidad espacial del clima, en todos los casos se realizan correlaciones de las variables con la elevación, presentando la distribución de las variables a la misma escala de los modelos digitales de terreno empleados para los POMCA.

Figura 4-2 Localización de estaciones de monitoreo utilizadas para el análisis del clima en el POMCA del río Humea. Tomado de MADS et. al. (2019)

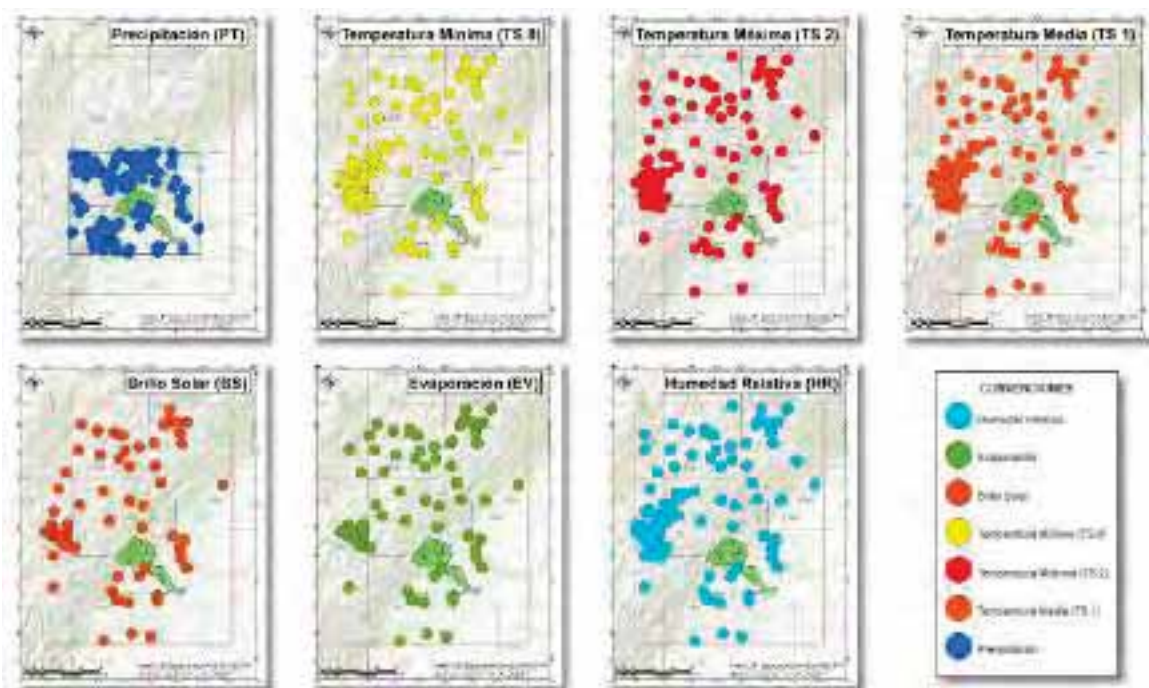


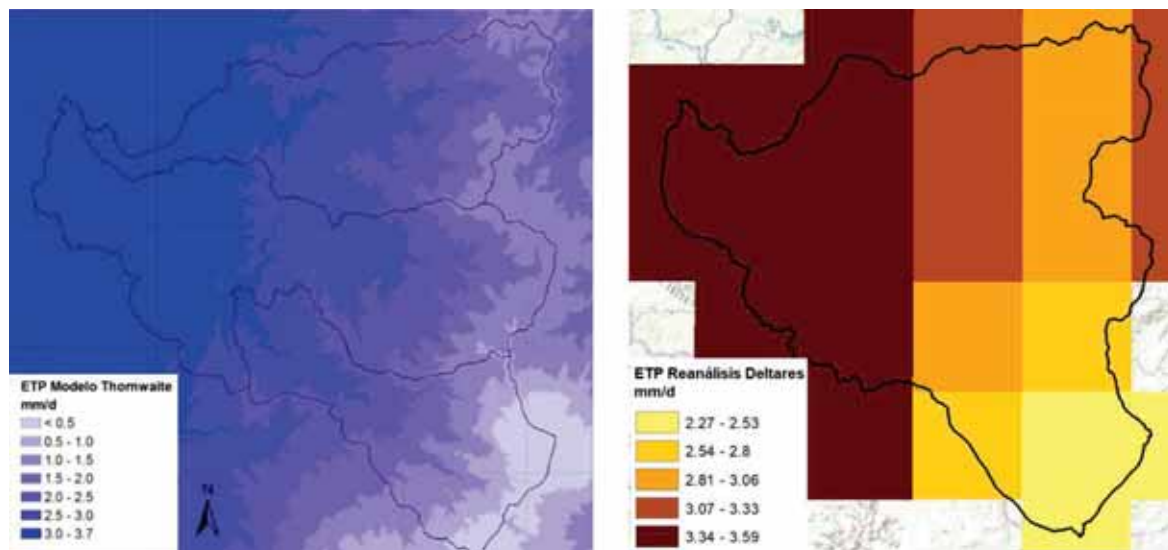
Tabla 4-3 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de la temática de clima

Actividad evaluación	SZH Río Humea		SZH Río Pamplonita		SZH Río Chinchiná	
	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP
Elaboración de producto POMCA	Estaciones IDEAM	CHIRPS Temperatura FLDAS	Estaciones IDEAM	Estaciones IDEAM Coberturas ESA Soil	Estaciones hidroclimatólogicas	Estaciones IDEAM Noah Land Surface ETP Deltares
	Herramienta de Qgis	QGIS	Sin Información	QGIS	Sin información	QGIS
Cobertura espacio - temporal	procesamiento					
	Poca cobertura en el área de la cuenca	Cobertura en toda el área de la cuenca a resolución 0.05° Periodo de tiempo de 1982 a 2012 (31 años)	Poca cobertura en el área de la cuenca para algunas de las variables climatólogicas	Cobertura en toda el área de la cuenca. Periodo de tiempo de 1982 a 2012 (31 años)	Buena cobertura incluyendo estaciones del IDEAM y de otras entidades administrativas	Cobertura en toda el área de la cuenca a resolución 0.01° y 0.05° Periodo de tiempo de 1982 a 2012 (31 años)
Incertidumbre	Fuente de información	No es representativa para la cuenca	CHIRPS puede presentar diferencias con mediciones en estaciones en registros previos al año 2000 (Shen et al., 2020). Los registros de FLDAS muestran errores mínimos comparados con registros de estaciones (Alemu & Wimberly, 2020)	No permite identificar variabilidad espacial para algunas de las variables	La información de coberturas de ESA ha demostrado ser adecuada para la elaboración de modelos climáticos regionales (Reinart et al. 2021)	No permite identificar variabilidad espacial para algunas de las variables desempeño a nivel diario que permite su uso en evaluaciones del recurso hídrico (Sperna et al., 2015)

Mediante el uso de HidroCHEP, para algunas variables se optó por el uso de registros de sensores remotos para suplir la deficiente densidad de puntos de observación que permitieran obtener una distribución espacial adecuada para la caracterización a nivel de cuencas y subcuencas. Como se observa en la Figura 4-3 para el caso de la cuenca del río Chinchiná, si bien el POMCA presenta una aparente mejor distribución de variables como la evapotranspiración potencial teniendo en cuenta la resolución de la información (resolución del POMCA de 30 m vs. resolución con HidroCHEP de 5500 m), no se presenta una validación de los resultados que permita identificar el grado de precisión de las estimaciones hechas, por lo que no es posible evaluar cuál de las dos fuentes de información presenta mejores resultados.

En este sentido, el ejercicio realizado con HidroCHEP se respalda en diferentes investigaciones que han señalado el buen desempeño de los registros de sensores remotos como los utilizados para la caracterización de la temperatura media diaria obtenida de FLDAS Noah Land Surface (Alemu & Wimberly, 2020), o los obtenidos para precipitación a partir de CHIRPS principalmente para los registros después del año 2000 (Shen et al., 2020), o en términos generales para las regiones de la Orinoquía, Andina y Caribe de Colombia (Martínez & Serna, 2018), lo que brinda confianza en su uso para identificar el comportamiento espacial de las principales variables hidroclimatológicas. En esta investigación se realizó particularmente la validación de los registros de temperatura de FLDAS Noah Land Surface, en comparación con los registros de la estación EL JAPON en la cuenca del río Humea, demostrando una adecuada aproximación de las imágenes del sensor remoto a los registros tomados en campo.

Figura 4-3 Resultados de evapotranspiración potencial para el caso de la cuenca del río Chinchiná mediante correlaciones con temperatura usadas en el POMCA (izquierda) y a partir de datos de reanálisis de sensores remotos con HidroCHEP (derecha)



En el caso de la evapotranspiración potencial tomada de los datos de reanálisis descargados del sitio web del proyecto Earth2Observe, Sperna et. al. (2015) recomiendan el uso de los registros diarios estimados mediante la ecuación de Penman-Monteith en zonas con pocos registros, de acuerdo con la validación que realizaron. Sin embargo, de acuerdo con la validación realizada para el caso de estudio de la cuenca del río Chinchiná, no se identificó una buena aproximación a los cálculos realizados para el Evapotranspiración a partir de los registros de la estación AEROPUERTO LA NUBIA usando el método de FAO-Penman Monteith para los años 1983 y 1984, lo cual requiere ser verificado, tomando una mayor longitud de registros de otras estaciones como las administradas por CENICAFÉ o la Central Hidroeléctrica de Caldas.

En la aplicación de HidroCHEP, para la estimación de la evapotranspiración real, se siguieron las recomendaciones del estudio de la FAO de la serie Riego y Drenaje No 56 (Allen et al., 2006), lo cual requirió contar con mapas de cobertura del suelo, utilizando el mapa de coberturas Corine Land Cover para Colombia del IGAC, a escala 1:100.000, que resultó adecuado, considerando la escala de la información climatológica disponible.

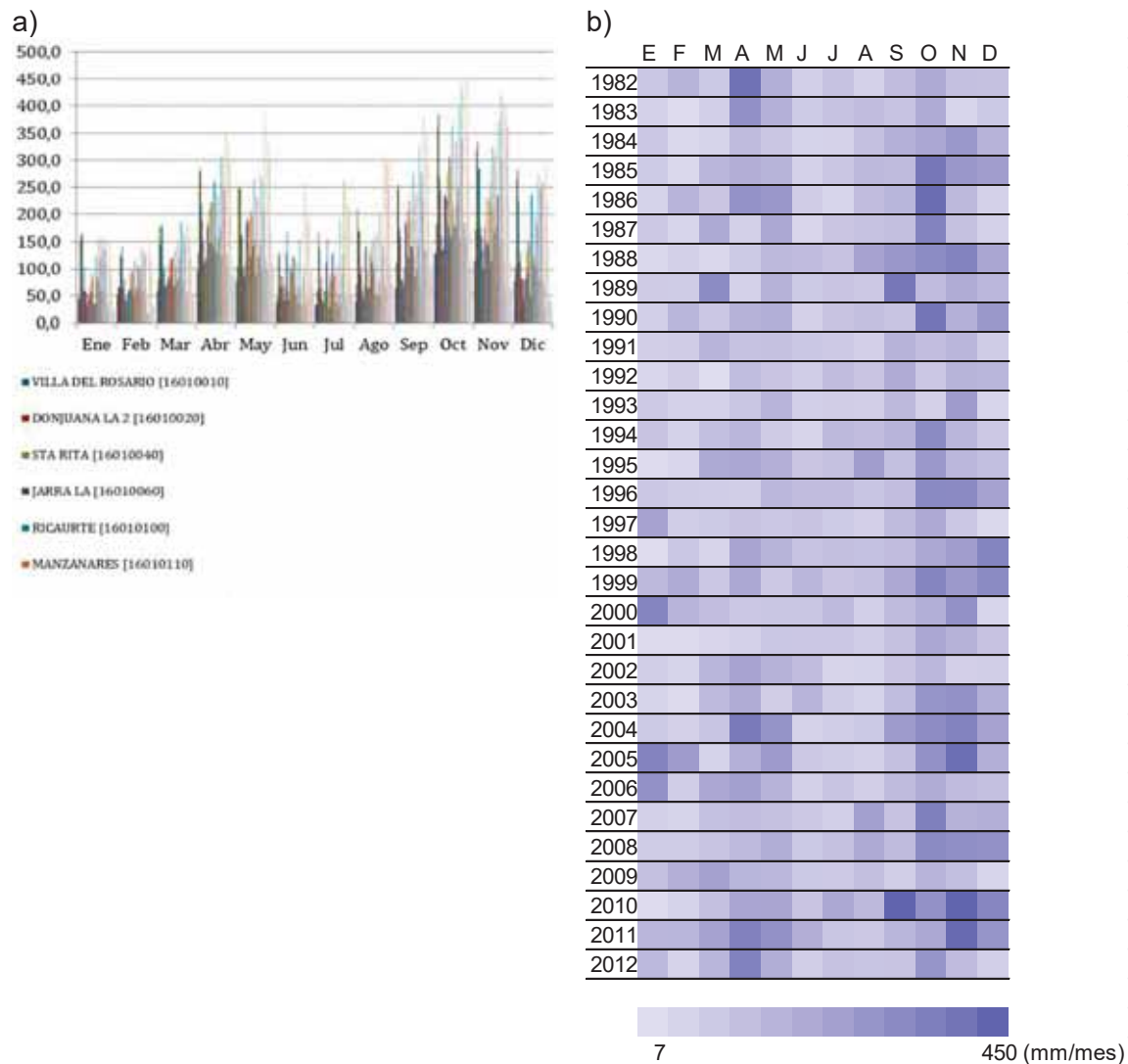
Para el caso de estudio en la cuenca transfronteriza del río Pamplonita, el uso de HidroCHEP permitió acceder a fuentes alternativas de mapas de cobertura del suelo en territorio venezolano, utilizando fuentes que han sido validadas en diferentes regiones del planeta y que permiten tener una buena aproximación en las modelaciones que se hagan a nivel regional (Reinhart et al., 2021), mientras que el POMCA se basó en los resultados de evapotranspiración potencial únicamente para el área del territorio Colombiano, y calculando un único valor representativo de evapotranspiración real para la cuenca usando el método de Budyko (Budyko, 1974), lo cual limitó los cálculos que derivan posteriormente como la estimación de índices hidrológicos, haciéndolos de forma agregada a nivel de subcuencas, y perdiendo la posibilidad de realizar estimaciones distribuidas con el uso de herramientas SIG, que permiten tener un mejor análisis de las condiciones hidrológicas del territorio.

Finalmente, la aplicación de los casos de estudio con las herramientas de HidroCHEP permitió contar con un panorama del comportamiento de las variables climáticas en el tiempo de una forma que visualmente permite al lector identificar la variación en el periodo de análisis (ver Figura 4-4), ya que comparativamente con los documentos POMCA, éstos suelen presentar los datos promedio de las variables para las estaciones hidroclimatológicas, desaprovechando las capacidades de las herramientas SIG para realizar la distribución espacial de las variables a diferentes escalas de tiempo.

4.1.3 Temática de hidrología

El análisis del desempeño de HidroCHEP para la elaboración de la temática de hidrología se basó en los análisis presentados en la Tabla 4-4.

Figura 4-4 Presentación del comportamiento temporal de la precipitación en la cuenca del río Pamplonita. a) Gráfica promedio mensual multianual de estaciones usada en el POMCA, b) Gráfica de escala de colores para valores promedio mensuales de la cuenca usado en la aplicación de HydroCHEP



En los documentos POMCA se usa la información disponible de las mediciones de las estaciones hidrometeorológicas para adelantar los diferentes análisis de balance hídrico y modelación hidrológica, a pesar de la poca disponibilidad para casos como del río Humea, esto soportado en metodologías de regionalización de las variables, con las que se infieren el comportamiento de las variables para aquellas zonas que no están monitoreadas.

Tabla 4-4 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de la temática de Hidrología

Actividad evaluación	SZH Río Humea		SZH Río Pamplonita		SZH Río Chinchiná	
	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP
Fuente de información	Estaciones IDEAM de zonas cercanas	Cartografía IGAC E:1:25.000	Caracterización climática estaciones IDEAM	Topografía de ALOS PAL SAR	Estaciones IDEAM	Estaciones IDEAM
		Caracterización climática CHIRPS y FLDAS NOAH		Caracterización climática Estaciones IDEAM		
Herramienta de procesamiento		Cobertura del suelo Corine Land Cover		Cobertura del suelo ESA Land Cover		
	Sin información. Se implementó el modelo bidimensional de flujo inestable de Saint Venant regionalizado para la obtención de series para la cuenca	Hec-HMS	Matlab	WEAP PEST	TETIS	FDC2.1 BFI+3.0
Cobertura espacio - tiempo	Información tomada fuera del área de estudio	Cobertura en toda el área de la cuenca a resolución 0.05°	Cobertura en toda el área de Colombia	Cobertura en toda el área de Colombia. Cartografía a escala 1:50.000	Cobertura en toda la cuenca. Periodo de tiempo 2004-2007	Cobertura en toda la cuenca. Periodo de tiempo de 1982 a 2012 (31 años)
		Periodo de tiempo de 1982 a 2012 (31 años)		Cobertura del suelo a escala 1:120.000		
Incertidumbre	Información oficial	Ver Tablas 4.1 y 4.2	Información oficial	Ver Tablas 4.1 y 4.2	Información oficial	Información oficial
	Fuente de información					

Elaboración de producto POMCA

Cont. Tabla 4-4 Evaluación del uso de herramientas para la consolidación de la temática de Hidrología

Actividad evaluación	SZH Río Humea		SZH Río Pamplonita		SZH Río Chinchiná	
	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP
Herramienta de procesamiento	Sin información.	HEC-HMS no muestra buen desempeño en la simulación de caudales pico y escorrientas en cuencas poco instrumentadas con información base de sensores remotos (Meresa, 2018). Las herramientas del paquete HydroOffice han sido usados en diferentes trabajos (Gregor, 2020; Nasr, 2017; Kambombe, 2018)	El modelo "abcd" de Thomas se programó en la herramienta Matlab. El código no ha sido validado	El modelo WEAP requiere de información de entrada precisa (Khan y Kundai, 2022) El modelo ha demostrado ser confiable en cuanto a los resultados de modelaciones hidrológicas (Dimova et al, 2013; Ochengo, 2021; Tena et al, 2021)	Es un modelo ampliamente validado. El desempeño del modelo TETIS depende en gran medida de entender los procesos naturales y la interacción con los procesos antropogénicos en una cuenca (Khanh, 2022)	Las herramientas del paquete HydroOffice han sido usados en diferentes trabajos (Gregor, 2020; Nasr, 2017; Kambombe, 2018)
	Se obtienen métricas de desempeño del modelo que muestran resultados aceptables para los puntos de calibración.					
Fuente de información	Descarga directa, requiere pre-procesamiento	Descarga directa, requiere preprocesamiento y manejo de formato NetCDF	Descarga directa – Requiere pre-procesamiento.	Descarga directa – Requiere pre-procesamiento.	Descarga directa, requiere pre-procesamiento	Descarga directa, requiere pre-procesamiento
	Sin información	Libre, descarga directa de página WEB, entorno amigable, amplia disponibilidad de tutoriales.	Licenciado, requiere conocimientos en programación de computadores. Código no validado	Licenciado, descarga directa de página Web. Entorno amigable, amplia disponibilidad de tutoriales	Libre, descarga directa de página WEB. Amplia disponibilidad de tutoriales.	Libre, Descarga directa página WEB, no requiere complementos. Entorno amigable
Accesibilidad y facilidad de uso						

En este sentido, HidroCHEP ofrece alternativas de información de sensores remotos para completar la carencia de información que ha sido validada en diferentes regiones del planeta, y que para casos particulares podrá ser validada en las cuencas en donde se cuente con una o más estaciones para generar confianza en el uso de esta información para efectos de conocer su variabilidad espacial.

Resulta igualmente fundamental contar con la información de demandas hídricas que tienen las Corporaciones Autónomas Regionales para la caracterización de la demanda del recurso hídrico, ya que pudo evidenciarse una diferencia significativa en cuanto a lo reportado por el POMCA del río Pamplonita (314 concesiones) y la información consultada en la plataforma SIRH para esta variable (17 concesiones), denotando una falta de gestión para el reporte por parte de las Autoridades Ambientales en la plataforma SIRH, la cual fue la única fuente identificada en la construcción de HidroCHEP, para suplir la carencia de información cuando no se tiene respuesta por parte de las Autoridades Ambientales.

Los documentos POMCA de los tres casos de estudio mostraron recurrir a la modelación hidrológica para la generación de series de caudales e identificar a partir de éstos el comportamiento hidrológico en las subcuencas y microcuencas, a pesar de no contar en dos de los casos (ríos Humea y Pamplonita) con información adecuada para la calibración de los parámetros de los modelos, cuyos resultados se resumen en la Tabla 4-5.

En el caso del POMCA del río Humea, el consultor que elaboró el estudio siguió las recomendaciones de regionalización de los parámetros del modelo empleado para estimar los parámetros dentro de la cuenca del río Humea, sin que se aporte un análisis de las similitudes en las condiciones climáticas, topográficas y de suelos que influyen en la generación de escorrentía, lo cual ha sido señalado sobre esta metodología por autores como Müller y Thompson (2016). A pesar de ello, los resultados reportados en el POMCA evidencian un buen desempeño del modelo utilizado, obteniendo métricas de desempeño de coeficiente de correlación de 0.79 entre los datos observados y los datos modelados para la estación EL CABLE, y un error cuadrático medio (RMSE) de 28.47% que se considera igualmente bueno.

Tabla 4-5 Comparación del desempeño de la modelación hidrológica para los diferentes casos de estudio

	Río Humea		Río Pamplonita		Río Chinchiná	
	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP	POMCA	HidroCHEP
Estimación de la oferta	Modelo Bidimensional de flujo inestable de Saint Venant	Modelo HEC HMS	Modelo balance de Thomas abcd	Modelo WEAP	Modelo Tetis	Análisis estadístico de registros de estaciones
Distribución espacial	Agregado	Semidistribuido	Agregado	Semidistribuido	Agregado	Puntual
Estación de referencia	EL CABLE	EL CABLE	AGUAS CLARAS	AGUAS CLARAS	EL RETIRO	EL RETIRO
Error	RMSE = 28.4% R2 = 0.79	RSR = 1.05 R2 = 0.53	ENS = 0.79	RSR = 3.40 R2 = 0.24	RSR = 0.65 RSME = 3.23	No aplica
Desempeño del modelo	Bueno	No satisfactorio	Muy bueno	No satisfactorio	Apropiado	No aplica

Por su parte, en el POMCA del río Pamplonita se consideró un modelo agregado para la cuenca, el cual fue calibrado con los registros de la estación AGUAS CLARAS, obteniendo un coeficiente de eficiencia de Nash (ENS) de 0.79, el cual demuestra un muy buen desempeño del modelo para la estimación de los caudales, mientras que para el POMCA del río Chinchiná se implementó el modelo TETIS de forma agregada, los que demostró un desempeño apropiado según la comparación con los registros de la estación EL RETIRO, donde se obtuvieron resultados satisfactorios de la modelación con métricas de RSR de 0.65 y RSME de 3.23.

La selección de las herramientas utilizadas para la modelación hidrológica con HydroCHEP en los casos de estudio de los ríos Humea y Pamplonita, se basó principalmente en el criterio de parsimonia recomendado por Koutsoyiannis (2009), sin embargo, las métricas de evaluación empleadas mostraron resultados de un bajo desempeño de los modelos como se muestra en la Tabla 4-5, para el caso de HEC-HMS sin calibración de parámetros y WEAP con calibración de parámetros usando la herramienta PEST. En este sentido, es necesario que se considere adicionalmente el modelo conceptual que tienen las herramientas, buscando que se acerque a una representación de los procesos hidrológicos predominantes en la cuenca hidrográfica.

Para el caso del modelo Hec-HMS implementado en la subzona del río Humea, los resultados muestran que un modelo parsimonioso como el implementado, tomando valores de parámetros recomendados en la literatura según las coberturas del suelo, presenta grandes deficiencias por la sobrestimación de caudales, lo cual, resulta ser una alternativa con altos grados de incertidumbre si se piensa aplicar en cuencas poco instrumentadas. Para el caso de la cuenca del río Humea resultó tener mejores resultados la implementación de regionalización de parámetros en modelos hidrológicos, para lo cual HydroCHEP igualmente presenta una serie de herramientas de modelación hidrológica, con herramientas de calibración de parámetros con los que se puede hacer un ejercicio de búsqueda del modelo que tenga el mejor desempeño para la cuenca objeto de estudio.

Por otra parte, los modelos implementados en los casos de las cuencas Humea y Pamplonita pueden optimizarse planteando diferentes series de tiempo de las variables de entrada, para cada unidad de análisis del modelo semidistribuido, las cuales pueden obtenerse usando tanto fuentes de información de estaciones o de sensores remotos, como las herramientas de procesamiento que presenta HydroCHEP, lo cual se espera reduzca las sobrestimaciones que se presentaron en los dos casos, O explorar otros modelos que conceptualmente puedan ser más robustos para los casos de estudio en cuestión.

Cabe igualmente resaltar, que autores como Meresa (2019) estudiaron el bajo desempeño del modelo HEC-HMS en la simulación de caudales pico, lo que influye considerablemente en las métricas obtenidas para el desempeño del modelo en el caso del río Humea, y otros autores como Khan y Kindai (2022) indican la importancia de contar con información de entrada precisa para la obtención de resultados aceptables con el modelo WEAP, lo cual

en el caso de estudio no fue del todo posible, ya que para ciertos periodos de tiempo no se contaba con registros de las estaciones de monitoreo en el río Pamplonita, casos en los que el modelo hidrológico completa la información interpolando entre los datos existentes.

Estas consideraciones son relevantes al momento de la selección de una herramienta de modelación hidrológica, especialmente en los casos en los que se cuenta con poca información para la calibración de parámetros, por lo que contar con diferentes alternativas, como presenta HidroCHEP, permite que se realicen análisis más detallados para la estimación de caudales en cuencas poco instrumentadas.

4.2 Discusión

A partir de la implementación de la caja de herramientas en los tres casos de estudio y del ejercicio comparativo con los POMCA aprobados para cada uno de los casos, se consolidan en seis puntos fundamentales, los principales hallazgos en la evaluación de la caja de herramientas HidroCHEP.

4.2.1 Limitaciones e incertidumbre en el uso de herramientas

Al adelantar el ejercicio comparativo de los resultados de los productos POMCA arrojados por el uso de HidroCHEP, y los estimados para los POMCA vigentes, se evidencian diferencias, que no solamente pueden asociarse con las diferencias en las fuentes de información, sino también con las herramientas mismas de procesamiento.

Es importante tener presente, que muchas de las herramientas que se incluyen en HidroCHEP, pueden emplear diferentes algoritmos para una tarea específica, lo cual se ha estudiado en el caso de las herramientas SIG, tal como reportan autores como Benduch (2017), o en casos particulares, como las diferentes herramientas de modelación hidrológica, que basan sus estimaciones en varios tipos de modelos con diferencias en la cantidad de parámetros que llegan a utilizar.

En este sentido, es importante que al momento de utilizar una herramienta, se conozca sobre las limitaciones que puede tener de acuerdo con los principios en los que se basa, e igualmente reconocer la necesidad de evaluar la precisión de los resultados, cuando se cuente con información que permita validar el desempeño de la herramienta, o de lo contrario, será el profesional quien a partir de su experiencia, podrá definir si la metodología que utiliza la herramienta, es la que representa adecuadamente el comportamiento esperado en la cuenca hidrográfica.

4.2.2 Limitaciones en las fuentes de información

Contar con la información requerida para realizar la adecuada caracterización hidrometeorológica de las cuencas en el marco de la elaboración de los POMCAS, es quizás uno de los principales obstáculos a la hora de avanzar en la elaboración de

POMCAS, instrumento fundamental para la gestión integral de los recursos hídricos en el país.

Mediante la aplicación de la caja de herramientas en los tres casos de estudio seleccionados y su comparación con los documentos POMCA aprobados, se identificaron necesidades de información, que han limitado los resultados de los diferentes productos, y que requieren de especial atención con el fin de lograr la implementación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, descritas a continuación:

Limitaciones en la accesibilidad a la información

A través del desarrollo de los casos de estudio en las cuencas de los ríos Pamplonita y Chinchiná se identificó que existen zonas del país en donde aún no es posible acceder de forma libre a información cartográfica en las escalas requeridas para un POMCA, debido a que tienen restricción legal de acceso, por lo que se requiere tramitar permisos ante el Ministerio de Defensa Nacional, para la obtención de esta información.

Si bien, en la elaboración de POMCAS se requiere información de entidades gubernamentales, no se identificó que en la elaboración de los documentos POMCA aprobados, se haya utilizado la cartografía oficial del IGAC para la elaboración de la caracterización de hidrografía, morfometría y/o pendientes, sino que, por el contrario, los estudios se limitaron al uso de modelos digitales de terreno de libre descarga.

En este sentido, a pesar de existir la información necesaria para la elaboración de los productos POMCA en concordancia con las recomendaciones de la Guía Técnica para la formulación de POMCAS del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el que haya restricciones de acceso por motivos de Seguridad Nacional, o que la entidad administradora de la información no aporte los registros, conduce a la necesidad de recurrir a otras fuentes, en donde las alternativas de sensores remotos entran a suplir esta necesidad.

Limitaciones de información en cuencas transfronterizas

Teniendo en cuenta el alcance de este trabajo de investigación, el cual se enfocó a la etapa de caracterización física de un POMCA, es claro que, para los casos de las cuencas transfronterizas, la caracterización física no debe obedecer a los límites políticos, sino al límite físico que define la divisoria de aguas en una cuenca hidrográfica.

Como reportan Burgos y Gómez (2007), desde hace varias décadas se evidencian los esfuerzos que ha hecho el país en materia de establecer esquemas de gestión binacional de los recursos hídricos, sin embargo, lograr que estos esquemas involucren un flujo de información que permita atender las problemáticas socio-ambientales que se presentan en las zonas de frontera, no se ha dado de forma generalizada, como pudo evidenciarse para el caso de estudio del río Pamplonita, el cual no reporta información del país vecino para la elaboración de la caracterización física del POMCA.

En este sentido, de no fortalecer las políticas y normativa sobre asuntos fronterizos de gestión del recurso hídrico, seguirá siendo una herramienta útil la información libre de sensores remotos, mediante la cual fue posible elaborar los productos del caso de estudio y se lograron identificar variables como la evapotranspiración potencial y los usos del suelo en el territorio venezolano.

Limitaciones en la resolución de información

A pesar de que HidroCHEP presenta alternativas de fuentes de información de acceso libre para la elaboración de los productos POMCA, es importante que se reconozca las limitaciones que tienen estas fuentes a la hora de elaborar productos específicos.

Tal es el caso del desempeño del uso de modelos digitales de terreno para la elaboración de la caracterización de la hidrografía y la morfometría en una cuenca, ya que para los casos de estudio de las cuencas de los ríos Humea y Pamplonita, cuya cuenca baja tiene pendientes muy planas, en donde el uso de herramientas SIG para la generación de productos como el mapa de orden de las corrientes, presenta inconsistencias con la realidad identificada a partir de los mapas base (ver Figura 4-5).

Adicionalmente, en aquellos casos en donde se requiere solucionar las deficiencias de información hidroclimatológica, la caja de herramientas ofrece la posibilidad de consulta de información de sensores remotos. Lograr que esta información sea representativa, dependerá en algunos casos, no sólo de la resolución espacial de la fuente de información, sino también del tamaño de las subzonas.

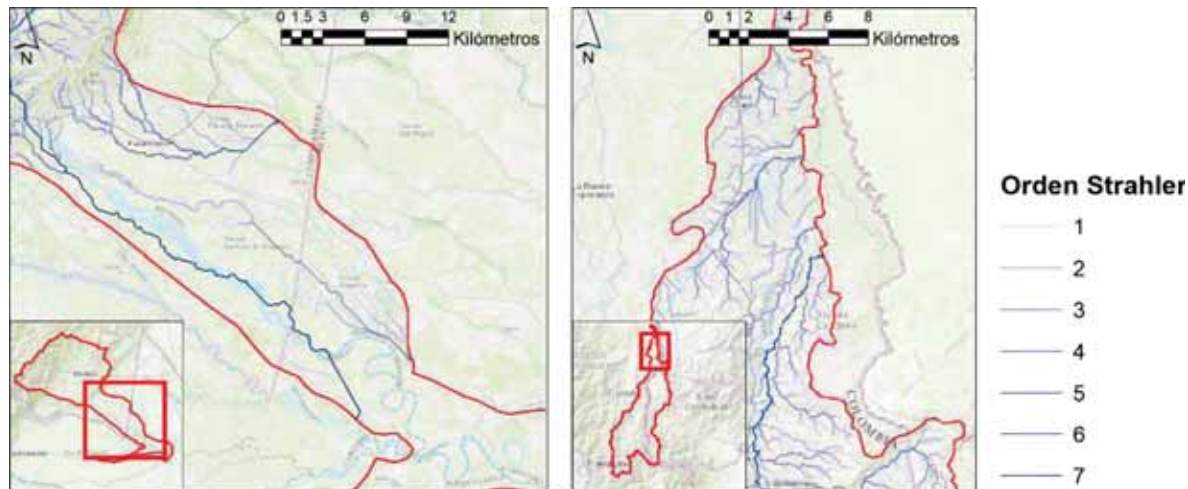
Si bien, contar con otras fuentes de información cubre las deficiencias de monitoreo que tiene el país, la gran variabilidad en tamaño de las cuencas objeto de ordenación (desde 191 km² – Subzona 2622 Río Desbaratado a 25.388 km² Subzona 4415 Río Caquetá Bajo), limitará la representatividad en el uso de fuentes de información de sensores remotos para conocer la variabilidad espacial de diferentes parámetros climáticos.

Adicionalmente, realizar una validación de los productos con datos puntuales medidos en terreno resulta importante para conocer el grado de confiabilidad de los registros de sensores remotos, e identificando así las limitaciones de la información que se use para solventar la deficiencia de información oficial.

4.2.3 Contar con una herramienta de apoyo a la selección de herramientas

El marco metodológico recomendado para el uso de HidroCHEP que se presentó en la sección 3.1.3, hace gran énfasis en la selección de la herramienta, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales de la caja de herramientas, es brindar diferentes alternativas para la elaboración de los productos POMCA.

Figura 4-5 Inconsistencias en la generación del orden de las corrientes, para los casos de estudio del río Humea (izquierda) y del río Pamplonita (derecha)



Mediante la elaboración de los tres casos de estudio, se hizo necesario establecer una metodología de categorización de las herramientas para su uso, tal como se describe en las secciones de “Selección de Herramientas” para cada caso de estudio en el numeral 3.2. Esta categorización se hizo teniendo en cuenta criterios como la escala de la información, la cobertura espacio – temporal, la cantidad de parámetros que requieren los modelos, la facilidad y/o accesibilidad al uso de las herramientas, contando aspectos como la necesidad de tener conocimientos en programación de computadores, para el uso de algunas herramientas.

Esta metodología podría convertirse en una herramienta en sí misma, conformada como un asistente en la selección de herramientas que informe al usuario sobre el nivel de complejidad de la herramienta, asociada al requerimiento de conocimiento y grado de formación para su uso, el tiempo que toma su uso y aplicación, los requerimientos de información y material de referencia sobre las incertidumbres asociadas a la herramienta misma, la cual puede ser planteada para futuras investigaciones y desarrollo de la caja de herramientas.

4.2.4 Desarrollo de marcos genéricos en función de la disponibilidad de información

Con la ejecución de los casos de estudio, se logró evidenciar que puede llegar a presentarse un patrón en la selección de herramientas y procedimientos de elaboración de los productos POMCA, de acuerdo con la disponibilidad de información que se tenga para ello.

Si bien, la selección de los tres casos de estudio obedeció principalmente a la cobertura de información de registros hidroclimatológicos, se evidenció que existen zonas en las que se puede tener igualmente diferentes niveles de información cartográfica, para los que la

caja de herramientas presentó igualmente alternativas para la elaboración de los productos asociados.

Teniendo en cuenta lo anterior, se considera que pueden elaborarse marcos genéricos que orienten la elaboración de los productos POMCA, partiendo de la disponibilidad de información, y de acuerdo con ello, brinden lineamientos sobre las fuentes recomendadas para la obtención de registros y posteriormente sugieran las herramientas de procesamiento que podría utilizarse de acuerdo con la accesibilidad y facilidad de uso.

Si bien estos marcos no serían permanentes en el tiempo teniendo en cuenta el acelerado desarrollo en nuevas herramientas e investigaciones, permitiría servir como instrumento de apoyo a los profesionales que se enfrentan a la elaboración de un POMCA, e invitaría a mantenerse actualizado periódicamente.

4.2.5 Consolidación de experiencias y apoyo en aspectos particulares del uso de las herramientas

El contar con una caja de herramientas que presenta un amplio número de opciones para la elaboración de los productos POMCA, puede conducir a que el usuario se sienta inclinado a seleccionar aquellas en las que ha tenido experiencia de uso, teniendo en cuenta el tiempo que conlleva el aprendizaje en el uso de nuevas herramientas, y en algunos casos, cuando se requiere acudir a manipular formatos de archivos con los que no se está familiarizado, como los formatos NetCDF, en los que se pueden obtener muchos de los registros climatológicos de sensores remotos, y que fue el que se usó en la caracterización de la evapotranspiración en los tres casos de estudio.

En este sentido, no solamente contar con material de apoyo como tutoriales y/o manuales de uso, aportan elementos para que un usuario de la caja de herramientas pueda sentir interés en el uso de una nueva fuente de información o de una nueva herramienta, sino que consolidar una comunidad de apoyo, donde se compartan las experiencias al respecto, permitirá conducir a la optimización en la caracterización de las cuencas hidrográficas en el país.

Para ello, el espacio de foros dispuesto en HidroCHEP (Ver Figura 4-6), representa un elemento de apoyo para el uso y manipulación de las distintas herramientas, en los que, garantizando la divulgación de la caja de herramientas, los distintos usuarios pueden buscar apoyo en otros que se hayan enfrentado previamente a dificultades, buscar recomendaciones, o plantear escenarios de discusión sobre las temáticas seleccionadas de los POMCA.

Figura 4-6 Pantallazo de espacio de Foros dispuesto en HidroCHEP



4.2.6 Aplicación de HidroCHEP en escenarios diferentes a la elaboración de POMCAS

Tras la aplicación del marco metodológico recomendado para el uso de la caja de herramientas HidroCHEP en los tres casos de estudio, se identificó que, en el momento de seleccionar las herramientas, muchas de las dispuestas no son recomendadas para la elaboración de los productos POMCA, de acuerdo con los lineamientos que tiene la Guía Técnica para la formulación de POMCAS principalmente en términos de la escala de trabajo.

Si bien se reconoce que la carencia de información que tienen algunas regiones del país para la implementación de ciertas herramientas es una limitante, sigue siendo importante que el usuario conozca de las diferentes alternativas que, con un cierto grado de incertidumbre, permitirán cubrir las carencias de información y obtener resultados aproximados a la caracterización de las cuencas hidrográficas.

Las alternativas de fuentes de información permitirán que HidroCHEP sirva también para brindar apoyo a la caracterización de cuencas de mayor tamaño que las Subzonas Hidrográficas, en el marco de los diferentes fines que puede tener como objeto conocer el comportamiento de las variables físicas que se incluyeron en la caja de herramientas.

Adicionalmente, el hecho que HidroCHEP consolide material de apoyo en el uso de las herramientas, permite que sea utilizado en otros escenarios como en la academia, sirviendo de herramienta pedagógica, para la formación en cursos de caracterización de cuencas hidrográficas, o en particular de las distintas herramientas que se disponen para ello.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

La gestión sostenible del agua y el saneamiento han venido siendo objeto de discusión en las últimas décadas y han encaminado a la sociedad en la búsqueda de garantizar la implementación de una gestión integrada de los recursos hídricos como parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (PNUMA, 2021). En el marco de los ODS, desde el año 2010, Colombia, a través de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, estableció los objetivos, programas y metas dentro de los cuales el desarrollo de instrumentos de planificación del recurso en todo el territorio nacional resulta fundamental.

Como parte de la investigación adelantada, se logró identificar que, tras 12 años de implementación de la Política, se tiene apenas un 44% de avance en la consolidación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), lo que deja en evidencia la necesidad que tiene el país, en la implementación de acciones que permitan acelerar el conocimiento de sus recursos para establecer estrategias de manejo integral.

En este contexto, tras adelantar la investigación enfocada en la construcción y evaluación de una caja de herramientas para el apoyo a la gestión del conocimiento hidrológico en la formulación de POMCAS en Colombia, se obtuvieron las siguientes conclusiones, las cuales, para facilitar el análisis, se han organizado acorde con cada uno de los objetivos específicos planteados para la investigación y descritos al inicio del documento.

Objetivo 1 Conformar una Caja de Herramientas Hidrológicas que apoye técnicamente la generación de conocimiento hidrológico para la formulación de POMCAS en el país.

Se construyó HidroCHEP como un sitio web (<https://sites.google.com/view/hidrochep>) que compila fuentes de datos y herramientas que sirven de apoyo para la caracterización hidrológica de una cuenca hidrográfica, a partir de las recomendaciones establecidas por la Guía Técnica para la formulación de POMCAS del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en cuanto a las temáticas de hidrografía, morfometría, pendientes, clima e hidrología en la etapa de diagnóstico (MADS, 2014).

La estructura de HidroCHEP busca que los usuarios puedan acceder a las herramientas compiladas de los sitios web propios de sus desarrolladores, ofreciendo un marco de

relación e integración entre ellas, para garantizar la elaboración de los productos requeridos por la Guía Técnica para la formulación de POMCAS.

La arquitectura del sitio web demostró ser útil en el proceso de consolidación de los productos del POMCA, ya que permitió relacionar las fuentes de información, las metodologías y las herramientas de procesamiento para la elaboración de un producto específico, así como establecer la relación que se plantea entre los diferentes productos, con el fin de obtener un contexto descriptivo de las condiciones hidrológicas de los tres casos de estudio.

Se considera que la divulgación de la caja de herramientas, brindará a las Autoridades Ambientales, y demás actores interesados en la planificación del recurso hídrico, un instrumento que ilustra las recomendaciones planteadas en la Guía Técnica para la formulación de POMCAS, ampliando la descripción del alcance de los productos, asociándolos a la forma en que se elaboran e integrando directrices técnicas que facilitan la elaboración de los productos de las temáticas seleccionadas para la fase de diagnóstico de un POMCA.

Objetivo 2 Implementar el uso de la caja de herramientas hidrológicas, para tres casos de estudio, donde se tengan diferentes niveles de información hidroclimatológica (poca, mediana, amplia).

Se estableció como metodología para la selección de los casos de estudio, aquellas subzonas hidrográficas que contaran con un POMCA en ejecución, y clasificándolas de acuerdo con la disponibilidad de información hidroclimatológica de registros de estaciones de monitoreo, a partir de la información reportada en el catálogo de estaciones del IDEAM (IDEAM, 2021).

De la clasificación se seleccionó la subzona hidrográfica del río Humea como caso con poca información, la subzona del río Pamplonita con mediana información y la del río Chinchiná como caso con amplia información.

Para cada uno de los casos se utilizó la caja de herramientas HidroCHEP para la elaboración de los productos establecidos en la Guía Técnica para la formulación de POMCAS en cuanto a las temáticas de hidrografía, morfometría, pendientes, clima e hidrología, siguiendo el marco metodológico propuesto para la selección tanto de fuentes de información, como de herramientas de procesamiento.

Con los productos elaborados se realizó una caracterización física en las temáticas seleccionadas para los tres casos de estudio, de cuyo ejercicio fue posible aplicar el marco metodológico establecido para el uso de HidroCHEP señalado en la sección 3.1.3, el cual permitió seleccionar de la gama de alternativas que presenta la Caja de Herramientas, aquellas fuentes de información y herramientas que se consideraron adecuadas para la investigación, a partir de criterios de acceso a la información requerida, acceso a la

experiencia necesaria en el uso de la herramienta, y disponibilidad de recursos para su uso.

A partir de la elaboración de los casos de estudio fue posible evidenciar que resulta igualmente importante para la clasificación del nivel de información, la disponibilidad de cartografía oficial y el acceso a los registros de demandas del recurso hídrico en las cuencas, ya que esto configuró diferencias en la selección de fuentes de información y de herramientas de procesamiento para la elaboración de los productos, y limitó las posibilidades de uso de herramientas inclusive en escenarios con amplia disponibilidad de información como se previó para la subzona del río Chinchiná.

Adicionalmente, se logró establecer la necesidad de identificar las fortalezas, debilidades y limitaciones tanto de las fuentes de información, como de las herramientas de procesamiento, lo que constituye un criterio fundamental a la hora de seleccionar los insumos con los que se elaborarán los productos POMCA, actividad que en muchas ocasiones es desconocida por los consultores, como se pudo observar en los documentos POMCA publicados para los tres casos de estudio. Esta necesidad puede subsanarse considerando futuros desarrollos de la Caja de Herramientas como se explica más adelante en las recomendaciones.

De la misma forma, con la elaboración de los casos de estudio se recalca la importancia del criterio del profesional que haga uso de la Caja de Herramientas, toda vez que no puede interpretarse el uso de HidroCHEP, como una guía que paso a paso conduzca a la elaboración satisfactoria de los productos, sin que se haga un análisis detallado de las limitaciones de los resultados, los motivos que conducen a bajos desempeños en las modelaciones y a plantear alternativas de optimización que permitan realizar una mejor caracterización de las condiciones físicas de las cuencas objeto de estudio.

Objetivo 3 Establecer los alcances que tiene la implementación de la caja de herramientas hidrológicas para la formulación de POMCAS con el fin de generar un marco comparativo con los planes y estudios elaborados a la fecha para las cuencas de estudio.

Tras realizar la evaluación de la implementación de la caja de herramientas HidroCHEP en la elaboración de productos requeridos por la Guía Técnica para la formulación de POMCAS del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2014), se pudo observar comparativamente, que la disponibilidad de diferentes fuentes de información y de herramientas de procesamiento, permitió lograr resultados con escalas de trabajo más cercanas a lo requerido por la Guía Técnica, comparativamente con el ejercicio que se adelantó en los POMCAS aprobados para los tres casos de estudio.

Para la caracterización física de las cuencas a partir de información cartográfica, como lo es los productos de las temáticas de hidrografía, morfometría y pendientes, la caja de herramientas sugiere utilizar como fuente de información la cartografía oficial del IGAC a escala 1:25.000, presentando alternativas de descarga y diferentes herramientas de

procesamiento, que facilitan convertir la cartografía oficial a un modelo digital de terreno, con el que es una práctica común la elaboración de los productos POMCA a través del uso de herramientas SIG, como se pudo evidenciar en los documentos POMCA aprobados para los tres casos de estudio. Disponer de la cartografía 1:25.000 permite trabajar con la escala recomendada por la Guía Técnica.

Para los casos en que no se cuente con la cartografía oficial, por ser cuencas transfronterizas, falta de cobertura o reserva legal en el acceso a la información, la caja de herramientas igualmente presenta diferentes alternativas de modelos digitales de terreno a partir de sensores remotos, dentro de los que se encontró que el provisto por ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2015), es el que más se aproxima a la escala recomendada de trabajo. Si bien, pueden existir otros modelos digitales de terreno con mejor resolución, como el que se obtiene a partir de las imágenes de sensor Rapideye, la caja de herramientas no la incluyó, por lo que su adquisición requiere de compra, y se buscó que se incluyeran principalmente fuentes libres de información.

En cuanto a la caracterización de variables climatológicas e hidrológicas, es habitual recurrir al uso de los registros de monitoreo de estaciones como se evidenció en los POMCA de los casos de estudio seleccionados. Sin embargo, la red de monitoreo del país cuenta con extensos registros de precipitación para la región Andina y Caribe principalmente, teniendo un gran déficit de registros en otras variables y regiones del país. A pesar del trabajo que viene haciendo el IDEAM, las Corporaciones Autónomas Regionales y el sector privado para densificar la red de monitoreo, sólo hasta la última década se ha incrementado la instalación de nuevas estaciones, cuya recolección de información y disposición al público resulta fundamental para que en el futuro se pueda mejorar la caracterización climática e hidrológica requerida en los instrumentos de planificación del recurso hídrico, cuando se cuente con una longitud de registros adecuada para identificar los cambios espacio – temporales de las variables hidroclimatológicas.

Para solventar esta necesidad hasta contar con la longitud adecuada de registros de las nuevas estaciones, la caja de herramientas HidroCHEP presenta un amplio número de fuentes de información climatológica de sensores remotos, los cuales pueden ser considerados para suplir las falencias de información espacio – temporal. Contar con esta información al elaborar los casos de estudio del presente trabajo, hizo posible realizar una mejor caracterización de la variación temporal de variables como la precipitación y la evapotranspiración, que si bien, en algunos casos, no cuenta con una resolución adecuada para identificar la variación espacial, podrá ser objeto de tratamiento adicional con técnicas de *downscaling*, para obtener mejores resultados en productos subsiguientes.

Generar la confianza en el uso de estos registros por parte de los tomadores de decisión, dependerá de continuar con las investigaciones que se adelanten en la validación de la información para las diferentes regiones en el país, y en mayor medida, de conocer sobre la disponibilidad de esta información, y capacitación en su manipulación; donde la difusión de la caja de herramientas tiene el potencial de brindar este aporte.

Es claro, que si bien herramientas de acceso a la información ambiental del país como el Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH, buscan hacer accesible la gestión del conocimiento y el acceso a la información, a pesar de haberse creado desde el año 2007³, no han cumplido su objetivo de consolidar la información que aportan los diferentes actores, al contar con otras herramientas de búsqueda y descarga de información como el DHIME del IDEAM, el ICDE, el SIGOT o el motor de búsqueda “Colombia en Mapas”.

A pesar de la existencia de diferentes herramientas de consulta y descarga de información, no se ha logrado con éxito el objetivo del acceso libre a la información ambiental, por el bajo reporte por parte de las autoridades ambientales a plataformas como el SIRH, y la falta de integración de información del sector privado, cuyos registros y monitoreo amplían la disponibilidad de información para caracterizar adecuadamente los recursos hídricos en diferentes regiones del país. Tal fue el caso que se evidenció con la subzona del río Chinchiná, que tiene una red de monitoreo de clima y de caudales donde sólo el 29% de las estaciones son administradas por el IDEAM, a cuya información se puede acceder de forma libre y gratuita, mientras que la demás requiere de trámites ante los demás administradores, y en ocasiones a la voluntad de la entidad para suministrar la información.

En este sentido, para continuar con la construcción de POMCAS en el país se hace necesario contar con mecanismos de integración de la información recopilada no sólo por las entidades gubernamentales, sino también por el sector privado, que permitirá para muchos casos, contar con una mejor distribución de los registros de variables hidroclimatológicas, y reducir la incertidumbre asociada la falta de información.

En cuanto a la disposición de herramientas de procesamiento de la información que se consolidan en HidroCHEP, en casos como las herramientas de procesamiento de datos o de mapas, la caja de herramientas permite que el usuario tenga diferentes opciones, cuya selección que en gran medida dependerán de la experticia en el uso, la amigabilidad en la interfaz y el material de apoyo que exista.

Por otro lado, en el caso de las herramientas de modelación hidrológica, si bien se cuenta también con un amplio número de opciones, el usuario deberá, a partir de su experticia, seleccionar el modelo que mejor represente los procesos que considere influyen en mayor medida el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca, y además tener como criterio de selección fundamental, la disponibilidad de información para la estimación y/o calibración de los parámetros del modelo, en cuyo sentido, puede fortalecerse la caja de herramientas, para aportar criterios adicionales de selección.

Como insumo para las demás etapas de un POMCA, resulta indispensable implementar modelos hidrológicos con el fin de estimar la respuesta de la cuenca a escenarios de riesgo como el impacto del cambio climático, o para que sirva a las autoridades ambientales para la simulación del impacto de nuevas concesiones o alteraciones de tipo antrópico que

³ Decreto 1323 de 2007 “Por el cual se crea el sistema de información del recurso hídrico, SIRH”

alteren la oferta hídrica, y de esta manera hacer un mejor ejercicio en la gestión de los recursos hídricos.

Finalmente, se reconoce, que la arquitectura y estructura de la caja de herramientas, aporta un marco metodológico que, en concordancia con la Guía Técnica del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, permite al usuario la elaboración de los productos de la etapa de diagnóstico de un POMCA, apoyando en la definición de metodologías, fuentes de información y herramientas de procesamiento, por lo que se considera, que la divulgación e implementación de la caja de herramientas en nuevos casos de estudio, permitirá avanzar en el cumplimiento de las metas establecidas por la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Cabe hacer especial énfasis a que no debe interpretarse el uso de HidroCHEP como una guía metodológica para la elaboración de los productos POMCA, sin contar con el análisis y el criterio del profesional, que reconozca las limitaciones de las fuentes de información, de las herramientas y de los métodos, con cuyo único criterio, deberá buscar mejoras en el desempeño de sus resultados y presentar así mismo de ser posible, el grado de incertidumbre asociado a los productos que presente, como herramienta fundamental para la toma de decisiones en el marco de planificación del recurso hídrico.

5.2 Recomendaciones

La Caja de Herramientas HidroCHEP demostró ser útil en el proceso de elaboración de un POMCA, a través de su uso en los tres casos de estudio. A partir de las lecciones aprendidas en la elaboración de esta investigación, se hacen las siguientes recomendaciones:

5.2.1 Apoyo continuo en formación y capacitación en el uso de herramientas

Si bien, la primera versión de HidroCHEP contiene 87 herramientas, que puede ser un número significativo, es claro que no representa una lista detallada de todas las herramientas disponibles para las actividades seleccionadas.

Al contar con un número tan amplio de herramientas, se considera importante que, a través de la academia, y de los demás actores interesados en el conocimiento de las condiciones físicas de las cuencas, como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, las Corporaciones Autónomas Regionales y el sector privado, se generen espacios de capacitación en el uso de las diferentes herramientas, que brinde apoyo a los profesionales interesados, con lo que se agilice y mejore la elaboración de los instrumentos de planificación del recurso hídrico en el país.

5.2.2 Desarrollo futuro de HidroCHEP

A pesar de haber estructurado la caja de herramientas HidroCHEP en función de los lineamientos establecidos por la Guía Técnica para la formulación de POMCAS (MADS, 2014), los cuales a su vez se enmarcan en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, sin importar cuál sea la estructura que se defina en los próximos años en Colombia, para la gestión de los recurso hídrico, es clara la necesidad de continuar con la caracterización de las cuencas hidrográficas en el país.

En este sentido, la arquitectura de la caja de herramientas HidroCHEP, permitiría adaptarse a nuevas estructuras de los instrumentos de planificación, además de contar con el potencial de ampliar el alcance a las demás temáticas y etapas de la elaboración de un POMCA, teniendo en cuenta que dispone de diferentes fuentes de información a diferentes escalas para ser identificadas en etapas como el aprestamiento, y de permitir incluir herramientas en áreas diferentes a la caracterización hidrológica.

Por otro lado, el uso de HidroCHEP podría ampliarse igualmente para servir de apoyo en la elaboración de otros instrumentos de planificación del recurso hídrico, al presentar herramientas de procesamiento de información a diferentes escalas e igualmente tener la posibilidad de incluir fuentes de información asociadas con estos instrumentos.

Finalmente, se evidenció la necesidad de incluir en HidroCHEP, un grupo de herramientas de *downscaling*, que brinde apoyo a los profesionales que no están habituados al uso de registros de sensores remotos, para que conozcan de las técnicas, métodos y herramientas disponibles en el procesamiento y escalamiento de esta información.

5.2.3 Investigación en evapotranspiración para Colombia

Al adelantar la evaluación crítica de la caja de herramientas mediante los tres casos de estudio, se evidenció que para la caracterización de la evapotranspiración potencial, los POMCA publicados no contaron con la información necesaria para realizar una caracterización de esta variable a nivel espacio temporal, que permitiera la estimación a través del método de Penman-Monteith, como recomiendan distintos autores (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Conocer el comportamiento de esta variable resulta importante no sólo para realizar la caracterización climática, sino para la estimación de los balances hídricos que permitan estimar la oferta hídrica de la cuenca. Por ello, al adelantar los casos de estudio del presente trabajo, haber contado con los resultados del trabajo de Sperna et. al. (2015), a través de la plataforma Earth2Observe, permitió el uso de registros de evapotranspiración calculados a través del método de Penman-Montheit, a una mejor escala de trabajo que la que resulta de la interpolación de las estimaciones con datos de estaciones o calculada con otros métodos. Sin embargo, los registros de evapotranspiración se encuentran hasta el año 2012, lo que limitó el análisis realizado.

En este sentido, es importante que a través del sector académico o gubernamental se adelanten estudios similares al realizado por Sperna et. al. (2015) para Colombia, que permitan contar con una base de datos a nivel nacional validada de registros de evapotranspiración, que se alimente constantemente a partir de la información de sensores remotos, con lo que se pueda tener una mejor aproximación a los cálculos hidrológicos requeridos para la planificación del recurso hídrico.

Bibliografía

- Acker, J. G., & Leptoukh, G. (2007). Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data. *Eos, Trans. AGU*, 88, 14-17. <https://doi.org/10.1029/2007EO020003>
- Alemu, W., & Wimberly, M. (2020). Evaluation of remotely sensed and interpolated environmental datasets for Vector - Borne disease monitoring using in situ observations over Amhara Region, Ethiopia. *Sensors*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/s20051316>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO Riego y Drenaje No 56: Evapotranspiración de cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Andrades, C., & Rossetti, D. (2011). Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 33(4), 1058-1077. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.549852>
- Archfield, S. A., & Vogel, R. M. (2010). Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments. *Water Resour. Res.*, 46, 1-15.
- ASF DAAC. (2015). ALOS PALSAR Radiometriz Terrain Corrected Low Res. In: Includes Material (C) JAXA/METI 2007.
- ASOCARS, CORPONOR, & UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER. (2014). Ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Pamplonita en el Departamento Norte de Santander en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental - CORPONOR. In: San José de Cúcuta.
- Athira, P., Sudheer, K. P., Cibil, R., & Chaubey, I. (2016). Predictions in ungauged basins: An approach for regionalization of hydrological models considering the probability distribution of model parameters. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 30, 1131-1149.

- Benduch, P. (2017). Comparison of the results of spatial analyses performed in ArcGIS and QGIS software. *Polish Academy Sciences, IV*, 1887-1902. <http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2017.4.3.143>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). *Runoff prediction in Ungauged Basins*. Cambridge University Press.
- Budyko, M. (1974). *Climate and life* (D. H. Miller, Trans.).
- Burgos G., A., & Gómez V., G. (2007). *Avances y retos en la gestión de las cuencas binacionales de Colombia: los casos de las cuencas hidrográficas internacionales colombo - ecuatorianas y colombo - venezolanas* (U. d. Rosario, Ed.). https://doi.org/10.48713/10336_1243
- Burgos, V. (2012). *Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal*, Mendoza 1er encuentro de investigadores en formación de Recursos Hídricos (IFRH 2012), Buenos Aires, Argentina.
- Burton, J. (2003). *Integrated water resources management on a basin level* (Multimondes, Ed.).
- Calton, B. (2014). *Earth2Observe Global earth observation for integrated water resource assessment*. European Commission. Retrieved 09 de febrero de 2022 from <http://www.earth2observe.eu/>
- Cameron, A. C., & Windmeijer, F. A. (1997). An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. *J. Econom.*, 77, 329-342.
- Castiglioni, S., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space - based interpolation. *J. Hydrol.*, 378, 272-280.
- Chapman, T., & Maxwell, A. (1996). *Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments* Hydrology and Water Resources Symposium 1996, Hobart, Australia. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.360361071346753>
- Chung, S., Gassman, P., Gu, R., & Kanwar, R. (2002). Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 45.
- CIIFEN, & Corporación cuenca río Chinchiná. (2019). Informe final Convenio de cooperación Interinstitucional No 001 - 2018 entre el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño - CIIFEN y la Corporación Cuenca Río Chinchiná para aunar esfuerzos para el desarrollo de acciones comunes del proyecto Cuencas Climáticamente Resilientes y el Plan Estratégico de la Corporación Cuenca Río Chinchiná. In: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Resolución No 001278 de 2012 "Por la cual se declara en ajuste el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Pamplonita", (2012).
- Correa A., G. (2014). Concentración regional de la población por niveles de riqueza hídrica en Colombia. *Revista CIFE*, 16(25), 153-165.
- Corredor, X., & Sánchez, I. (2013, 21 - 24 October 2013). *Jaziku - Statistical Inference Software for Teleconnections Analysis* 38th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, College Park, MD. <http://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/Collections.htm>
- CRCCH. (2005). *Series on model choice: 1. General approaches to modelling and practical issues of model choice*. C. R. C. f. C. Hydrology.
- DANE. (2020). *Estimaciones y proyecciones de la población*
- Dawson, C., Abrahart, R., & See, L. (2007). HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecast. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1034-1052. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.008>
- Department of Transport and Main Roads. (2010). *Hydrology (Chap. 5)*. Queensland
- Dimova, G., Tzanov, E., Ninov, P., Ribarova, I., & Kossida, M. (2013). Complementary use of the WEAP model to underpin the development of SEEAW physical water use and supply tables. *Procedia Engineering*, 70, 563-572.
- Doczi, J. (2013). *Climate risk management tools for water, sanitation and hygiene sector*. O. D. Institute.
- Doherty, J. (2018). *PEST model - independent parameter estimation User Manual*. In Watermark Numerical Computing.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. *FAO Estudio de Riego y Drenaje No. 24*, 144.
- ECOFYS, & IDS. (2011). *Guiding climate compatible development*. C. a. d. k. Network.
- ESA. (2017). *Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep.*
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., . . . Verdin, A. P. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought

- monitoring. *U.S. Geological Survey Data Series*, 832, 4. <https://dx.doi.org/10.3133/ds832>
- Garg, A., Rana, A., & Shukla, P. (2007). *Handbook of current and next generation vulnerability and adaptation assessment tools*. E. Commission.
- GIZ. (2009). *International workshop on mainstream adaptation to climate change: Guidance and tools, May 28 - 30*. S. A. p. l. c. internacional.
- Gnann, S., Coxon, G., Woods, R., howden, N., & McMillan, H. (2021). TOSSH: A toolbox for strwmaflow signatures in hydrology. *Environmental Modelling and Software*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104983>.
- González, N. (2017). Desafíos de la gobernanza ambiental: una aproximación a las implicaciones de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en Colombia. *Ciencia Política*, 12(23), 205-229. <https://doi.org/10.15446/cp.v12n23.62595>
- Gregor, M. (2020a). BFI+3.0. In. Bratislava, Slovakia.
- Gregor, M. (2020b). FDC 2.1. In. Bratislava, Slovakia.
- Gregor, M. (2020c). *Surface and Groundwater Quality changes in periods of water scarcity*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32244-0>
- GWP. (2020). *GWP in action, 2020 anual report* (G. Ink, Ed.). Global Water Partnership (GWP).
- Hammill, A., & Tanner, T. (2011). Harmonising climate risk management: Adaptation screening and assessment tools for development cooperation. *OECD Environment Working Papers*, 39. <https://dx.doi.org/10.1787/5kg706918zvl-en>
- Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrigation and Drainage Engr.*, 111, 113-124.
- He, Y., Bárdossy, A., & Zehe, E. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3539-3553.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1283 - 1298. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-HMS User's Manual version 4.7*.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional de Agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2021). *Catálogo Nacional de estaciones*
- IDEAM. (2022). *Sistema de información del recurso Hídrico - SIRH*
- Ines, A., & Hansen, J. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agric. Forest Meteorol.*, 138, 44-53.
- Kambobe, O. (2018). *Impact of climate variability and land use change on streamflow in lake ChilWa Basin, Malawi* Egerton University].
- Khanh, B. (2022). *Manual calibration of TETIS model in the Mar Menor lagoon subcatchment* Jornada científica nacional “Transformación digital y tecnología digital en Ciencias de la Tierra, Minas y Medio Ambiente” (EME 2021), Hanoi, Vietnam.
- Knoben, W., Freer, J., Fowler, K., Peel, M., & Woods, R. (2019). Modular assessment of rainfall - runoff models toolbox (MARRMoT) V1.2: an open-source, extendable framework providing implementations of 46 conceptual hydrologic models as continuous state - space formulations. *Geoscientific model development*, 12, 2463-2480. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2463-2019>
- Koutsoyiannis, D. (2006). Nonstationary versus scaling in hydrology. *Journal of Hydrology*, 324, 239-254. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.022>
- Koutsoyiannis, D. (2009). *Seeking parsimony in hydrology and water resources technology* European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria.
- MADS. (2014). *Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- MADS. (2022a). *Cuencas Objeto Ordenación y Manejo (Subzonas y Niveles Subsiguientes)*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved 20 de junio de 2022 from <https://www.minambiente.gov.co/>
- MADS. (2022b). *Plataforma colaborativa 1 - Río Chinchiná*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved 10 de septiembre de 2022 from <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/plataformas-colaborativas/plataforma-colaborativa-rio-chinchina/>
- MADS, ADAPTACIÓN, F. D., CORPOGUAVIO, CORMACARENA, & CORPORINOQUIA. (2019). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica -POMCA- del río Humea*.
- Martinez, A., & Serna, J. (2018). *IDEAM-METEO/002/2018: Validación de las estimaciones de precipitación con CHIRPS e IRE/IDEAM* (Nota técnica del IDEAM, Issue. M. y. E. A.-I. Instituto de Hidrología.

- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
- Mcleod, E., Margles, S., Wongbusarakum, S., Gombos, M., Dazé, A., Otzelberger, A., . . . Wiggins, M. (2015). Community - based climate vulnerability and adpatation Tools: A review of tools and their applications. *Coastal management*, 43(4), 439-458. <http://dx.doi.org/10.1080/08920753.2015.1046809>
- Meresa, H. (2019). Modelling of river flow in ungauged catchment using remote sensing data: application of the empirical (SCS-CN), Artificial Neural Network (ANN) and Hydrological Model (HEC-HMS). *Modelling Earth Systems and Environment*, 5, 257-273. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0532-z>
- Molina R., J. (2017). Los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas - POMCA, como determinantes de licencias, permisos y autorizaciones ambientales. El conflicto entre el desarrollo económico y el ordenamiento ambiental del territorio. In U. E. d. Colombia (Ed.), *Medio ambiente y ordenación del territorio*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, V. M., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50, 885-900.
- Murillo, L., & Silva, A. (2019). La gestión del recurso hídrico en Brasil y Colombia, una comparación de sus instrumentos. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 173-190. <https://doi.org/10.15446/ga.v22n2.82554>
- Müller, M. F., & Thompson, S. E. (2016). Comparing statistical and process-based flow duration curve models in ungauged basins and changin rain regimes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 669-683.
- Nag, A., & Basudev, B. (2019). Can a calibration-free dynamic rainfall-runoff model predict FDCs in data-scare regions? Comparing the IDW Model with the Dynamic Budyko Model in South India. *Hydrology*, 6, 32-49.
- NASA/GSFC/HSL. (2018). *FLDAS Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS)* <https://doi.org/10.5067/5NHC22T9375G>
- Nasr, A. (2017). *EPA Research Report 2018: Assessment of the hydrometric network and hydrodinamic behaviour of small Irish catchments* (EPA Research Programme 2014 - 2020, Issue.
- Nistor, M., & Porumb, G. (2015). How to compute the land cover evapotranspiration at regional scale? A spatial approach of Emilia - Romagna region. *Georeview*, 25, 38-53. <https://doi.org/10.4316/GEOREVIEW.2015.25.1.268>
- Ochengo, C. (2021). *Estimation of a safe reservoir yield using WEAP: A case study of Thwake multipurpose reservoir* University of Nairobi].

- Olhoff, A., & Schaer, C. (2010). *Screening tools and guidelines to support the mainstreaming of climate change adaptation into development assistance - A Stocktaking report*. U. N. D. P. (UNDP).
- OMM. (2008). OMM-N° 168 De la medición a la información hidrológica (Guía de prácticas hidrológicas, Issue. O. M. Mundial.
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (N. Unidas, Ed.).
- Palaniappan, M., Lang, M., & Gleick, P. (2008). *A review of decision - making support tools in the water, sanitation, and hygiene sector*. Pacific Institute.
- Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N., & Wheeler, H. (2011). Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13, 193-214.
- Peralta M., G., Alarcón G., S., Garzón C., J., Neuta N., D., & Rodríguez A., N. (2021). Desabastecimiento hídrico en el sistema de ciudades de Colombia: Ordenamiento ambiental y territorial en el área hidrográfica Magdalena - Cauca. *Cuadernos de geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 459-480. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.88753>
- Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1983). Flood runoff. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- PNUMA. (2021). *Progresos en la gestión integrada de los recursos hídricos. Serie de seguimiento de los avances para la consecución del ODS 6: actualización sobre el indicador mundial 6.5.1 y necesidades de aceleración*. (S. Agenda, Ed.). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- QGIS Equipo de Desarrollo. (2021). *Sistema de información geográfica QGIS*. In (Version 3.16) <https://qgis.org/en/site/index.html>
- R Core Team. (2022). *R: A Language and environment for statistical computing*. In Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. *J. Hydrol. Eng.*, 18, 958-975.
- Refsgaard, J. (1990). Terminology, modelling protocol and clasification of hydrological model codes. In *Distributed hydrological modelling* (Vol. 22, pp. 17-40). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2_2
- Reinhart, V., Fonte, C. C., Hoffmann, P., Bechtel, B., Rechid, D., & Boehner, J. (2021). Comparison of ESA climate change initiative land cover to CORINE land cover over

- Eastern Europe and the Baltic States from a regional climate modeling perspective. *Int. J. of Applied Earth Obs. and Geoinf.*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102221>
- Rubio G., D. (2019). *Evaluación de la capacidad institucional para la implementación de la política nacional de gestión integral del agua en Colombia desde el 2010* Universidad Externado de Colombia]. Bogotá D.C. <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/1724>
- Sadegh, M., AghaKouchak, A., Flores, A., Mallakpour, I., & Reza, M. (2019). A Multi - Model nonstationary rainfall - runoff modeling framework: Analysis and toolbox. *Water Resources Management*, 33, 3011-3024. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02283-y>
- Sarrazin, F., Pianosi, F., & Wagener, T. (2017). An introduction to the SAFE Matlab Toolbox with practical examples and guidelines. In *Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling* (pp. 363-378). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803011-0.00018-5>
- Schaufelberger, P. (1962). La clasificación natural de los climas. *Cenicafé*(1), 3-22.
- Shen, Z., Yong, B., Gourley, J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., . . . Zhang, J. (2020). Recent global performance of the Climate Hazards Group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). *Journal of Hydrology*, 591. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>
- Sieber, J. (2019). *Water Evaluation and Planning (WEAP) System, Software version: 2019.0*. In Somerville, MA, USA Stockholm Environment Institute. <https://www.weap21.org>
- Singh, W. R., Knapp, H. V., Arnold, J., & Demissie, M. (2005). Hydrological modeling of the iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343-360. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03740.x>
- Skoulidakis, C., Filali, Y., Aureli, A., Amani, A., & Jiménez, B. (2018). information - Communication Technologies as an Integrated Water Resources Management (IWRM) Tool for Sustainable Development. In *Achievements and Challenges of Integrated River Basin Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74700>
- Soil Conservation Service (SCS). (1956). Hydrology: National Engineering Handbook. In. Soil Conservation Service, USDA.
- Sperna, F. C., Lopez, P., Van Dijk, A. I. J. M., & Schellekens, J. (2015, 29 nov a 4 dec 2015). *Global high-resolution reference potential evaporation* 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia. <http://www.mssanz.org.au/modsim2015>

- Tena, T., Mudenda, F., Nguvulu, A., Mwaanga, P., & Gathenya, J. (2021). Analysis of river tributaries streamflow contribution using WEAP Model: A case of the Ngwerere and Kanakatampa tributaries to the Chongwe river in Zambia. *J. of Water Resource and Protection*, 13(4), 309-323. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.134019>
- Thornthwaite, C. W., & Mather, R. J. (1955). *The water balance*.
- Trærup, S., Christiansen, L., & Ascaso, E. (2014). *A guidance to tools and methods for climate risk management*. U. D. Partnership.
- Tshimanga, R., Huges, D., & Kapangaziwiri, E. (2011). Understanding hydrological processes and estimating model parameter values in large basins: the case of the Congo River basin. *IAHS Publ.*, 345, 17-22.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban hydrology for small Watersheds TR-55*. U. S. D. o. Agriculture.
- UNFCCC. (2008). *Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change*. C. P. L. UNFCCC Secretariat con los servicios de E. Pinto, Stratus Consulting Inc.
- Universidad Nacional de Colombia, CORPOCALDAS, & ASOCARS. (2014). Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca del río Chinchiná. In: Corporación Autónoma Regional del Caldas (CORPOCALDAS).
- Williams, J. (1995). Computer models of watershed hydrology. In. Colorado: Water Resources Publications.
- Willows, R., & Connell, R. (2003). *Climate adaptation: risk, uncertainty and decision-making Technical Report*. U. C. I. Programme. http://www.ukcip.org.uk/risk_uncert/risk_uncert.html
- Zamudio R., C. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 99-112.
- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., & Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on Budyko framework - Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360(1-4), 117-131. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.021>