

Maestría en Ingeniería Civil

Análisis comparativo de la estimación de caudales ambientales a través de diferentes enfoques holísticos. Caso de estudio: Cuenca alta del río Magdalena

Yesica Alejandra Rodríguez Blásquez

Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2019



Análisis comparativo de la estimación de caudales ambientales a través de diferentes enfoques holísticos. Caso de estudio: Cuenca alta del río Magdalena

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

Ph. D. Germán Ricardo Santos Granados

Director

Ph. D. Héctor Andrés Angarita Corredor

Ph. D. Gerald Augusto Corzo Pérez

Co-directores

Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2019



La tesis de maestría titulada “Análisis comparativo de la estimación de caudales ambientales a través de diferentes enfoques holísticos. Caso de estudio: Cuenca alta del río Magdalena”, presentada por Yesica Alejandra Rodríguez Blásquez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Codirector

Héctor Andrés Angarita Corredor

Codirector

Gerald Augusto Corzo Pérez

Bogotá, D.C., 22 de octubre de 2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, mis padres Andrés Alberto Rodríguez Moreno y Liana María Blásquez Liscano y mi hermano Andrés Sebastián Rodríguez Blásquez, que a través de los años siempre han estado ahí para mí, apoyándome tanto en los buenos momentos como en los malos, seguros siempre de que lograría grandes cosas en la vida.

Así mismo, a mi compañero de vida Nicolás Gómez Cuarán, quien me dio una palabra de aliento y motivación siempre que estuve a punto de rendirme, convencido de todo el potencial y capacidades albergadas dentro de mi ser.

Finalmente, a todos aquellos amigos que me brindaron su compañía a través de todo este proceso que hoy llega a un feliz término.

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de posgrado en una institución de tan alta calidad y, de igual forma, a la dirección de posgrados de la misma por todo su apoyo durante mi proceso dentro de la maestría.

Agradezco al proyecto S-MultiStor por todas las oportunidades que me brindaron durante el desarrollo de la investigación tanto a nivel nacional como internacional, permitiéndome trabajar con los mejores ingenieros e investigadores. Igualmente, a The Nature Conservancy por toda su guía, por compartir conmigo sus experiencias sobre trabajos realizados previamente y que se relacionaban con la presente investigación, así como, los resultados de dichos trabajos y la información disponible para desarrollar el mío.

Al doctor Germán Ricardo Santos Granados por involucrarme dentro de su grupo de trabajo, para llevar a cabo este trabajo de investigación dentro de uno de sus proyectos, con la entera confianza de mis capacidades para obtener grandes resultados.

Así mismo, al doctor Héctor Andrés Angarita Corredor por haberse convertido en el mejor mentor para llegar al feliz término de esta tesis porque sin su constante apoyo y ayuda esto no sería una realidad. Igualmente, al doctor Gerald Augusto Corzo Pérez por su guía e inclusión dentro del proyecto S-MultiStor.

A los genios de la computación y amigos Tatiana Vaca Agudelo, Freddy Santiago Duarte y Daniel Alejandro Páramo Torres por brindarme toda la ayuda que estuvo a su alcance.

Finalmente, a esas personas especiales que son capaces de poner sus manos a tu disposición para que logres tus metas a tiempo, definitivamente sin ustedes esto sería simplemente un sueño, gracias Nicolás Gómez Cuarán y Daniel Caballero Torres.

This Project is partially supported by the Programmatic Cooperation between the Directorate-General for International Cooperation (DGIS) of the Dutch Ministry of Foreign Affairs and IHE Delft in the period 2016 – 2020, also called DUPC2.

Resumen

Colombia es el segundo país latinoamericano con mayor potencial hidroeléctrico, al contar con 26 centrales hidroeléctricas (hasta 2015) y proyecciones de expansión de 31 proyectos más. Ante la presencia de tal número de estructuras hidráulicas, se da lugar a la sobre regulación de las corrientes de agua donde estas se encuentran. Generando así, la alteración hidrológica del régimen de caudales y a la modificación de la biota acuática presente. De manera que, el estudio del caudal ambiental desde una perspectiva holística resulta fundamental para un país con el recurso hídrico y biodiversidad como el de Colombia.

Recientemente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propuso la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia (GMECAC). Esta busca estandarizar la estimación de caudales en Colombia en el marco de la gestión integral del recurso hídrico a nivel de cuenca. Para ello se tienen en consideración los cinco componentes del régimen de caudal ambiental dentro de los procesos físicos, químicos y biológicos del ecosistema.

Esta investigación presenta el análisis comparativo de dicha metodología en relación con una metodología holística altamente reconocida a nivel mundial. El análisis se hizo a partir de una comparación cualitativa y una comparación cuantitativa; la comparación cualitativa en términos de alcance y procesos involucrados para la implementación de cada uno de los enfoques en estudio. En la comparación cuantitativa se identificaron las diferencias entre las metodologías producto de los regímenes de caudal ambiental calculados desde el punto de vista ambiental y económico para diferentes escenarios de operación del embalse. Como resultado se obtuvo para las dos metodologías el escenario de regla de operación del embalse que menor alteraciones genera, la producción hidroenergética de este y los costos económicos asociados respecto a la regla de operación real de la represa de Betania.

Se observó que GMECAC representa un mayor crecimiento económico para la región en términos de producción de hidroenergía y ELOHA evalúa el impacto generado por la operación del embalse de una manera que permite conocer la severidad de la alteración y la dirección de la misma. Adicionalmente, el escenario viable de operación fue el escenario más conservador ambientalmente, sin implicar una pérdida económica significativa en relación con la producción de energía hidroeléctrica.

Palabras clave: Régimen de caudal ambiental, metodologías holísticas, caudal ambiental, ecosistemas de agua dulce, análisis comparativo.

Abstract

Colombia is the second Latin American country with the greatest hydroelectric potential, with 26 hydroelectric plants (until 2015) and expansion projections for 30 more projects. In the presence of such a number of hydraulic structures, the over-regulation of the water currents where these are found occurs. Thus generating the hydrological alteration of the flow regime and the modification of the aquatic biota present. So, the study of environmental flow from a holistic perspective was essential for a country with water resources and biodiversity such as Colombia.

Recently, the Ministry of Environment and Sustainable Development proposed the Methodological Guide for the Estimation of Environmental Flows in Colombia (GMECAC). This seeks to standardize the estimation of flows in Colombia in the framework of the integral management of water resources at the basin level. For this, the five components of the environmental flow regime are considered within the physical, chemical and biological processes of the ecosystem.

This research presents the comparative analysis of this methodology in relation to a holistic methodology highly recognized worldwide. The analysis was made from a qualitative comparison and a quantitative comparison; qualitative comparison in terms of scope and processes involved for the implementation of each of the approaches under study. In the quantitative comparison, the differences between the methodologies resulting from the environmental flow regimes calculated from the environmental and economic point of view for different reservoir operation scenarios were identified. As a result, for the two methodologies, the scenario of the operation rule of the reservoir that generates the least alterations, its hydro-energy production and the associated economic costs with respect to the actual operating rule of the Betania dam were obtained.

It was observed that GMECAC represents a greater economic growth for the region in terms of hydropower production and ELOHA evaluates the impact generated by the operation of the reservoir in a way that allows to know the severity of the alteration and the direction of the same. Additionally, the viable operating scenario was the most environmentally conservative scenario, without implying a significant economic loss in relation to hydroelectric power production.

Keywords: Environmental flow regime, holistic methodologies, freshwater ecosystem, e-flows, comparative analysis, ELOHA.

Índice general

1. Capítulo I. Introducción	16
1.1. Motivación	16
1.2. Problema	16
1.3. Antecedentes	19
1.4. Objetivos	20
1.4.1. Objetivo general.....	20
1.4.2. Objetivos específicos	20
1.5. Estructura de la investigación.....	21
2. Capítulo II. Revisión de la literatura y conceptos generales	23
2.1. Caudal ambiental.....	23
2.2. Metodologías para la estimación del caudal ambiental	23
2.2.1. Metodologías hidrológicas.....	23
2.2.2. Metodologías hidráulicas	24
2.2.3. Metodologías de simulación de hábitat o eco-hidráulicas	25
2.2.4. Metodologías holísticas	25
2.3. WEAP (Water Evaluation and Planning System): Modelación de operación la operación del embalse para los escenarios de caudal ambiental.....	33
3. Capítulo III. Comparación cualitativa de las metodologías holísticas	34
3.1. Componente técnico.....	34
3.1.1. Subcomponente hidrológico	34
3.1.2. Subcomponente ecológico	39
3.1.3. Subcomponente de medición del impacto.....	47
3.2. Componente social	50
3.3. Componente de gestión	51
3.3.1. GMECAC	51
3.3.2. ELOHA.....	54
4. Capítulo IV. Requerimientos de información	56
5. Capítulo V. Caso de estudio.....	57
5.1. Descripción del caso de estudio	57
5.1.1. Descripción general de la cuenca.....	57

5.1.2.	Caracterización física de la cuenca	59
5.1.3.	Caracterización hidrológica de la cuenca.....	60
5.2.	Condiciones especiales del caso de estudio.....	63
5.3.	Complementación de series de caudal.....	64
5.4.	Naturalización de caudales aguas debajo de Betania	68
6.	Capítulo VI. Comparación cuantitativa.....	72
6.1.	Implementación de metodologías.....	72
6.1.1.	Implementación de GMECAC.....	72
6.1.2.	Implementación de ELOHA	126
6.2.	Desarrollo del modelo de simulación de la operación del embalse	144
6.2.1.	Información de entrada	144
6.2.2.	Estructura del modelo	146
7.	Capítulo VII. Resultados y análisis de resultados	148
7.1.	Análisis cualitativo	148
7.2.	Análisis cuantitativo.....	149
7.2.1.	Comparación en términos ambientales	149
7.2.2.	Comparación en términos económicos	151
8.	Capítulo VIII. Conclusiones	153
9.	Capítulo IX. Recomendaciones y observaciones	158
10.	Referencias	160

Índice de tablas

Tabla 1. Requerimientos de información para las metodologías. Fuente: Propia.	56
Tabla 2. Subzonas hidrográficas del Alto Magdalena. Fuente: Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas, IDEAM 2013.....	58
Tabla 3. Descripción general de estaciones utilizadas dentro de la cuenca del Alto Magdalena. Fuente: Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología (DHIME), IDEAM 2019.	62
Tabla 4. Correlación entre parámetros de la distribución Weibull. Fuente: (Haan, 1977).....	83
Tabla 5. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales mínimos (estación 21097120). Fuente: Propia.	87
Tabla 6. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales mínimos (Estación 21097070). Fuente: Propia.	89
Tabla 7. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales máximos (Estación 21097120). Fuente: Propia.	91
Tabla 8. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales máximos (Estación 21097070). Fuente: Propia.	93
Tabla 9. Eventos extremos mínimos - Métricas hidrológicas. Fuente: Propia.	94
Tabla 10. Eventos extremos máximos - Métricas hidrológicas. Fuente: Propia.	94
Tabla 11. Ficha técnica de la represa de Betania. Fuente: Propia.	146
Tabla 12. Esquema comparativo de acuerdo con la revisión cualitativa realizada a las metodologías. Fuente: Propia.	149
Tabla 13. Comparación económica del escenario más eficiente en contraste con la operación real de Betania. Fuente: Propia.	152

Índice de figuras

Figura 1. Estructura general de la investigación. Fuente: Propia.	21
Figura 2. Estructura detallada del análisis cuantitativo de la investigación. Fuente: Propia.	22
Figura 3. Clasificación general de las metodologías hidrológicas.	24
Figura 4. Esquema de funcionamiento de ELOHA. Fuente: Poff et. Al 2010.	28
Figura 5. Componentes del régimen de caudales ambientales. Fuente: Modificación Postel y Richter 2003.	29
Figura 6. Marco metodológico de GMECAC. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.	30
Figura 7. Marco metodológico de la fase 2 del nivel de estimación. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales, MINAMBIENTE 2017.	31
Figura 8. Marco metodológico de la fase 3 del nivel de estimación. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.	32
Figura 9. DIM para grado de alteración con RFI y RRI. Fuente: Grill et. al 2015.	36
Figura 10. Caudales mínimos para cada condición hidrológica VS caudal medio multianual. Fuente: Guía Metodológica para la estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.	37
Figura 11. Caracterización hidrológica del flujo de ELOHA a partir de diagramas de isopercentiles.	39
Figura 12. Esquema de modelo MDLC. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.	42
Figura 13. Caudal ambiental y aprovechable para la condición hidrológica seca de un punto en la red de drenaje. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.	49
Figura 14. Escala de grado de alteración a partir del ecochange tipo semáforo. Fuente: Propia.	50
Figura 15. Esquema de la aplicación del factor de asimilación a escala de tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE 2015.	53
Figura 16. Localización de la cuenca del Alto Magdalena. Fuente: Propia.	57
Figura 17. Perfil esquemático del río Magdalena. Fuente: Caracterización física, demográfica, social y económica de los municipios ribereños de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, CORMAGDALENA 2013.	59
Figura 18. Régimen de precipitación del Alto Magdalena. Fuente: Propia.	61
Figura 19. Localización de las estaciones del IDEAM usadas para la caracterización del régimen de lluvias del Alto Magdalena. Fuente: Propia.	62
Figura 20. Cuenca hipotética del caso de estudio. Fuente: Propia.	64
Figura 21. Correlación entre caudales observados y predichos para las estaciones 21047010, 21057060 y 21087070. Fuente: Propia.	66
Figura 22. Hidrograma de las estaciones 21047010, 21057060 y 21087070. Fuente: Propia.	68
Figura 23. Hidrogramas naturalizados de estaciones 21097120 y 21097070. Fuente: Propia.	71
Figura 24. DOR para la cuenca del Alto Magdalena antes de la construcción de la represa de Betania.	73
Figura 25. DOR para la cuenca del Magdalena y del Alto Magdalena después de la construcción de la represa de Betania.	74
Figura 26. Fragmentación de la cuenca del Alto Magdalena antes (izquierda) y después (derecha) de la construcción de la represa de Betania.	74
Figura 27. Correlación cruzada con el indicador ONI del ENOS.	76

Figura 28. Clasificación del flujo de acuerdo con el indicador ONI del ENOS para cada estación.	77
Figura 29. Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica ...	78
Figura 30. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov-Smirnov. Fuente: (Aparicio, 1992).....	84
Figura 31. Métricas hidrológicas para la identificación de eventos de interés ecológico. Fuente: Propia	95
Figura 32. Sección transversal tomada en agosto de la estación 21097120. Fuente: (IDEAM, 2014)	96
Figura 33. Sección transversal tomada en noviembre de la estación 21097120. Fuente: (IDEAM, 2014).	96
Figura 34. Sección transversal tomada en agosto de la estación 21097070. Fuente: (IDEAM, 2014).	97
Figura 35. . Sección transversal tomada en noviembre de la estación 21097070. Fuente: (IDEAM, 2014)	97
Figura 36. Estado de banca llena teórico descrito por la metodología. Fuente:(IDEAM, 2017).	98
Figura 37. Identificación del estado de banca llena de la estación 21097120 para la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.....	99
Figura 38. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097120 para la batimetría tomada en noviembre. Fuente: Propia.	99
Figura 39. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097070 para la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.	100
Figura 40. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097070 para la batimetría tomada en noviembre. Fuente: Propia.	100
Figura 41. Esquema explicativo del estado de banca llena con base en la relación ancho-profundidad para una sección inconfina. Fuente: Propia.....	101
Figura 42. Esquema explicativo del estado de banca llena en términos de la potencia específica de la corriente para una sección inconfina. Fuente: Propia.....	102
Figura 43. Relación ancho-profundidad y potencia específica para la condición ficticia generada en la estación 21097070 con la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.....	103
Figura 44. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de agosto en la estación 21097120. Fuente: Propia.	104
Figura 45. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de noviembre en la estación 21097120. Fuente: Propia.	105
Figura 46. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de agosto en la estación 21097070. Fuente: Propia.	105
Figura 47. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de noviembre en la estación 21097070. Fuente: Propia.	106
Figura 48. Métricas hidrológicas e hidromorfométricas en la condición natural para la estación 21097120. Fuente: Propia.	107
Figura 49. Métricas hidrológicas e hidromorfométricas en la condición natural para la estación 21097070. Fuente: Propia.	107
Figura 50. Ejemplo de ajustes de distribuciones de probabilidad para el factor de planta de enero. Fuente: Propia.	109
Figura 51. Zonas de volumen de una represa. Fuente: WEAP, 2019.....	113
Figura 52. Curva guía teórica de Betania. Volumen muerto (Amarillo), volumen de amortiguación (verde), volumen operativo (azul) y volumen de control de crecientes (morado). Fuente: Propia.	113
Figura 53. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	114

Figura 54. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097120 entre los años 2015 y 2017- Todos los escenarios. Fuente: Propia.....	114
Figura 55. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	115
Figura 56. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097070 entre los años 2015 y 2017- Todos los escenarios. Fuente: Propia.....	115
Figura 57. Desempeño del escenario 1 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.	117
Figura 58. Desempeño del escenario 1 y 4 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.	117
Figura 59. Desempeño del escenario 2 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.	118
Figura 60. Desempeño del escenario 2 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.	118
Figura 61. Desempeño del escenario 3 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.	119
Figura 62. Desempeño del escenario 3 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.	119
Figura 63. Desempeño del escenario 4 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.	120
Figura 64. Desempeño del escenario 4 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.	120
Figura 65. Desempeño del escenario 5 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.	121
Figura 66. Desempeño del escenario 5 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.	121
Figura 67. Verificación de cumplimiento de escenarios para la GMECAC en la estación 21097120. Fuente: Propia.	122
Figura 68. Verificación de cumplimiento de escenarios para la GMECAC en la estación 21097070. Fuente: Propia.	123
Figura 69. Caudal ambiental y aprovechable para la condición húmeda en la estación 21097120. Fuente: Propia.	124
Figura 70. Caudal ambiental y aprovechable para la condición normal en la estación 21097120. Fuente: Propia.	125
Figura 71. Caudal ambiental y aprovechable para la condición seca en la estación 21097120. Fuente: Propia.	125
Figura 72. Régimen de caudal ambiental promedio mensual para todos los escenarios a partir de la GMECAC para la estación 21097120. Fuente: Propia.	126
Figura 73. Diagrama de isopercentiles de la estación 21097120 en condición natural. Fuente: Propia.	127
Figura 74. Diagrama de isopercentiles de la estación 21097070 en condición natural. Fuente: Propia.	127
Figura 75. Caracterización ecológica para la estación 21097120. Fuente: TNC, 2019.	128
Figura 76. Caracterización ecológica para la estación 21097070. Fuente: TNC, 2019.	129
Figura 77. Gradación porcentual del impacto. Fuente: Propia.	130
Figura 78. Indicadores del impacto del escenario 1 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.	131

Figura 79. Indicadores del impacto del escenario 1 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.	132
Figura 80. Indicadores del impacto del escenario 2 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.	133
Figura 81. Indicadores del impacto del escenario 2 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.	134
Figura 82. Indicadores del impacto del escenario 3 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.	135
Figura 83. Indicadores del impacto del escenario 3 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.	136
Figura 84. Indicadores del impacto del escenario 4 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.	137
Figura 85. Indicadores del impacto del escenario 4 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.	138
Figura 86. Indicadores del impacto del escenario 5 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.	139
Figura 87. Indicadores del impacto del escenario 5 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.	140
Figura 88. Régimen de caudal ambiental diario en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	141
Figura 89. Régimen de caudal ambiental por año en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	141
Figura 90. Curva de duración de caudales ambientales en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	142
Figura 91. Régimen de caudal ambiental diario en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	142
Figura 92. Régimen de caudal ambiental por año en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	143
Figura 93. Curva de duración de caudales ambientales en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.	143
Figura 94. Curva de elevación en función del volumen de la represa de Betania. Fuente: Propia.	145
Figura 95. Modelo de simulación de la operación de la represa de Betania en WEAP. Fuente: Propia.	147
Figura 96. Desempeño final de todos los escenarios para la estación 21097120. Fuente: Propia.	150
Figura 97. Desempeño final de todos los escenarios para la estación 21097070. Fuente: Propia.	150
Figura 98. Costo-beneficio porcentual tras la implementación de ELOHA en reemplazo a la metodología colombiana. Fuente: Propia.	152

Índice de anexos

Anexo 1. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 2. Fuente: Propia.	164
Anexo 2. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 2. Fuente: Propia.	165
Anexo 3. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 3. Fuente: Propia.	168
Anexo 4. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 3. Fuente: Propia.	169
Anexo 5. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 4. Fuente: Propia.	170
Anexo 6. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 4. Fuente: Propia.	172
Anexo 7. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 5. Fuente: Propia.	173
Anexo 8. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 5. Fuente: Propia.	175

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Motivación

Los ecosistemas de agua dulce proporcionan servicios ecológicos hídricos de gran importancia para la humanidad, tales como el control de inundaciones, suministro de agua potable para consumo, conservación de la biodiversidad, entre otros (Meli, Rey, Carabias, Ruiz, & Martínez, 2013). Por consiguiente, los cambios en la salud de los ecosistemas tienen una influencia directa e indirecta sobre el bienestar del hombre y, así mismo, las acciones humanas generan impactos sobre los mismos ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Sin embargo, el crecimiento económico ha implicado secuelas considerables sobre el ambiente, aun cuando el valor económico de los servicios ecosistémicos (estimado en 124.8 billones de dólares para 2011) supera el producto interno bruto mundial (estimado en 75.2 billones de dólares para el mismo año) (UNESCO, 2015).

La rápida tasa de crecimiento demográfico, el crecimiento de la producción y consumo y el crecimiento económico han provocado un aumento significativo en la demanda de agua dulce, tanto que se estima que para el 2030 y para un escenario climático invariante, habrá un déficit de agua del 40% a nivel mundial (UNESCO, 2015). Lo que implica necesariamente un progreso basado en el desarrollo sostenible, propendiendo por un equilibrio entre los tres pilares; el económico, el social y el ambiental. De modo que, el manejo integral de los ecosistemas de agua dulce se ha vuelto un tema de gran relevancia a nivel mundial (King & Brown, 2009), puesto que, con el incremento de la explotación de los ríos, ha aumentado el reconocimiento de la necesidad de la cuantificación de un régimen de flujo de agua para mantener un estado ecológico aceptable de los ríos a través de los caudales ambientales (Sapkota, Bharati, Gurung, Kaushal, & Smakhtin, 2013). Razón por la cual se pretende desarrollar la investigación propuesta en el presente documento, dada la abundancia e importancia del recurso hídrico en Colombia.

1.2. Problema

Los caudales ambientales se pueden definir como el flujo necesario en un ecosistema de agua dulce para cumplir con una condición específica de dicho ecosistema (Brown & Joubert, 2003). Las represas han sido uno de los progresos de los que se ha beneficiado la humanidad, sin embargo, estas son una de las causas de la pérdida de conectividad entre los flujos aguas abajo de estas, el transporte de sedimentos (es importante resaltar que en Colombia las represas no tienen permitida la liberación de

los sedimentos que atrapan) y biota; ocasionando impactos negativos sobre la diversidad y capacidad de recuperación de los ecosistemas ribereños (King & Brown, 2018). Como respuesta a esta problemática, ha surgido una nueva especialidad científica denominada “Evaluación de Caudales Ambientales”, que tiene como finalidad el suministro de información ecológica y social para la toma de decisiones entre los stakeholders dentro de los planes de manejo integral del recurso hídrico (King & Brown, 2018) y, de esta forma, evitar la degradación de los ecosistemas de agua dulce.

Los ecosistemas de agua dulce aportan funciones ecológicas fundamentales que se resumen en servicios ecosistémicos elementales para el desarrollo de la sociedad (Meli et al., 2013). No obstante, las intervenciones antrópicas pueden llegar a tener consecuencias drásticas e irreversibles dentro de los servicios principales del ecosistema, tales como la hidrología y dinámica de los sedimentos, la biogeoquímica y ciclo de nutrientes y la provisión de hábitat y mantenimiento de cadenas tróficas (Meli et al., 2013). Dentro de estas acciones humanas se pueden encontrar cuatro categorías principales: Afectación de la dinámica hidrológica de la cuenca, contaminación y cambio del uso del suelo (Naiman, Décamps, & McClain, 2005).

De acuerdo con el informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, alrededor del 60% de los caudales de los mayores ríos del mundo ha sido interrumpido por alguna estructura hidráulica (UNESCO-WWAP, 2003). Hecho que apoya la afirmación de que la afectación humana con mayor influencia corresponde a la alteración del régimen hidrológico de las cuencas mediante la construcción de obras como diques y represas (Meli et al., 2013). De manera que, se ha incurrido en el deterioro de los ecosistemas; pues se observa que a nivel mundial el 24% de los mamíferos, el 12% de las aves, y alrededor del 4% de los peces se encuentran amenazados (UNESCO-WWAP, 2003).

Dentro de los propósitos más comunes ante la construcción de las represas y embalses se encuentra el control de inundaciones, el suministro de agua potable, la irrigación, la recreación, la navegación y la generación de energía hidroeléctrica (Lehner et al., 2011). La generación de energía hidroeléctrica es considerada como la fuente principal de energías renovables en el mundo pues esta representa una quinta parte de la electricidad a nivel mundial (Banco Mundial, 2015). Esto se ve reflejado en el aumento de la cantidad de presas y embalses construidos alrededor del mundo que en los últimos sesenta años ha llegado a más de 50.000 grandes presas, de modo que, estas estructuras hidráulicas representan un papel fundamental dentro del manejo de los recursos hídricos (Lehner et al., 2011). Por consiguiente, resulta indispensable realizar un adecuado cálculo e implementación de los caudales ambientales sobre la zona en estudio; al propender por la protección contra la sobre-explotación y la

sobre-regulación los caudales ambientales son considerados como una de las herramientas clave dentro del manejo integral del recurso hídrico (McClain, 2017).

América Latina es reconocida como una de las regiones que cuenta con mayor potencial hidroeléctrico del mundo (Banco de Desarrollo de América Latina - CAF, 2015). De los 2800 GW de potencial hidroeléctrico del mundo, América Latina y el Caribe cuenta con 694 GW, para lo cual Colombia es el segundo país latinoamericano después de Brasil con mayor potencial hidroeléctrico (Olade, 2012). Hasta 2015, se estimó que en la cuenca del Río Magdalena existen alrededor de 26 centrales hidroeléctricas con una capacidad instalada de 6.36 GW y en construcción dos grandes embalses con una capacidad instalada total de 2.80 GW (Angarita, Wickel, Chavarro, Escobar-Arias, & Delgado, 2015). Por otro lado, se proyecta la expansión de al menos 30 grandes proyectos hidroeléctricos más que adicionarían 7.64 GW a la capacidad instalada en Colombia (Angarita et al., 2015).

De modo que, es evidente la importancia de los proyectos hidroeléctricos en el país y, por lo tanto, de dar un manejo ambiental adecuado para la construcción y operación de los mismos. Por esto, en 2010 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; con el apoyo de otras entidades, establecen la “Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico”. En esta se establece como una de las estrategias la conservación de los diferentes ecosistemas que contribuyen a la regulación de la oferta hídrica mediante la “definición de los caudales mínimos necesarios para el mantenimiento de las corrientes superficiales y sus ecosistemas acuáticos asociados e implementar medidas para garantizarlos” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2010). Sin embargo, la mayoría de las metodologías establecidas en la normatividad colombiana, corresponden a métodos hidrológicos basados en la curva de duración de caudales.

No obstante, la salud de los ecosistemas acuáticos depende de la estacionalidad, de las variaciones en los niveles del agua y de los flujos de agua (Avila et al., 2013). De ahí la importancia de la aplicación de metodologías que permitan la evaluación del ecosistema como un todo, contemplando variables tanto bióticas como abióticas, tales como: Calidad del agua, geomorfología, vegetación acuática, hidráulica, especies relacionadas con el ecosistema ripario (peces, macroinvertebrados, etc.), entre otras (Rodríguez-Gallego et al., 2011).

Consecuentemente, esta propuesta tiene como finalidad principal el desarrollo de un análisis que permita la comparación entre la aplicación de dos metodologías holísticas diferentes para la cuantificación de caudales ambientales con el fin de evaluar el grado de influencia que tiene la variación de la metodología de cálculo dentro de diferentes elementos del ecosistema en relación con

los tres pilares del desarrollo sostenible; tomando la cuenca alta del río Magdalena como zona de estudio y el bocachico como especie objetivo de conservación.

1.3. Antecedentes

Conforme han ido cambiando las necesidades del ser humano, lo ha hecho la manera en la que este consume recursos naturales para suplir dichas necesidades. Consecuentemente, el impacto sobre el medio ambiente por la sobreexplotación de los ecosistemas que albergan dichos recursos. Así mismo, han variado y evolucionado las metodologías para la cuantificación de caudales ambientales, pues a través del tiempo ha incrementado la necesidad por considerar de manera más aproximadas todos los elementos y relaciones dentro de los ecosistemas.

Empezando en la década de los 70's con las metodologías hidrológicas al desarrollarse el método de Tennant y su implementación por parte del US Fish and Wildlife Service en 11 corrientes de 3 estados en Estados Unidos. Posteriormente, se introducen los métodos hidráulicos y ecohidráulicos que además de la hidrología permitían la consideración de otros parámetros tales como la velocidad de flujo, la profundidad de flujo y el ancho superficial, entre otros. Hasta que a principios de 1990 se da el inicio de las metodologías holísticas implementándose en proyectos ubicados especialmente en Sudáfrica, Australia y Asia, debido al incremento en la construcción de embalses y presas en estos países.

Existen múltiples enfoques holísticos basados en teorías diferentes, pero todos apuntando a considerar el ecosistema como un todo. Dentro de los más destacados y mayormente usados a nivel mundial encontramos Building Block Methodology (BBM) implementado en la evaluación del caudal ambiental para el río Luvuvhu, Downstream Responde to Imposed Flow Transformation (DRIFT) aplicado por los gobiernos de Lesoto y Sudáfrica en el proyecto de generación de energía hidroeléctrica denominado The Lesotho Highlands Water Project (LHWP); estudio que llevó al desarrollo de las herramientas computacionales DRIFTSOLVER y DRIFTCATEGORY para automatizar en cierto grado el proceso de la metodología. Adicionalmente, está el Integrated Basin Flow Management (IBFM) que introdujo el concepto de Espacio de Desarrollo como la región aceptable de máxima degradación en relación con la explotación del recurso hídrico a través de la planeación hídrica de la cuenca del río Mekong a cargo de la Comisión del mismo.

Sin embargo, todas las metodologías mencionadas anteriormente no tienen en consideración la relación entre la alteración del régimen hidrológico y la respuesta ecológica del ecosistema ante dicha alteración, por lo que, en respuesta a esto se desarrolló la metodología Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA); usada en la presente investigación en contraste con la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, desarrollada por el IDEAM.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia cualitativa y cuantitativa de la aplicación de la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia frente al marco de referencia Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA) sobre la toma de decisiones en la planificación de una cuenca desde en términos ambientales y económicos, tomando como caso de estudio la represa de Betania en el departamento del Huila.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer los componentes cualitativos relevantes de la metodología colombiana en relación con la metodología conocida globalmente.
- Determinar los procesos fundamentales requeridos para la implementación de las dos metodologías en estudio.
- Identificar los requerimientos de información para la aplicación de las dos metodologías para la estimación del régimen de caudales ambientales.
- Calcular el régimen de caudales ambientales para el caso de estudio aplicando los dos enfoques holísticos objeto de estudio de la investigación.
- Establecer los eventos hidrológicos de interés para mantener los procesos de las funciones ecológicas a conservar.
- Modelar en WEAP los escenarios de caudal ambiental para las dos metodologías contempladas para diferentes reglas de operación.

- Determinar la variación en el impacto económico y ambiental que implica el uso de una u otra de las metodologías holísticas en estudio de acuerdo con la alteración generada por los diferentes escenarios de operación del embalse planteados.

1.5. Estructura de la investigación

Para dar solución al problema planteado fue necesario plantear una estructura que permitiera el establecimiento de una secuencia de procesos ordenados cronológicamente para una mayor eficiencia en la investigación. Esta estructura fue definida para dos escalas de detalle diferentes, la primera de manera general contemplando todo el procedimiento del estudio y, la segunda, corresponde a una detallada en la que se definen los procesos requeridos para el desarrollo del estudio cuantitativo. A continuación, se sintetizan estas estructuras a través de dos diagramas explicativos.

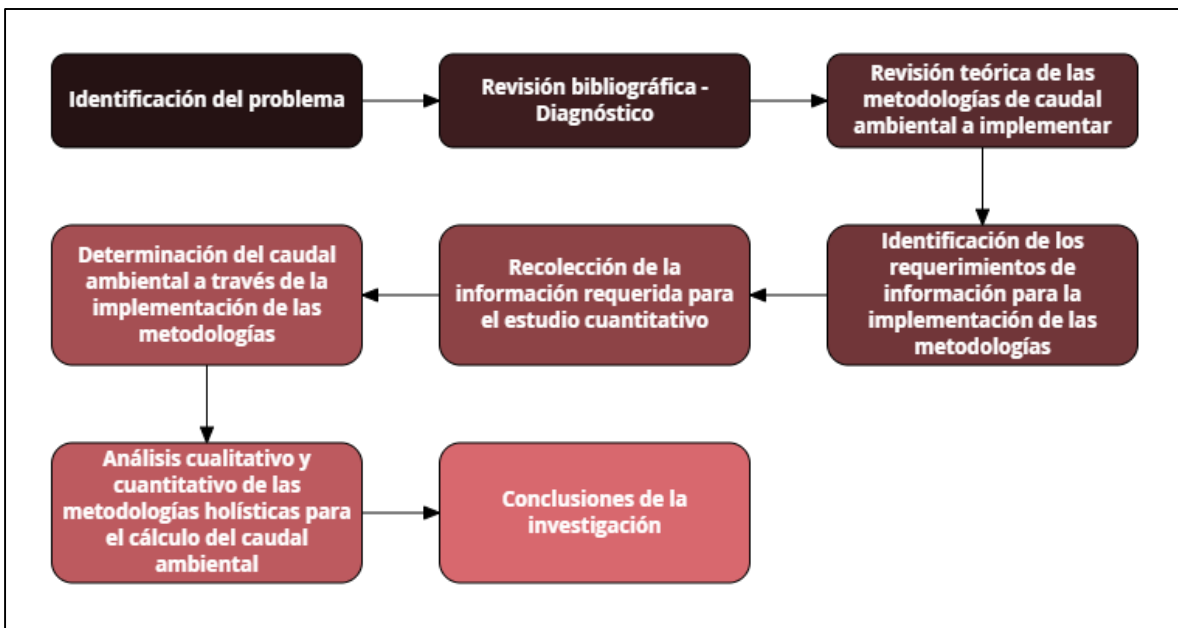


Figura 1. Estructura general de la investigación. Fuente: Propia.

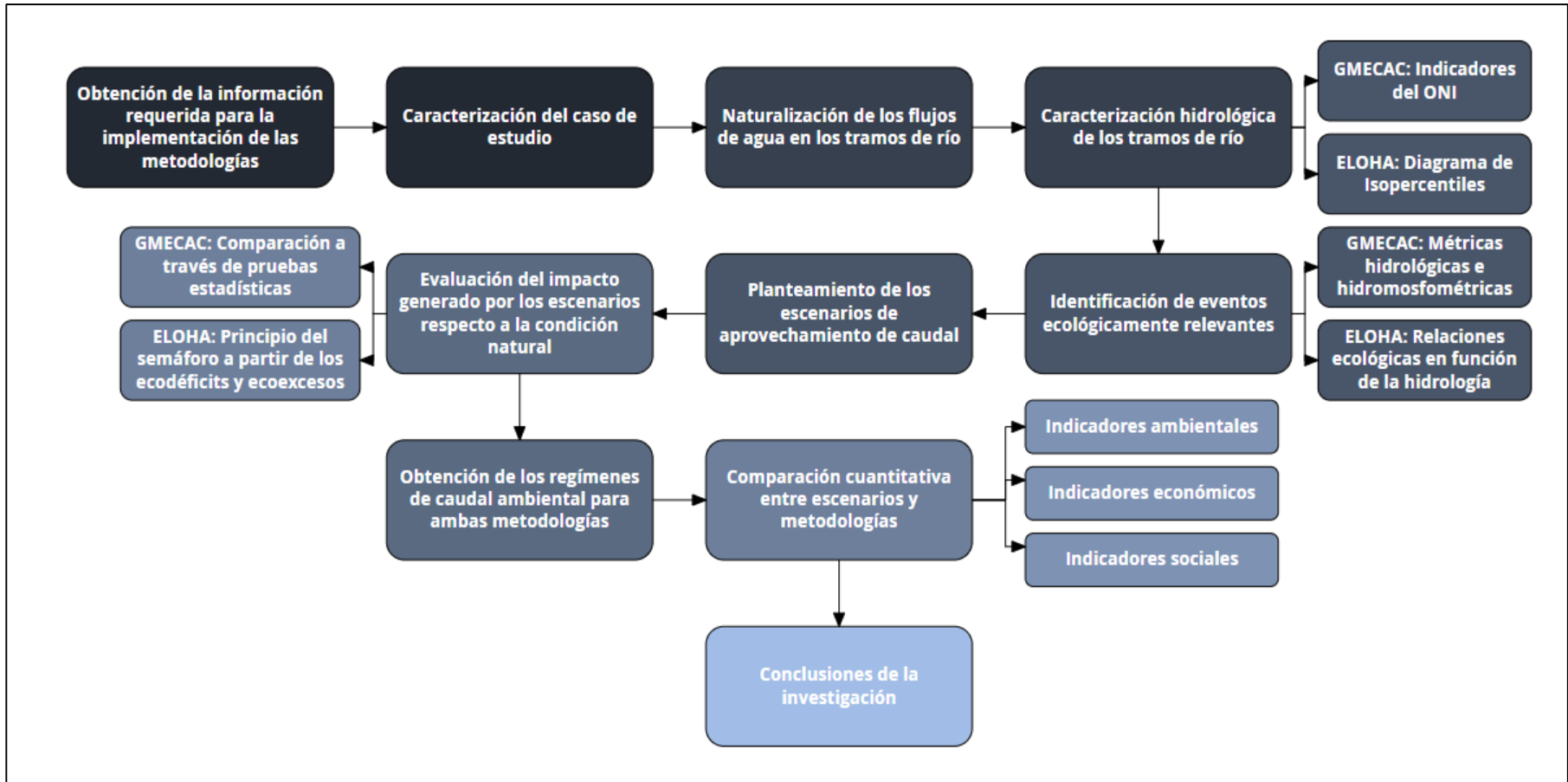


Figura 2. Estructura detallada del análisis cuantitativo de la investigación. Fuente: Propia.

2. Capítulo II. Revisión de la literatura y conceptos generales

2.1. Caudal ambiental

Los caudales ambientales son las variables que representan la cantidad, la calidad y el momento de los flujos de agua dulce que se requieren para mantener los servicios del ecosistema que se encargan de la salud del mismo y sus estuarios y, así mismo, de garantizar el bienestar humano que depende de dichos servicios (International River Foundation, 2007).

De acuerdo con lo anterior, es evidente la relevancia que los caudales ambientales tienen dentro de un sistema fluvial. Así mismo, el gran riesgo al que son expuestos los ecosistemas cuando estos no son considerados o estimados correctamente. De manera que, en 1970 se da el inicio de una rama de la hidrología preocupada por la estimación del caudal ambiental; para la conservación de los servicios ecosistémicos de interés.

Debido al nivel alto de complejidad que implica su estimación, se han desarrollado múltiples metodologías a través del tiempo y originarias de diferentes lugares del mundo. A partir de 1950, comienza una construcción de proyectos de presas no distribuidas uniformemente, concentrándose especialmente en Estados Unidos, Australia, Suráfrica y China, por lo que, estas naciones dedicaron un gran esfuerzo al entendimiento de los caudales ambientales. De manera general, todas estas metodologías se clasifican en cuatro grandes grupos: Metodologías hidrológicas, metodologías hidráulicas, metodologías de simulación de hábitat o eco – hidráulicas y metodologías holísticas.

2.2. Metodologías para la estimación del caudal ambiental

2.2.1. Metodologías hidrológicas

Son aquellas que están basadas en series de tiempo de caudales y, por ende, no cuentan con una relación explícita entre los componentes hidrológicos y biológicos. Por esto mismo es considerada como la metodología con mayor cantidad de simplificaciones y la más económica. Esta se encuentra clasificada en tres categorías: Único valor de caudal ambiental para todo el año, valor de caudal ambiental para cada mes de año y régimen completo. A continuación, se muestra un cuadro resumen que contiene las metodologías más destacadas en cada una de las categorías.

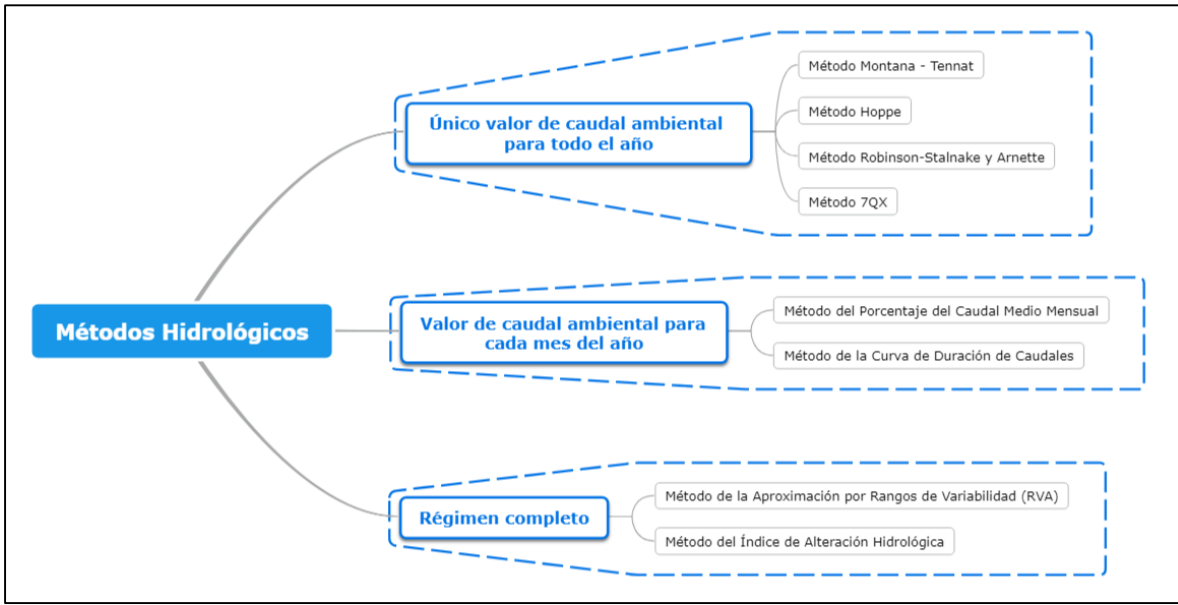


Figura 3. Clasificación general de las metodologías hidrológicas.

2.2.2. Metodologías hidráulicas

Son métodos que relacionan variables de la geometría de la sección del canal de flujo como la velocidad de flujo, la profundidad de flujo, perímetro mojado o el ancho superficial con las descargas y respuesta biológica del ecosistema. Estos establecen dos criterios para determinar los requerimientos mínimos de caudal:

- **Umbral de caudal mínimo:** Punto de inflexión que resulta de la gráfica que relaciona al perímetro con el caudal; donde se observa que al aumentar el caudal se aumenta el perímetro mojado.
- **Porcentaje de reserva de hábitat:** Para un valor determinado de caudal (normalmente asociado al caudal medio) debe considerarse el correspondiente ancho o perímetro mojado para conservar un porcentaje de hábitat en específico.

Dentro de las submetodologías más reconocidas se encuentran el método del perímetro mojado, el método de Idaho, el método R2Cross, entre otros.

2.2.3. Metodologías de simulación de hábitat o eco-hidráulicas

Como su nombre lo indica, estas metodologías tienen una gran similitud con las metodologías hidráulicas, sin embargo, difieren en que en las eco-hidráulicas se debe desarrollar un modelo que permita la determinación de la idoneidad del hábitat para un organismo en específico bajo diferentes escenarios. Motivo por el cual requiere de mayor cantidad y variedad de información tal como batimetría, topografía y ecología. Un ejemplo de estas es el Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), que tiene como finalidad establecer el hábitat real útil.

2.2.4. Metodologías holísticas

Estas consideran que en el manejo de los caudales ambientales se deben contemplar los factores bióticos y abióticos y, adicionalmente, el espectro completo del régimen hidrológico; esto quiere decir que se debe tener en cuenta tanto la variabilidad temporal como espacial pues los procesos de las especies también son variables a lo largo del espacio y del tiempo. De manera que, buscan el entendimiento de la interacción entre los factores hidrológicos y los ecosistémicos e incluso socioeconómicos. Obteniendo así la descripción del régimen hidrológico necesario para mantener una condición en específico del ecosistema.

Dentro de las metodologías más conocidas se encuentran Building Block Methodology (BBM), aproximación holística, evaluación por panel de expertos, Downstream Response to Imposed Flow Transformation (DRIFT), entre otras. No obstante, en la presente investigación se utilizarán otras dos metodologías un poco más recientes, Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA) y la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia.

2.2.4.1. Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA)

Es un marco de referencia que permite evaluar las necesidades de caudal ambiental sobre áreas geográficas de gran tamaño, es decir, que está destinado a análisis a nivel regional. Busca establecer las relaciones que existen entre la alteración del régimen de flujo y la respuesta ecológica del ecosistema para ríos con diferentes regímenes hidrológicos; a través de la síntesis de información tanto hidrológica como ecológica. Para esto, la metodología está dividida en tres procesos fundamentales: Proceso científico, proceso social y monitoreo y evaluación.

2.2.4.1.1. Proceso científico

Este proceso tiene como finalidad el desarrollo de las relaciones entre alteración de flujo y respuesta ecológica a través de la aplicación de una serie de cuatro fases: Construcción de la función hidrológica, clasificación de los segmentos de río, cálculo de la alteración hidrológica y, finalmente, determinación de las relaciones entre alteración de flujo y respuesta ecológica.

2.2.4.1.1.1. Construcción de la función hidrológica

Esta fase consiste en la creación de un hidrograma a paso diario o mensual en un periodo de tiempo que sea capaz de representar la variabilidad del clima e incluso estos periodos de tiempo pueden ser ampliados mediante la aplicación de modelos hidrológicos. Cabe resaltar que este proceso es fundamental pues es la base para el desarrollo de las condiciones de los segmentos de ríos a lo largo de la región.

2.2.4.1.1.2. Clasificación de segmentos de río

La categorización de los segmentos de río se debe hacer de acuerdo con la similitud entre los regímenes de flujo de los diferentes segmentos; esto mediante estadísticos de flujo ecológicamente relevantes con base en los hidrogramas de línea base elaborados en la fase anterior. Adicionalmente, se puede realizar una subclasificación según las características geomorfológicas que definen el hábitat físico en estudio. De modo que, la cantidad de tipos de ríos depende de la heterogeneidad y del tamaño de la región a analizar.

2.2.4.1.1.3. Cálculo de la alteración hidrológica

Esta fase corresponde al cálculo de la desviación porcentual entre los flujos bajo la condición del desarrollo y los flujos de la línea base, para cada uno de los segmentos de río clasificados. Esto mediante el uso de estadísticos que se encuentren fuertemente ligados con las condiciones ecológicas y que puedan ser usados como objetivos dentro de la gestión del recurso hídrico.

2.2.4.1.1.4. Determinación de las relaciones entre la alteración del flujo y la respuesta ecológica

Las relaciones a determinar se encuentran asociadas a los cambios en la condición ecológica del ecosistema de acuerdo con el grado de alteración hidrológica ante el cual este se ve expuesto. Consecuentemente, se obtiene una familia de relaciones para cada tipo de río con el uso de estadísticos de flujo y variables ecológicas relevantes para la preservación de los servicios del ecosistema. Dentro de las variables ecológicas mayormente usadas para analizar la respuesta ecológica se encuentran la

riqueza de especies de invertebrados acuáticos y la abundancia de peces; en general estas variables deben ser sensibles a alteraciones de flujo. Adicionalmente, estas variables deben ser validadas a partir de monitoreo y de diálogos con la comunidad.

2.2.4.1.2. Proceso social

En este proceso se busca realizar la gestión del recurso hídrico a partir de las relaciones establecidas entre la alteración del flujo y la respuesta ecológica, obtenidas en el proceso científico. Dicha gestión está dividida en tres etapas: Determinación de las condiciones ecológicas aceptables, desarrollo de los objetivos de caudal ambiental e implementación de la gestión de caudal ambiental.

2.2.4.1.2.1. Determinación de las condiciones ecológicas aceptables

Teniendo en cuenta que el objetivo de ELOHA es entender los compromisos entre los usos antropogénicos del agua y la degradación ecológica causada por ese uso, esta etapa pretende identificar los elementos ecológicos y culturales que deben ser protegidos o restaurados a través de la gestión de los ríos. Dichos valores a conservar deben representar los intereses de todos los involucrados, por lo que, esto debe llevarse a cabo a través de un proceso controlado entre los Stakeholders, los expertos y la comunidad. Así mismo, este proceso requiere de supervisión por parte de los gobiernos de acuerdo con los diferentes niveles de desarrollo del recurso hídrico y de las correspondientes jurisdicciones.

2.2.4.1.2.2. Desarrollo de los objetivos de caudal ambiental

De acuerdo con los elementos identificados en la fase anterior, se determina un flujo ambiental objetivo, es decir, el máximo grado de alteración del flujo que puede darse; de ese modo se establece un flujo adecuado para el río en función del mantenimiento de la condición ecológica deseada.

2.2.4.1.2.3. Implementación de la gestión de caudal ambiental

Su finalidad es la determinación de los efectos acumulativos resultado de la alteración del flujo mediante la incorporación de objetivos de flujo ambiental en el proceso de planificación del recurso hídrico. Para ello, se evalúan las limitaciones y oportunidades para la implementación de las metas (objetivos) de caudal ambiental en cualquier sitio en específico o incluso para cada sitio de manera simultánea. Por otro lado, la gestión es una herramienta que tiene otros múltiples usos, como, por ejemplo:

- Optimización de la eficiencia del suministro de agua.
- Priorización de los proyectos de restauración.
- Base para la toma de decisiones de autorización, considerando los efectos acumulativos tanto aguas arriba como aguas abajo.

2.2.4.1.3. Proceso de monitoreo y evaluación

Una vez calculado e implementado el caudal ambiental para la región en estudio, se da el inicio a un proceso iterativo de mejoramiento continuo de los resultados obtenidos. De manera que, se determine el porcentaje alcanzado en cuanto a las metas de caudal ambiental establecidas y los elementos del sistema a mejorar para cumplir dichos objetivos.

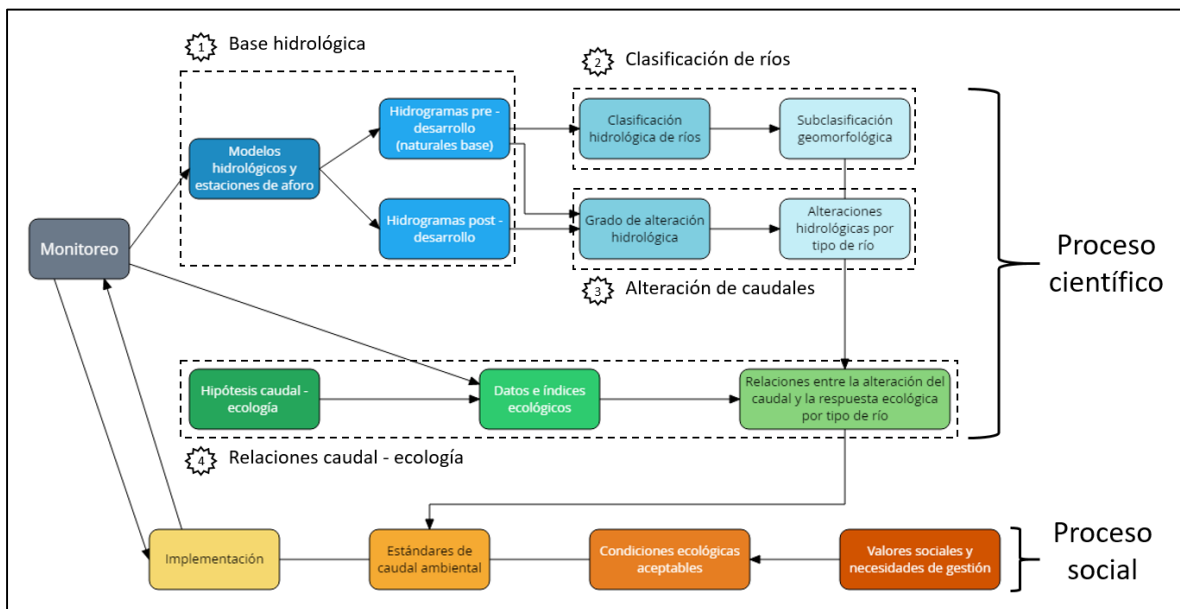


Figura 4. Esquema de funcionamiento de ELOHA. Fuente: Poff et. Al 2010.

2.2.4.2. Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia (GMECAC)

Esta es una metodología desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales con el objetivo de estandarizar una metodología para la estimación de caudales ambientales en Colombia a nivel de cuenca hidrográfica, dentro del marco de la gestión integral del recurso hídrico. Pasando de las metodologías actualmente usadas basadas en el concepto de conservar

un mínimo, a un enfoque holístico en el que se considera la hidrología, la geomorfología, la hidráulica, la calidad del agua, la ecología y los servicios ecosistémicos. De modo que, se obtiene como resultado un régimen de caudales ambientales con atributos ecológicos que tiene en consideración procesos físicos, biológicos y químicos.

Dicho régimen de caudales ambientales se da en términos de cinco componentes fundamentales: Duración, frecuencia, momento, magnitud y tasa de cambio.

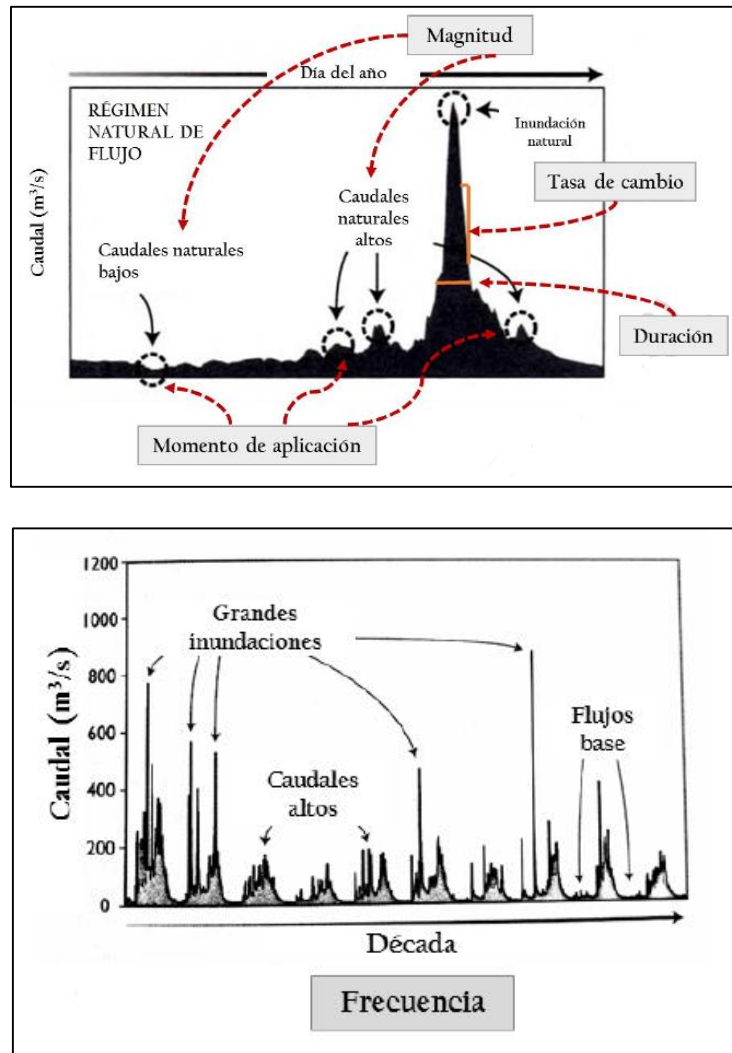


Figura 5. Componentes del régimen de caudales ambientales. Fuente: Modificación Postel y Richter 2003.

La metodología está dividida en dos niveles de desarrollo, denominados “estimación” y “gestión” y, a su vez, estos están divididos en diferentes fases de ejecución.

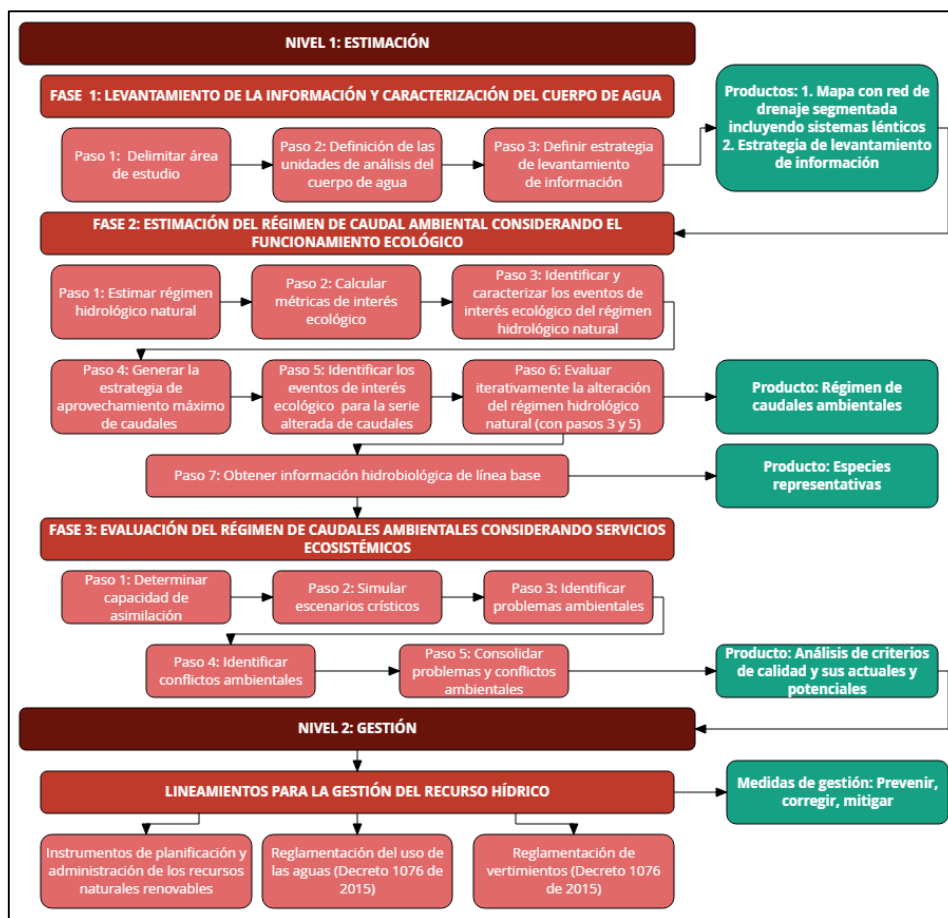


Figura 6. Marco metodológico de GMECAC. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.

2.2.4.2.1. Nivel 1: Estimación

En síntesis, este nivel de implementación se lleva a cabo a partir de 3 fases: Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua, estimación del caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico y evaluación de caudales ambientales considerando servicios ecosistémicos; las cuales están compuestas por las siguientes subfases o pasos:

2.2.4.2.1.1. Fase 1: Levantamiento de la información y caracterización del cuerpo de agua

- Delimitación.
- Definición de unidades de análisis.
- Clasificación geomorfológica.
- Trabajo de campo.
- Información secundaria.

Resultado: Bases de datos con la información y caracterización de los cuerpos de agua.

2.2.4.2.1.2. Fase 2: Estimación del caudal ambiental considerando el funcionamiento ecológico

- Funcionalidad ecológica: Hidrología, geomorfología e hidráulica.
- Diagnóstico ecológico

Resultado: Régimen de caudales ambientales, alteración del régimen hidrológico de acuerdo con la línea base y factor de hábitat para las especies representativas como información hidrológica base.

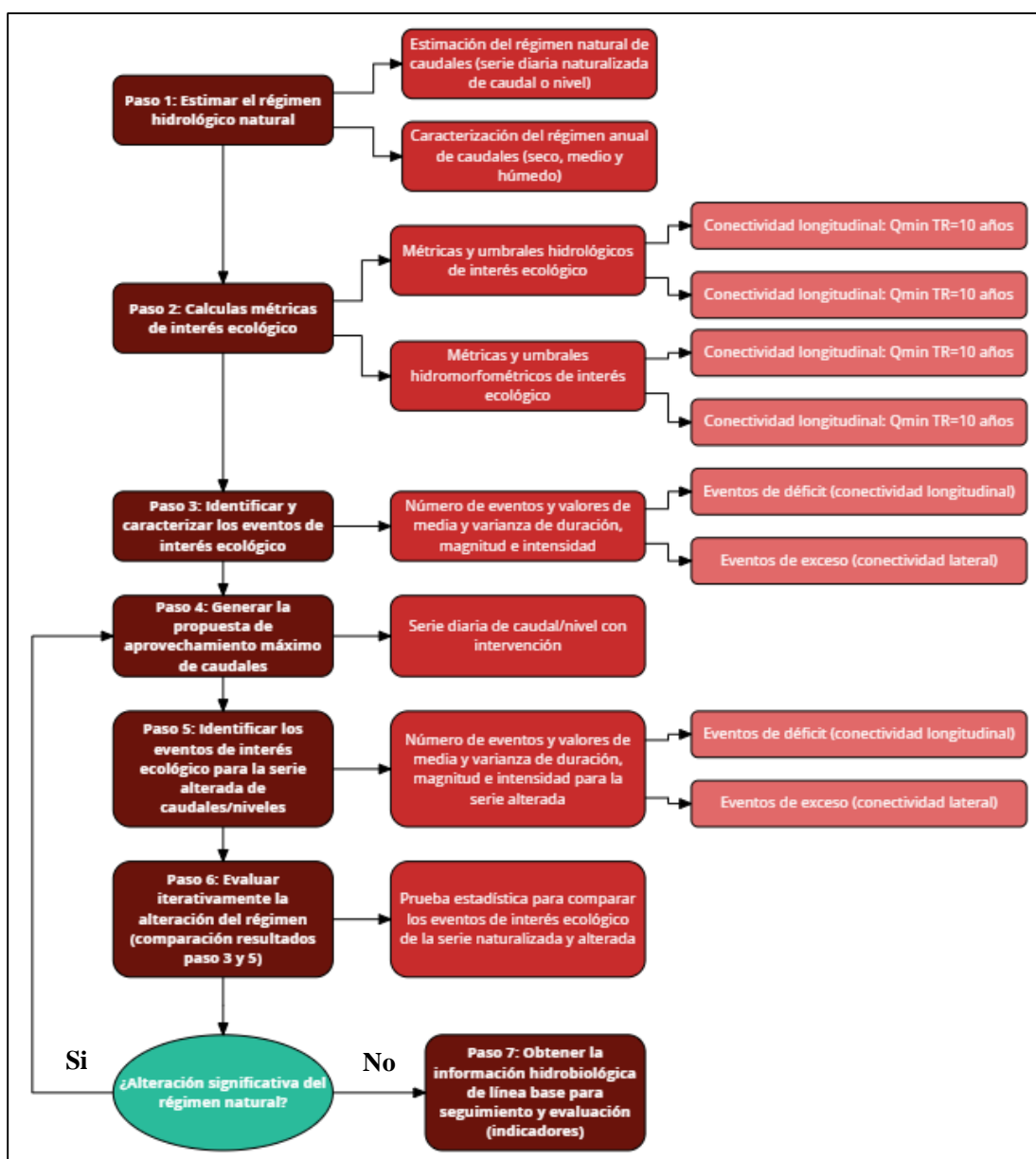


Figura 7. Marco metodológico de la fase 2 del nivel de estimación. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales, MINAMBIENTE 2017.

2.2.4.2.1.3. Fase 3: Evaluación de caudales ambientales considerando los servicios ecosistémicos

- Calidad de agua
- Servicios ecosistémicos
- Problemáticas y conflictos ambientales

Resultado: Escenarios críticos definidos, problemáticas ambientales y conflictos ambientales.

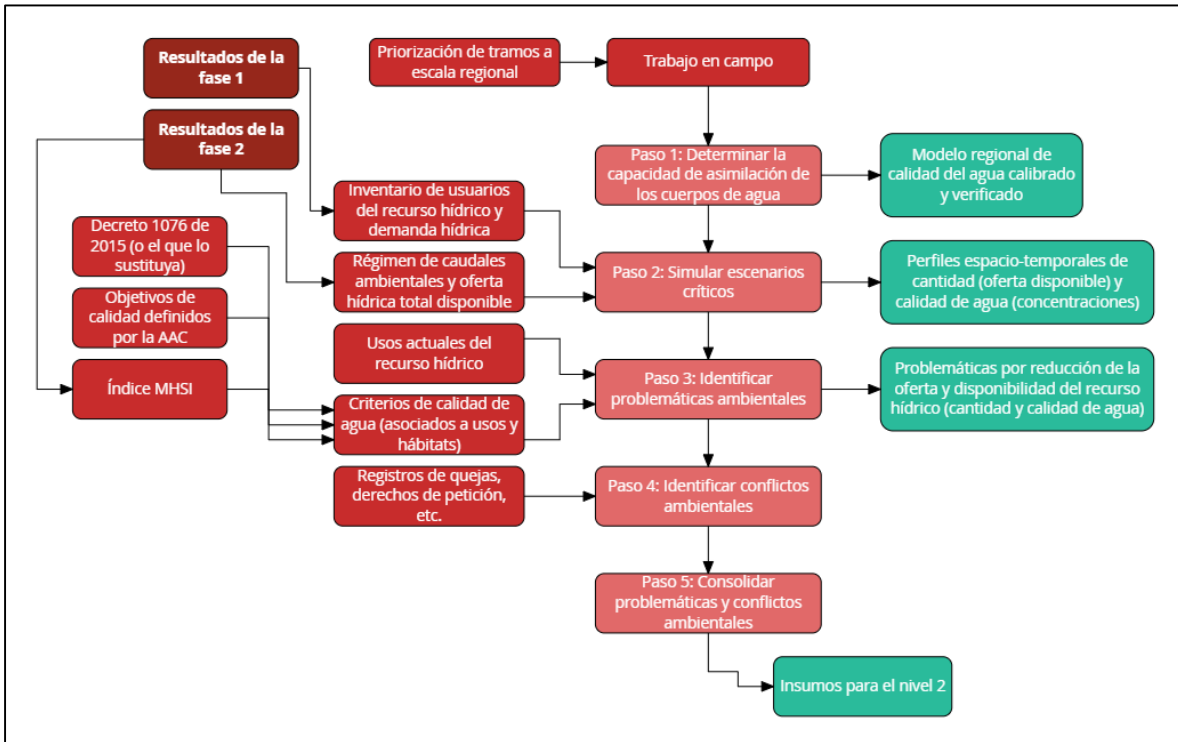


Figura 8. Marco metodológico de la fase 3 del nivel de estimación. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.

2.2.4.2.2. Nivel 2: Gestión

De acuerdo con las condiciones estimadas de régimen y calidad de agua obtenidas en el nivel de estimación, el nivel de gestión tiene como finalidad principal establecer los lineamientos del manejo integral del recurso hídrico convenientes para que se alcancen dichas condiciones de caudal ambiental. Adicionalmente, al tener identificadas las problemáticas y conflictos ambientales, estos se deben consolidar con la priorización de diferentes temáticas en términos de agua, tales como:

- Reglamentación del uso del agua.
- Declaratoria de agotamiento o reservas si la demanda supera la oferta hídrica disponible.

- Reglamentación de los vertimientos si la calidad del cuerpo de agua no es idónea para los usos actuales y potenciales.
- Revisión de permisos ambientales que apliquen cuando la cantidad o calidad del agua en cuanto a una problemática estén asociadas a un usuario en particular.

Complementariamente, con base en la condición ecológica deseada y dentro del marco de la planificación de los recursos naturales renovables, las autoridades ambientales correspondientes deben establecer las medidas de gestión adicionales que se requieran para restaurar, rehabilitar o recuperar el ecosistema de agua dulce. Esto a través de estrategias de seguimiento y monitoreo de caudal ambiental, en términos de cantidad y calidad.

2.3. WEAP (Water Evaluation and Planning System): Modelación de operación la operación del embalse para los escenarios de caudal ambiental

Es una herramienta que tiene como objetivo principal incorporar la asignación del recurso hídrico limitado, la calidad del agua y las políticas para el uso sostenible del agua dentro de la planificación de los recursos hídricos. Consecuentemente tiene tres enfoques:

- 1) Herramienta de pronóstico con la simulación de la demanda, el suministro, los flujos y el almacenamiento de agua y la generación, el tratamiento y la descarga de la contaminación.
- 2) Herramienta de análisis de políticas al evaluar el conjunto de opciones de gestión y desarrollo del agua, teniendo en cuenta los múltiples usos competitivos de los sistemas de agua.
- 3) Herramienta de información al establecer una base de datos sobre la demanda y suministro del recurso.

Esta herramienta puede ser utilizada en sistemas agrícolas y municipales, subcuencas y sistemas de ríos complejos. Esta incluye aplicaciones tales como el análisis de demanda sectorial, la conservación del agua, derechos de agua, priorización de la asignación del agua, modelación de sistemas de agua subterráneos, operaciones de represas, generación de energía hidroeléctrica, demanda de energía, seguimiento de la contaminación, requisitos del ecosistema, análisis de costos, entre otros. Esto a través de la definición de los componentes del sistema, el marco de tiempo, los límites espaciales y la configuración del problema.

3. Capítulo III. Comparación cualitativa de las metodologías holísticas

Con el pasar de los años, se han desarrollado múltiples métodos para la estimación del caudal ambiental debido al aumento en la preocupación por la conservación de los ecosistemas. Los gestores y reguladores del agua requieren de guía para la selección del método más apropiado para la cuantificación del caudal ambiental de acuerdo con el contexto y disponibilidad de información con la que se cuente y, así mismo, para la aplicación de este. Recientemente (Opperman et al., 2018) propusieron un marco de trabajo de tres niveles para la evaluación e implementación de los caudales ambientales.

En función de la información disponible, los recursos asociados al estudio y el nivel de resolución que requiera el mismo, los tres niveles establecidos responden a una jerarquía donde el nivel 1 corresponde al más básico y el nivel 3 al más completo. El primer nivel hace referencia a un análisis bajo métodos holísticos hidrológicos de escritorio basados en información existente, el segundo nivel también trabaja con información existente, pero en conjunto con workshops en los que el trabajo depende del juicio y conocimiento de expertos y el tercer nivel requiere de la recolección de nueva información y de la prueba de hipótesis a través de la generación de modelos por parte de un equipo de profesionales expertos. En la investigación desarrollada, se presenta una comparación cualitativa correspondiente a la estimación de caudales ambientales a través de métodos de nivel 1.

Esta comparación se realiza a través de tres componentes fundamentales: El técnico, el social y el de gestión. Dado que el componente técnico abarca múltiples temáticas, este se dividió en tres elementos; uno hidrológico, uno ecológico y uno de medición del impacto. A continuación, se explican detalladamente cada uno de los componentes y elementos mencionados anteriormente.

3.1. Componente técnico

3.1.1. Subcomponente hidrológico

Dentro del subcomponente hidrológico se consideran dos factores, la definición de la condición natural de flujo, es decir, pre aprovechamiento de caudales y como segundo factor, la caracterización del flujo anual del tramo en estudio en tres tipos que corresponden a flujos altos, flujos estacionales o normales (típicos) y flujos bajos para las dos metodologías objeto de comparación.

3.1.1.1. GMECAC

3.1.1.1.1. Definición de la condición natural de flujo

Esta definición depende de la disponibilidad de información con la que se cuente. De manera que, se presentan dos escenarios posibles. El primero hace referencia a un tramo en el que se tiene la información de interés, es decir, se tienen registros sistemáticos a escala diaria de al menos 10 años y con una cantidad de datos faltantes menor al 10% sobre el total de los datos. En el segundo escenario, se requiere de la caracterización del régimen hidrológico a lo largo de toda la red de drenaje más allá de los tramos instrumentados.

Para ambos escenarios. Se identifica la alteración del régimen de flujo desde el punto de vista de regulación o fragmentación, partiendo de los siguientes 3 criterios como mínimo:

3.1.1.1.1.1. Porcentaje de cuenca controlada

El porcentaje de una cuenca controlada por uno o varios embalses debe ser mayor al 10% de la cuenca vertiente a un tramo de estudio o el volumen útil de uno o varios embalses debe ser mayor que el 10% del volumen del hidrograma de la creciente con periodo de retorno de 10 años.

3.1.1.1.1.2. Grado de regulación (DOR)

Este concepto corresponde a la proporción del volumen de flujo anual de un tramo de río que puede ser almacenado por uno o varios embalses, calculados para todos los tramos de la red de drenaje; adicionalmente el valor de este índice debe ser mayor a 2.

$$DOR_i = \frac{\sum S_i V_e}{Q_i} \geq 2.0 \quad (1)$$

Donde:

S_i : Número de embalses aguas arriba del tramo i .

V_e : Almacenamiento total de cada uno.

Q_i : Volumen de esorrentía media anual del tramo i .

3.1.1.1.3. Índice de fragmentación y de regulación (RFI, RRI)

Por un lado, el índice de fragmentación hace referencia a una medida de la fragmentación del río causada por barreras en la estructura de conectividad de la cuenca o subcuenca. Por otro lado, el índice de regulación proporciona una aproximación al grado de alteración de un río causado por las modificaciones en el régimen natural de flujo inducidas por la operación de presas aguas arriba de este. Para determinar el grado de alteración, Grill et. Al 2015 propusieron una matriz de impacto de las represas (Dam Impact Matriz, DIM) en la que se clasifican dichos índices en cuatro categorías, según los rangos de ocurrencia de cuartiles (por medio de percentiles): Débil 0-25, moderado 25-50, fuerte 50-75 y severo 75-100. De manera que, se considera que el régimen de flujo natural ha sido alterado cuando estos índices son fuertes o severos.

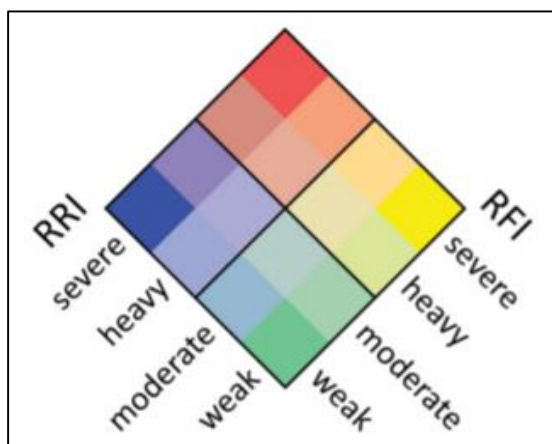


Figura 9. DIM para grado de alteración con RFI y RRI. Fuente: Grill et. al 2015.

3.1.1.1.2. Caracterización del régimen anual de caudales

El flujo se categoriza en tres condiciones hidrológicas que permiten considerar la variabilidad natural del clima: Condición húmeda (flujos altos), condición normal (flujos típicos) y condición seca (flujos bajos). Dicha variabilidad ocurre a dos escalas, una intranual y otra interanual, a través de las cuales se identifica si el régimen de lluvias es monomodal o bimodal. Esto en conjunto con los periodos secos y húmedos resultado de la variabilidad climática se encargan de regular la respuesta hidrológica.

Debido a la alta documentación que se tiene del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación Sur), la clasificación del flujo se hace a partir de este de acuerdo con alguno de los tres siguientes indicadores:

- Índice Oceánico El Niño (ONI)
- Índice Oscilación del Sur (SOI)

- Índice ENOS Multivariado (MEI)

De manera que, comúnmente se asocia el fenómeno de El Niño con la condición seca y el fenómeno de La Niña con la condición húmeda, siendo así la condición normal lo que se considera neutral entre estos dos fenómenos. Para la selección del mejor indicador, se determina cuál de estos tiene mayor correlación con las variables medias mensuales tales como precipitación, caudal, temperatura, entre otras. Una vez clasificados los caudales diarios, se estima el caudal mínimo medio anual para cada mes y condición hidrológica y se comparan con los caudales medio multianuales.

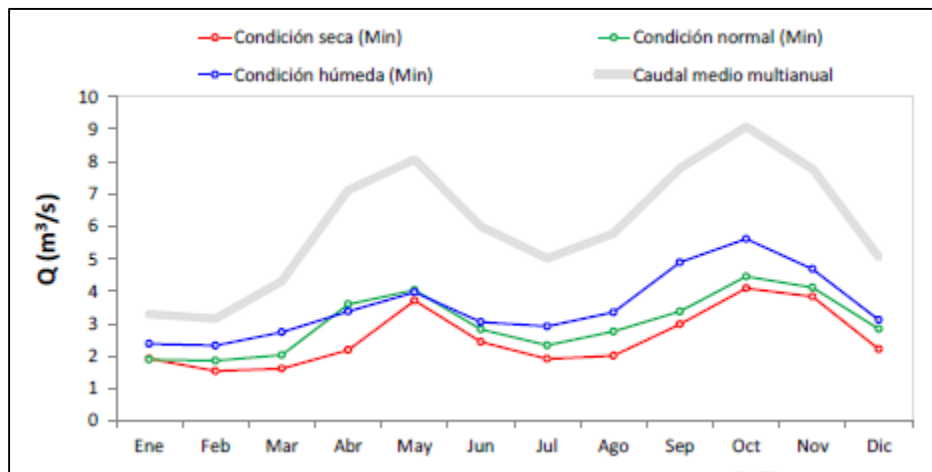


Figura 10. Caudales mínimos para cada condición hidrológica VS caudal medio multianual. Fuente: Guía Metodológica para la estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.

Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento para los caudales máximos representativos para cada mes y condición hidrológica; teniendo en cuenta los siguientes criterios de selección de caudal máximo:

- Condición seca: El caudal máximo corresponde a la media de la serie de caudales máximos para dicha condición.
- Condición normal: El caudal máximo es el mayor valor entre el caudal máximo para un periodo de retorno de 2.33 años (estimado con toda la serie de caudales ajustados a Gumbel o a la función que mejor se ajusten) y la media de la serie de caudales máximos para dicha condición.
- Condición húmeda: El caudal máximo será el mayor valor entre el caudal máximo para un periodo de retorno de 15 años (con toda la serie de caudales) y la media de la serie de caudales máximos para dicha condición.

De esta manera, se obtiene el rango inicial de variación de caudales dentro del cual se debe garantizar el régimen de caudales ambientales que condicionará cualquier aprovechamiento hídrico en un sitio específico de la red de drenaje.

3.1.1.2. ELOHA

3.1.1.2.1. Definición de la condición natural de flujo

En este sentido, ELOHA no ofrece lineamientos en términos de tiempo o alteración para la definición de lo que puede considerarse como natural dentro del tramo o área de estudio.

3.1.1.2.2. Caracterización del régimen anual de caudales

La caracterización hidrológica del tramo fluvial de interés se realiza en relación con los procesos ecológicos relevantes. Dentro de dicha caracterización hidrológica, se tienen en cuenta 4 de los 5 componentes del caudal: La temporalidad, la magnitud, la frecuencia y la duración de los eventos hidrológicos. Una de las maneras más utilizadas para poder identificar la variabilidad de la hidrología del río corresponde a la realización de un diagrama de isopercentiles.

Un diagrama de percentiles hace referencia a la curva que resulta de la relación entre los caudales para una determinada frecuencia de excedencia correspondiente a cada día del año, de manera que, se puede caracterizar la hidrología del río en todo el año. Las frecuencias de excedencia características están definidas de acuerdo con los tipos de flujo establecidos: Flujos altos, flujos estacionales (típicos), flujos bajos, flujo mínimo y flujo medio. Para cada tipo de flujo estas frecuencias de la curva de regulación de caudales son:

- ✓ Flujos altos: Rango percentil Q5 – Q10
- ✓ Flujos estacionales: Rango percentil Q10 – Q75
- ✓ Flujos bajos: Rango percentil Q75 – Q95
- ✓ Flujos mínimos: Rango percentil Q95 – Q99
- ✓ Flujo medio: Q50

Sin embargo, la caracterización principal del flujo está dada por tres de los cinco tipos de flujo mencionados anteriormente. Estos son, flujos altos, flujos estacionales (típicos) y flujos bajos. Para la elaboración del diagrama de percentiles se construye la curva de duración de caudales para cada día del año con toda la serie de caudales con la que se cuente, es decir, que se tendrán 365 curvas de

duración de caudales para la condición natural. Una vez se tienen las curvas, se determinan los caudales correspondientes a las frecuencias de cada tipo de flujo y, así, se caracteriza el río de acuerdo según cada tipo de flujo.

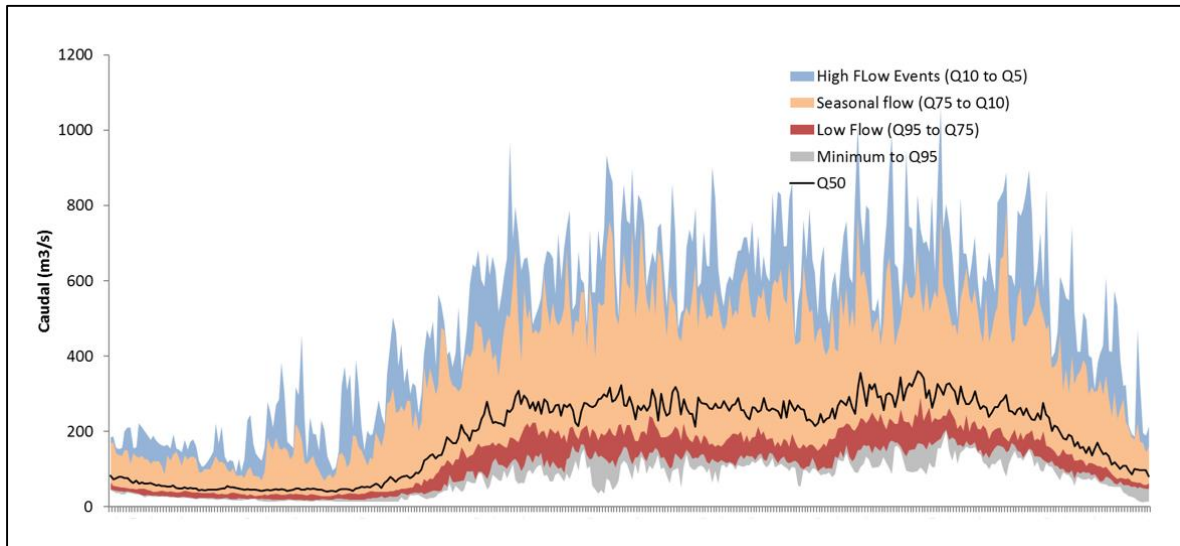


Figura 11. Caracterización hidrológica del flujo de ELOHA a partir de diagramas de isopercentiles.

3.1.2. Subcomponente ecológico

3.1.2.1. GMECAC

En este subcomponente se tiene como fin el establecimiento de métricas hidrológicas e hidromorfométricas para caracterizar los eventos de interés ecológico en la serie natural e intervenida de caudales. Dentro de estas métricas se tienen en cuenta cuatro de los componentes del régimen de caudales ambientales: Magnitud, duración, intensidad y momento. A continuación, se explican las métricas y el proceso de obtención de estas.

3.1.2.1.1. Estimación de métricas

3.1.2.1.1.1. Métricas hidrológicas

Estas buscan la caracterización de los eventos extremos del régimen de caudales, tanto los caudales mínimos como los caudales máximos. Esto se hace para los eventos extremos porque esta dinámica de flujo es más difícil de garantizar respecto a la dinámica normal del río. Consecuentemente, el

ecosistema y sus funciones ecológicas son más vulnerables durante estos eventos, que en la mayoría de los casos ocurren con una muy baja frecuencia.

Para ello, la serie de caudales debe ajustarse a una función de probabilidad que represente de mejor manera el conjunto de datos hidrológicos comprobando esto a través de pruebas de bondad de ajuste. Las métricas se calculan a partir de la siguiente definición:

- Caudales extremos mínimos: Caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años ($Q^{min}_{TR=10 \text{ años}}$).
- Caudales extremos máximos: Caudal máximo con periodo de retorno de 15 años ($Q^{max}_{TR=15 \text{ años}}$).

3.1.2.1.1.2. Métricas hidromorfométricas

Para las métricas hidromorfométricas hay dos elementos a conservar en el segmento de interés, la conectividad longitudinal y la conectividad lateral, por medio de la relación tiempo – caudal y del caudal de banca llena, respectivamente.

1) Conectividad longitudinal

Esta se mide a través de la relación tiempo-caudal (Q_{t-b}) o a partir de la relación de geometría hidráulica para el tiempo de tránsito. Se tiene que cuando el caudal es menor que el caudal Q_{t-b} hay presencia de barreras hidráulicas, las cuales pueden ser permanentes, temporales, naturales o inducidas. Estas barreras restringen el movimiento tanto de aguas arriba hacia aguas abajo como de aguas abajo hacia aguas arriba. Adicionalmente, se generan incrementos significativos del tiempo de residencia en el tramo ante pequeñas disminuciones en el caudal, provocando que el oxígeno se acabe rápidamente ante la llegada de cargas contaminantes considerables.

Para la determinación de Q_{t-b} se propone el diagrama de tiempo de residencia versus el caudal para cada tramo. Este representa el tiempo medio de tránsito (t_m) que un soluto emplea para moverse desde el extremo aguas arriba hasta el extremo aguas abajo. Para ello existen dos alternativas:

- a) En ausencia de información hidráulica detallada:

- Para ríos de alta pendiente:

- ❖ Propuesta de Jiménez y Wolf

$$t^*_{*m} = 1.4247q^*{}^{-0.507} \quad (2)$$

$$q^* = \frac{Q}{W_B \sqrt{gHs^3}} \quad (3)$$

$$t^*_{*m} = \frac{t_m \sqrt{gHs}}{L_R} \quad (4)$$

Donde:

Q: Caudal.

W_B : Ancho medio de la banca llena en el tramo.

Hs: Altura promedio de los escalones o caídas características del tramo.

L_R : Longitud del tramo.

- ❖ Propuesta de Comiti

$$t^*_{*m} = 1.0870q^*{}^{-0.66} \quad (5)$$

$$q^* = \frac{Q}{W \sqrt{gD_{84}^3}} \quad (6)$$

$$t^*_{*m} = \frac{t_m \sqrt{gD_{84}}}{L_R} \quad (7)$$

Donde:

Q: Caudal.

W: Ancho de flujo.

D_{84} : Diámetro característico del sedimento correspondiente al 84% de la curva granulométrica.

L_R : Longitud del tramo.

- Para ríos de baja pendiente (Limitados por capacidad):

Se recomienda el modelo MDLC (Multilinear Discrete Lag-Cascade). Este establece que para el transporta del caudal a lo largo de un tramo se combina el tránsito a lo largo de n embalses lineales con un coeficiente de almacenamiento (k), a través de un cana lineal caracterizado por un parámetro de retraso advectivo (τ)

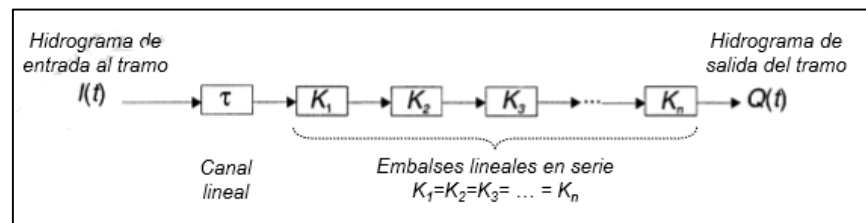


Figura 12. Esquema de modelo MDLC. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBINTE 2017.

Ecuaciones:

$$m = \frac{C_o}{V_m} \quad (8)$$

Donde:

C_o : Celeridad de la onda.

V_m : Velocidad media del flujo

$$k = \frac{3}{2m} (1 + (m - 1)Fr^2) \left(\frac{Y_o}{SL_R} \right) \left(\frac{L_R}{mV_m} \right) \quad (9)$$

Donde:

Fr: Número de Froude.

Y_o : Profundidad normal.

S : Pendiente del tramo.

L_R : Longitud del tramo.

$$n = \frac{\left(\frac{4m}{9}\right) (1 - (m - 1)^2 Fr^2)}{(1 - (m - 1) Fr^2) \left(\frac{Y_o}{SL_R}\right)} \quad (10)$$

$$\tau = \left(\frac{L_R}{mV_m}\right) \left(1 - \frac{\left(\frac{2}{3}\right) (1 - (m - 1)^2 Fr^2)}{(1 - (m - 1) Fr^2) \left(\frac{Y_o}{SL_R}\right)}\right) \quad (11)$$

$$t_m = m(nk + \tau) \quad (12)$$

Donde:

t_m : Tiempo de tránsito.

b) Con información hidráulica detallada:

Al tener este tipo de información, se puede desarrollar un modelo hidráulico a escala de tramo, para simular diferentes condiciones y evaluar el tiempo de tránsito. Así mismo, se pueden realizar experimentos con trazadores para mayor detalle. Una vez se tiene el modelo, se realiza el diagrama de tiempo en función del caudal y se determina el caudal para la relación tiempo caudal del tramo siguiendo el siguiente proceso:

- Normalizar ejes respecto al valor máximo.
- Calcular las pendientes $\frac{\Delta t_m}{\Delta Q}$
- Identificar el punto de quiebre del diagrama, el cual corresponde a donde la pendiente es igual a menos 1. Dicho punto corresponde al caudal Q_{t-b} .

Posteriormente se regionaliza dicho caudal, repitiendo el proceso para todos los tramos; obteniendo así un modelo general para cada tipo de río (alta pendiente y baja pendiente).

2) Conectividad lateral

Esta se evalúa por medio del caudal de banca llena pues esta es una variable indicadora asociada con:

- Maximización del transporte de sedimentos a lo largo de la corriente.
- Ocurrencia de eventos de desbordamiento de agua y sedimento hacia planicies de inundación o ecosistemas de transición (como humedales y rondas hídricas).
- Eventos que favorecen la conexión entre cuerpo de agua lóticos y lénticos.

Para la determinación del caudal de banca llena, se requiere de información hidrométrica primaria y secundaria (modelos hidráulicos, secciones transversales, propiedades hidráulicas). Para ello existen dos alternativas de cálculo:

- c) Maximización de la potencia específica de la corriente (ω)

$$\omega = \gamma Q S_o W \quad (13)$$

Donde:

γ : Peso específico del agua.

Q : Caudal que fluye.

S_o : Pendiente media del segmento.

W : Ancho superficial de flujo.

- d) Mínimo local de la relación ancho-profundidad:

Esta corresponde a la propuesta de Radecki-Pawlik (2002) en la que se sugiere identificar la condición de banca llena cuando la relación ancho-profundidad (W/H) alcanza un mínimo local (siguiendo el mismo criterio de la pendiente para determinar dicho punto de quiebre).

Cabe aclarar que para ambas alternativas se deben incluir las siguientes etapas:

- (1) Delimitación del área de la cuenca que drena.

- (2) Modelo hidráulico calibrado: Simulación de condiciones hidráulicas en cada tramo o con secciones transversales para simular a través de modelos de flujo uniforme, por ejemplo.
- (3) Estado de banca llena: Las métricas, ya sea la potencia específica de la corriente o la relación ancho-profundidad, se deben estimar para condiciones de flujo diferentes; teniendo en cuenta que estas se deben verificar con observaciones de campo.
- (4) Propiedades de banca llena: Determinación del ancho, profundidad y caudal de banca llena a través de modelos hidráulicos (valor promedio en el tramo) o secciones transversales (valor singular en el tramo)

Una vez se han caracterizado las métricas de conectividad longitudinal y lateral para el tramo donde hay disponibilidad de información, estas se calculan en aquellos tramos que no cuentan con información hidráulica extendiendo las métricas conocidas a nivel regional a través de modelos. Para ello se utilizan relaciones de geometría-hidráulica como el ancho de banca llena en función del área de la cuenca, de acuerdo con el tipo morfológico del río. Adicionalmente, se debe considerar que como el ancho y la profundidad de banca llena no representan la variabilidad de las propiedades hidráulicas para flujos diferentes al caudal de banca llena. Consecuentemente, se plantea el uso de relaciones adimensionales, como las mostradas a continuación:

$$W^* = \frac{W}{W_B} = a_1 \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{b_1} \quad (14)$$

$$H^* = \frac{H}{H_B} = a_2 \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^{b_2} \quad (15)$$

$$Q^* = \frac{Q}{Q_B} \quad (16)$$

Donde:

W : Ancho asociado a cualquier caudal Q .

H : Profundidad asociada a cualquier caudal Q .

a_1, a_2, b_1, b_2 : Parámetros adimensionales de la sección.

Q_B : Caudal de banca llena.

Q : Caudal circulante por el tramo,

W_B : Ancho de banca llena.

H_B : Profundidad de banca llena.

3.1.2.1.2. Eventos de interés ecológico

La identificación de los eventos de interés corresponde a los eventos extremos máximos y mínimos, es decir, a aquellos eventos en los que el caudal es mayor al caudal máximo con periodo de retorno de 15 años o mayor al caudal de relación tiempo – caudal y a los eventos para los cuales el caudal es menor que el caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años o menor al caudal de banca llena. Dichos eventos se miden en términos de magnitud (D), duración (T) e intensidad (I), donde:

$$D = \sum_{i=t_o}^{j=t_f} (q_f - q_{admin}) \quad (17)$$

$$T = t_f - t_o \quad (18)$$

$$I = \frac{D}{T} \quad (19)$$

Donde:

D : Magnitud.

q_f : Caudal del evento de interés ecológico.

q_{admin} : Caudal correspondiente a la métrica evaluada.

T : Duración del evento.

t_o : Tiempo inicial del evento.

t_f : Tiempo final del evento.

I : Intensidad del evento.

3.1.2.2. ELOHA

3.1.2.2.1. Estimación de métricas

Una vez se tiene caracterizada la hidrología de flujo del tramo, se identifican los procesos ecológicos asociados a dichos procesos hidrológicos. De manera que, se lleva a cabo la creación de una base de datos ecológica en la que se liga el cambio en el proceso biológico al correspondiente proceso hidrológico; teniendo en consideración el tipo de río, el tipo de régimen, el tipo de proceso biológico, la duración del proceso hidrológico, el umbral de alteración que indica alerta, el umbral de alteración crítico, así como la función del componente biológico que está siendo alterado. Dentro de los procesos biológicos a considerar se puede encontrar la migración de peces, la reproducción de peces, el esparcimiento de semillas de vegetación, entre otros. Todas estas relaciones se determinan de acuerdo con la información disponible y con base en el conocimiento de expertos, así como, con la revisión de bibliografía relacionada.

Posteriormente, se introduce el concepto de “Ecochange” que se puede definir como el cambio relativo entre los caudales para las frecuencias de excedencia características de cada tipo de flujo para la condición natural y la condición alterada (después de la implementación de la propuesta de aprovechamiento de caudales), es decir, el cambio entre las curvas de duración de caudales en condición natural y en condición alterada. Dependiendo de si el cambio es negativo o positivo, esto es, si el proceso biológico disminuyó o aumentó respecto a la línea base, se le denomina “Ecodéficit” o “Ecoexceso”, respectivamente.

3.1.2.2.2. Eventos de interés ecológico

El principio de semáforo ecológico explicado anteriormente, funciona como un sistema de priorización de impactos sobre el ecosistema. En consecuencia, los eventos de interés corresponden a aquellos que tienen mayor urgencia de ser atendidos de acuerdo con la priorización realizada según el grado de alteración sobre el ecosistema.

3.1.3. Subcomponente de medición del impacto

En este se analizan dos factores, en primer lugar, la propuesta de aprovechamiento de caudales y, en segundo lugar, el criterio de aceptación del impacto de acuerdo con la propuesta establecida en relación con el ecosistema.

3.1.3.1. GMECAC

3.1.3.1.1. Propuesta de aprovechamiento de caudales

Dentro de esta metodología se plantea que la propuesta de aprovechamiento de caudales puede estimarse como un porcentaje del caudal medio mensual; garantizando que el caudal aguas abajo del aprovechamiento satisface el caudal mínimo caracterizado inicialmente. Esto es:

$$Q^*_{i,j} = \begin{cases} Q_{i,j} - q_j & ; \quad Si \quad Q_{i,j} - q_j > Q^j_{mínimo} \\ Q^j_{mínimo} & ; \quad Si \quad Q_{i,j} - q_j < Q^j_{mínimo} \end{cases} \quad (20)$$

Donde:

$Q^*_{i,j}$: Caudal aguas abajo del aprovechamiento.

$Q_{i,j}$: Caudal en condición natural.

q_j : Caudal aprovechado.

En cuanto a la serie de caudales alterada (resultado del aprovechamiento de caudales establecido), se realiza nuevamente el proceso de identificación y caracterización de los eventos de interés ecológico.

3.1.3.1.2. Criterio de aceptación del impacto

Para la determinación del impacto aceptable después de la implementación de la propuesta de aprovechamiento de caudales sobre el correspondiente río, se realiza un proceso iterativo de comparación entre los caudales en a condición natural y los caudales aguas abajo, resultado de la modificación. Esta comparación se realiza a través de la aplicación de pruebas estadísticas para todos los eventos y componentes de caudal ambiental para el rango intercuartil Q25 – Q75 mensual; una de las pruebas recomendadas corresponde a la prueba t, sin embargo, esta sólo resulta conveniente ante una muestra de datos homogénea y la información hidrológica usualmente no tiene ese comportamiento, de manera que, alternativamente pueden ser usadas otras pruebas como la prueba de Spearman o Kendall. En este proceso iterativo, se evalúan tres métricas relacionadas con el caudal ambiental, su magnitud, su duración y su intensidad; verificando que su distribución no sea significativamente diferente para los dos escenarios contemplados.

Al realizar este proceso iterativo, se obtiene como resultado el máximo caudal aprovechable que permita mantener las condiciones del ecosistema aguas abajo. Una vez definido dicho caudal, se prosigue con la clasificación de la serie de caudales aguas abajo en los tres periodos hidrológicos ya mencionados (seco o bajo, normal o típico y húmedo o alto). Posteriormente, para cada una de las

condiciones hidrológicas se compara la serie de caudales aguas abajo con la serie de caudales mínimos aguas abajo y la serie de caudales máximos aguas abajo, de manera que, el régimen de caudal ambiental resulta siendo el área entre el caudal aguas abajo y el caudal mínimo aguas abajo para cada condición hidrológica, y el caudal aprovechable se define como el área entre el caudal máximo aguas abajo y el caudal aguas abajo de la condición hidrológica, como se muestra a continuación:

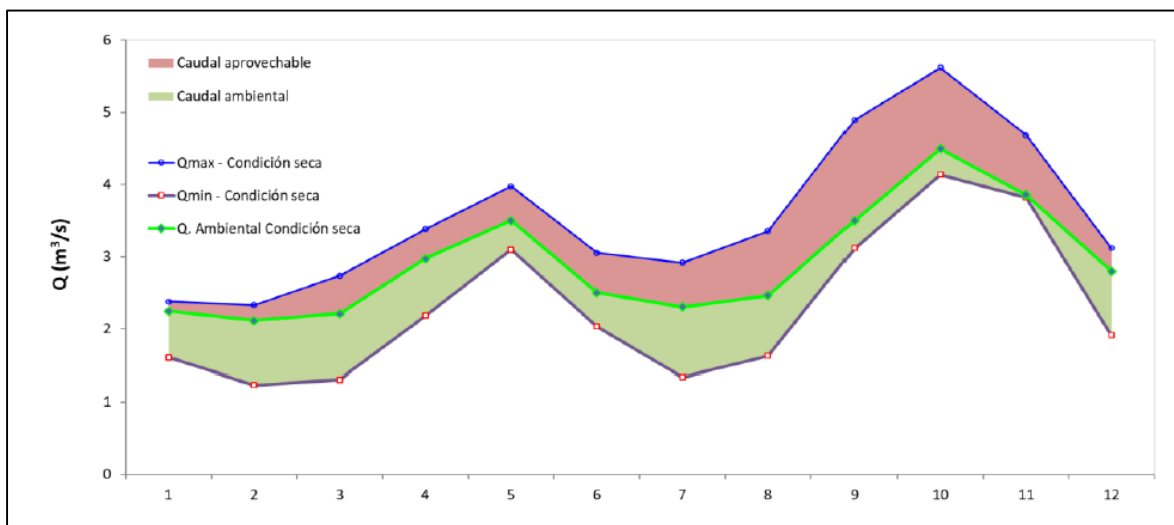


Figura 13. Caudal ambiental y aprovechable para la condición hidrológica seca de un punto en la red de drenaje. Fuente: Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia, MINAMBIENTE 2017.

3.1.3.2. ELOHA

3.1.3.2.1. Propuesta de aprovechamiento de caudales

La metodología no propone una guía para el desarrollo de la propuesta, esta tarea queda bajo el criterio del operador del proyecto para ser evaluada posteriormente de acuerdo con la magnitud de la modificación del régimen de caudales que esta genere.

3.1.3.2.2. Criterios de aceptación del impacto

Se establece una escala de grado de alteración para los índices del ecochange, a partir del principio de funcionamiento de un semáforo. De manera que, dependiendo del valor del índice, se le asigna un color que indica la magnitud de la alteración y, así mismo, la prioridad de la misma. La escala se presenta a continuación:

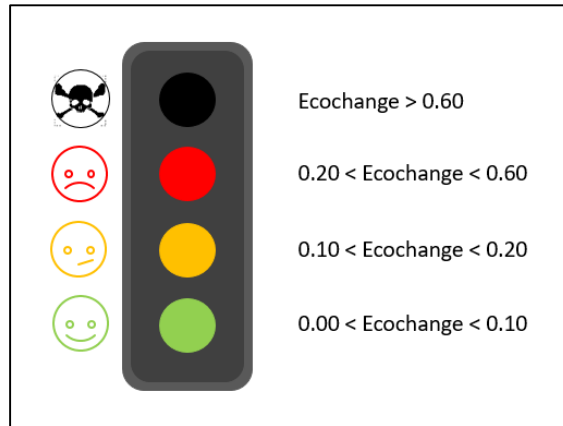


Figura 14. Escala de grado de alteración a partir del ecochange tipo semáforo. Fuente: Propia.

3.2. Componente social

Este es un elemento que no se encuentra contemplado dentro de la metodología colombiana, más allá de una interacción con la comunidad para la identificación de los problemas y conflictos resultado de la implementación del régimen de caudal ambiental. A diferencia de esta, ELOHA proporciona una base científica para una discusión pública alrededor de los diferentes stakeholders interesados en el recurso hídrico. Con ello, se promueve una negociación para la definición de las condiciones ecológicas aceptables y los objetivos de caudal ambiental a través del grado permisible de alteración del flujo.

De esta manera, es posible tener en consideración los valores, tanto ambientales como sociales, apreciados por todos aquellos interesados y beneficiados por la cuenca. Todo esto se lleva a cabo de un proceso que se encuentra dividido en tres fases fundamentales: Determinación de las condiciones ecológicas aceptables, desarrollo de los objetivos de caudal ambiental e implementación de la gestión de caudal ambiental. Por otro lado, así como es posible la identificación de los eventos ecológicos relevantes para cada tipo de flujo para cada momento del año, así mismo puede desarrollarse el mismo procedimiento para la generación de una base de datos de los procesos sociales que ocurren dentro del río y de los cuales la comunidad depende.

3.3. Componente de gestión

3.3.1. GMECAC

3.3.1.1. Seguimiento

Se propone que el seguimiento ante la implementación del régimen de caudal ambiental se realice mediante el Índice de Idoneidad de Hábitat con análisis Multiespecies (MHSI). Este permite reconocer los requerimientos de hábitat de la ictiofauna. Con este se pretende dar recomendaciones para el manejo de variables ambientales necesarias para mantener cierto rango de condición de las poblaciones; para ello se requiere de información de abundancia y biomasa de especies, hidráulica, fisicoquímica, y microbiológica de los puntos de monitoreo.

Para la determinación del MHSI se debe seguir el procedimiento descrito a continuación:

- 1) Agrupar los sitios de monitoreo según la unidad morfológica del tramo, teniendo en cuenta que cada grupo debe tener el conjunto de especies encontradas con su abundancia (N) y biomasa (Br).
- 2) Estimar el factor de importancia (I) para cada especie de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_i = w_1 P_{a,i} + w_2 P_{b,i} \quad (21)$$

Donde:

$$P_{a,i} = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (22)$$

$$P_{b,i} = \frac{Br_i}{\sum Br_i} \quad (23)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (24)$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{a}{b} \quad (25)$$

$w_1; w_2$: Pesos relativos de la abundancia y la biomasa respectivamente.

$P_{a,i}; P_{b,i}$: Abundancia y biomasa normalizadas de la especie i .

$a; b$: Coordenadas del centroide en el campo adimensional Pa y Pb

$$a = \frac{\sum P_{a,i} N_i}{\sum N_i} \quad (26)$$

$$b = \frac{\sum P_{b,i} Br_i}{\sum Br_i} \quad (27)$$

- 3) Construir la curva de importancias acumuladas o curva de rarefacción con la organización de las importancias descendentemente.
- 4) Identificar las especies dominantes dentro de la zona de estudio, las cuales corresponden a las especies ubicadas antes del punto de quiebre de la curva.
- 5) Estimar el MHSI para cada factor de hábitat según la expresión a continuación:

$$MHSI_k = \sum_{i=1}^I \frac{n_{ki}}{IN_i} \quad (28)$$

$$N_i = \sum_{k=1}^K n_{ki} \quad (29)$$

Donde:

$MHSI_k$: Índice de idoneidad de hábitat para el k -ésimo gradiente del factor de hábitat analizado.

i : i -ésima especie dominante.

I : Abundancia total de especies dominantes.

n_{ki} : Abundancia de la i -ésima especie del k -ésimo gradiente.

N_i : Abundancia de la i -ésima especie en todos los factores del factor de hábitat analizado.

3.3.1.2. Evaluación

En cuanto al proceso denominado evaluación se establece que esta se haga a través del concepto de calidad de agua con la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua por medio del factor de asimilación; el cual permite establecer la respuesta del sistema fluvial ante perturbaciones inducidas aguas arriba (cargas contaminantes). Este está asociado con la influencia causada por la variabilidad espacial y temporal del régimen de caudales, la estructura morfológica de la red de drenaje y demás variables ambientales.

Se plantea entonces seguir el procedimiento que sigue:

- 1) Determinar la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua, así:

$$c = \frac{1}{a}w \quad (30)$$

Donde:

c: Concentración al final del tramo.

a: Factor de asimilación.

w: Carga contaminante al inicio del tramo.

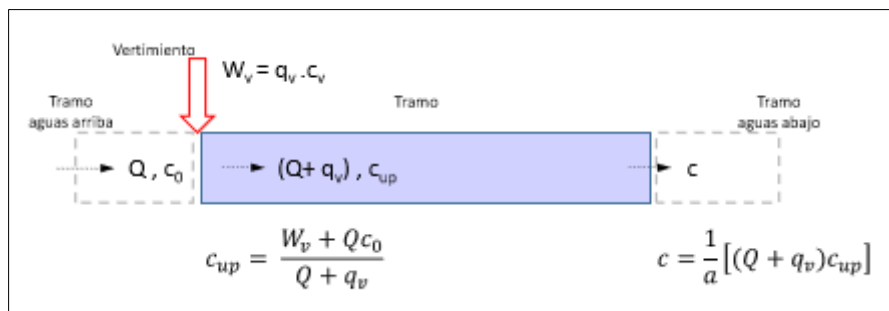


Figura 15. Esquema de la aplicación del factor de asimilación a escala de tramo. Fuente: Minambiente-CORNARE 2015.

- 2) Desarrollar modelo de calidad de agua, teniendo en consideración que este debe permitir la representación de los procesos y de las transformaciones que ocurran en los cuerpos de agua tras la implementación del régimen de caudal ambiental a nivel de tramo, priorizando los tramos con cargas contaminantes más significativas. Posteriormente, el modelo se extiende a nivel regional para poder simular los perfiles de calidad de agua a lo largo del área de estudio.

Cabe resaltar que para los sitios sin monitoreo se deben tomar estaciones de frontera que recojan los efectos acumulativos.

- 3) Simular escenarios críticos. En este paso se pretende realizar la identificación de las condiciones críticas ante las cuales se presenten problemáticas asociadas con la disponibilidad del recurso hídrico o la calidad del mismo, de manera que, se tengan claros los requisitos necesarios para la planificación y administración del recurso.

En primer lugar, se requiere de los objetivos de calidad de agua, en caso de no contar con dicha información estos deben ser definidos según los usos predominantes del tramo en estudio mediante la información secundaria referente a la distribución espacial de los usuarios identificados en dicho tramo. En segundo lugar, dichos usos deben ser categorizados de acuerdo con los criterios establecidos en el decreto 1076 de 2015 (consumo humano y doméstico, preservación de fauna y flora, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura y acuicultura, navegación y transporte acuático).

Posteriormente, se establecen los escenarios críticos. Un escenario crítico corresponde a aquel en el que se ha extraído el aprovechamiento máximo de caudales para la condición más crítica de un periodo hidrológico normal (típico) y seco (condiciones climáticas extremas) para cargas contaminantes máximas. Consecuentemente, se obtienen dos resultados de este proceso, un perfil de calidad de agua y un perfil de oferta de agua disponible a lo largo de cada tramo, de modo que, sea posible verificar si se presentan problemáticas para el escenario de caudal ambiental más crítico.

- 4) Identificar problemáticas ambientales. Estas hacen referencia a los cambios operados en el medio ambiente o en alguno de sus componentes por la acción humana, es decir, impactos sobre el entorno físico-biótico.
- 5) Identificar conflictos ambientales. Estos se relacionan con los conflictos sociales por la disputa del recurso hídrico en cuanto a aspectos ambientales.
- 6) Consolidar problemáticas y conflictos ambientales, de manera que, sea posible la identificación e implementación de medidas para la mitigación y corrección de las mismas.

3.3.2. ELOHA

La metodología enfatiza en la importancia de un continuo monitoreo de los resultados obtenidos sobre la cuenca con la implementación del régimen de caudal ambiental adoptado, de acuerdo con los

objetivos a ser cumplidos. Sobre esta base, es posible identificar el porcentaje de las metas que han sido cumplidas, la eficiencia de las estrategias ejecutadas y la necesidad del establecimiento e implementación de estrategias alternas que permitan el logro de los objetivos que aún no se han cumplido. No obstante, la metodología no establece los procesos e indicadores oportunos para evaluar el desempeño de las medidas implementadas.

4. Capítulo IV. Requerimientos de información

CONCEPTO		ELOHA	GMECAC
Componente técnico	Caracterización hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> - Discretización topológica de la red de drenaje. - Inventario de estaciones hidrológicas y geolocalización de estas. - Registros históricos de caudal, precipitación y temperatura de la zona de estudio. - Inventario y georreferenciación de la infraestructura hidráulica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo de Elevación Digital de la zona de estudio. - Discretización topológica de la red de drenaje. - Inventario de estaciones hidrológicas y geolocalización de estas. - Registros históricos de caudal, precipitación y temperatura de la zona de estudio. - Inventario y georreferenciación de la infraestructura hidráulica. - Registros históricos de indicadores relacionados con el fenómeno de El Niño.
	Caracterización ecológica	<ul style="list-style-type: none"> - Registros de las relaciones ecológicas de la zona de estudio en función de la hidrología. - Series de tiempo de caudal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Series de tiempo de caudal. - Información hidráulica de la zona de estudio (sección transversal o modelo hidráulico)
	Medición del impacto	<ul style="list-style-type: none"> - Escenario de alteración del flujo como por ejemplo la regla de operación del embalse puesto que la metodología está enfocada a la determinación del caudal ambiental ante la presencia de una estructura que altere el flujo natural del río. 	<ul style="list-style-type: none"> - Escenario de alteración del flujo como por ejemplo la regla de operación del embalse puesto que la metodología está enfocada a la determinación del caudal ambiental ante la presencia de una estructura que altere el flujo natural del río.
Componente social		<ul style="list-style-type: none"> - Registros de las relaciones sociales de la zona de estudio en función de la hidrología. 	No se especifica
Componente de gestión	Monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Información de especies animales y vegetales para seguimiento en cada tramo. - Índices de calidad de vida pre y pos proyecto. - Encuestas de opinión y satisfacción sobre la economía de la zona de estudio pre y pos proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información hidrobiológica para la identificación de ictiofauna en términos de abundancia y biomasa para cada tramo.
	Evaluación	No se especifica	<ul style="list-style-type: none"> - Registros históricos de la caracterización de vertimientos puntuales sobre los cuerpos de agua. - Información de calidad de agua para la caracterización estacional de la calidad del agua, variabilidad temporal de cargas contaminantes y la caracterización de propiedades del cuerpo de agua para asimilar contaminación. - Inventario de usos y usuarios, con el número de concesiones por uso y la correspondiente demanda acumulada por uso para cada tramo. Adicionalmente, para cada usuario se requieren los siguientes datos

Tabla 1. Requerimientos de información para las metodologías. Fuente: Propia.

5. Capítulo V. Caso de estudio

5.1. Descripción del caso de estudio

5.1.1. Descripción general de la cuenca

La cuenca del Alto Magdalena corresponde al sector de la cuenca del río Magdalena – Cauca comprendida desde su nacimiento en la Laguna de la Magdalena al sur del Páramo de las Papas en el departamento del Huila a una altitud de 3.685 msnm hasta el municipio de Honda a una altitud de 229 msnm (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001). Con un área total de drenaje de 44.526 km² (IDEAM, 2013) y una extensión de 565 km atravesando ciudades y municipios tales como Coyaima, Ambalema, Flandes, Espinal y Honda en el departamento del Tolima; Aipe, Gigante, Yaguará, Garzón, Campoalegre y Neiva en el departamento del Huila; y Guaduas y Ricaurte en el departamento de Cundinamarca (CORMAGDALENA, 2013a).

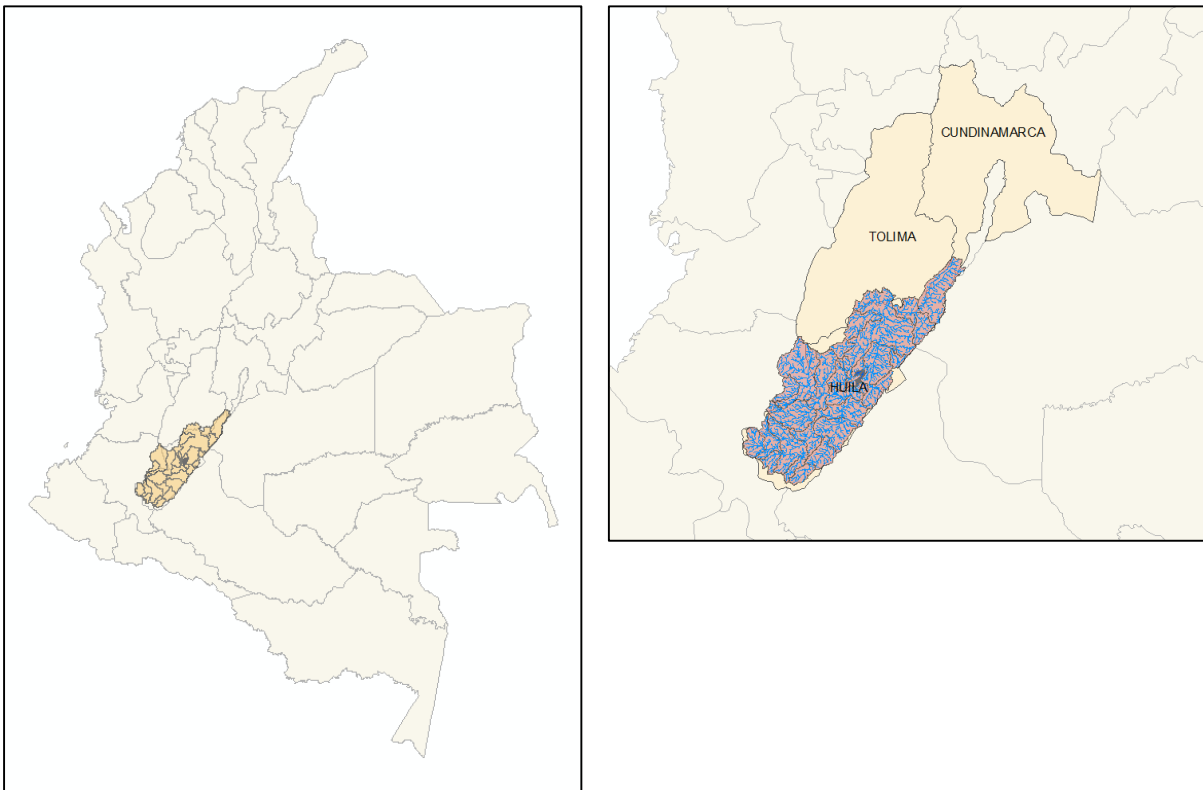


Figura 16. Localización de la cuenca del Alto Magdalena. Fuente: Propia.

De acuerdo con la zonificación hidrográfica de Colombia, esta se encuentra conformada por un total de 23 subzonas hidrográficas, las cuales corresponden a subcuencas de tercer orden (IDEAM, 2013), como se muestra a continuación.

No.	Subzona hidrográfica	Área (km ²)
1	Río Alto Magdalena	2506
2	Río Timaná y otros directos al Magdalena	382
3	Río Suaza	1422
4	Ríos Directos al Magdalena (ml)	1544
5	Río Páez	5203
6	Ríos Directos al Magdalena (md)	1150
7	Río Yaguará y Río Iquira	937
8	El Juncal y otros ríos directos al Magdalena	452
9	Río Neiva	1071
10	Río Fortalecillas y otros	2159
11	Río Bache	1169
12	Río Aipe, Río Chenche y otro directos al Magdalena	2607
13	Río Cabrera	2806
14	Directos al Magdalena entre ríos Cabrera y Sumapaz (md)	1036
15	Río Prado	1676
16	Ríos Luisa y otros directos al Magdalena	1076
17	Río Sumapaz	3048
18	Río Bogotá	5933
19	Río Coello	1832
20	Río Opía	553
21	Río Seco y otros directos al Magdalena	1773
22	Río Totaré	1437
23	Río Lagunilla y otros directos al Magdalena	2754

Tabla 2. Subzonas hidrográficas del Alto Magdalena. Fuente: Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas, IDEAM 2013.

5.1.2. Caracterización física de la cuenca

En el inicio de la corriente del río se presentan pendientes muy altas y flujo muy turbulentos, cruzando la zona arqueológica de San Agustín. Posteriormente, a una altitud de 725 msnm se forma un cañón en el alto de Pericongo entre los municipios de Timaná y Pitalito en el departamento del Huila. A partir de este punto, se considera como un río de llanura (CORMAGDALENA, 2013b).

Posteriormente, a una altitud de 472 msnm después de 200 km de recorrido se encuentra la capital del Huila, Neiva; correspondiente a un piso término cálido. Luego, más allá de los 420 km de recorrido, está localizado el municipio de Girardot; que marca el límite entre los departamentos de Cundinamarca y Tolima. Estos dos municipios ribereños representan la mayor significancia económica y demográfica de la cuenca. Adicionalmente, en el recorrido entre Neiva y Girardot, el río Magdalena recibe importantes afluencias por parte de río Saldaña y el río Bogotá (CORMAGDALENA, 2013b).

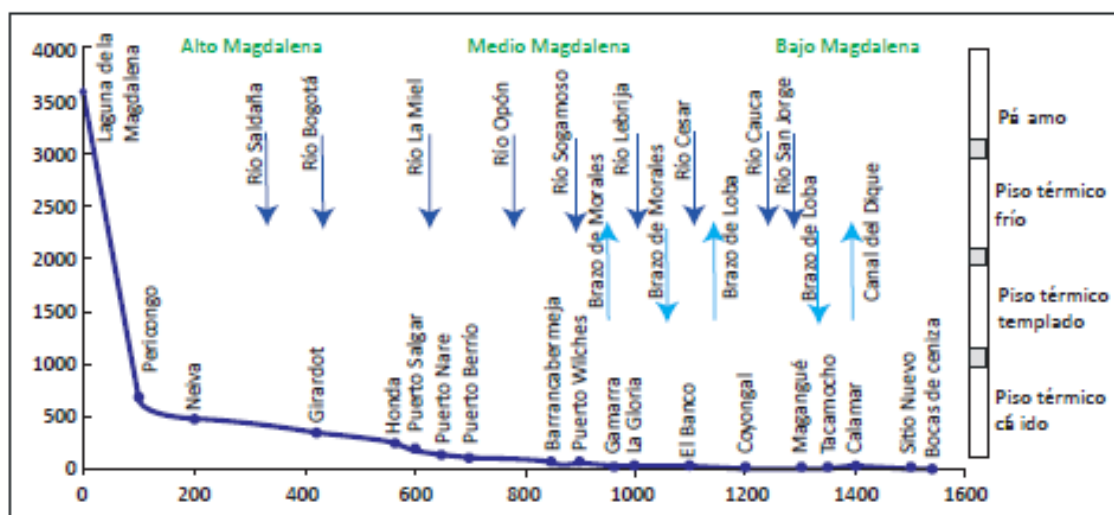


Figura 17. Perfil esquemático del río Magdalena. Fuente: Caracterización física, demográfica, social y económica de los municipios ribereños de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena, CORMAGDALENA 2013.

Por otro lado, desde un punto de vista geológico, la cuenca se encuentra delimitada por las fallas inversas de alto ángulo. En el margen occidental la delimita el Sistema de Fallas de Chusma y Calarma y por el margen oriental el Sistema de Fallas de Garzón – Suaza. Consecuentemente, es considerada como una de las zonas más inestables de río Magdalena (CORMAGDALENA, 2013b).

Desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Yaguará, se encuentra conformada por cuencas entre segundo y cuarto orden que presentan pendientes pseudo-ovaladas con un valor promedio de 125m/km. Una vez se llega a la represa de Betania cambian las condiciones naturales de drenaje del río, sin embargo, esto permite manejar en cierta medida los caudales pico. Aguas abajo de este punto, existen 8 afluencias principales correspondientes a los ríos Neiva, Bache, Villavieja, Aipe, Pata, Cabrera, Saldaña y Bogotá. Adicionalmente, dentro de los cuerpos de aguas más representativos para la cuenca se encuentra: Lagunas La Magdalena, El Juncal, Fúquene y Suesca y los embalses de Betania, Prado, Muña, Tominé, Sisga y Neusa (CORMAGDALENA, 2013b).

A lo largo de la cuenca se encuentran diferentes tipos de clima, sin embargo, de manera predominante está el clima cálido seco en el valle y medio húmedo en las elevaciones medias. En términos de humedad, se ha identificado que la humedad relativa a aumentando de sur a norte presentando valores característicos en el sur de 71%, en el centro de 69% y en el norte de 66% (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001).

5.1.3. Caracterización hidrológica de la cuenca

La cuenca del Alto Magdalena se caracteriza por tener un régimen de precipitación bimodal. En los meses de enero y febrero se presenta el primer periodo seco y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre ocurre el segundo. Así mismo, durante los meses de marzo, abril y mayo se tiene la primera temporada lluviosa del año y la segunda se presenta desde el mes de octubre hasta el mes de diciembre (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001), como se muestra a continuación de acuerdo con el registro de 29 estaciones ubicadas en la cuenca del Alto Magdalena pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

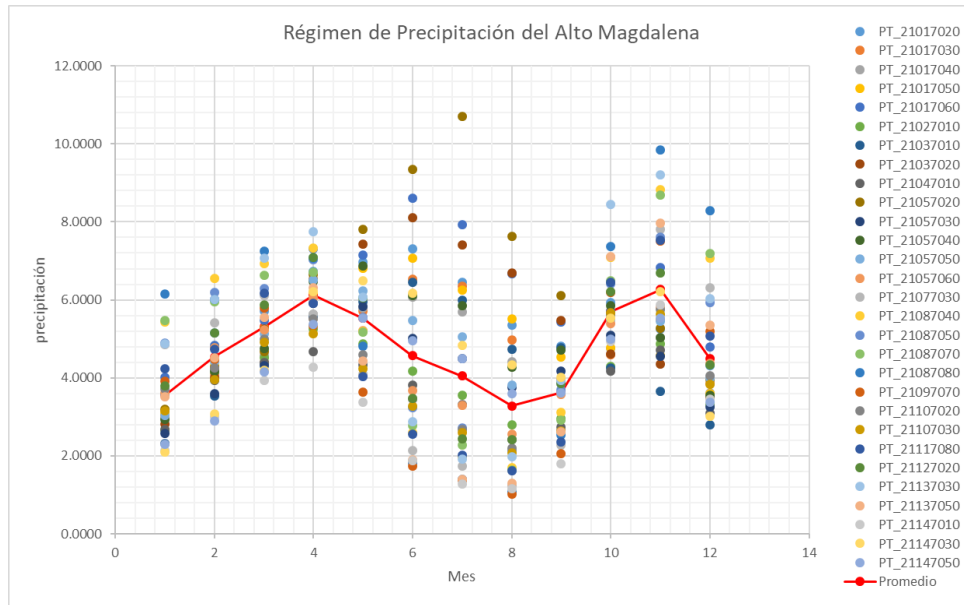


Figura 18. Régimen de precipitación del Alto Magdalena. Fuente: Propia.

ID Estación	Código Estación	Nombre Estación	Latitud	Longitud
1	21017020	SAN AGUSTIN - AUT	1.8703	-76.2316
2	21017030	CASCADA SIMON BOLI	1.8735	-76.2317
3	21017040	SALADO BLANCO	1.9881	-76.0120
4	21017050	PITALITO 2 - AUT	1.8488	-76.0524
5	21017060	MAGDALENA LA	1.9050	-76.4011
6	21027010	PERICONGO	2.0532	-75.8519
7	21037010	PUENTE GARCES - AUT	2.0263	-75.7754
8	21037020	SAN MARCOS	1.7523	-75.9454
9	21047010	PUENTE BALSEADERO	2.2324	-75.6486
10	21057020	SAN RAFAEL-LAGUNA	2.3167	-76.2500
11	21057030	PUENTE RICAURTE - AUT	2.5229	-75.9616
12	21057040	BOCATOMA	2.5667	-76.0667
13	21057050	VEGA EL SALADO	2.3314	-75.9422
14	21057060	PAICOL – AUT	2.4604	-75.7611
15	21077030	VICHECITO	2.5010	-75.5496
16	21087040	HIDROELECTRICA	2.7143	-75.5693
17	21087050	BOCATOMA	2.7052	-75.6207
18	21087070	JARDIN EL HACIENDA	2.6306	-75.5556
19	21087080	HACIENDA VENECIA - AUT	2.6438	-75.5443
20	21097070	PUENTE SANTANDER	2.9426	-75.3085
21	21107020	PUENTE MULAS	2.5664	-75.3743
22	21107030	CASIL EL	2.5448	-75.3016
23	21117080	GUAYABO	2.9211	-75.1497

ID Estación	Código Estación	Nombre Estación	Latitud	Longitud
24	21127020	SOCORRO EL	2.9543	-75.5211
25	21137030	PUENTE CARRETERA	3.2634	-75.2510
26	31137050	ANGOSTURA RIO	3.4432	-75.1188
27	21147010	SAN ALFONSO	3.3705	-75.1142
28	21147030	CARRASPOSO	3.3275	-74.8669
29	21147050	PUENTE VENADO	3.2839	-74.9082

Tabla 3. Descripción general de estaciones utilizadas dentro de la cuenca del Alto Magdalena. Fuente: Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología (DHIME), IDEAM 2019.

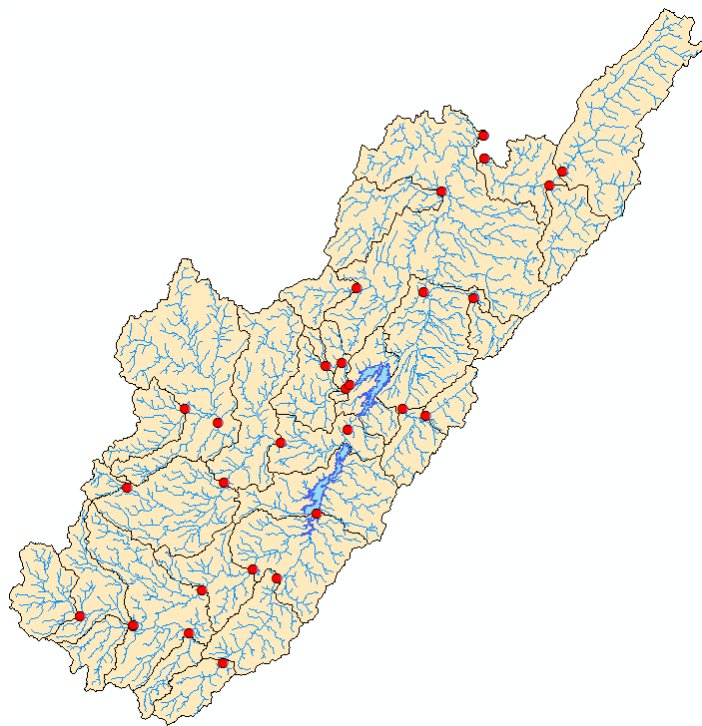


Figura 19. Localización de las estaciones del IDEAM usadas para la caracterización del régimen de lluvias del Alto Magdalena. Fuente: Propia.

En referencia a la distribución espacial de la precipitación, las zonas menos lluviosas se caracterizan por tener valores de precipitación anuales entre 1000-1500 mm y estas se encuentran hacia los valles interandinos del Alto Magdalena. Por otro lado, el Espinal, el Guamo, Saldaña, Coyaima y Natagaima

corresponden a las zonas más secas, así como la cuenca alta del río Bogotá y la cuenca del río Chicamocha (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001).

En general, la cuenca presenta un comportamiento hidrológico homogéneo con un caudal promedio de 1.385 m³/s medido en la estación de Arrancaplumas. Desde el nacimiento del río hasta su confluencia con el río Yaguará se tiene que los valores promedio del drenaje natural de la cuenca son de 0.5 km/km². Más adelante, en las cuencas de los ríos Neiva, Bache, Villavieja, Aipe, Pata y Cabrera los valores del drenaje natural ascienden a un rango que oscila entre 0.65 y 1.10 km/km². Adicionalmente, entre sus afluentes más importantes están los ríos Suaza, Páez, Yaguará, Neiva, Ceibas, Bache, Cabrera, Prado, Saldaña, Sumapaz, Coello, Bogotá, Totaré y Gualí (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001).

En cuanto a la evaporación media, se tiene que la distribución de esta depende de la elevación. En la vertiente oriental en donde se encuentra el límite entre los departamentos del Huila y Cauca se presentan un valor promedio anual de 1000 mm mientras que hacia el centro de la vertiente se encuentra una franja en sentido norte – sur con valores de evaporación media anual entre 1500 mm y 1700 mm. Posteriormente, estos valores disminuyen a medida que asciende la divisoria de aguas hasta llegar a una franja con valores anuales entre 1300 mm y 1500 mm. Adicionalmente, en el valle del Alto Magdalena se presentan los mayores valores de evapotranspiración potencial, por encima de 1600 mm/año (CORMAGDALENA & IDEAM, 2001).

5.2. Condiciones especiales del caso de estudio

Debido a la finalidad académica de la investigación desarrollada, se decidió trabajar con una cuenca hipotética dentro de la cuenca del Alto Magdalena. En esta se encuentra situada la represa de Betania en los municipios de Campoalegre, Hobo y Yaguará pertenecientes al departamento del Huila en Colombia, teniendo en cuenta que no se consideró de manera directa el efecto producido por la operación de la represa el Quimbo. Esto se simplificó a través de la afluencia proveniente del río sobre el cuál se encuentra localizada dicha represa, el río Magdalena Alto.

Adicionalmente a esta afluencia, se tuvieron en cuenta los aportes de flujo procedentes del río Páez y del río Yaguará. Para ello se utilizaron los datos históricos de caudal medio diario de tres estaciones de aforo ubicadas sobre estas tres corrientes: Estación “Puente Balseadero [21047010]” (río Magdalena Alto), estación “Paicol Aut [21057060]” (río Páez) y estación “Jardín El Hacienda [21087070]” (río Yaguará).

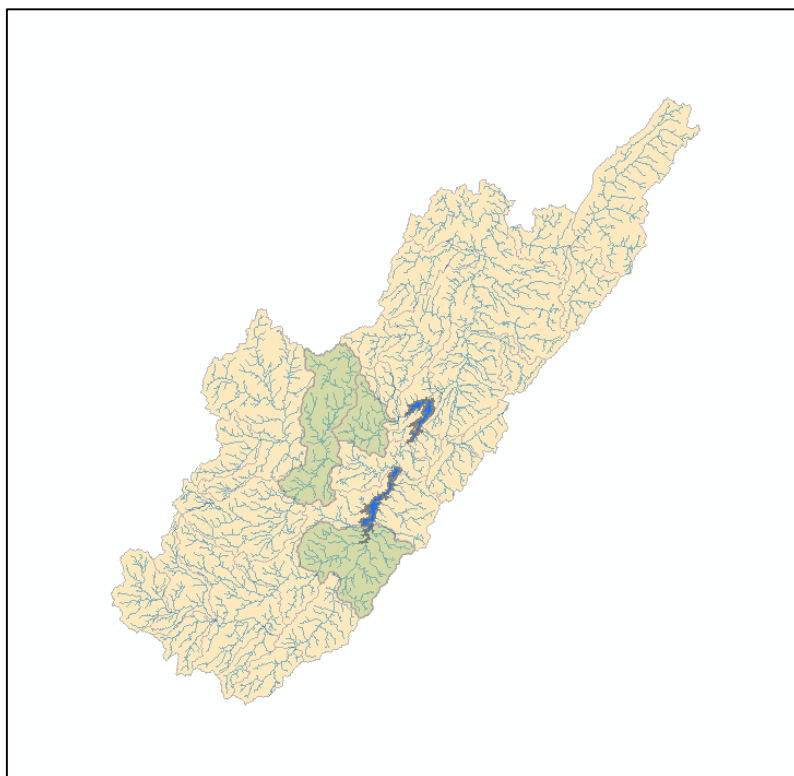


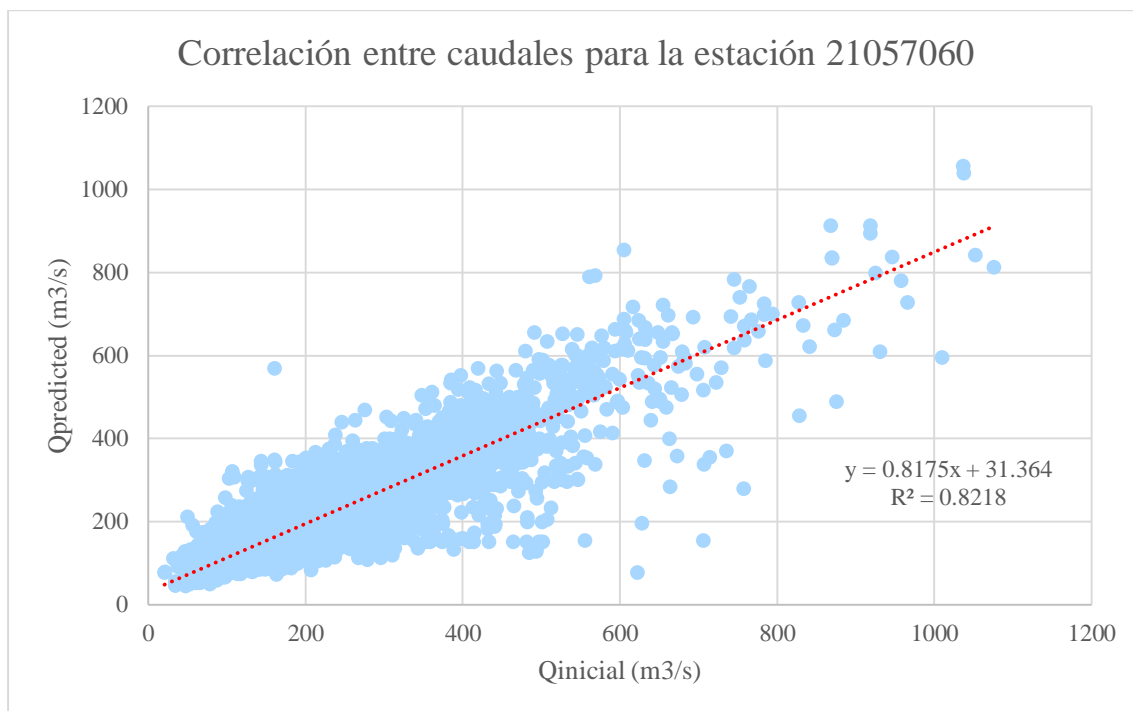
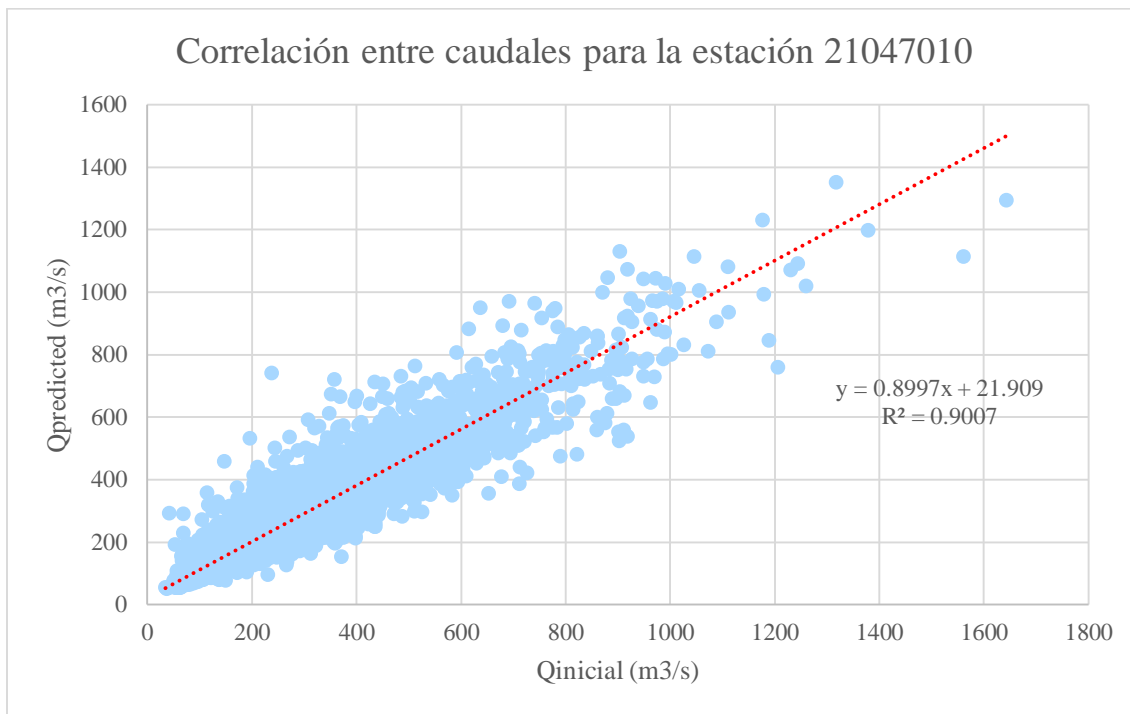
Figura 20. Cuenca hipotética del caso de estudio. Fuente: Propia.

5.3. Complementación de series de caudal

Para el análisis, se tienen como base las 29 estaciones del IDEAM mencionadas anteriormente con mediciones desde el 01/01/1975 hasta el 31/12/2017. De esta manera, se cuenta con registros de caudal de 43 años consecutivos, sin embargo, en cada una de estas series hay datos faltantes. Razón por la cual es necesario el tratamiento de dichas series de caudal para obtener información confiable con la que se pueda trabajar, teniendo en cuenta que este es uno de los datos de entrada claves para el cálculo del régimen de caudal ambiental.

La complementación de los datos faltantes no se realizará para las 29 estaciones, sino para las 3 estaciones correspondientes a los puntos de control de las cuencas de los ríos Magdalena Alto, Páez y Yaguará como se ilustró en la figura 18. Para ello se utilizó la herramienta de árbol de decisiones M5P del programa WEKA 3.8 a partir del conjunto de series adecuadas de aprendizaje para cada una de las estaciones puesto que este funciona bien para la complementación de datos hidrológicos (Ritter, 2016). Para la selección del conjunto de series adecuadas para cada una de las estaciones se utilizaron diferentes criterios como las estaciones más cercanas a la estación a completar o las estaciones que

presentaban una menor desviación estándar; seleccionando finalmente la predicción con la que se obtuviera el coeficiente de correlación más cercano posible a 1, obteniendo los resultados mostrados a continuación.



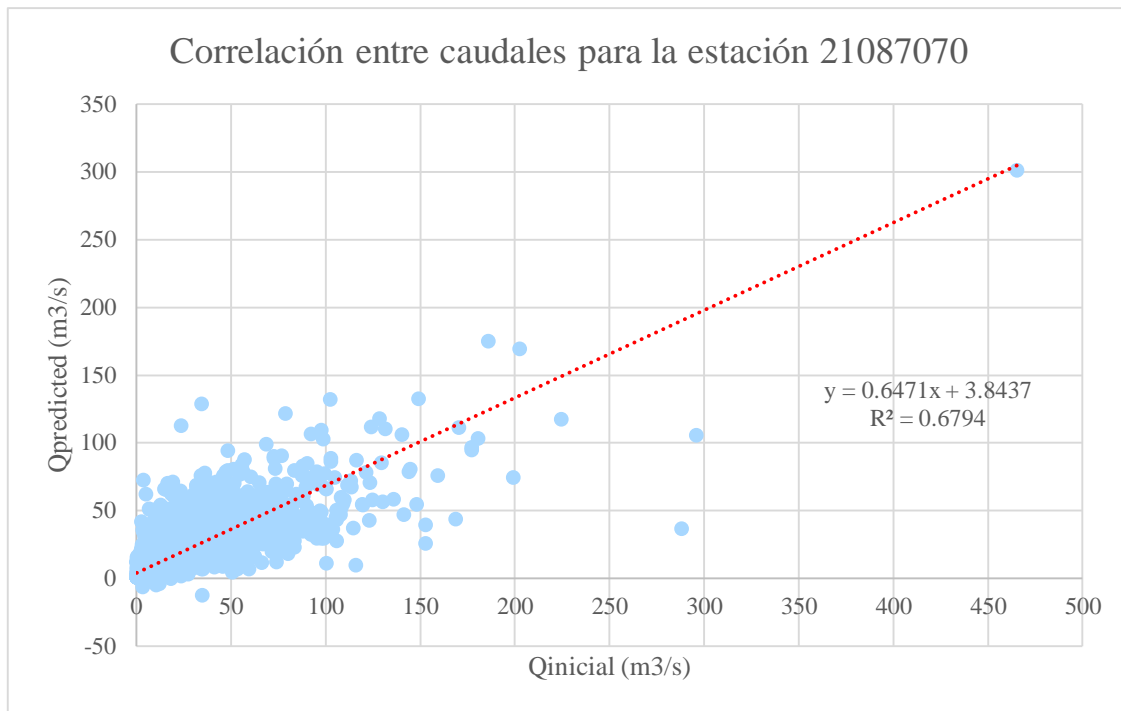
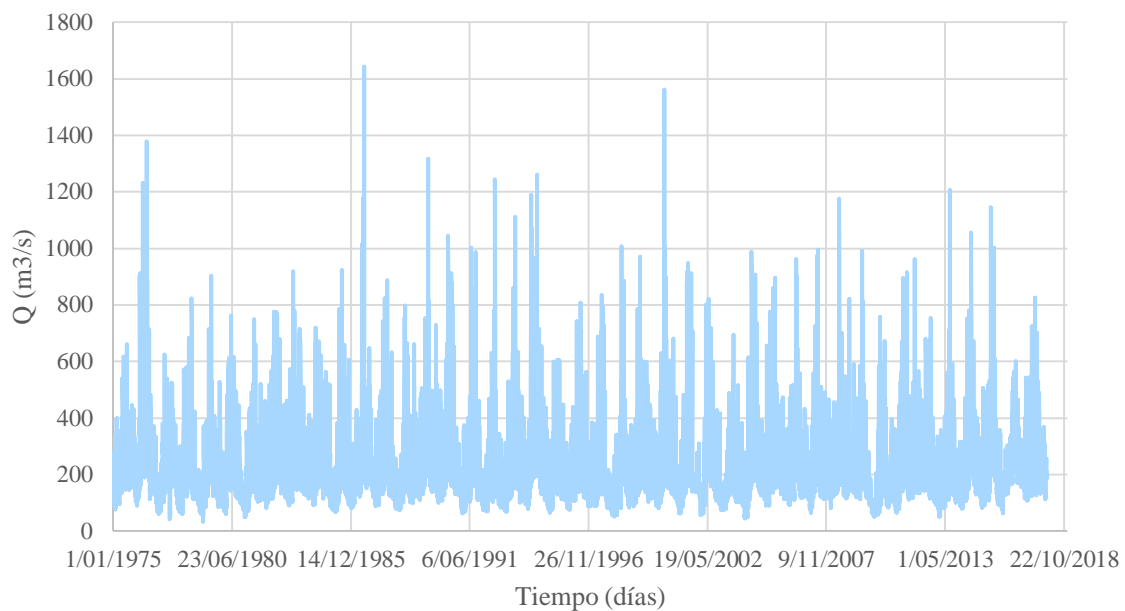


Figura 21. Correlación entre caudales observados y predichos para las estaciones 21047010, 21057060 y 21087070. Fuente: Propia.

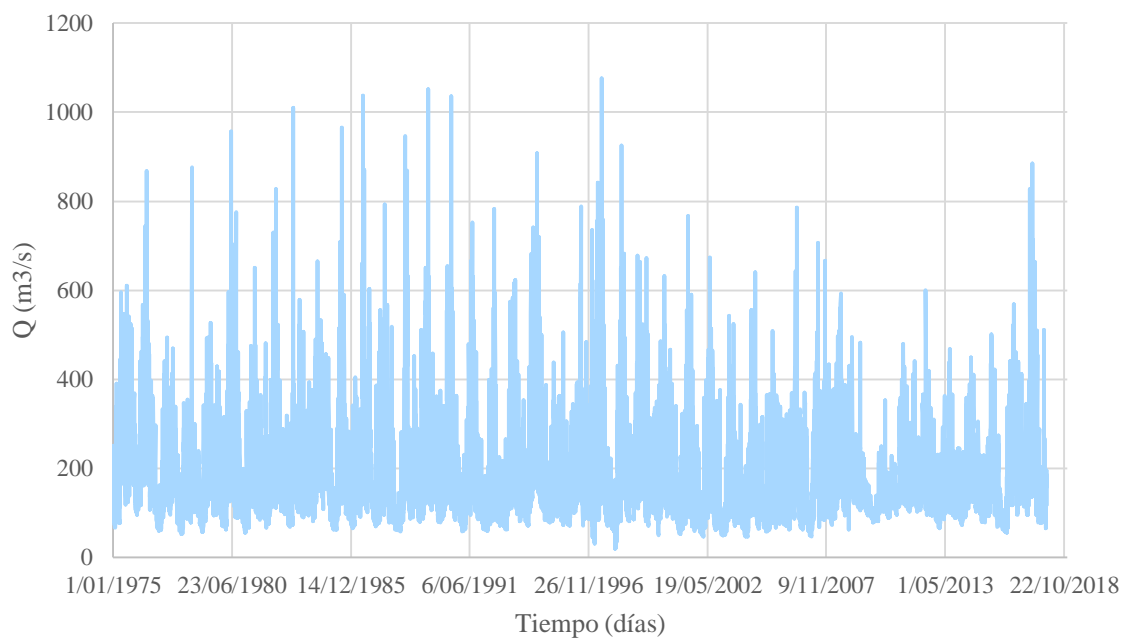
Una vez seleccionada la predicción de la serie de caudal para cada una de las estaciones, se procedió con la creación de nuevas series de caudal a partir de las series observadas que se tenían mezclándolas con las series predichas por el modelo estadístico de WEKA, obteniendo para todas las estaciones mejores correlaciones.

Consecuentemente, se obtienen los hidrogramas ilustrados a continuación para cada una de las estaciones a lo largo de los 43 años estudiados.

Hidrograma de la estación 21047010



Hidrograma de la estación 21057060



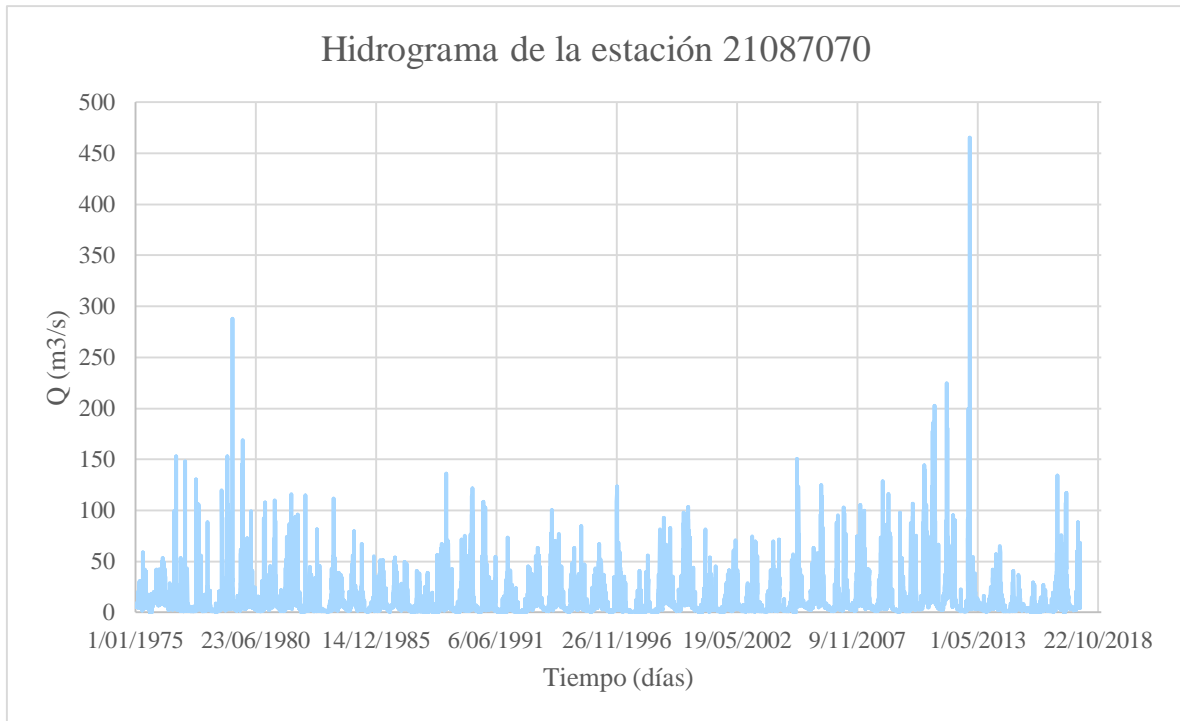


Figura 22. Hidrograma de las estaciones 21047010, 21057060 y 21087070. Fuente: Propia.

5.4. Naturalización de caudales aguas debajo de Betania

Uno de los objetivos a cumplir dentro de esta investigación es determinar las diferencias entre dos condiciones relevantes para la cuenca de la represa de Betania. El primer escenario hace referencia a dicha cuenca como si no se hubiese construido la represa y el segundo escenario corresponde al real, en el que la represa si se construyó. Consecuentemente, se requirió de un proceso de naturalización de los caudales de manera tal que, se tuviese una idea del comportamiento de los caudales aguas abajo de la represa de Betania.

Para ello, se consideraron dos puntos aguas abajo del embalse de Betania, el primero justo después de la represa en la estación 21097120 y el segundo corresponde a la estación 21097070 del IDEAM. En el segundo punto de control se cuenta con registros completos de caudal desde 1975 hasta antes del comienzo de la construcción de la represa en 1887, no obstante, en el primer punto solamente hay mediciones a partir de 1998. Debido a esto, para el primer punto el caudal se asumió como la sumatoria de los caudales en las tres estaciones afluentes a la represa de Betania y del caudal resultante de la escorrentía que se drena aguas abajo de estos tres puntos tomando como referencia la estación

21077030 del IDEAM para la obtención de registros de precipitación y temperatura en el periodo de tiempo en análisis.

El cálculo de la escorrentía se realizó suponiendo esta como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real sin considerar cualquier otro tipo de pérdidas. Para la precipitación se contaba con la serie sin datos faltantes puesto que esta había sido completada anteriormente para otro estudio. En cuanto a la evaporación se utilizó la ecuación de Thornthwaite (Pelton & Tanner, 1960), con su debida corrección por el número de días del mes y número de horas de sol al día.

$$EVP_{Potencial} = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right) \quad (31)$$

$$I = \sum i \quad ; \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (32)$$

Donde:

$EVP_{Potencial}$: Evapotranspiración potencial.

T : Temperatura media mensual.

I : Índice de calor anual

N : Número máximo de horas de sol, de acuerdo con una tabla dependiendo del mes y de la latitud.

d : Número de días del mes.

Como se puede observar, este método depende de la temperatura media mensual y, así mismo, da como resultado un valor promedio de la evapotranspiración potencial mensual. Motivo por el cual se supuso la evapotranspiración potencial como constante a lo largo de cada uno de los meses para cada uno de los años. Posteriormente, se calculó la evapotranspiración real con la corrección de la evapotranspiración potencial a través del coeficiente de cultivo (K), asumiendo este como un valor promedio de 0.75 puesto que los valores de este parámetro oscilan entre 0.65 y 0.85 (FAO, 2006).

$$EVP_{Real} = K * EVP_{Potencial} \quad (33)$$

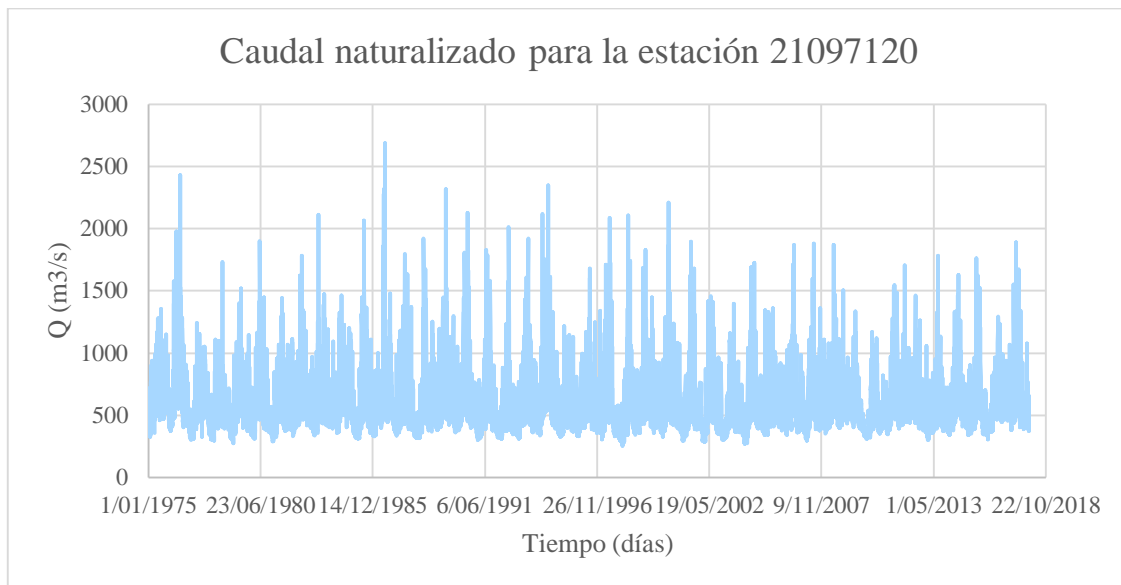
Donde:

EVP_{Real} : Evapotranspiración real.

K : Coeficiente de cultivo.

Cabe resaltar que el caudal de esorrentía resultado de todo este procedimiento se le asignó a cada una de las estaciones afluentes a la represa de Betania de acuerdo con el porcentaje que representa el área de cada una de estas en relación con el área total resultado de la sumatoria de las áreas de las tres subcuencas.

En cuanto al segundo punto de control aguas abajo, se utilizó nuevamente la herramienta de árbol de decisiones M5P del programa WEKA 3.8 para la complementación de los datos a partir del 01/01/1988 hasta el 31/12/2017 a partir de la serie calculada para el punto justo aguas abajo de la represa de Betania, obteniendo así los siguientes hidrogramas.



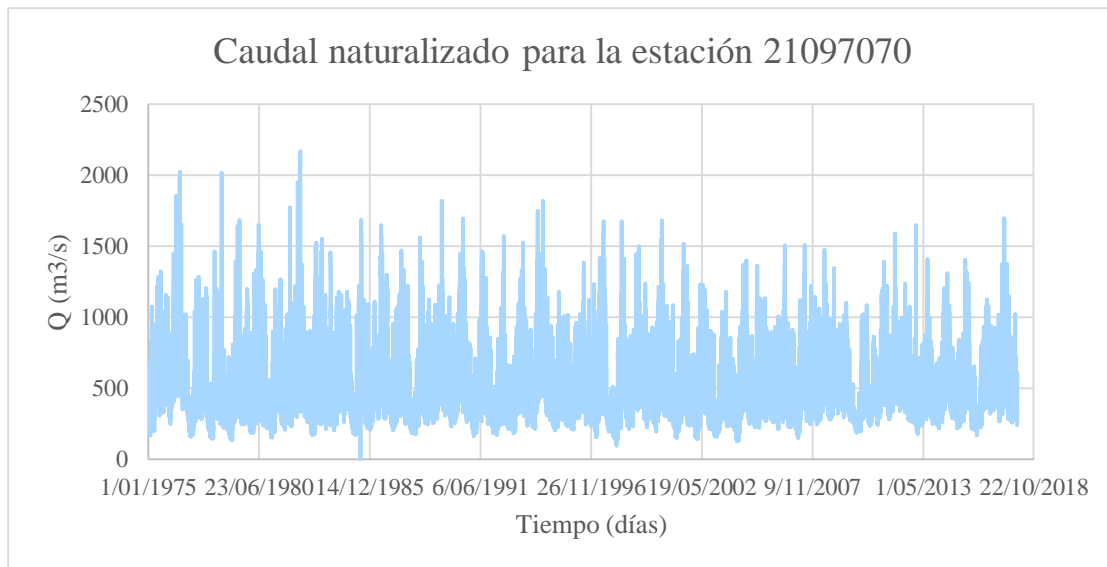


Figura 23. Hidrogramas naturalizados de estaciones 21097120 y 21097070. Fuente: Propia.

6. Capítulo VI. Comparación cuantitativa

6.1. Implementación de metodologías

6.1.1. Implementación de GMECAC

6.1.1.1. Régimen natural de flujo

Se aplicaron los tres criterios establecidos por la metodología para la definición de la condición natural. Estos corresponden al porcentaje de cuenca controlada, el grado de regulación (DOR) y los índices de fragmentación y regulación del río (RFI y RRI, respectivamente) (Grill et al., 2014). Esto se realizó para toda la cuenca del Alto Magdalena para una condición inicial considerando los embalses existentes antes de la construcción de la represa de Betania y otra condición posterior después de la construcción de dicho embalse. A continuación, se describen las expresiones utilizadas aclarando que para el cálculo de los índices de fragmentación y regulación del río fue necesario cambiar la relación entre volúmenes por la relación entre longitudes debido a que hasta el momento nadie en Colombia ha calculado el volumen de cada uno de los fragmentos de río de la red de drenaje del Alto Magdalena.

- Grado de regulación:

$$DOR_i = \frac{\sum_{s_i} V_e}{Q_i} \quad (34)$$

Donde:

DOR_i : Grado de regulación en el punto i del río.

S_i : Conjunto de embalses ubicados aguas arriba del punto i .

V_e : Capacidad de almacenamiento del embalse.

Q_i : Volumen de escorrentía anual en el tramo i .

- Índice de fragmentación del río:

$$RFI = 100 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i^2}{L^2} * 100 \right) \quad (35)$$

Donde:

RFI: Índice de fragmentación del río.

l_i : Longitud del tramo *i* del río.

L: Longitud total de la red de drenaje.

- Índice de regulación del río:

$$RRI = \sum_{i=1}^n DOR_i \frac{l_i}{L} \quad (36)$$

Donde:

RRI: Índice de fragmentación del río.

l_i : Longitud del tramo *i* del río.

L: Longitud total de la red de drenaje.

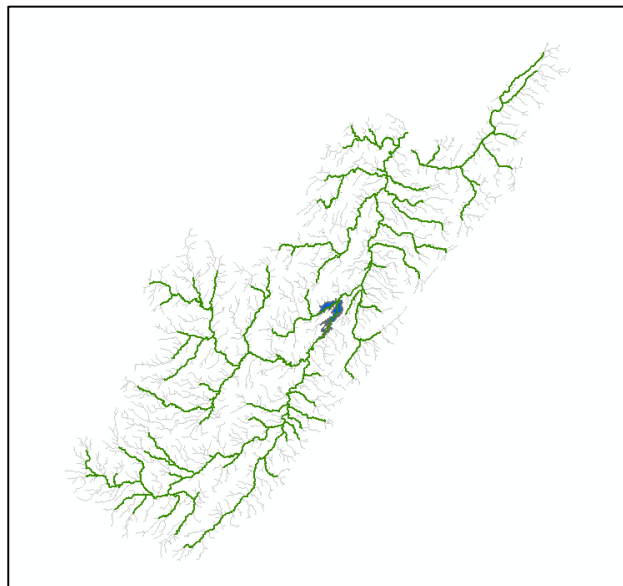


Figura 24. DOR para la cuenca del Alto Magdalena antes de la construcción de la represa de Betania.

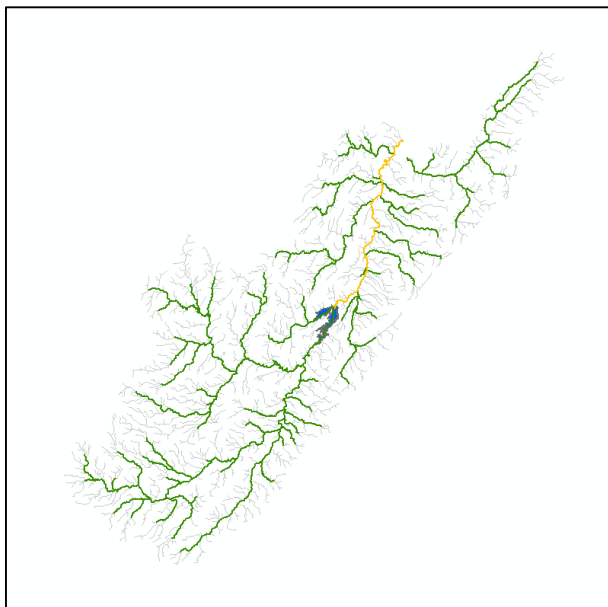


Figura 25. DOR para la cuenca del Magdalena y del Alto Magdalena después de la construcción de la represa de Betania.

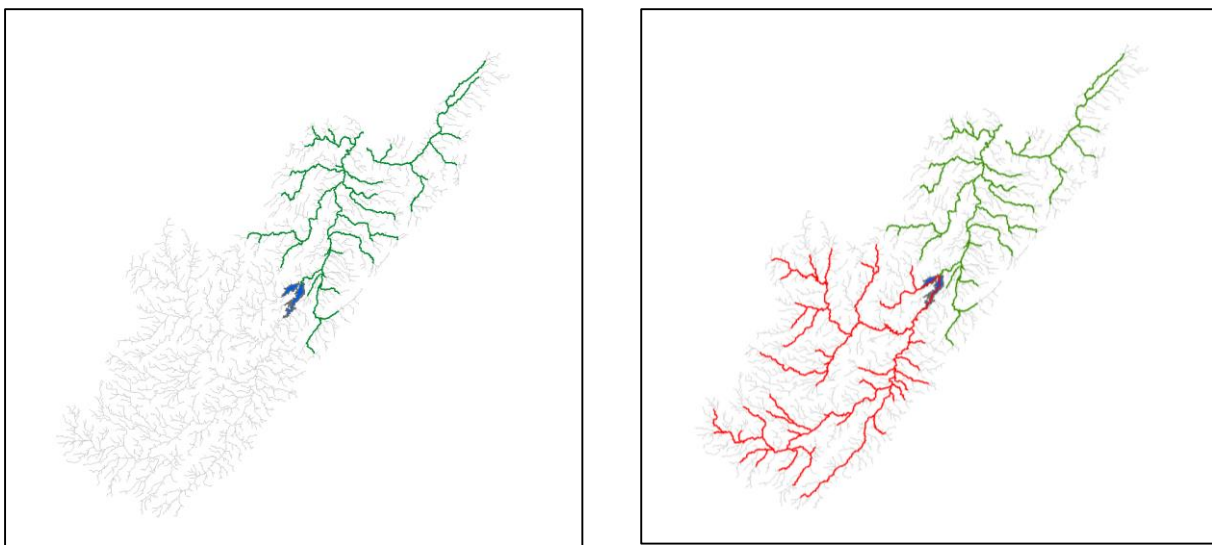


Figura 26. Fragmentación de la cuenca del Alto Magdalena antes (izquierda) y después (derecha) de la construcción de la represa de Betania.

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible observar que antes de la construcción de Betania toda la red hídrica del Alto Magdalena se encuentra denotada con color verde, lo que significa que se encontraba en una condición natural según los criterios establecidos por la metodología. Sin embargo,

después de este evento se tiene que la red aguas arriba de la represa se desconecta (color rojo) y que el DOR aguas abajo de la misma tiene valores mayores al umbral máximo del 2% (color amarillo). De manera que, la condición natural de la red en la zona de estudio corresponde a aquellos caudales que logran representar el sistema antes de la construcción de Betania.

Al calcular los índices de regulación del río para toda la red del Alto Magdalena para la condición sin la represa de Betania y con la represa de Betania se obtuvieron valores de 0.8553 y 1.0121 respectivamente. Así mismo, los valores del índice de fragmentación del río para ambas condiciones corresponden al 11.3516% y 19.5318%. Consecuentemente, se corrobora la alteración negativa en el ecosistema resultado de la construcción de la represa de Betania.

6.1.1.2. Caracterización del flujo

Una vez definida la condición natural de flujo en la zona de estudio, se caracterizó el flujo de acuerdo con el indicador del ENOS que mejor correlación evidenció con las tres variables hidrológicas seleccionadas: Caudal, precipitación y temperatura. Dicha correlación se hizo para cada una de las estaciones correspondientes a los puntos en análisis aplicando el concepto de correlación cruzada, el cual hace referencia a la determinación de una función entre el número de meses de desplazamiento de las series mensuales de cada uno de los indicadores respecto a las series de caudal y el coeficiente de correlación resultado de la relación entre cada una de las variables hidrológicas seleccionadas y los indicadores; esto con el fin de evaluar el tiempo que tarda la sincronización entre los eventos macroclimáticos y dichas variables. Para ambos puntos de estudio se determinó que la mejor correlación que existe involucra a la variable temperatura con el indicador ONI sincronizándose una vez transcurridos 4 meses, tal y como se muestra en la figura a continuación.

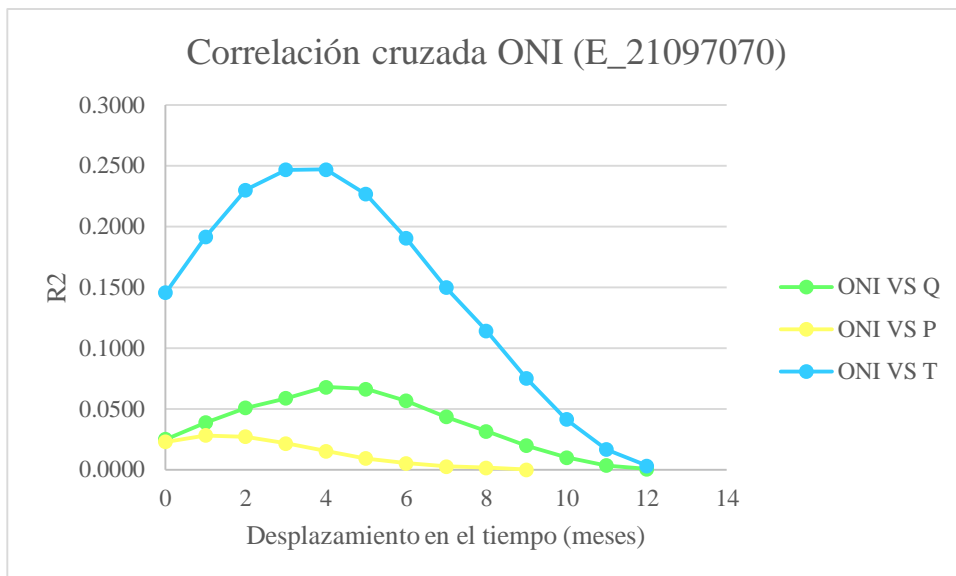
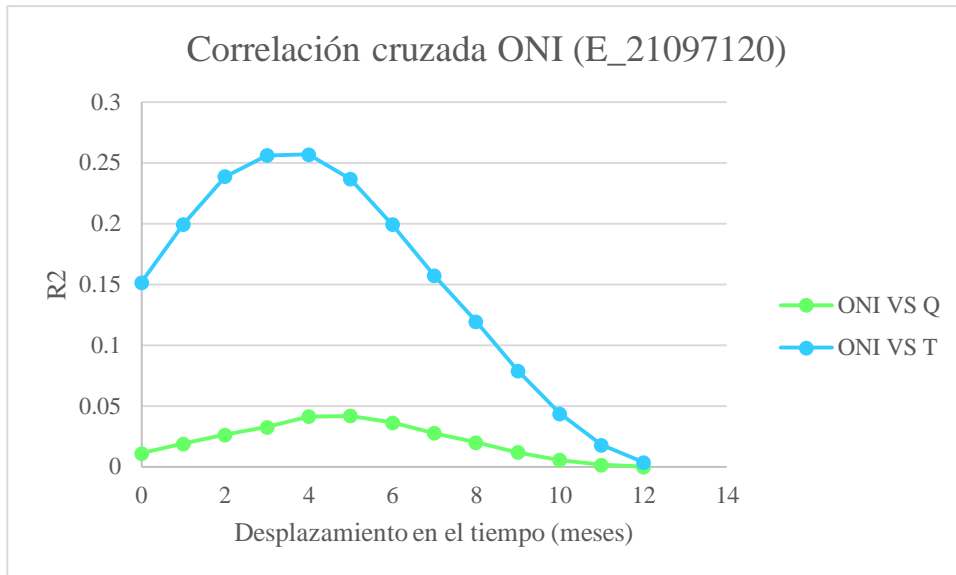


Figura 27. Correlación cruzada con el indicador ONI del ENOS.

De este modo, se clasificaron los flujos en cada una de las estaciones en condición húmeda (color azul), condición normal (color verde) y condición seca (color rojo). Para ello, se consideró que el fenómeno de El Niño representa la condición seca, el fenómeno de La Niña la condición húmeda y el intermedio entre estos dos la condición normal. Cabe aclarar que los eventos categorizados como húmedos son aquellos que presentan indicadores ONI mayores o iguales a +0.5 y los eventos secos indicadores ONI inferiores o iguales a -0.5.

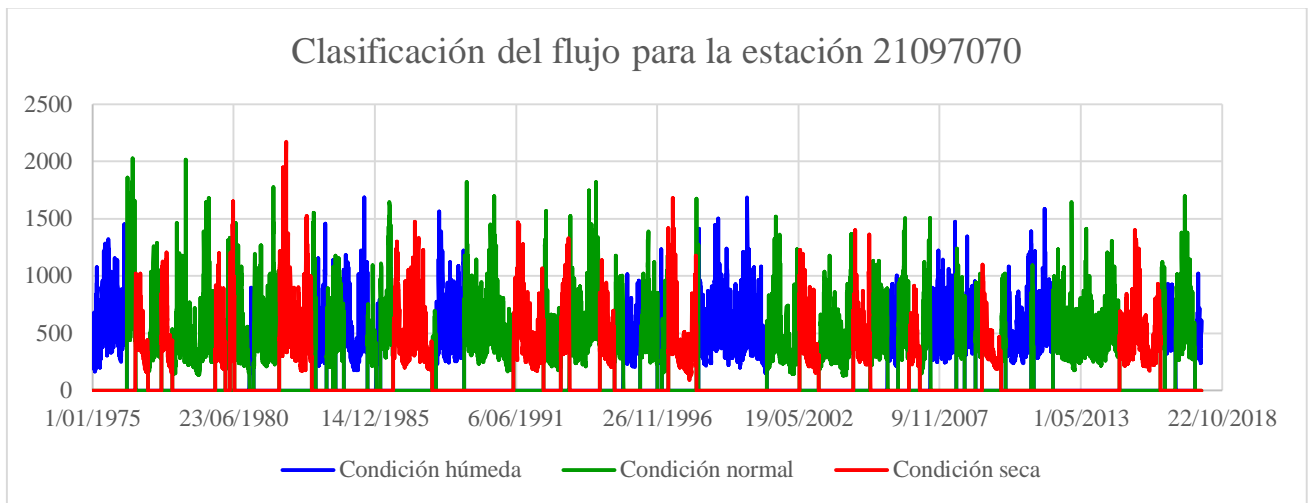
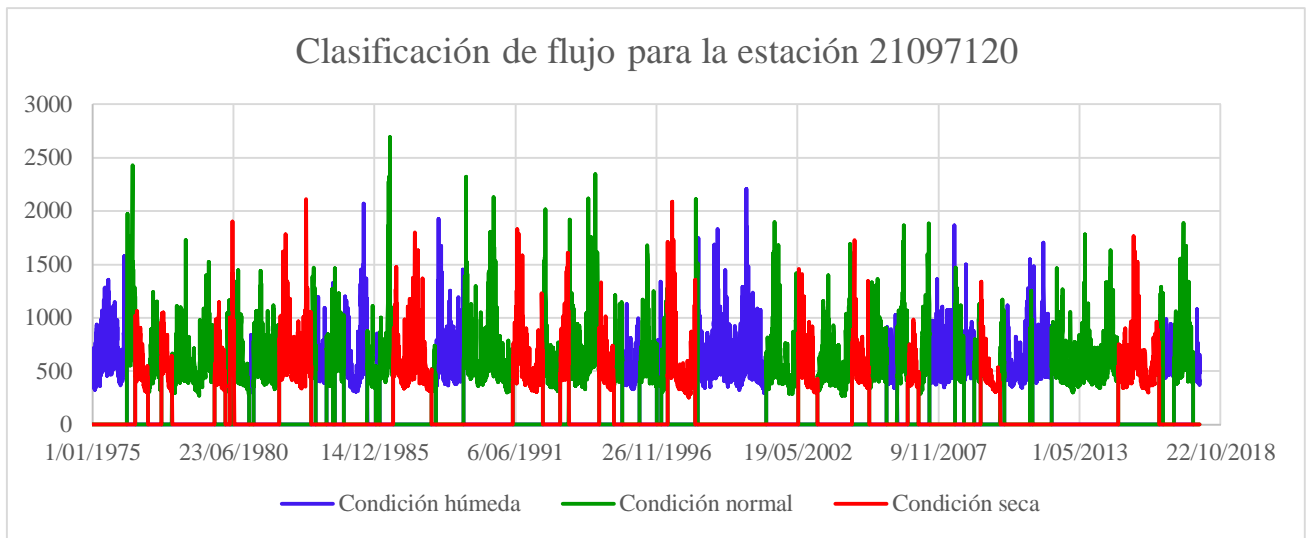


Figura 28. Clasificación del flujo de acuerdo con el indicador ONI del ENOS para cada estación.

Posteriormente, se identificaron los rangos de garantía del régimen de caudal ambiental para cada una de las condiciones. Esto quiere decir, que se determinó el caudal mínimo mensual para cada condición y el caudal máximo mensual correspondiente al mayor valor entre el caudal máximo promedio de la condición y el caudal máximo ajustado a la distribución de Gumbel para un periodo de retorno de 2.33 años. De manera que, para cada estación y condición hidrológica se tiene el rango de caudales dentro del cual se debe asegurar que el régimen de caudal ambiental se va a mantener.

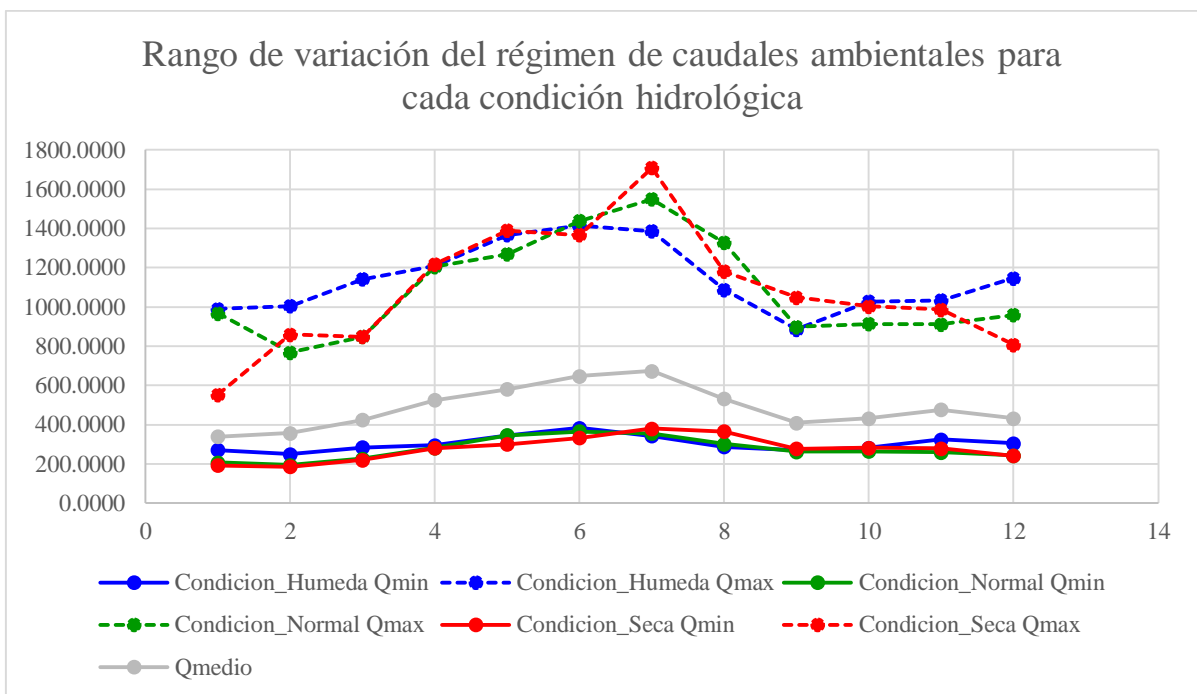
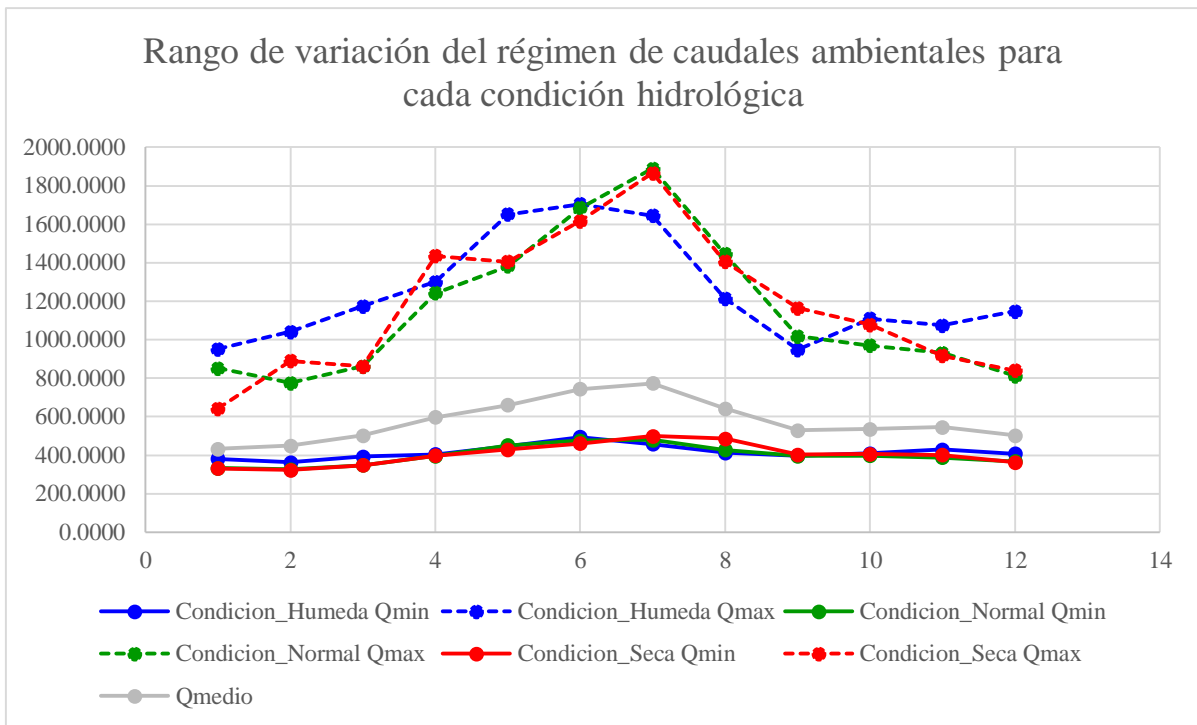


Figura 29. Rango de variación del régimen de caudales ambientales para cada condición hidrológica

6.1.1.3. Métricas de interés ecológico

6.1.1.3.1. Métricas hidrológicas

Conforme la metodología lo exige, se realizaron los ajustes tanto de los caudales mínimos diarios como de los caudales máximos diarios a cuatro diferentes distribuciones de probabilidad de las distribuciones recomendadas, las cuales corresponden a: Gumbel, Normal, Pearson y Weibull. A continuación, se describen las metodologías usadas para el cálculo de los ajustes teniendo en cuenta que en algunas de estas hay una diferenciación entre valores extremos mínimos y valores extremos máximos.

6.1.1.3.1.1. Distribución de Gumbel (Distribución de Valores Extremos Tipo I)

Es una distribución asintótica para valores máximos (mínimos) correspondiente a un modelo estadístico limitante donde el tamaño de la muestra (n) se aproxima al infinito para la distribución del máximo (mínimo) de n valores independientes de una distribución inicial cuya cola derecha no tiene límites y que es de tipo exponencial; es decir, la distribución acumulativa inicial se acerca a la unidad (a cero) con valores crecientes (decrecientes) de la variable aleatoria al menos tan rápido como la distribución exponencial se aproxima a la unidad (Haan, 1977). De manera que, la función de distribución de probabilidad para valores máximos y mínimos se encuentra dada por las siguientes expresiones:

$$P(x \leq X_i) = F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (\text{Valores máximos}) \quad (37)$$

$$P(x \leq X_i) = F(x) = 1 - e^{-e^y} \quad (\text{Valores mínimos}) \quad (38)$$

Con:

$$Y = \alpha(X_i - \beta) \quad (39)$$

$$\alpha = \frac{S_n}{\sigma} \quad ; \quad \beta = \bar{x} - \frac{Y_n}{\alpha} \quad (\text{Valores máximos}) \quad (40)$$

$$\alpha = \frac{S_n}{\sigma} \quad ; \quad \beta = \bar{x} + \frac{Y_n}{\alpha} \quad (\text{Valores mínimos}) \quad (41)$$

Donde:

$P(x \leq X_i)$: Probabilidad de no ocurrencia.

X_i : Datos de la muestra desde 1 hasta n.

Y: Variable reducida de la distribución de probabilidad.

α, β : Parámetros de la distribución de probabilidad.

σ : Desviación estándar de la muestra.

\bar{x} : Medía de la muestra.

Y_n : Media de la variable reducida Y.

S_n : Desviación estándar de la variable reducida Y.

6.1.1.3.1.2. Distribución normal

La distribución normal es una distribución de dos parámetros que tiene una forma acampanada (distribución de Gauss), continua y simétrica alrededor de μ (media). Los parámetros μ y σ^2 (varianza) a veces se indican como parámetros de ubicación y escala (Haan, 1977). Se tiene que la función de distribución de probabilidad es:

$$P(x \leq X_i) = F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (42)$$

Sin embargo, esta no es una integral que pueda ser solucionada analíticamente. Motivo por el cual se ha definido una variable estandarizada (z) que permita evaluar la integral numéricamente (Aparicio, 1992) a través de tablas que describen el comportamiento de la distribución en función de μ , σ y z.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (43)$$

De manera que, la función de distribución de probabilidad resulta siendo como se muestra a continuación, teniendo en cuenta que como tiene un comportamiento simétrico solamente es necesario evaluar la integral entre cero y la variable estandarizada (Aparicio, 1992):

$$F(z) = \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (44)$$

6.1.1.3.1.3. Distribución Pearson III

La distribución Pearson III hace parte de la numerosa familia de distribuciones Gamma. La función de la distribución de probabilidad se describe por la ecuación a continuación (Rao & Hamed, 2000):

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(B)} \int_0^{\frac{x-\gamma}{\alpha}} y^{\beta-1} e^{-y} dy \quad (45)$$

$$y = \frac{x - \gamma}{\alpha} \quad (46)$$

El valor de x puede ser calculado analíticamente con el uso del método de estimación de cuantiles, así:

$$x = \bar{x} + K_T \sigma \quad (47)$$

Donde K_T es el factor de frecuencia correspondiente a un periodo de retorno dado, el cual puede ser evaluado a través de la siguiente expresión:

$$K_T = u(u^2 - 1)k + \left(\frac{u^3 - 6u}{3}\right)k^2 - (u^2 - 1)k^3 + uk^4 + \frac{k^5}{3} \quad (48)$$

$$k = \frac{C_s}{6} \quad (49)$$

Con C_s como coeficiente de simetría de la distribución y u es la variable normal estandarizada correspondiente a una probabilidad de no excedencia F(x), que puede ser evaluada de la manera mostrada a continuación:

$$u = W - \frac{C_o + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} + \varepsilon(P) \quad (50)$$

Donde:

$$\begin{array}{ll} C_0 = 2.515517 & d_1 = 1.432788 \\ C_1 = 0.802853 & d_2 = 0.189269 \\ C_2 = 0.010328 & d_3 = 0.001308 \end{array}$$

$$W = \sqrt{-2\log(P)} \quad \text{para } P < 0.5 \quad (51)$$

Donde:

P : Probabilidad de excedencia $\rightarrow P = 1 - F$

*Para $P > 0.5 \rightarrow P = 1 - P$ y la función u se calcula como u con el signo contrario.

$\varepsilon(P)$: Error para la correspondiente probabilidad (menos a $4.5 * 10^{-4}$)

6.1.1.3.1.4. Distribución Weibull (Distribución de Valores Extremos Tipo III)

La distribución Weibull surge cuando el extremo proviene de una distribución principal que está limitada en la dirección de interés. La distribución ha encontrado su mayor uso en hidrología como la distribución para el ajuste de flujos bajos; pues estos se encuentran limitados por cero a la izquierda (Haan, 1977). La siguiente expresión describe el comportamiento de la función de distribución de probabilidad:

$$P(x \leq X_i) = F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x_i - \varepsilon}{\beta - \varepsilon}\right)^\alpha} \quad (52)$$

Con:

$$\beta = \bar{x} + \sigma A(\alpha) \quad (53)$$

$$\varepsilon = \beta - \sigma B(\alpha) \quad (54)$$

Donde:

$P(x \leq X_i)$: Probabilidad de no ocurrencia.

X_i : Datos de la muestra desde 1 hasta n.

β, ε : Parámetros de la distribución de probabilidad que son función del coeficiente de asimetría C_s y las funciones $A(\alpha)$ y $B(\alpha)$, de acuerdo con la tabla de correlación mostrada a continuación.

C_s	$1/\alpha$	$A(\alpha)$	$B(\alpha)$
-1.0000	0.0200	0.4460	40.0050
-0.9710	0.0300	0.4440	26.9870
-0.9170	0.0400	0.4420	20.4810
-0.8670	0.0500	0.4390	16.5760
-0.6380	0.1000	0.4250	8.7370
-0.2540	0.2000	0.3890	4.7550
0.0690	0.3000	0.3460	3.3700
0.3590	0.4000	0.2970	2.6340
0.6310	0.5000	0.2460	2.1590
0.8960	0.6000	0.1930	1.8150
1.1600	0.7000	0.1420	1.5490
1.4300	0.8000	0.0920	1.3340
1.7080	0.9000	0.0440	1.1540
2.0000	1.0000	0.0000	1.0000
2.3090	1.1000	-0.0400	0.8670
2.6400	1.2000	-0.0770	0.7520
2.9960	1.3000	-0.1090	0.6520
3.3820	1.4000	-0.1360	0.5630
3.8020	1.5000	-0.1600	0.4850
4.2620	1.6000	-0.1800	0.4180
4.7670	1.7000	-0.1960	0.3590
5.3230	1.8000	-0.2080	0.3080
5.9380	1.9000	-0.2170	0.2630
6.6190	2.0000	-0.2240	0.2240
7.3740	2.1000	-0.2270	0.1900
8.2140	2.2000	-0.2290	0.1610

Tabla 4. Correlación entre parámetros de la distribución Weibull. Fuente: (Haan, 1977).

6.1.1.3.1.5. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

Una vez se han realizado los ajustes de los caudales máximos y mínimos diarios de las estaciones en estudio a cada una de las distribuciones de probabilidad descritas anteriormente, se procede con la

implementación de la prueba de bondad de ajuste, la cual permite determinar el mejor ajuste desde un enfoque estadístico. La prueba de Chi cuadrado y Kolmogorov-Sminorv corresponden a las pruebas mayormente utilizadas, sin embargo, la prueba de Kolmogorov-Smirnov tiene la ventaja de no requiere la agrupación de los datos para su aplicación (Aparicio, 1992).

Para la determinación de la validez de un ajuste, esta prueba compara el máximo valor absoluto de la diferencia (D) con un valor crítico (d) que es función del tamaño de la muestra y del nivel de significancia de la prueba. De manera que, si $D < d$, entonces se acepta la hipótesis nula. Esta hace referencia a que el ajuste es válido y el comportamiento de los datos ajustados puede describirse a través de la distribución de probabilidad que se está evaluando.

$$D = \max|F_o(x_m) - F(x_m)| \tag{55}$$

Con:

$$F_o(x_m) = 1 - \frac{m}{n + 1} \tag{56}$$

Donde:

$F_o(x_m)$: Función de distribución de probabilidad observada.

$F(x_m)$: Función de distribución de probabilidad esperada.

m : Número de orden del dato en una lista de mayor a menor.

n : Tamaño de la muestra (número total de datos).

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
n grande	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

Figura 30. Valores críticos d para la prueba Kolmogorov-Smirnov. Fuente: (Aparicio, 1992)

1) Caudales extremos mínimos

Al aplicar la prueba para un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$ y un tamaño de muestra de 43 datos, se obtuvo que el mejor ajuste de los datos corresponde a la distribución de probabilidad normal tanto para la estación 21097120 como para la 21097070 con un valor de D de 0.0923 y 0.1039, respectivamente contra un valor de d de 0.2486. Seguido de esta, se tiene la distribución de probabilidad de Gumbel con un valor de D de 0.1459 y 0.1216, respectivamente. Contrariamente, para las distribuciones de probabilidad de Pearson y Weibull se obtuvieron valores de D mayores que d, por lo tanto, dichos ajustes no son válidos.

2) Caudales extremos máximos

Para esta prueba se utilizó el mismo nivel de significancia y tamaño de muestra, obteniendo resultados similares a los obtenidos para los caudales extremos mínimos. El mejor ajuste de los datos corresponde a la distribución de probabilidad normal tanto para la estación 21097120 como para la 21097070 con un valor de D de 0.0704 y 0.0644, respectivamente contra un valor de d de 0.2486. La siguiente mejor distribución de probabilidad es la de Gumbel con un valor de D de 0.1078 y 0.0781, respectivamente. Así mismo, los ajustes con las distribuciones de probabilidad de Pearson y Weibull se rechazaron.

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
1975	43	0.0227	0.0668	0.0320	0.0003	0.1015	0.0441	0.0093	0.0224	0.0788
1976	42	0.0455	0.0800	0.0455	0.0004	0.1095	0.0345	0.0001	0.0451	0.0640
1977	41	0.0682	0.1272	0.1033	0.0016	0.1929	0.0590	0.0351	0.0666	0.1247
1978	40	0.0909	0.1309	0.1082	0.0022	0.2163	0.0400	0.0173	0.0887	0.1254
1979	39	0.1136	0.1317	0.1092	0.0036	0.2552	0.0180	0.0044	0.1101	0.1416
1980	38	0.1364	0.1523	0.1371	0.0057	0.2961	0.0160	0.0008	0.1307	0.1598
1981	37	0.1591	0.1531	0.1382	0.0079	0.3270	0.0060	0.0208	0.1512	0.1679
1982	36	0.1818	0.1608	0.1487	0.0145	0.3895	0.0210	0.0331	0.1673	0.2076
1983	35	0.2045	0.1798	0.1749	0.0177	0.4113	0.0248	0.0297	0.1869	0.2068
1984	34	0.2273	0.1933	0.1936	0.0323	0.4836	0.0339	0.0336	0.1949	0.2564
1985	33	0.2500	0.2031	0.2071	0.0326	0.4845	0.0469	0.0429	0.2174	0.2345
1986	32	0.2727	0.2086	0.2147	0.0335	0.4880	0.0641	0.0581	0.2392	0.2153
1987	31	0.2955	0.2099	0.2164	0.0347	0.4925	0.0856	0.0790	0.2608	0.1970
1988	30	0.3182	0.2408	0.2585	0.0353	0.4947	0.0774	0.0597	0.2829	0.1765
1989	29	0.3409	0.2886	0.3215	0.0383	0.5050	0.0523	0.0194	0.3026	0.1641
1990	28	0.3636	0.2897	0.3229	0.0558	0.5545	0.0740	0.0408	0.3078	0.1909
1991	27	0.3864	0.3410	0.3872	0.1434	0.6894	0.0453	0.0008	0.2429	0.3030
1992	26	0.4091	0.3420	0.3883	0.1750	0.7193	0.0671	0.0208	0.2341	0.3103
1993	25	0.4318	0.3430	0.3895	0.1889	0.7312	0.0888	0.0423	0.2430	0.2994
1994	24	0.4545	0.3525	0.4010	0.2310	0.7621	0.1020	0.0536	0.2235	0.3076
1995	23	0.4773	0.3855	0.4396	0.2342	0.7642	0.0918	0.0376	0.2430	0.2869
1996	22	0.5000	0.3959	0.4515	0.2354	0.7650	0.1041	0.0485	0.2646	0.2650
1997	21	0.5227	0.3969	0.4526	0.2479	0.7730	0.1258	0.0701	0.2749	0.2503
1998	20	0.5455	0.3996	0.4557	0.2912	0.7982	0.1459	0.0898	0.2543	0.2527
1999	19	0.5682	0.4395	0.4995	0.3049	0.8055	0.1287	0.0686	0.2632	0.2373
2000	18	0.5909	0.4548	0.5157	0.3062	0.8062	0.1361	0.0752	0.2847	0.2153
2001	17	0.6136	0.4930	0.5549	0.3078	0.8069	0.1206	0.0587	0.3058	0.1933
2002	16	0.6364	0.6597	0.7056	0.3936	0.8456	0.0234	0.0692	0.2428	0.2092

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
2003	15	0.6591	0.7173	0.7514	0.3955	0.8464	0.0582	0.0923	0.2636	0.1873
2004	14	0.6818	0.7291	0.7604	0.4939	0.8814	0.0472	0.0786	0.1879	0.1996
2005	13	0.7045	0.7315	0.7623	0.5677	0.9034	0.0270	0.0577	0.1368	0.1988
2006	12	0.7273	0.7366	0.7661	0.5709	0.9043	0.0093	0.0388	0.1563	0.1770
2007	11	0.7500	0.7405	0.7691	0.5851	0.9081	0.0095	0.0191	0.1649	0.1581
2008	10	0.7727	0.7414	0.7698	0.6106	0.9148	0.0313	0.0030	0.1621	0.1421
2009	9	0.7955	0.8177	0.8260	0.6477	0.9240	0.0222	0.0305	0.1477	0.1286
2010	8	0.8182	0.8389	0.8412	0.7024	0.9365	0.0207	0.0231	0.1158	0.1183
2011	7	0.8409	0.8937	0.8806	0.7242	0.9414	0.0528	0.0397	0.1167	0.1005
2012	6	0.8636	0.9171	0.8979	0.7270	0.9419	0.0535	0.0343	0.1367	0.0783
2013	5	0.8864	0.9439	0.9187	0.7888	0.9546	0.0575	0.0324	0.0976	0.0682
2014	4	0.9091	0.9644	0.9363	0.7912	0.9551	0.0553	0.0272	0.1179	0.0460
2015	3	0.9318	0.9744	0.9459	0.8024	0.9573	0.0426	0.0141	0.1294	0.0255
2016	2	0.9545	0.9956	0.9742	0.9385	0.9819	0.0410	0.0197	0.0161	0.0274
2017	1	0.9773	0.9965	0.9765	0.9685	0.9874	0.0193	0.0008	0.0088	0.0101

	Gumbel	Normal	Pearson	Weibull
D	0.1459	0.0923	0.3078	0.3103
Verificación	OK	OK	Se rechaza	Se rechaza
d	0.2486			

Tabla 5. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales mínimos (estación 21097120). Fuente: Propia.

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
1975	43	0.0227	0.0875	0.0540	0.0000	0.0122	0.0648	0.0312	0.0227	0.0106
1976	42	0.0455	0.0945	0.0621	0.0026	0.2141	0.0491	0.0167	0.0428	0.1686
1977	41	0.0682	0.0999	0.0686	0.0045	0.2600	0.0318	0.0005	0.0637	0.1918
1978	40	0.0909	0.1199	0.0938	0.0060	0.2885	0.0290	0.0028	0.0849	0.1976
1979	39	0.1136	0.1355	0.1143	0.0063	0.2930	0.0218	0.0007	0.1073	0.1794
1980	38	0.1364	0.1579	0.1447	0.0065	0.2952	0.0215	0.0084	0.1299	0.1589
1981	37	0.1591	0.1686	0.1594	0.0100	0.3404	0.0095	0.0003	0.1491	0.1813
1982	36	0.1818	0.1719	0.1640	0.0118	0.3580	0.0099	0.0178	0.1700	0.1762
1983	35	0.2045	0.1812	0.1769	0.0174	0.4023	0.0233	0.0277	0.1871	0.1977
1984	34	0.2273	0.1887	0.1873	0.0203	0.4206	0.0385	0.0400	0.2069	0.1933
1985	33	0.2500	0.1897	0.1886	0.0215	0.4281	0.0603	0.0614	0.2285	0.1781
1986	32	0.2727	0.1913	0.1908	0.0257	0.4499	0.0814	0.0819	0.2470	0.1772
1987	31	0.2955	0.2060	0.2111	0.0263	0.4524	0.0894	0.0844	0.2692	0.1570
1988	30	0.3182	0.2165	0.2254	0.0273	0.4571	0.1017	0.0928	0.2909	0.1390
1989	29	0.3409	0.2410	0.2587	0.0378	0.4999	0.0999	0.0822	0.3031	0.1590
1990	28	0.3636	0.2577	0.2811	0.0600	0.5620	0.1059	0.0825	0.3037	0.1984
1991	27	0.3864	0.2648	0.2905	0.1159	0.6569	0.1216	0.0959	0.2705	0.2705
1992	26	0.4091	0.3321	0.3762	0.1410	0.6862	0.0770	0.0329	0.2681	0.2771
1993	25	0.4318	0.3514	0.3997	0.1532	0.6988	0.0804	0.0322	0.2787	0.2669
1994	24	0.4545	0.3668	0.4179	0.1802	0.7235	0.0878	0.0366	0.2743	0.2689
1995	23	0.4773	0.3685	0.4200	0.1811	0.7240	0.1087	0.0573	0.2962	0.2467
1996	22	0.5000	0.4323	0.4918	0.1910	0.7322	0.0677	0.0082	0.3090	0.2322
1997	21	0.5227	0.4429	0.5032	0.2634	0.7815	0.0799	0.0196	0.2593	0.2588
1998	20	0.5455	0.4435	0.5038	0.2658	0.7828	0.1019	0.0416	0.2796	0.2374
1999	19	0.5682	0.4750	0.5367	0.2864	0.7946	0.0932	0.0314	0.2818	0.2264
2000	18	0.5909	0.4910	0.5529	0.3151	0.8093	0.0999	0.0380	0.2758	0.2184
2001	17	0.6136	0.5278	0.5890	0.4366	0.8597	0.0858	0.0246	0.1770	0.2460
2002	16	0.6364	0.6438	0.6924	0.4516	0.8649	0.0075	0.0561	0.1848	0.2285

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
2003	15	0.6591	0.7158	0.7502	0.4891	0.8771	0.0567	0.0911	0.1700	0.2180
2004	14	0.6818	0.7626	0.7857	0.5481	0.8947	0.0808	0.1039	0.1338	0.2129
2005	13	0.7045	0.7676	0.7894	0.5749	0.9021	0.0631	0.0849	0.1296	0.1975
2006	12	0.7273	0.7703	0.7914	0.6146	0.9123	0.0430	0.0641	0.1127	0.1850
2007	11	0.7500	0.7929	0.8080	0.6191	0.9134	0.0429	0.0580	0.1309	0.1634
2008	10	0.7727	0.8005	0.8136	0.6210	0.9141	0.0278	0.0408	0.1517	0.1413
2009	9	0.7955	0.8187	0.8267	0.6426	0.9192	0.0232	0.0312	0.1529	0.1237
2010	8	0.8182	0.8598	0.8562	0.6691	0.9255	0.0416	0.0380	0.1491	0.1073
2011	7	0.8409	0.8749	0.8671	0.6794	0.9277	0.0340	0.0261	0.1615	0.0868
2012	6	0.8636	0.9104	0.8929	0.7117	0.9347	0.0467	0.0293	0.1520	0.0711
2013	5	0.8864	0.9120	0.8941	0.7808	0.9490	0.0256	0.0077	0.1055	0.0626
2014	4	0.9091	0.9152	0.8965	0.8296	0.9584	0.0061	0.0126	0.0795	0.0493
2015	3	0.9318	0.9342	0.9110	0.8903	0.9696	0.0024	0.0208	0.0415	0.0378
2016	2	0.9545	0.9598	0.9322	0.9061	0.9725	0.0053	0.0224	0.0484	0.0179
2017	1	0.9773	1.0000	0.9949	0.9257	0.9761	0.0227	0.0177	0.0516	0.0012

	Gumbel	Normal	Pearson	Weibull
D	0.1216	0.1039	0.3090	0.2771
Verificación	OK	OK	Se rechaza	Se rechaza
d	0.2486			

Tabla 6. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales mínimos (Estación 21097070). Fuente: Propia.

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
1975	43	0.0227	0.0012	0.0161	0.0000	0.0153	0.0216	0.0066	0.0227	0.0074
1976	42	0.0455	0.0066	0.0301	0.0003	0.1032	0.0388	0.0154	0.0452	0.0577
1977	41	0.0682	0.0471	0.0738	0.0059	0.3028	0.0211	0.0056	0.0623	0.2346
1978	40	0.0909	0.0636	0.0872	0.0088	0.3409	0.0274	0.0037	0.0821	0.2500
1979	39	0.1136	0.0877	0.1057	0.0090	0.3429	0.0259	0.0080	0.1047	0.2293
1980	38	0.1364	0.0956	0.1115	0.0117	0.3703	0.0408	0.0249	0.1246	0.2339
1981	37	0.1591	0.1091	0.1214	0.0201	0.4295	0.0500	0.0377	0.1390	0.2705
1982	36	0.1818	0.1508	0.1514	0.0243	0.4515	0.0311	0.0305	0.1576	0.2697
1983	35	0.2045	0.2156	0.1982	0.0267	0.4627	0.0110	0.0063	0.1779	0.2581
1984	34	0.2273	0.2319	0.2102	0.0326	0.4874	0.0046	0.0170	0.1947	0.2601
1985	33	0.2500	0.3554	0.3069	0.0329	0.4885	0.1054	0.0569	0.2171	0.2385
1986	32	0.2727	0.3805	0.3281	0.0432	0.5232	0.1078	0.0554	0.2295	0.2505
1987	31	0.2955	0.3869	0.3336	0.0460	0.5314	0.0914	0.0381	0.2495	0.2359
1988	30	0.3182	0.3889	0.3353	0.0504	0.5436	0.0707	0.0172	0.2677	0.2255
1989	29	0.3409	0.4072	0.3513	0.0505	0.5439	0.0663	0.0104	0.2904	0.2030
1990	28	0.3636	0.4085	0.3525	0.0849	0.6151	0.0449	0.0111	0.2788	0.2515
1991	27	0.3864	0.4437	0.3843	0.0982	0.6362	0.0574	0.0021	0.2882	0.2498
1992	26	0.4091	0.4698	0.4087	0.1185	0.6635	0.0607	0.0003	0.2906	0.2545
1993	25	0.4318	0.4749	0.4137	0.1221	0.6679	0.0431	0.0181	0.3097	0.2361
1994	24	0.4545	0.4817	0.4202	0.1291	0.6763	0.0272	0.0343	0.3254	0.2217
1995	23	0.4773	0.5055	0.4436	0.2345	0.7672	0.0283	0.0337	0.2428	0.2900
1996	22	0.5000	0.5107	0.4488	0.2382	0.7697	0.0107	0.0512	0.2618	0.2697
1997	21	0.5227	0.5143	0.4524	0.2436	0.7732	0.0085	0.0704	0.2791	0.2504
1998	20	0.5455	0.6269	0.5747	0.2688	0.7887	0.0814	0.0292	0.2766	0.2432
1999	19	0.5682	0.6356	0.5849	0.2762	0.7930	0.0674	0.0167	0.2920	0.2248
2000	18	0.5909	0.6401	0.5902	0.2818	0.7961	0.0491	0.0007	0.3091	0.2052
2001	17	0.6136	0.6666	0.6222	0.3115	0.8116	0.0530	0.0086	0.3022	0.1980
2002	16	0.6364	0.6856	0.6457	0.3523	0.8311	0.0492	0.0093	0.2840	0.1947

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
2003	15	0.6591	0.7419	0.7183	0.3533	0.8318	0.0828	0.0593	0.3058	0.1727
2004	14	0.6818	0.7420	0.7186	0.3754	0.8413	0.0602	0.0368	0.3064	0.1594
2005	13	0.7045	0.7507	0.7301	0.3783	0.8423	0.0461	0.0255	0.3262	0.1377
2006	12	0.7273	0.7562	0.7375	0.3861	0.8455	0.0290	0.0103	0.3412	0.1182
2007	11	0.7500	0.7787	0.7680	0.4170	0.8577	0.0287	0.0180	0.3330	0.1077
2008	10	0.7727	0.7794	0.7690	0.5792	0.9093	0.0067	0.0037	0.1936	0.1366
2009	9	0.7955	0.7943	0.7893	0.6018	0.9153	0.0012	0.0061	0.1937	0.1198
2010	8	0.8182	0.8007	0.7982	0.6963	0.9378	0.0175	0.0200	0.1219	0.1196
2011	7	0.8409	0.8129	0.8149	0.7617	0.9515	0.0281	0.0260	0.0793	0.1106
2012	6	0.8636	0.8428	0.8562	0.7841	0.9558	0.0209	0.0075	0.0795	0.0922
2013	5	0.8864	0.8554	0.8733	0.7974	0.9584	0.0310	0.0130	0.0890	0.0720
2014	4	0.9091	0.8563	0.8745	0.8401	0.9663	0.0528	0.0345	0.0690	0.0572
2015	3	0.9318	0.8727	0.8965	0.8718	0.9719	0.0592	0.0353	0.0600	0.0401
2016	2	0.9545	0.9436	0.9775	0.9724	0.9893	0.0110	0.0229	0.0179	0.0347
2017	1	0.9773	0.9743	0.9966	0.9962	0.9945	0.0030	0.0193	0.0190	0.0172

	Gumbel	Normal	Pearson	Weibull
D	0.1078	0.0704	0.3412	0.2900
Verificación	OK	OK	Se rechaza	Se rechaza
d	0.2486			

Tabla 7. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales máximos (Estación 21097120). Fuente: Propia.

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
1975	43	0.0227	0.0022	0.0201	0.0000	0.0125	0.0205	0.0027	0.0227	0.0102
1976	42	0.0455	0.0049	0.0267	0.0001	0.0249	0.0406	0.0187	0.0454	0.0205
1977	41	0.0682	0.0570	0.0820	0.0007	0.1171	0.0112	0.0138	0.0675	0.0490
1978	40	0.0909	0.0623	0.0862	0.0129	0.3654	0.0286	0.0047	0.0780	0.2745
1979	39	0.1136	0.0827	0.1019	0.0178	0.4030	0.0310	0.0117	0.0958	0.2894
1980	38	0.1364	0.1160	0.1264	0.0200	0.4167	0.0203	0.0099	0.1164	0.2804
1981	37	0.1591	0.1287	0.1356	0.0209	0.4221	0.0304	0.0235	0.1382	0.2630
1982	36	0.1818	0.1903	0.1798	0.0258	0.4479	0.0085	0.0020	0.1560	0.2661
1983	35	0.2045	0.2597	0.2311	0.0286	0.4613	0.0551	0.0265	0.1759	0.2567
1984	34	0.2273	0.2805	0.2469	0.0388	0.5009	0.0532	0.0197	0.1885	0.2736
1985	33	0.2500	0.2933	0.2569	0.0443	0.5187	0.0433	0.0069	0.2057	0.2687
1986	32	0.2727	0.3453	0.2985	0.0483	0.5305	0.0726	0.0258	0.2245	0.2577
1987	31	0.2955	0.3681	0.3176	0.0499	0.5352	0.0727	0.0221	0.2455	0.2397
1988	30	0.3182	0.3963	0.3418	0.0566	0.5526	0.0781	0.0236	0.2616	0.2344
1989	29	0.3409	0.4148	0.3581	0.0594	0.5590	0.0739	0.0171	0.2815	0.2181
1990	28	0.3636	0.4304	0.3721	0.0889	0.6168	0.0668	0.0085	0.2747	0.2531
1991	27	0.3864	0.4460	0.3864	0.0944	0.6256	0.0596	0.0000	0.2919	0.2393
1992	26	0.4091	0.4601	0.3995	0.1120	0.6506	0.0510	0.0095	0.2971	0.2415
1993	25	0.4318	0.4663	0.4054	0.1358	0.6795	0.0345	0.0264	0.2960	0.2477
1994	24	0.4545	0.4837	0.4222	0.1403	0.6844	0.0292	0.0324	0.3143	0.2299
1995	23	0.4773	0.4839	0.4223	0.2103	0.7460	0.0066	0.0550	0.2670	0.2688
1996	22	0.5000	0.4975	0.4356	0.2462	0.7703	0.0025	0.0644	0.2538	0.2703
1997	21	0.5227	0.5326	0.4711	0.2606	0.7791	0.0098	0.0517	0.2621	0.2564
1998	20	0.5455	0.6088	0.5538	0.2606	0.7792	0.0633	0.0084	0.2849	0.2337
1999	19	0.5682	0.6142	0.5600	0.2798	0.7901	0.0460	0.0082	0.2884	0.2219
2000	18	0.5909	0.6442	0.5951	0.2862	0.7938	0.0533	0.0042	0.3047	0.2029
2001	17	0.6136	0.6680	0.6239	0.3021	0.8021	0.0544	0.0103	0.3115	0.1885
2002	16	0.6364	0.6760	0.6338	0.3207	0.8111	0.0397	0.0026	0.3156	0.1747

Año	Orden	F_Observada	F_Gumbel	F_Normal	F_Pearson	F_Weibull	ABS_Gumbel	ABS_Normal	ABS_Pearson	ABS_Weibull
2003	15	0.6591	0.7234	0.6940	0.3381	0.8196	0.0643	0.0349	0.3210	0.1605
2004	14	0.6818	0.7282	0.7003	0.3605	0.8294	0.0463	0.0185	0.3214	0.1476
2005	13	0.7045	0.7407	0.7168	0.3953	0.8435	0.0362	0.0123	0.3093	0.1390
2006	12	0.7273	0.7440	0.7212	0.4240	0.8544	0.0168	0.0060	0.3033	0.1271
2007	11	0.7500	0.7521	0.7320	0.4918	0.8774	0.0021	0.0180	0.2582	0.1274
2008	10	0.7727	0.7638	0.7478	0.5090	0.8827	0.0089	0.0250	0.2637	0.1099
2009	9	0.7955	0.7881	0.7809	0.5373	0.8910	0.0073	0.0146	0.2581	0.0956
2010	8	0.8182	0.7958	0.7914	0.6365	0.9171	0.0224	0.0268	0.1816	0.0989
2011	7	0.8409	0.8099	0.8109	0.7322	0.9385	0.0310	0.0300	0.1087	0.0976
2012	6	0.8636	0.8127	0.8148	0.7528	0.9428	0.0509	0.0488	0.1108	0.0791
2013	5	0.8864	0.8198	0.8246	0.8101	0.9541	0.0665	0.0618	0.0762	0.0678
2014	4	0.9091	0.8382	0.8499	0.8476	0.9613	0.0709	0.0592	0.0614	0.0522
2015	3	0.9318	0.9320	0.9668	0.8580	0.9632	0.0002	0.0350	0.0738	0.0314
2016	2	0.9545	0.9633	0.9915	0.9846	0.9876	0.0087	0.0370	0.0300	0.0331
2017	1	0.9773	0.9689	0.9944	0.9947	0.9905	0.0084	0.0171	0.0174	0.0133

	Gumbel	Normal	Pearson	Weibull
D	0.0781	0.0644	0.3214	0.2894
Verificación	OK	OK	Se rechaza	Se rechaza
d	0.2486			

Tabla 8. Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para caudales máximos (Estación 21097070). Fuente: Propia.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, se tiene que para el cálculo de las métricas hidrológicas será utilizada la distribución de probabilidad normal. Para el cálculo de la métrica que representa el evento extremo mínimo, se debe determinar el caudal mínimo para un periodo de retorno de 10 años. En cuanto al evento extremo máximo, la métrica corresponde al caudal máximo para un periodo de retorno de 15 años. Para ello se utiliza el método de los mínimos cuadrados (Monsalve Sáenz, 1995) con la variable estandarizada z .

1) Evento extremo mínimo

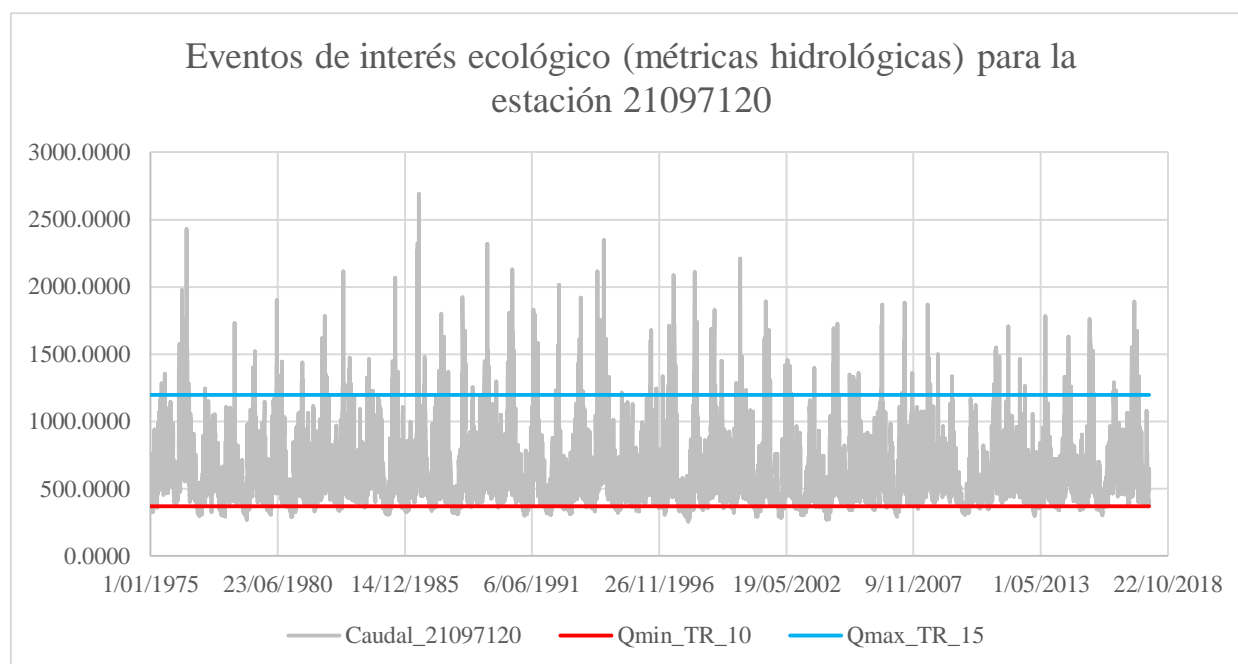
	Tr (años)	P ($x < X$)	X	z	Qmin (m3/s)
Estación_21097120	10	0.1000	370.8295	-1.2816	370.8295
Estación_21097070	10	0.1000	236.2180	-1.2816	236.2180

Tabla 9. Eventos extremos mínimos - Métricas hidrológicas. Fuente: Propia.

2) Evento extremo máximo

	Tr (años)	P ($x > X$)	X	z	Qmax (m3/s)
Estación_21097120	15	0.0667	1199.9466	1.5011	1199.9466
Estación_21097070	15	0.0667	1121.3097	1.5011	1121.3097

Tabla 10. Eventos extremos máximos - Métricas hidrológicas. Fuente: Propia.



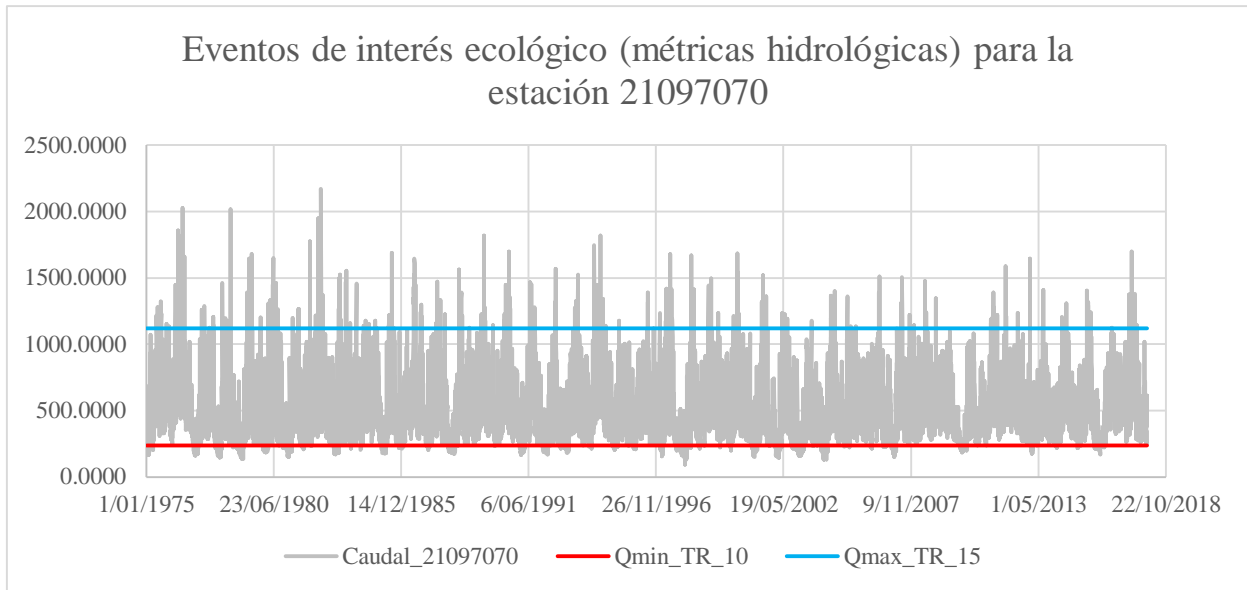


Figura 31. Métricas hidrológicas para la identificación de eventos de interés ecológico. Fuente: Propia

6.1.1.3.2. Métricas hidromorfométricas

Según lo establecido en la metodología, estas métricas se encuentran relacionadas con la conectividad lateral y longitudinal de los cuerpos de agua en estudio. Para la caracterización de la conectividad lateral se usa el caudal de banca llena y para la conectividad longitudinal el caudal proveniente del diagrama de tiempo de tránsito en función del caudal. A continuación, se describe el procedimiento utilizado y los resultados obtenidos.

6.1.1.3.2.1. Caudal de banca llena

Se parte de la elección de la metodología a utilizar en función de la disponibilidad de información hidrométrica, teniendo dos posibilidades. La primera se basa en el cálculo del caudal de banca llena de acuerdo con modelos hidráulicos detallados que se tengan y la segunda usa únicamente la sección transversal de la zona de estudio. En la presente investigación, solo se contaba con dos secciones transversales para los dos puntos objeto de estudio. Dichas secciones fueron obtenidas del informe de calidad de agua del río Magdalena realizado por el IDEAM en el 2013, para el cual se realizaron batimetrías en agosto y noviembre de dicho año (IDEAM, 2014).

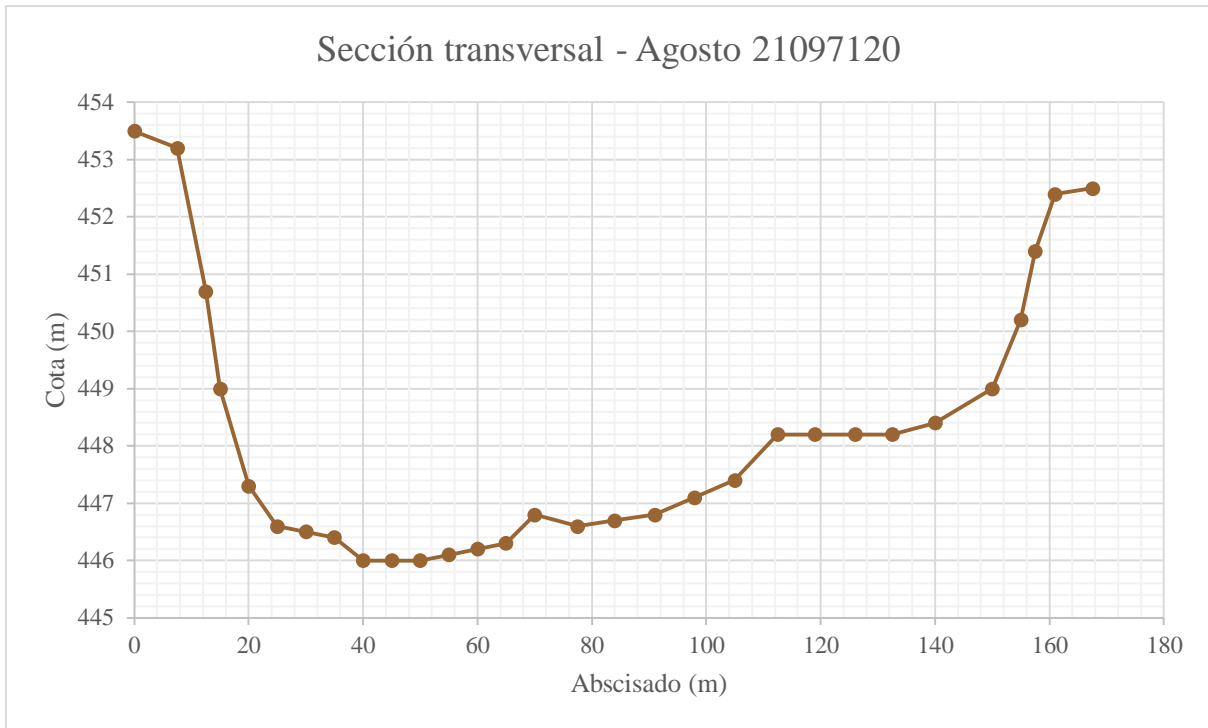


Figura 32. Sección transversal tomada en agosto de la estación 21097120. Fuente: (IDEAM, 2014)



Figura 33. Sección transversal tomada en noviembre de la estación 21097120. Fuente: (IDEAM, 2014).

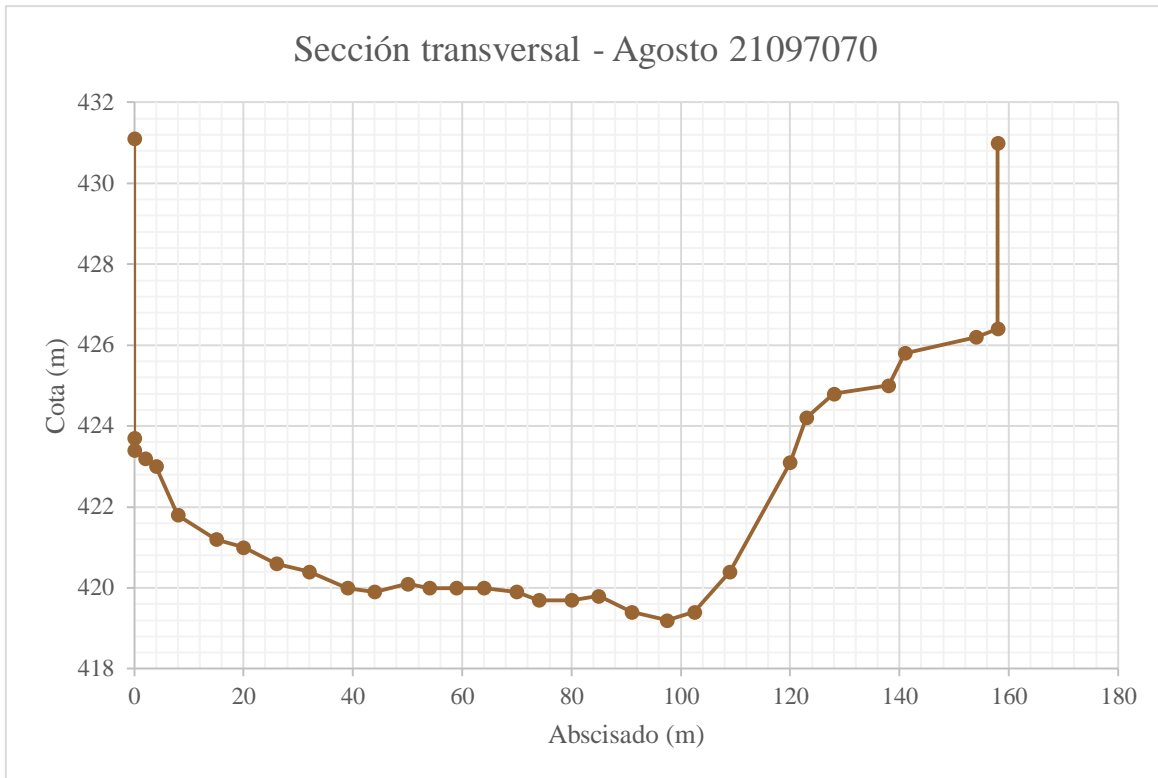


Figura 34. Sección transversal tomada en agosto de la estación 21097070. Fuente: (IDEAM, 2014).

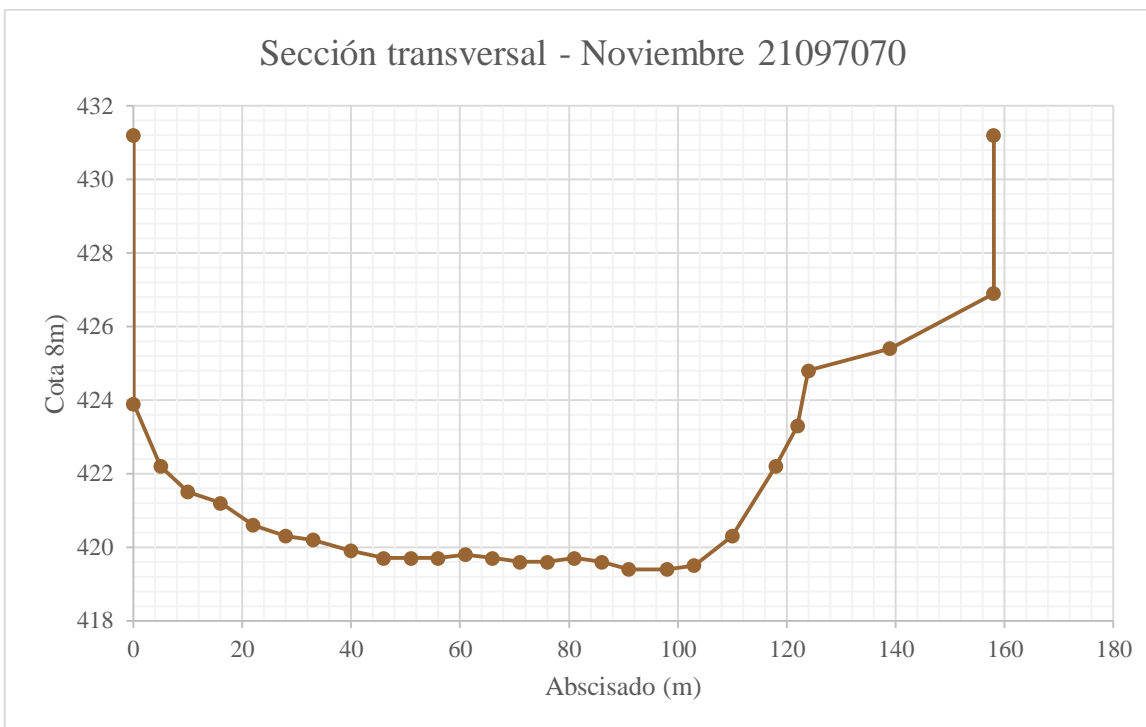


Figura 35. . Sección transversal tomada en noviembre de la estación 21097070. Fuente: (IDEAM, 2014)

Posteriormente, se simularon diferentes condiciones de nivel de agua de la sección bajo la suposición de flujo uniforme usando la herramienta computacional de diseño hidráulico disponible en HEC – RAS. Una vez se obtuvieron los caudales para diferentes elevaciones del nivel del agua de las secciones, se modeló el flujo uniforme subcrítico para los caudales anteriormente calculados con el fin de determinar los parámetros hidromorfológicos de las secciones tales como el área, el ancho hidráulico, la velocidad de flujo, entre otros. Estos son los insumos para calcular la relación ancho-profundidad y la potencia específica de la corriente, los cuales corresponden a los criterios bajo los cuales se calcula el caudal de banca llena teniendo que este es igual al caudal donde la relación alcance un mínimo local y la potencia un máximo local.

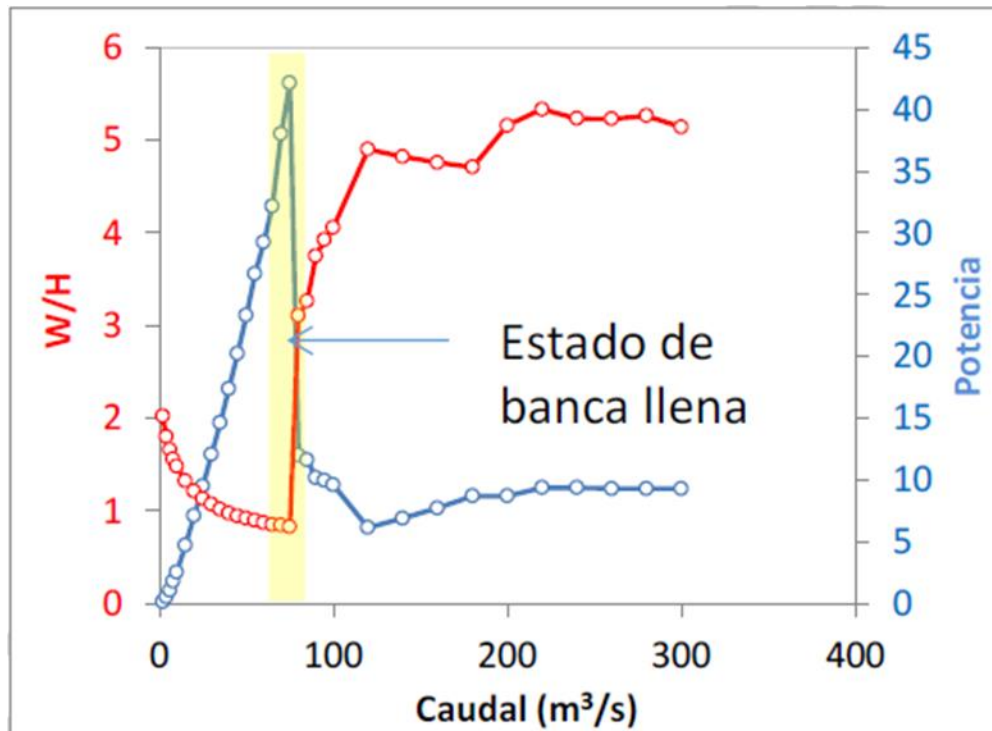


Figura 36. Estado de banca llena teórico descrito por la metodología. Fuente:(IDEAM, 2017).

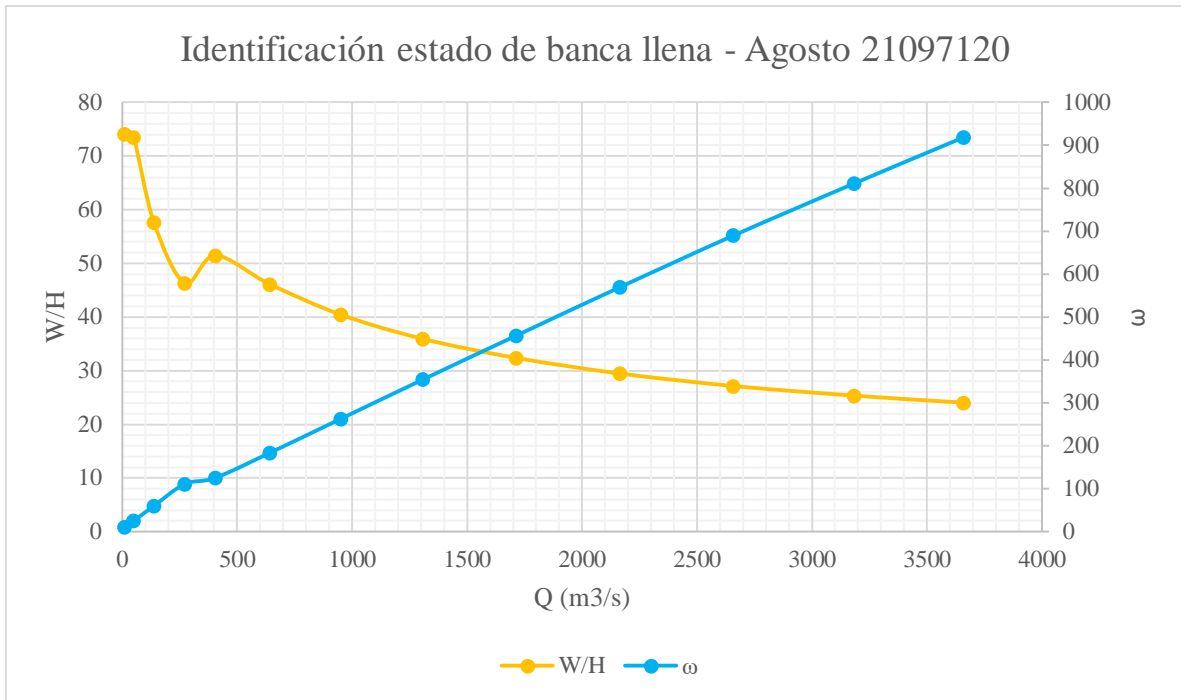


Figura 37. Identificación del estado de banca llena de la estación 21097120 para la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.

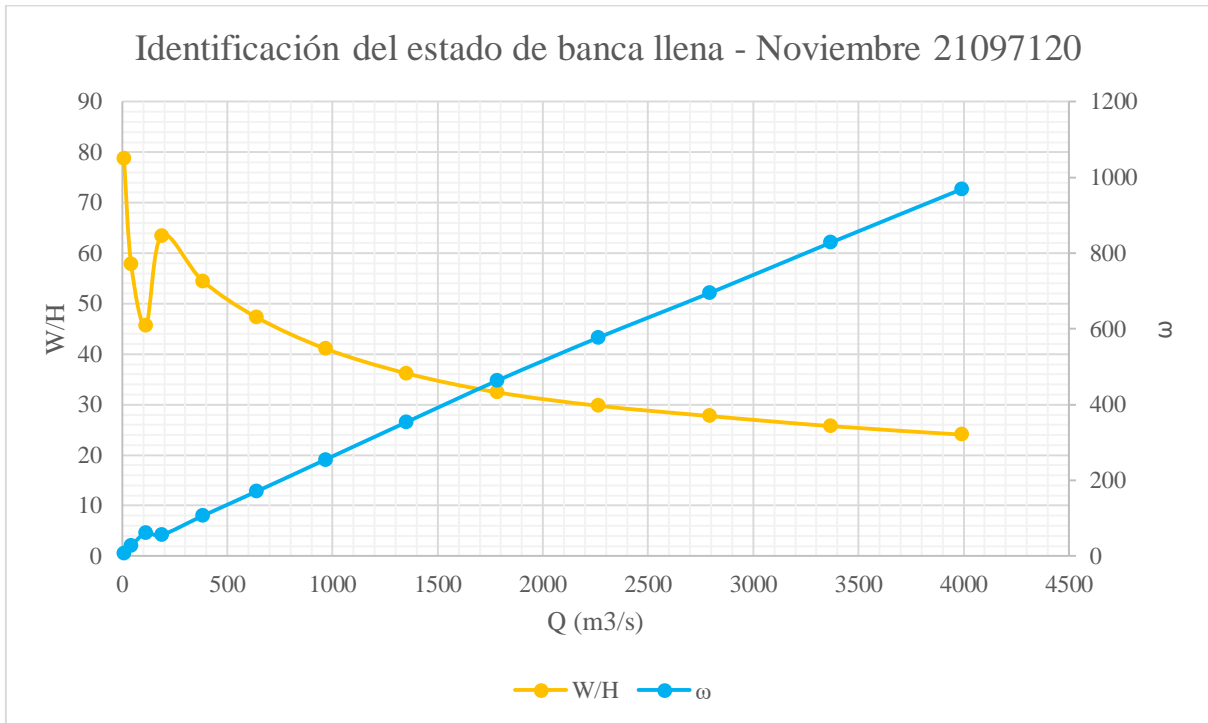


Figura 38. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097120 para la batimetría tomada en noviembre. Fuente: Propia.

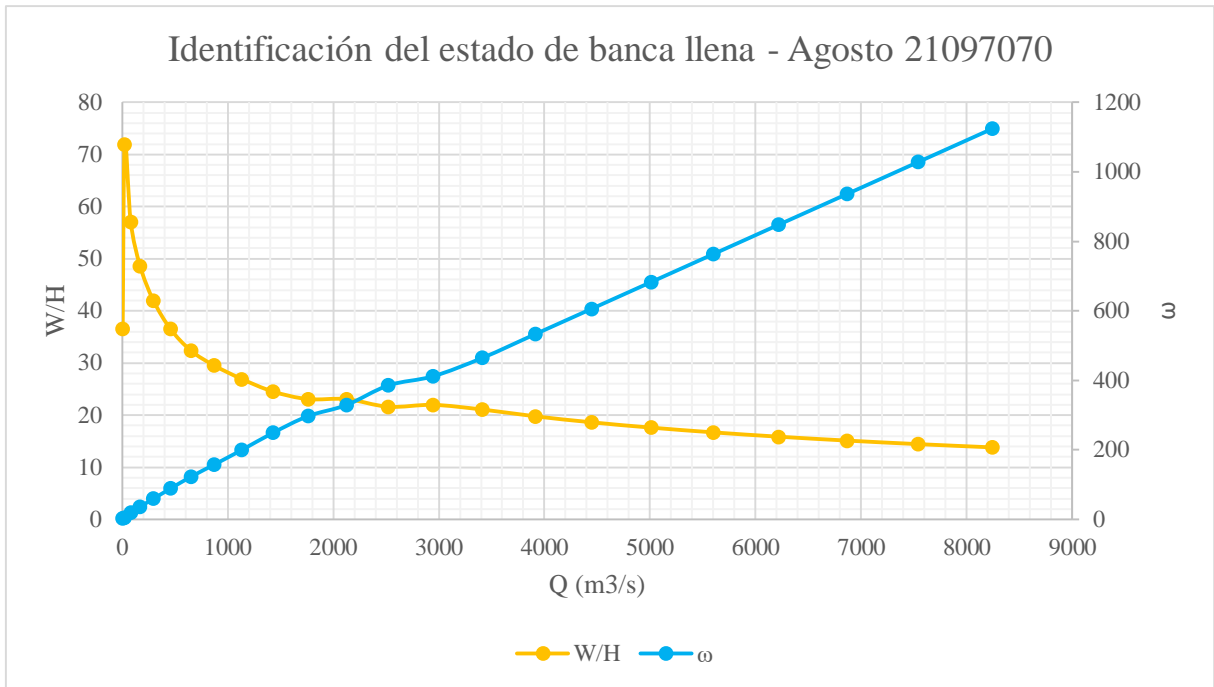


Figura 39. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097070 para la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.

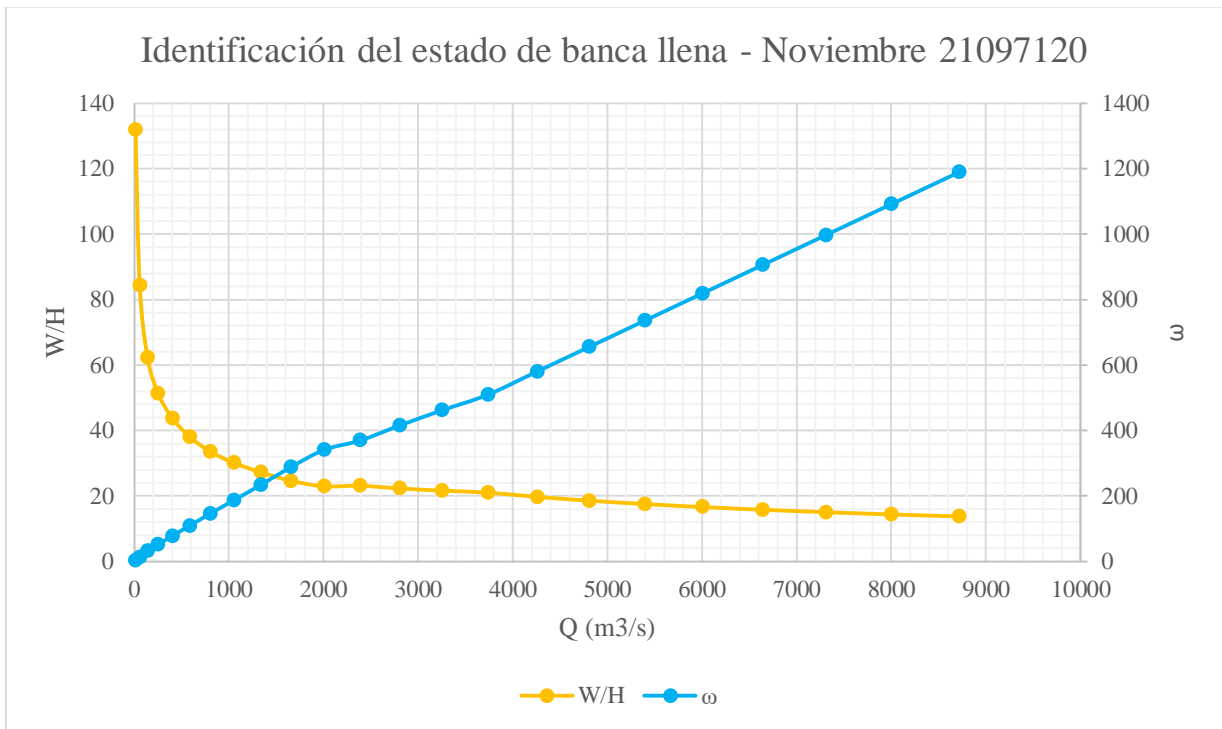


Figura 40. Identificación del estado de banca llena para la estación 21097070 para la batimetría tomada en noviembre. Fuente: Propia.

Al analizar los resultados obtenidos, se observa que no se tiene el comportamiento esperado. En cuanto a la estación 21097120, hay una pequeña tendencia hacia los mínimos y máximos locales, pero no tal y como la metodología lo exige y para la estación 21097070 no se presentan para nada dichos fenómenos. Esto se debe a que el método para el cálculo del caudal de banca llena propuesto por la metodología colombiana está pensado en secciones transversales inconfiadas, es decir, que en las secciones se presentan planicies de inundación. Sin embargo, las secciones transversales que se tienen son confinadas, de manera que, nunca se llegará al estado de banca llena.

En la figura a continuación se muestra un esquema que describe la condición inconfiada: Antes del estado de banca llena la profundidad del agua crece con una mayor tasa que el ancho hidráulico teniendo como resultado la disminución de la relación ancho-profundidad a medida que aumenta la profundidad. Justo después del estado de banca llena el ancho hidráulico crece con una mayor tasa que la profundidad obteniendo así que la relación ancho-profundidad crezca bruscamente. Finalmente, después del estado de banca llena el comportamiento vuelve a ser igual que en la condición antes de banca llena, es decir, la relación ancho-profundidad vuelve a disminuir con el aumento de la profundidad.

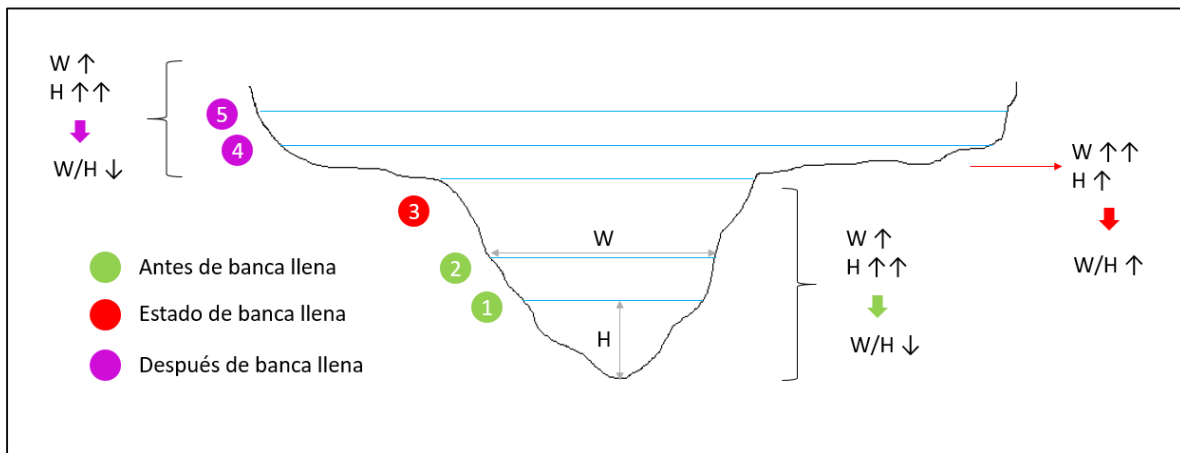


Figura 41. Esquema explicativo del estado de banca llena con base en la relación ancho-profundidad para una sección inconfiada. Fuente: Propia.

De manera análoga ocurre con la potencia específica. Cuando no se ha alcanzado el estado de banca llena el caudal crece con una mayor tasa que el ancho hidráulico teniendo como resultado el aumento de la potencia específica a medida que aumenta el caudal. Una vez se ha llegado al estado de banca llena, el ancho hidráulico crece con una mayor tasa que el caudal lo que hace que la potencia

específica crezca repentinamente. Después de que se ha presentado el estado de banca llena, el comportamiento hidráulico de la sección vuelve a ser como al principio.

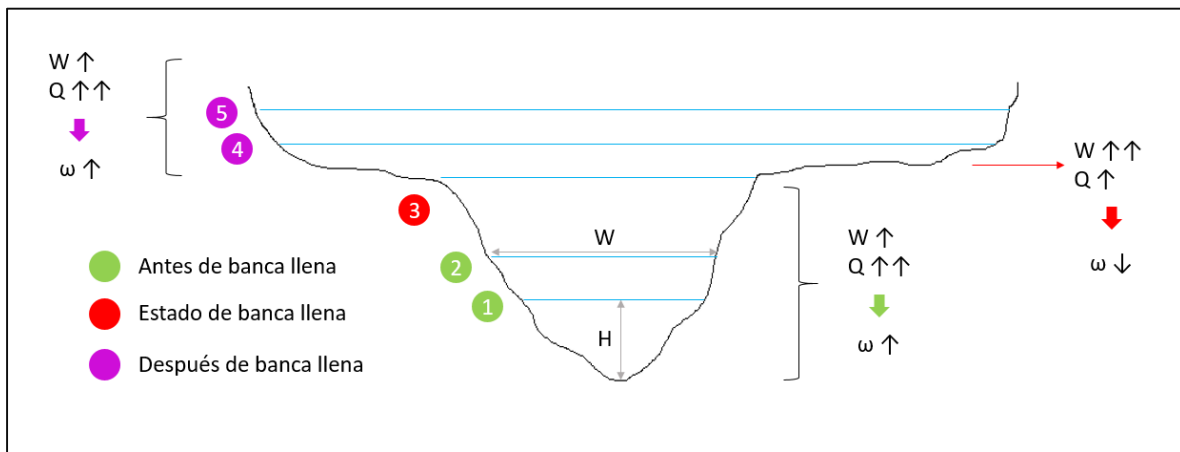


Figura 42. Esquema explicativo del estado de banca llena en términos de la potencia específica de la corriente para una sección inconfiada. Fuente: Propia.

A manera de prueba, se realizó una modelación de la estación 21097070 con la batimetría tomada en agosto de 2013 creando unas planicies de inundación ficticias partiendo de los extremos superiores de las secciones que ya se tenían. Se repitió todo el procedimiento ya explicado para el cálculo del caudal de banca llena y en este caso si se obtuvieron los máximos y mínimos locales descritos por la metodología. Sin embargo, el caudal correspondiente al estado de banca llena era del orden de 8000 m³/s; magnitud que supera en gran manera la capacidad de transporte de flujo del río y que adicionalmente no se asemeja a un caudal de 1200 m³/s correspondiente al orden de magnitud de la métrica hidrológica que describe los eventos máximos (caudal máximo con periodo de retorno de 15 años).

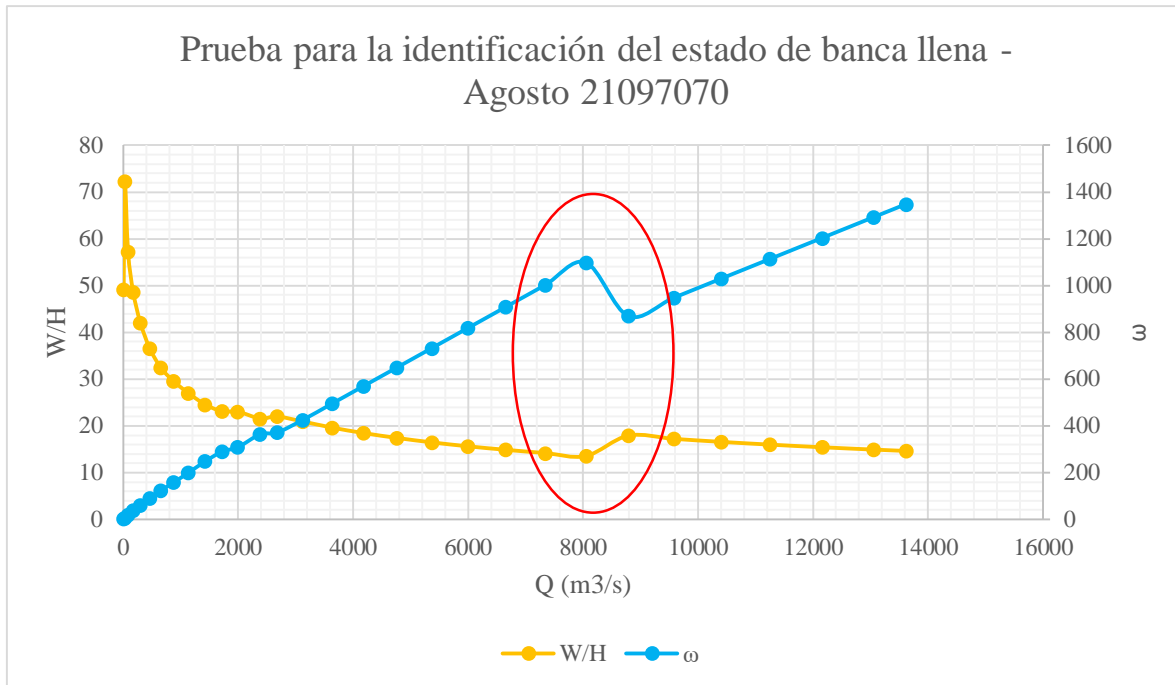


Figura 43. Relación ancho-profundidad y potencia específica para la condición ficticia generada en la estación 21097070 con la batimetría tomada en agosto. Fuente: Propia.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, en una sección confinada nunca se va a tener el cambio repentino ya sea de la relación ancho-profundidad o de la potencia específica. Consecuentemente no se puede calcular el caudal de banca llena usando el método establecido por la metodología colombiana. De manera que, al hacer una revisión bibliográfica, se encontró que el caudal formador de un canal se puede asociar al caudal con el mejor ajuste a una distribución de probabilidad con periodo de retorno de 2.33 años (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Anteriormente, en el cálculo de las métricas hidrológicas se determinó que el mejor ajuste a una distribución de probabilidad para ambas estaciones corresponde a la distribución normal. Con lo que el caudal de banca llena para un periodo de retorno de 2.33 años resulta siendo 1037.1940 m³/s para la estación 21097120 y 961.8888 m³/s; caudales que tienen un orden de magnitud similar al caudal máximo para un periodo de retorno de 15 años (métrica hidrológica que caracteriza los eventos hidrológicos máximos de interés ecológico).

6.1.1.3.2.2. Caudal del diagrama de tiempo de tránsito en función del caudal

Para el cálculo de esta métrica existen dos posibles escenarios, el caso 1 en el que no se cuenta con información hidráulica detallada y el caso 2 en el que si hay disponibilidad de dicha información.

Como se mencionó en la sección anterior sobre el cálculo del caudal de banca llena, el caso de estudio solamente cuenta con la información hidráulica correspondiente a dos batimetrías tomadas en agosto y noviembre del 2013 para cada una de las estaciones consideradas. De manera que, se trabajó de acuerdo con el caso 1.

Posteriormente, se determinó si los tramos analizados se caracterizan por ser ríos de alta pendiente o de baja pendiente. De acuerdo con el árbol de clasificación propuesto por (Flores, Bledsoe, Cuhaciyán, & Wohl, 2006), se tienen tramos de río limitados por capacidad; los cuales a su vez hacen referencia a ríos de baja pendiente. De modo que, para este tipo de ríos se implementó el modelo MDLC (Multilinear Discrete Lag-Cascade). Cabe resaltar que se utilizaron los modelos de flujo uniforme desarrollados en HEC-RAS para el cálculo del caudal de banca llena y, así mismo, para el cálculo de la celeridad de onda se aplicó el modelo de la onda cinemática; obteniendo los diagramas de tiempo de tránsito – caudal mostrado a continuación.

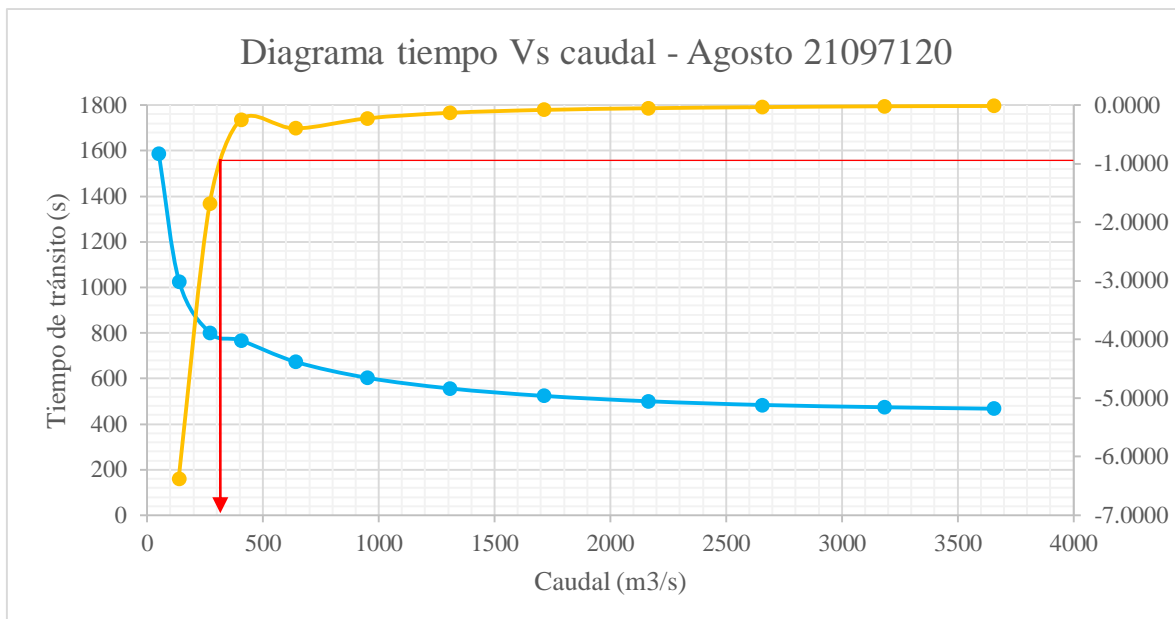


Figura 44. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de agosto en la estación 21097120. Fuente: Propia.

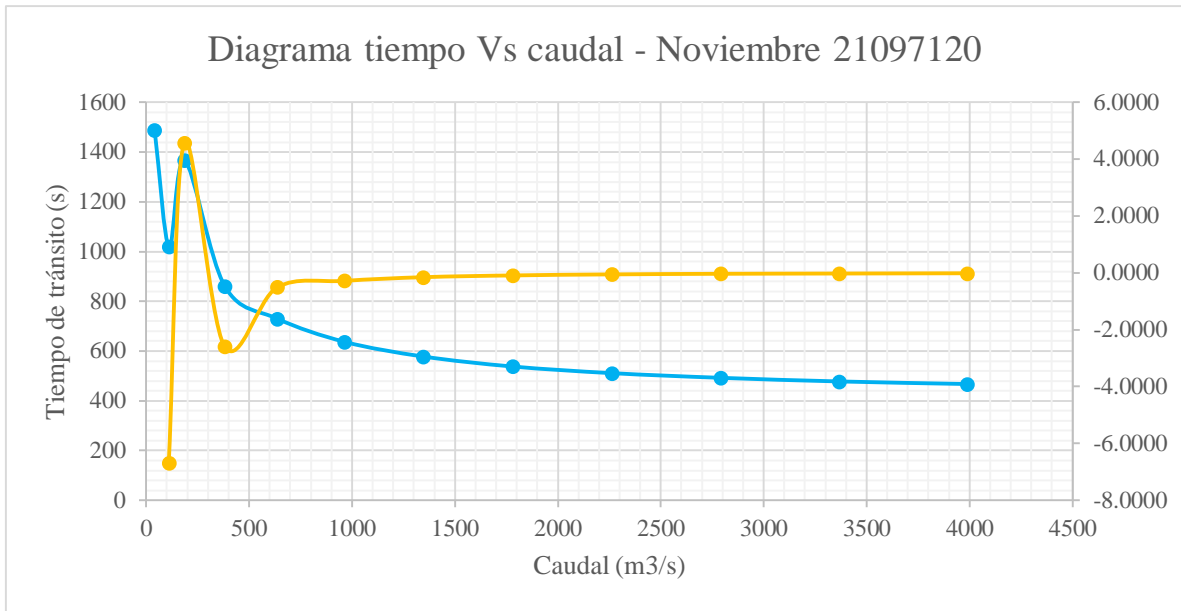


Figura 45. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de noviembre en la estación 21097120. Fuente: Propia.

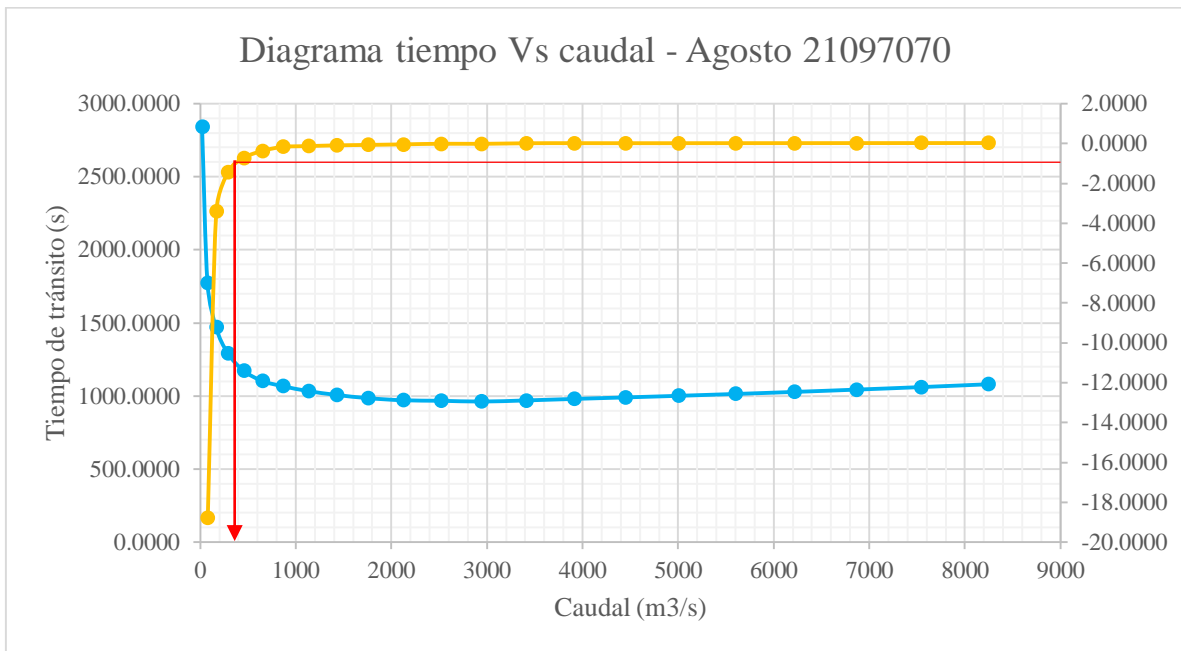


Figura 46. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de agosto en la estación 21097070. Fuente: Propia.

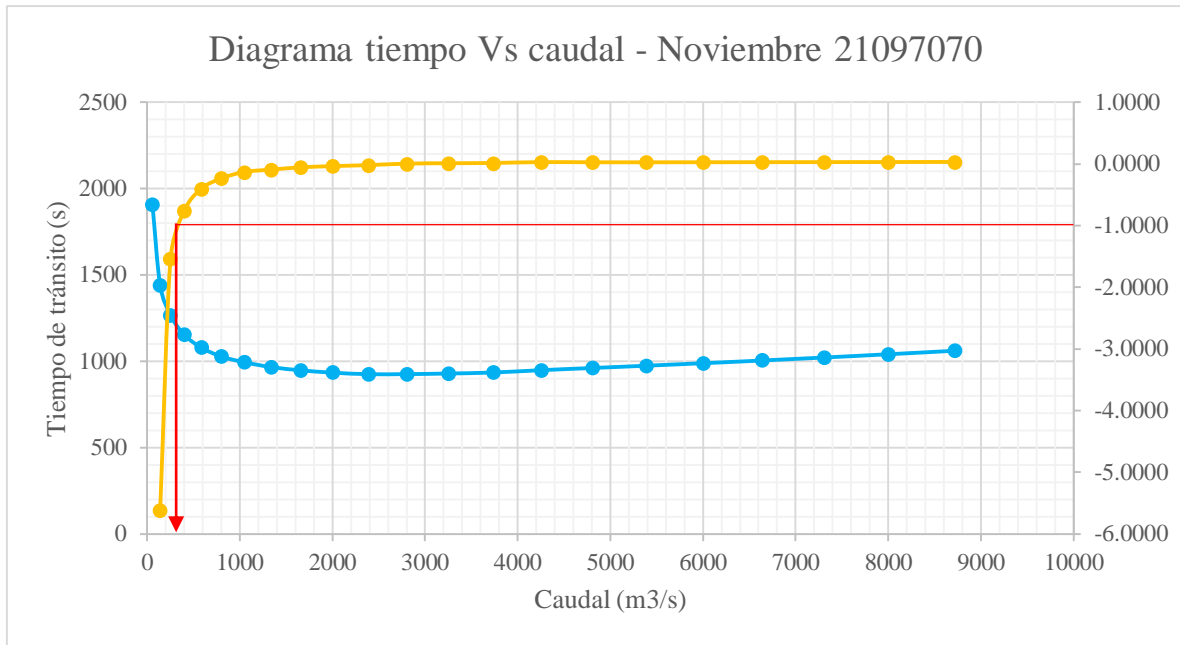


Figura 47. Diagrama de tiempo de tránsito caudal para batimetría de noviembre en la estación 21097070. Fuente: Propia.

En los diagramas anteriormente mostrados, se puede observar que para la estación 21097120 en la batimetría de noviembre se obtiene un comportamiento no esperado; motivo por el cual este diagrama se descarta y el caudal para dicha estación resulta siendo 306 m³/s. En cuanto a la estación 21097070, los caudales son 375 m³/s y 310 m³/s para las batimetrías de agosto y noviembre, respectivamente. Por lo que, la métrica final para la estación 21097070 se determinó como el promedio entre los caudales mencionados previamente, es decir, 342.5 m³/s. De tal modo que, la condición natural responde a las métricas hidrológicas e hidromorfométricas como se muestra a continuación.

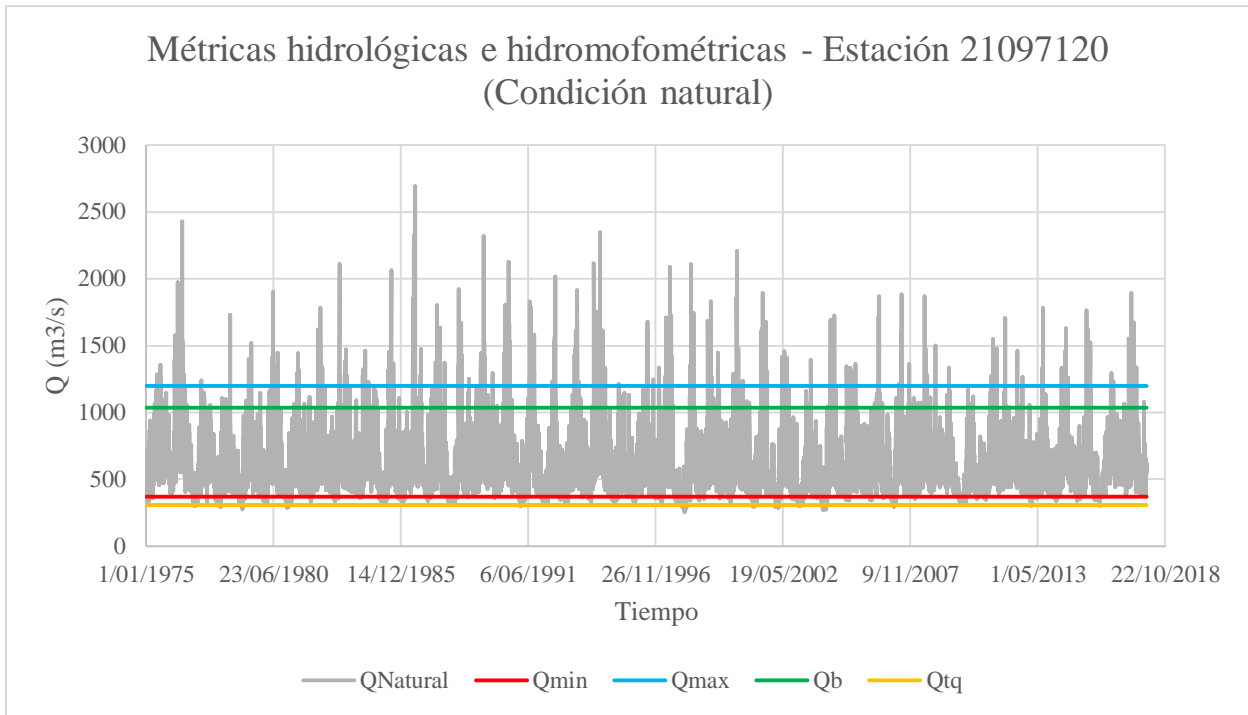


Figura 48. Métricas hidrológicas e hidromorfométricas en la condición natural para la estación 21097120. Fuente: Propia.

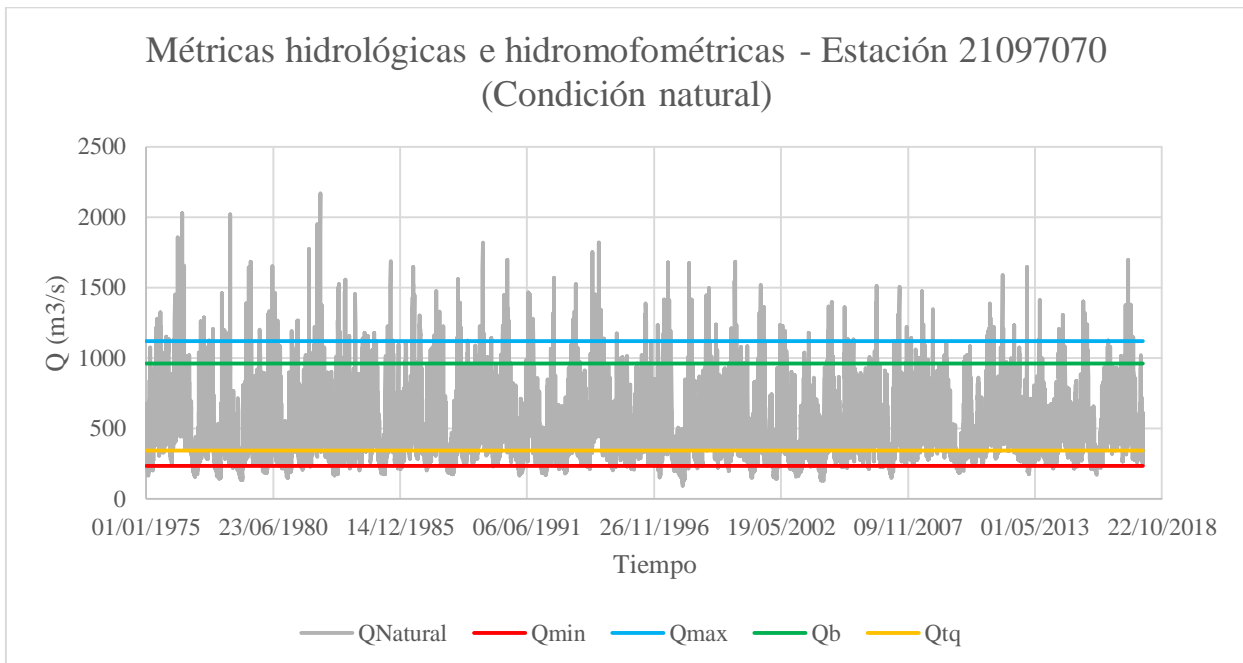


Figura 49. Métricas hidrológicas e hidromorfométricas en la condición natural para la estación 21097070. Fuente: Propia.

Con las métricas para la caracterización de los eventos de interés ecológicos, fue posible la identificación de aquellos eventos de caudal que superaran el caudal de banca llena y el caudal máximo con periodo de retorno de 15 años. Así mismo, se identificaron los eventos inferiores al caudal de la relación tiempo de tránsito y del caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años. La identificación de los eventos se hizo en términos de la duración, magnitud y caudal (intensidad) para cada evento de interés ecológico de cada mes para cada una de las métricas por separado; considerando la fecha de inicio y de finalización del correspondiente evento.

6.1.1.4. Escenarios de aprovechamiento de caudales

Existen diversas maneras de operación de embalses dependiendo del objetivo que se pretenda alcanzar con dicha estructura. En el presente estudio, se plantearon un total de seis escenarios diferentes para el aprovechamiento de caudales que corresponden a distintas reglas de operación en función de diferentes parámetros; los cuales pueden ser agrupados en cuatro grupos generales. Dichos escenarios son los mencionados a continuación:

- Caso 1: Regla de operación en función de la demanda de energía.
- Caso 2: Regla de operación en función de las afluencias al embalse.
- Caso 3: Regla de operación en función del caudal ambiental mínimo o generación de energía mínima.
- Caso 4: Regla de operación en función del almacenamiento del embalse.

6.1.1.4.1.1. Caso 1: Regla de operación en función de la demanda de energía

6.1.1.4.1.1.1. Escenario 1: Regla de operación en función de la demanda de energía diaria

Se contaba con el registro histórico de la energía producida por la represa de Betania desde el 01 de enero de año 2000 hasta el 31 de diciembre de 2015, información que podía utilizarse directamente como demanda para en modelo de operación del embalse en WEAP. Sin embargo, el estudio realizado contempló un periodo de análisis comprendido entre el 01 de enero del año 1975 y el 31 de diciembre del año 2017. Por esta razón, se requirió de la generación de una serie sintética de demanda partiendo de la información disponible.

Para ello, se calculó el factor de planta diario para cada uno de los meses para cada uno de los años de acuerdo con la siguiente expresión:

$$FP_i = \frac{PME_i}{P_{BETANIA}} \quad (57)$$

$$PME_I = \frac{E_{PRODUCIDA i}}{t} \quad (58)$$

Donde:

FP_i : Factor de planta diario de Betania (%)

PME_i : Potencia media equivalente diaria (MW)

$P_{BETANIA}$: Potencia total de Betania (MW)

$E_{PRODUCIDA i}$: Energía eléctrica producida por Betenia (KWh)

t : Tiempo en el que se produce la energía eléctrica en Betania (h)

Posteriormente, se realizaron ajustes del factor de planta a diferentes distribuciones de probabilidad para cada mes a escala diaria. Las distribuciones de probabilidad utilizadas fueron la distribución gamma, la distribución normal, la distribución beta, la distribución T y la distribución F. Para la selección del mejor ajuste, se realizó la minimización del error entre la frecuencia observada (calculada con la ecuación de Weibull) y la frecuencia teórica de la correspondiente distribución de probabilidad a partir de frecuencias acumuladas (Mayes, 2019).

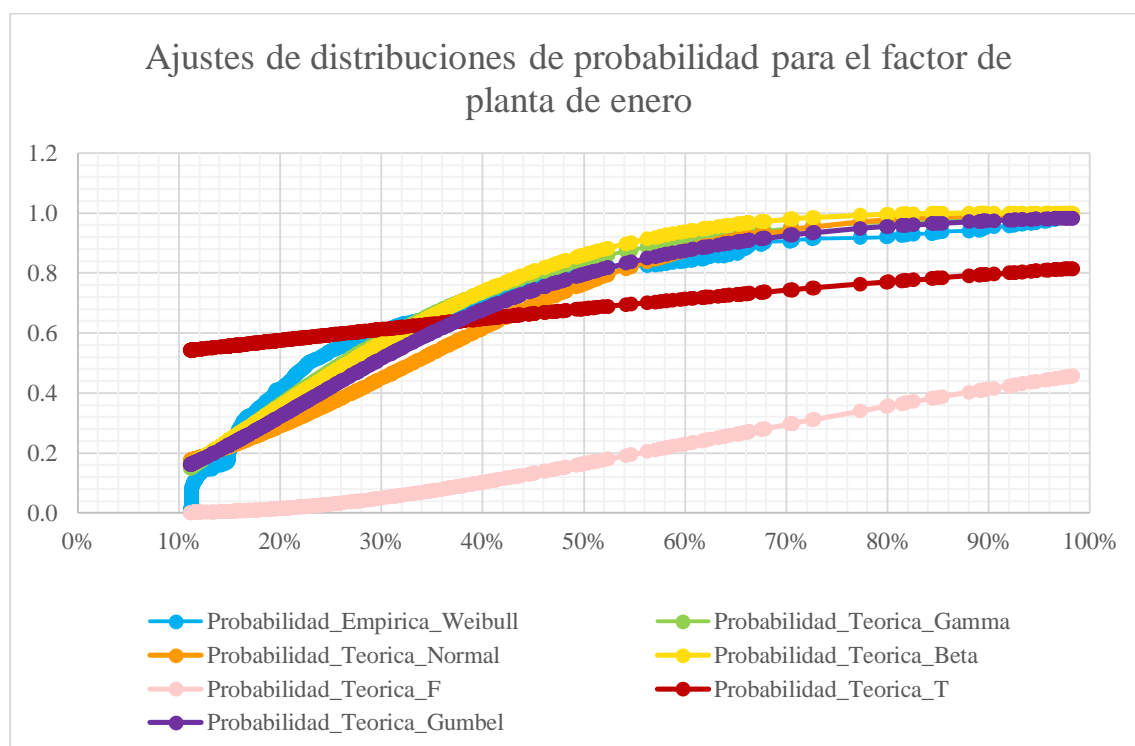


Figura 50. Ejemplo de ajustes de distribuciones de probabilidad para el factor de planta de enero. Fuente: Propia.

Una vez seleccionada la distribución de probabilidad que mejor se ajustara, se generó una serie de datos de variables aleatorias uniformemente distribuidas en un rango entre 0 y 1. Esta serie se utilizó como una serie de frecuencias que comprendía el periodo de estudio completo para calcular el valor del factor de planta en cada uno de los días desde 1975 hasta 2017 a través de la distribución de probabilidad teórica seleccionada (Mayes, 2019). Luego se aplicó el proceso inverso y se calculó la energía demandada de acuerdo con ese factor de planta calculado, teniendo así el input para la generación del primer escenario. Se procedió con la modelación en WEAP de este escenario de demanda permitiendo tener la serie de caudales aguas abajo de la represa de Betania. Se verificó que estos caudales fueran mayores que el caudal mínimo mensual de la condición natural; en los casos en los que el caudal no cumpliera estos valores debían ser reemplazados por el correspondiente caudal mínimo.

6.1.1.4.1.2. Escenario 2: Regla de operación en función de la demanda de energía promedio mensual

Este escenario se obtuvo a partir de la serie sintética de demanda de energía calculada en el escenario 1 con algunas modificaciones. Dicho escenario permite que el operador maneje el embalse con total libertad, esto hace referencia a que un día puede presentarse un pico de producción de energía y al siguiente día la producción puede ser mínima sin ningún inconveniente. De manera que, el escenario 2 se tuvo como objetivo suprimir la flexibilidad del mercado de energía, es decir, que no hubiese lugar a fluctuaciones tan abruptas en la producción de energía, sino que esto se implementara con mayor control. De modo que, se generó una serie de demanda promedio mensual, en otras palabras, se calculó la demanda de energía promedio para cada mes en cada año y este valor fue asignado para cada uno de los días del correspondiente mes y año.

6.1.1.4.1.2. Caso 2: Regla de operación en función de las afluencias al embalse

6.1.1.4.1.2.1. Escenario 3: Regla de operación en la que las salidas de agua son iguales al 80% de las afluencias al embalse

Dependiendo del objetivo del embalse, el manejo de las afluencias y las salidas del mismo varía. Esto afecta el comportamiento natural del flujo en el río y, por ende, el modo de vida de los ecosistemas aguas abajo de la hidroeléctrica. Sin embargo, se comprende que debe haber un balance entre las necesidades del ecosistema aguas abajo y las necesidades del embalse. En la definición de la condición natural, fue necesario determinar las afluencias totales que recibía el embalse por parte de

los tres ríos que este tiene aguas arriba y, así mismo, se determinaron las series de caudal aguas abajo de la represa en la condición actual; con lo que se pudo estimar la relación entre las afluencias y las salidas. Se obtuvo como resultado que en promedio esta relación es del orden del 70% para cada uno de los meses incluidos dentro del periodo de estudio.

De manera que, con el fin de reducir la cantidad de agua que se queda en el embalse para sus diferentes usos, en el escenario 3 se decidió incrementar dicha relación en un 10%. En otras palabras, se estableció como requerimiento que aguas abajo de la represa las salidas fueran equivalentes a 80% de las afluencias del embalse. Consecuentemente, se redujeron las pérdidas de flujo de un 30% a un 20%. Cabe aclarar que dentro de este escenario también se tuvo como requerimiento la demanda de energía sintética generada para el escenario 1 pero estableciendo una mayor prioridad al requerimiento de caudal aguas abajo que a la producción de energía.

6.1.1.4.1.2.2. Escenario 4: Regla de operación en la que las salidas de agua son iguales a las afluencias al embalse

El objetivo de este escenario consiste en limitar las pérdidas de flujo generadas por la represa, y así mismo, el almacenamiento del embalse. Esto es, que el flujo de agua se utilice explícitamente para la producción de energía sin generar alteraciones en el flujo de salida del embalse. De manera que, la cantidad de agua que entra al embalse es igual a la cantidad de agua que sale por el mismo. Para ello lo que se hizo fue tomar como base el escenario 1 y modifica el coeficiente buffer dejándolo en cero e igualando las elevaciones de buffer (top of buffer) y de amortiguamiento (top of conservation).

6.1.1.4.1.3. Caso 3: Escenario 5 - Regla de operación en función del caudal ambiental mínimo o de la generación de energía mínima

Existen embalses en los que no es posible la producción de energía cuando se permite el paso del caudal ambiental mínimo por las turbinas; en la represa de Betania este no es el caso. La hidroeléctrica está diseñada para que cuando esta condición se presente sea posible una generación de energía mínima equivalente a una potencia media de 60 MW. De manera que, en el escenario 5 se calculó el caudal correspondiente a esta condición a partir de la ecuación de máquinas y este fue utilizado como requerimiento de flujo aguas debajo de la represa de Betania en el modelo de operación del embalse.

$$P = \eta\gamma Q_T H \quad \rightarrow \quad Q_T = \frac{P}{\eta\gamma H} \quad (59)$$

Donde:

Q_T : Caudal turbinado (m³/s)

P : Potencia producida (W)

η : Eficiencia de las turbinas

γ : Peso específico del agua del río (N/m²)

H : Diferencia de altura entre la cota mínima física de la represa y de la cota de entrega (m)

$$Q_T = \frac{60 * 10^6}{0.88 * 10200 * (523.4 - 499)} = 273.9546 \frac{m^3}{s}$$

6.1.1.4.1.4. Caso 4: Escenario 6 - Regla de operación en función del almacenamiento del embalse

El almacenamiento de agua de un embalse puede analizarse a través de la curva guía del mismo. Esta curva corresponde a la relación entre el volumen almacenado por el embalse y el correspondiente caudal que puede ser asignado a partir de dicho almacenamiento. La curva se encuentra dividida en cuatro zonas principales: Volumen muerto, volumen de amortiguación, volumen operativo y volumen de control de crecientes; de acuerdo con las zonas de volumen definidas para una represa.

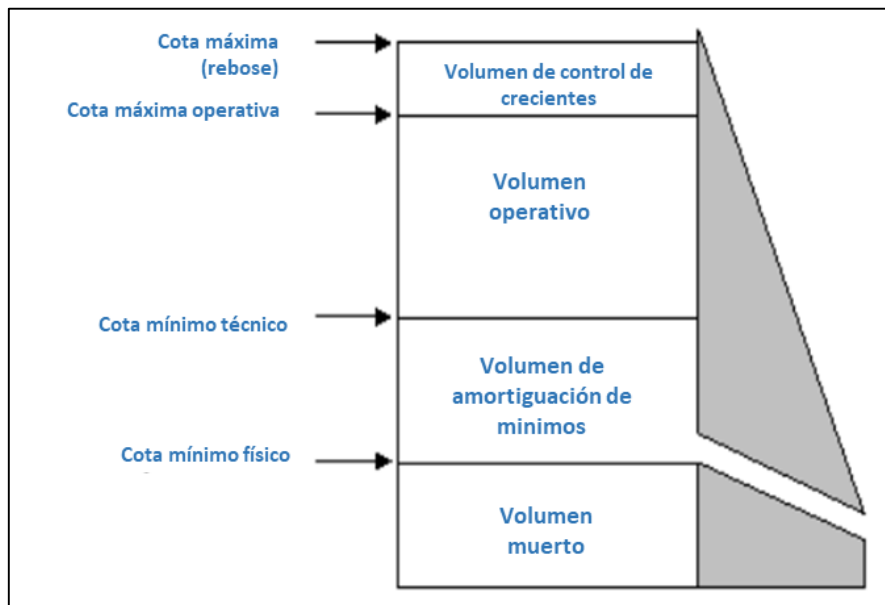


Figura 51. Zonas de volumen de una represa. Fuente: WEAP, 2019.

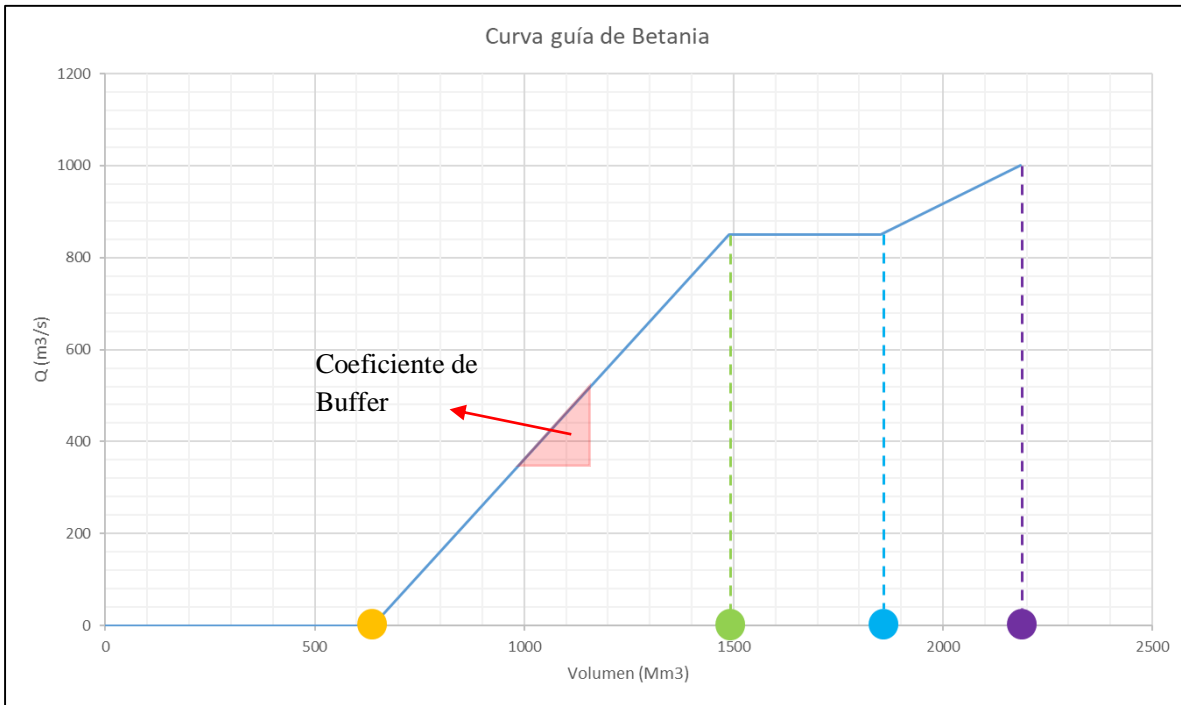


Figura 52. Curva guía teórica de Betania. Volumen muerto (Amarillo), volumen de amortiguación (verde), volumen operativo (azul) y volumen de control de crecientes (morado). Fuente: Propia.

Se modeló la operación de la represa de Betania para diferentes valores del coeficiente de Buffer, variando este entre 0.5 y 0.9. Es preciso señalar que este escenario fue modelado con el requerimiento de energía eléctrica producto de la serie sintética de demanda de energía diaria determinado para el escenario 1. Sin embargo, al analizar los flujos aguas abajo de la represa obtenidos tanto en la estación 21097120 y como en 21097070, se observó que la variación del coeficiente de Buffer no generó ninguna modificación en dichos flujos; teniendo como referencia los flujos aguas abajo resultado de la modelación del escenario 1. Consecuentemente, este escenario no será tenido en cuenta dentro del análisis.

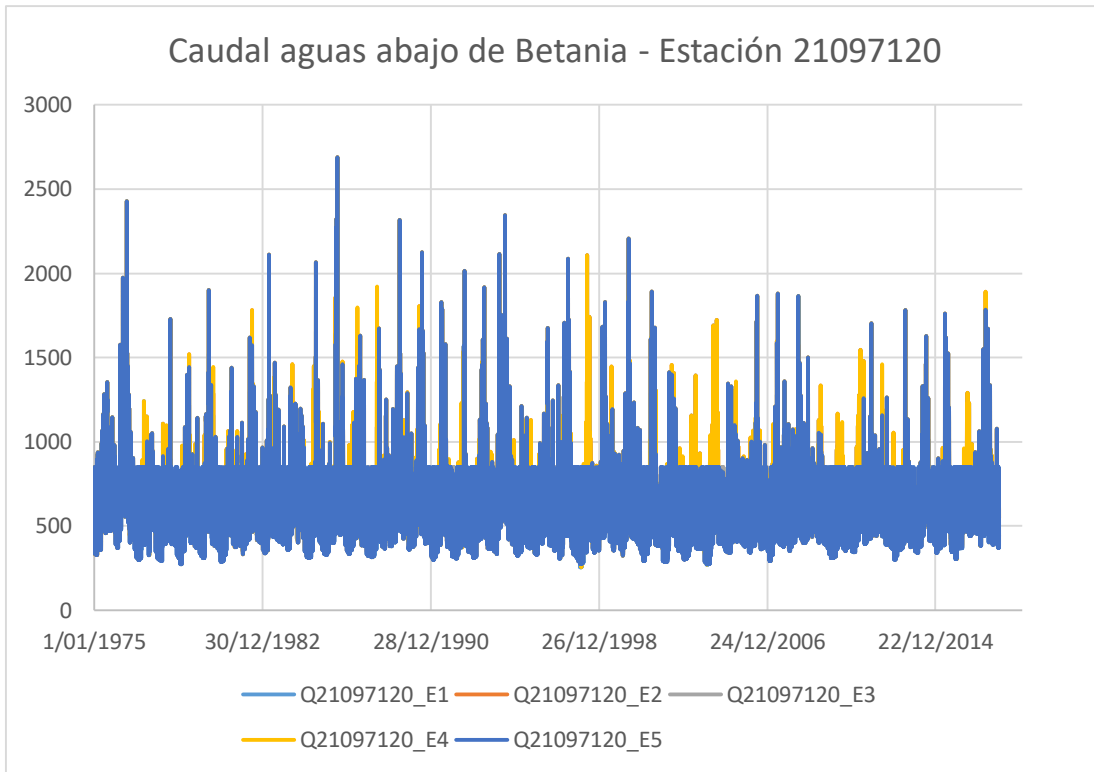


Figura 53. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

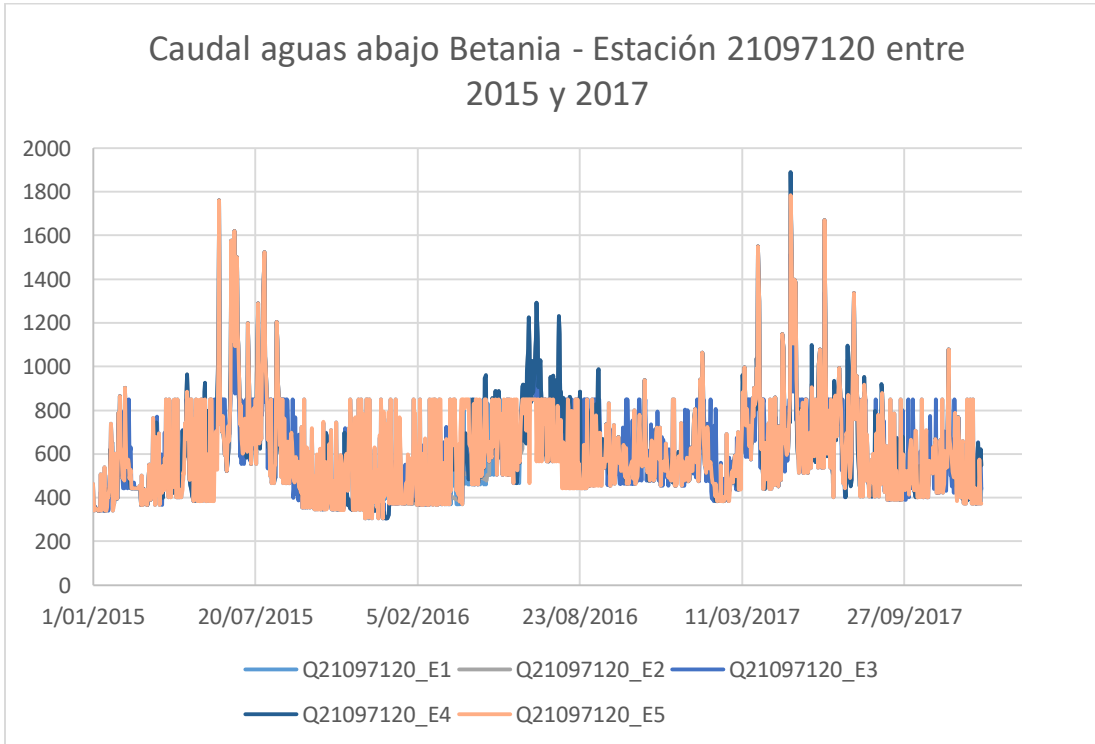


Figura 54. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097120 entre los años 2015 y 2017- Todos los escenarios. Fuente: Propia.

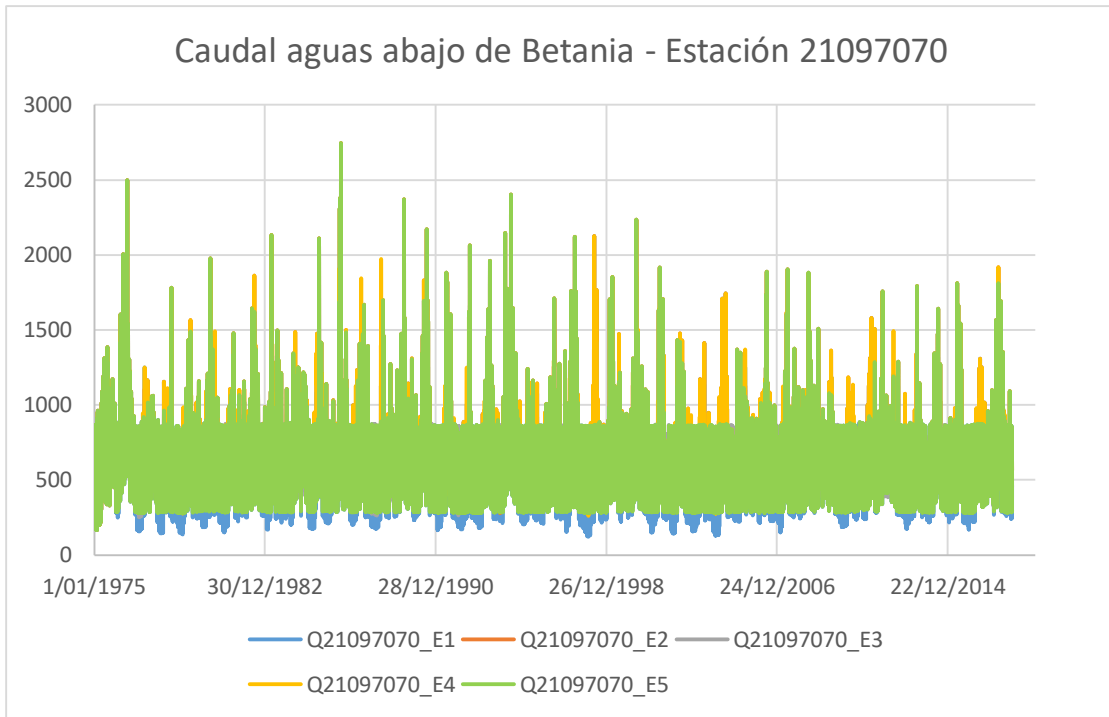


Figura 55. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

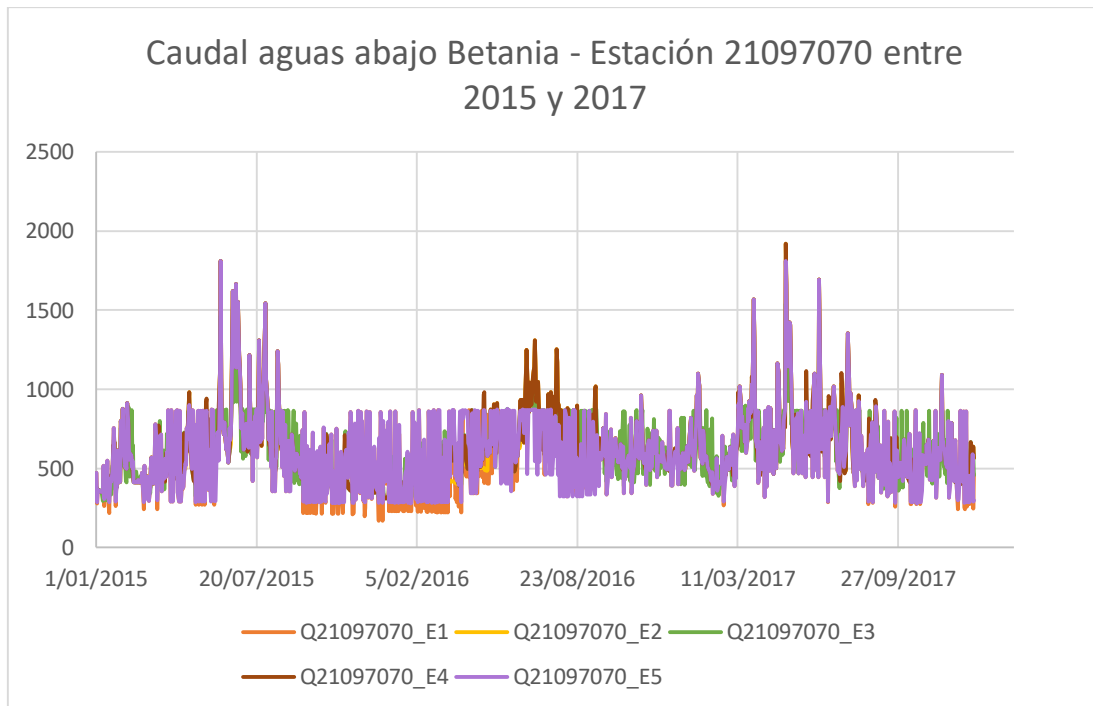


Figura 56. Caudal aguas abajo de Betania en la estación 21097070 entre los años 2015 y 2017- Todos los escenarios. Fuente: Propia.

6.1.1.5. Comparación estadística de los escenarios de aprovechamiento de caudal respecto a la condición natural

La metodología propone el uso de la prueba t o de la prueba de Spearman para verificar la similitud estadística entre la condición natural del flujo y la condición de flujo resultante de cada uno de los escenarios propuestos. Esto se debe realizar para cada una de las métricas que caracterizan los eventos de interés ecológico, es decir, que la prueba estadística se debe aplicar para los eventos naturales de interés ecológico en comparación con los eventos de interés ecológico resultado de cada métrica en cada escenario y para cada mes del año. Sin embargo, en múltiples meses y métricas el tamaño de los grupos de eventos de interés ecológico no coincide y, en otros casos, aunque el tamaño de la muestra sea el mismo, los eventos no ocurren en los mismos días o años. De modo que, se tiene que los eventos de interés ecológico no corresponden a grupos de datos pareados entre la condición natural y el correspondiente escenario.

En el caso de prueba de Spearman se requieren conjuntos de datos pareados. Teniendo dichos requerimientos de información, la prueba consiste en asignar a los datos de cada muestra un valor entre el rango 1 y n en orden ascendente; donde 1 corresponde al menor valor de la muestra y n al mayor valor de la misma. Posteriormente, se calcula la diferencia entre los rangos pareados asignados a cada muestra y se calcula el coeficiente de correlación de rango para ser comparado con el valor crítico del coeficiente de correlación de rango de Spearman para un nivel de significancia específico (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012). Como se puede observar, esta no corresponde a la prueba adecuada para el tipo de datos que requerían análisis.

Por otro lado, se encuentra la prueba t que resulta no ser del todo pertinente. La prueba está diseñada para muestras en las que las distribuciones de probabilidad asociadas a estas no presentan gran asimetría; sin embargo, cuando se trata de distribuciones de probabilidad para información hidrológica el comportamiento suele ser contrario (Naghetini, 2017). Motivo por el cual esta prueba no corresponde a la mejor opción para verificar la similitud entre la condición natural y alterada.

Se decidió aplicar nuevamente el procedimiento implementado para el cálculo de la serie sintética de demanda de energía diaria en términos de los ajustes de probabilidad. Una vez se obtuvieron los ajustes para cada mes para cada escenario para cada métrica se determinó si la condición natural y la correspondiente condición alterada podían considerarse similares a partir de la implementación de la prueba de Kolmogorov-Smirnoff a los ajustes a las distribuciones de probabilidad para un nivel de significancia de 0.05. No obstante, la mayoría de los ajustes fueron rechazados para el parámetro de duración porque no corresponde a una variable que pueda ser manejada a través de distribuciones de

probabilidad. Finalmente, la prueba estadística fue una combinación entre la prueba de Kolmogorov-Smirnoff y la comparación de un error porcentual entre la media de condición teórica y la condición alterada para cada parámetro y métrica, aceptándose que este error fuese menor al 10%.

Estación 21097120												
Mes	Condición Natural VS Escenario 1											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1

Figura 57. Desempeño del escenario 1 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070												
Mes	Condición Natural VS Escenario 1											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Diciembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1

Figura 58. Desempeño del escenario 1 y 4 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.

Estación 21097120												
Mes	Condición Natural VS Escenario 2											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1

Figura 59. Desempeño del escenario 2 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070												
Mes	Condición Natural VS Escenario 2											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1

Figura 60. Desempeño del escenario 2 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.

Estación 21097120												
Mes	Condición Natural VS Escenario 3											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Octubre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Noviembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1

Figura 61. Desempeño del escenario 3 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070												
Mes	Condición Natural VS Escenario 3											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1
Febrero	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Abril	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Junio	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1
Septiembre	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Octubre	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Noviembre	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Diciembre	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1

Figura 62. Desempeño del escenario 3 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.

Estación 21097120													
Mes	Condición Natural VS Escenario 4												
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq			
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I	
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	
Diciembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1

Figura 63. Desempeño del escenario 4 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070												
Mes	Condición Natural VS Escenario 4											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1

Figura 64. Desempeño del escenario 4 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.

Estación 21097120												
Mes	Condición Natural VS Escenario 5											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1
Diciembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✓ 1

Figura 65. Desempeño del escenario 5 respecto a la condición natural en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070												
Mes	Condición Natural VS Escenario 5											
	Qmax			Qb			Qmin			Qtq		
	D	M	I	D	M	I	D	M	I	D	M	I
Enero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Febrero	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Marzo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Abril	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Mayo	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Junio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Julio	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Agosto	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Septiembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Octubre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Noviembre	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1
Diciembre	✗ -1	✗ -1	✗ -1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✓ 1	✗ -1	✗ -1	✗ -1

Figura 66. Desempeño del escenario 5 respecto a la condición natural en la estación 21097070. Fuente: Propia.

Sin embargo, con esos resultados por si solos no es posible determinar si el escenario cumple o no con los requerimientos. La metodología en si no establece si se debe cumplir con todos los parámetros dentro de las métricas cada uno de los meses o no. De modo que, se consideró que es importante asociar cierta flexibilidad a la metodología en este tema ya que no se cuenta con relaciones ecológicas en función de la hidrología que permitan determinar en qué momentos las métricas son relevantes ecológicamente en términos de alteración. De acuerdo con esto, se estableció que se cumplía con un parámetro de las métricas si este presentaba un buen comportamiento mínimo el 75% del año. De lo contrario, se consideró que el escenario no plasmaba una operación de la represa que pudiese mantener el ecosistema aguas debajo de esta.

Escenario	Parámetro	Estación 21097120			
		Qmax	Qb	Qmin	Qtq
Escenario 1	D	✓	✓	✗	✓
	M	✓	✓	✓	✓
	I	✓	✓	✓	✓
Escenario 2	D	✓	✓	✓	✓
	M	✓	✓	✓	✓
	I	✓	✓	✓	✓
Escenario 3	D	✗	✗	✗	✓
	M	✗	✓	✓	✓
	I	✗	✓	✓	✓
Escenario 4	D	✓	✓	✓	✓
	M	✓	✓	✓	✓
	I	✓	✓	✓	✓
Escenario 5	D	✓	✓	✗	✓
	M	✓	✓	✓	✓
	I	✓	✓	✓	✓

Figura 67. Verificación de cumplimiento de escenarios para la GMECAC en la estación 21097120. Fuente: Propia.

Escenario	Parámetro	Estación 21097070			
		Qmax	Qb	Qmin	Qtq
Escenario 1	D	✓	✓	✗	✗
	M	✓	✓	✗	✗
	I	✓	✓	✗	✗
Escenario 2	D	✓	✓	✓	✓
	M	✓	✓	✓	✗
	I	✓	✓	✓	✗
Escenario 3	D	✗	✗	✓	✗
	M	✗	✓	✓	✗
	I	✗	✓	✓	✗
Escenario 4	D	✓	✓	✓	✓
	M	✓	✓	✓	✓
	I	✓	✓	✓	✓
Escenario 5	D	✓	✓	✓	✗
	M	✓	✓	✓	✗
	I	✓	✓	✓	✗

Figura 68. Verificación de cumplimiento de escenarios para la GMECAC en la estación 21097070. Fuente: Propia.

En primer lugar, se puede observar que los resultados en las dos estaciones para los mismos escenarios no son iguales y de hecho el desempeño de los escenarios en la segunda estación tienen un mayor impacto sobre el tramo que en la primera puesto que cumple con menos métricas de caracterización de los eventos de interés ecológico. Este no era el comportamiento esperado, puesto que, como la segunda estación se encuentra más alejada de la represa e incluso recibe flujo del río Neiva y el río Ceibas debería evidenciar una atenuación de los impactos generados por la operación de la represa de Betania. Sin embargo, la situación es la contraria; lo que podría ser motivo de revisión de la metodología colombiana.

6.1.1.6. Regímenes de caudal ambiental

De acuerdo con la metodología, el caudal ambiental se presenta como el caudal promedio mensual para cada uno de los meses, a partir de la serie de caudales ambientales diarios para el periodo de estudio. Por otro lado, este caudal corresponde al área entre el caudal aguas abajo de la represa y el caudal mínimo de la correspondiente condición hidrológica (zona verde) y el caudal aprovechable es

el área entre el caudal máximo de la condición hidrológica el caudal aguas abajo de la represa (zona rosa). A nivel mensual no se observa mayor cambio entre los diferentes escenarios en términos de caudal, sin embargo, como se pudo observar en la comparación estadística el impacto varía sustancialmente dependiendo del escenario. A continuación, se muestra un ejemplo de caudal ambiental para el escenario 1 en la estación 21097120 para cada condición hidrológica y el resumen de los regímenes de caudal ambiental promedio de todos los escenarios para las dos estaciones (los resultados para todos los escenarios y estaciones pueden encontrarse en los anexos).

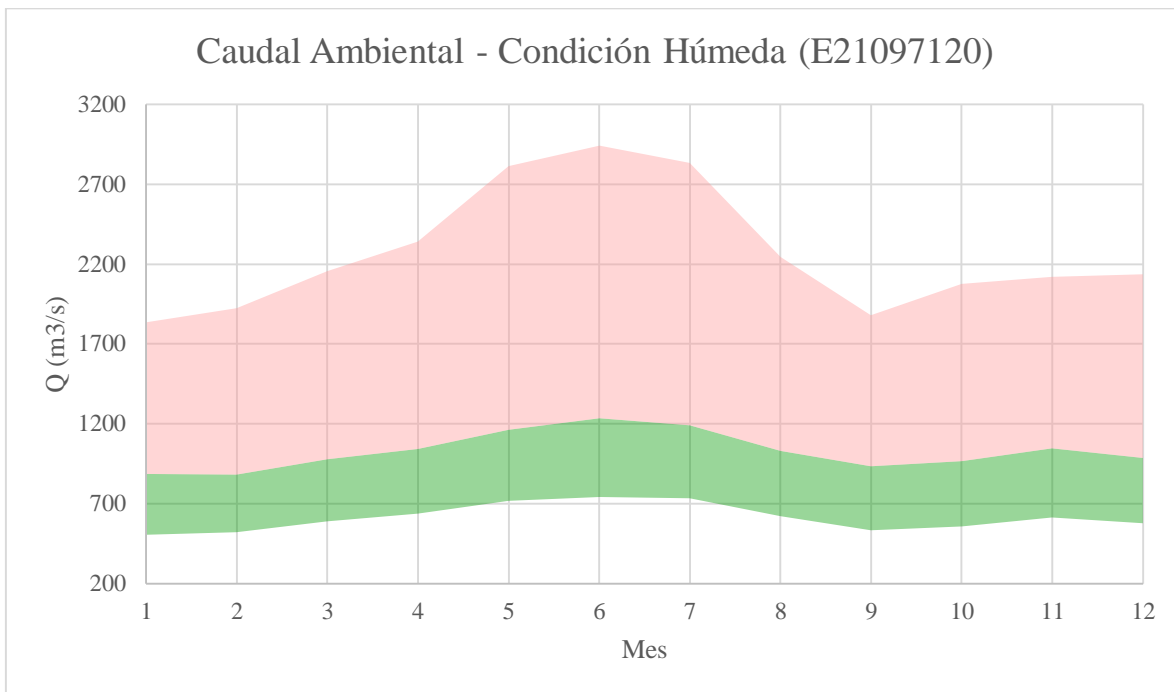


Figura 69. Caudal ambiental y aprovechable para la condición húmeda en la estación 21097120. Fuente: Propia.

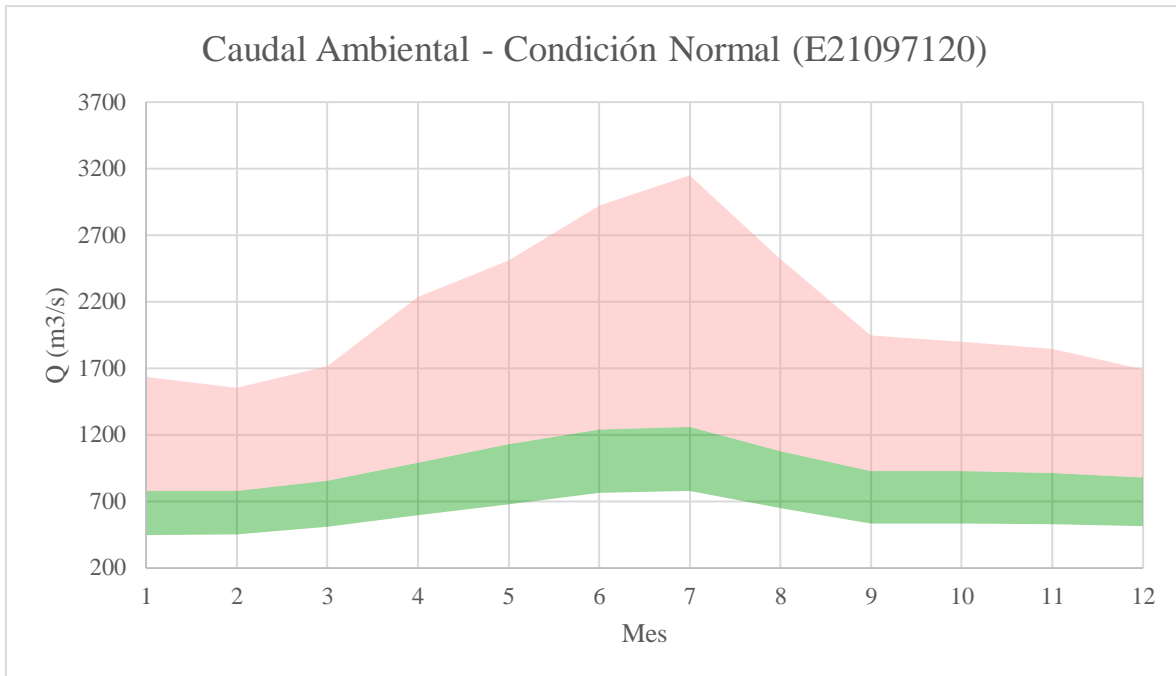


Figura 70. Caudal ambiental y aprovechable para la condición normal en la estación 21097120. Fuente: Propia.

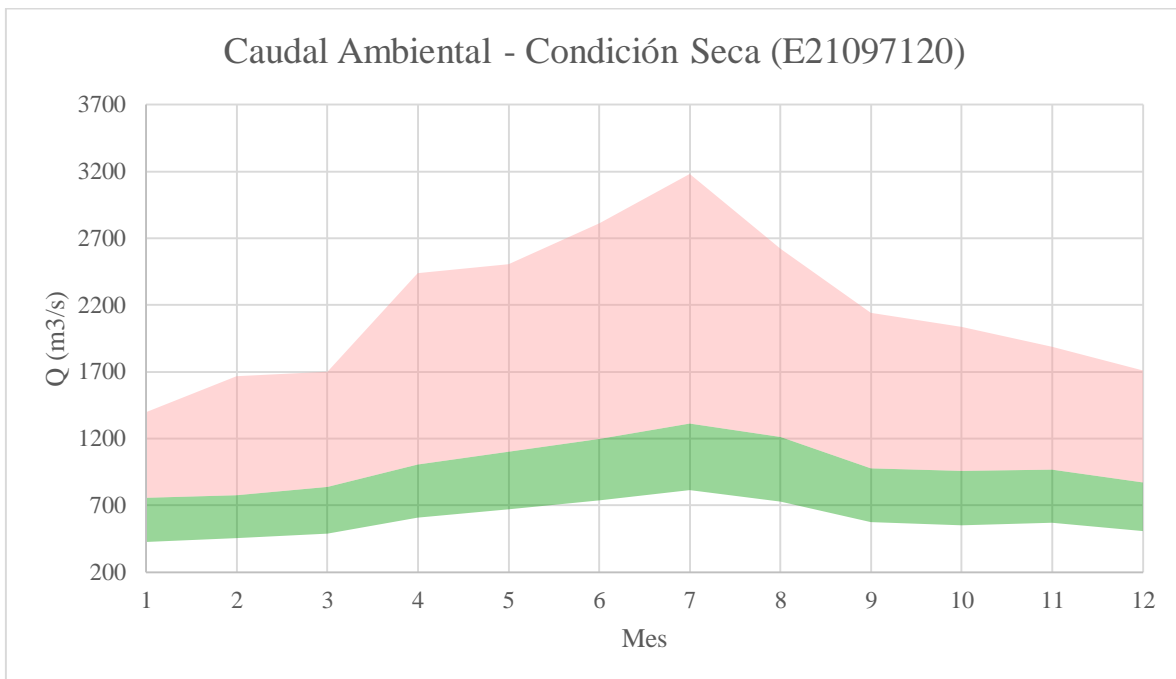


Figura 71. Caudal ambiental y aprovechable para la condición seca en la estación 21097120. Fuente: Propia.

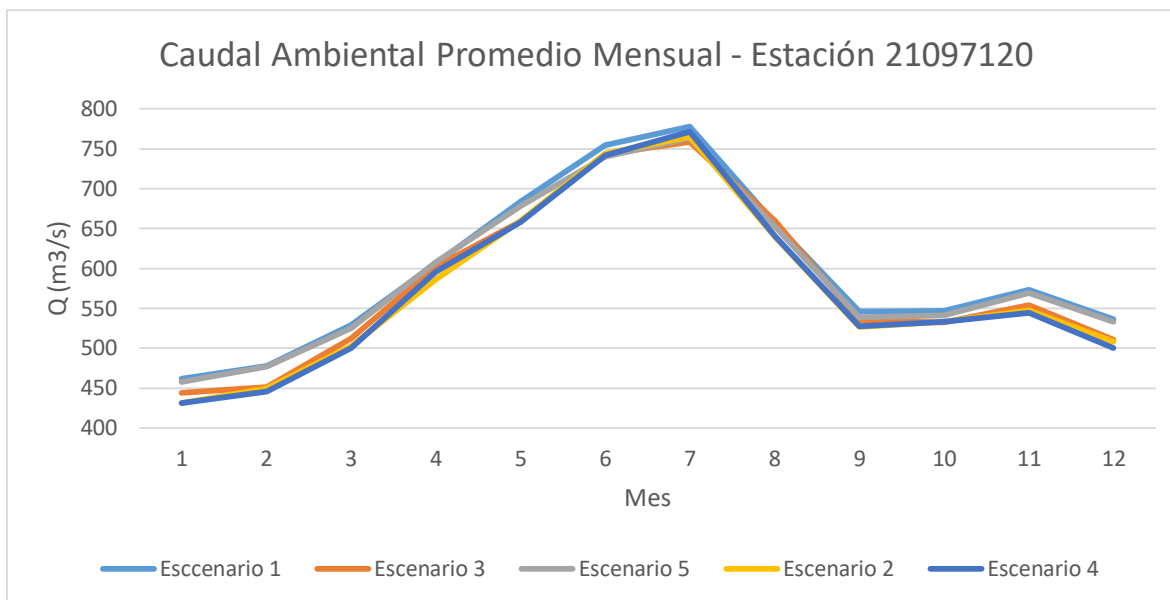


Figura 72. Régimen de caudal ambiental promedio mensual para todos los escenarios a partir de la GMECAC para la estación 21097120. Fuente: Propia.

6.1.2. Implementación de ELOHA

6.1.2.1. Régimen natural de flujo

Como se estableció en el capítulo de análisis cualitativo de las metodologías, ELOHA no cuenta con lineamientos para la definición de la condición natural de flujo. Por este motivo, la metodología se implementó usando la naturalización de flujos determinada para la GMECAC. Así mismo, para los mismos puntos de control, la estación 21097120 y la estación 21097070.

6.1.2.2. Caracterización del flujo

Teniendo los flujos naturales en cada estación, se estimaron los diagramas de isopercentiles de las mismas. Estos diagramas se construyen a partir de los percentiles correspondientes al 5%, 10%, 50%, 75%, 95% y 99%; estimados para cada uno de los días del año en toda la serie histórica analizada. Los percentiles mencionados corresponden a las categorías de flujo que caracterizan los caudales del tramo, estas categorías son: Caudal mínimo (caudales con una probabilidad de excedencia del 99%), caudal mínimo hasta Q95 (caudales con una probabilidad de excedencia del 95%), caudales bajos (caudales con una probabilidad de excedencia entre el 75% y 95%), flujo medio (caudal con una probabilidad de excedencia del 50%), flujos estacionales (caudales con una probabilidad de

excedencia entre el 10% y el 75%) y flujos máximos (caudales con una probabilidad de excedencia del 5%).

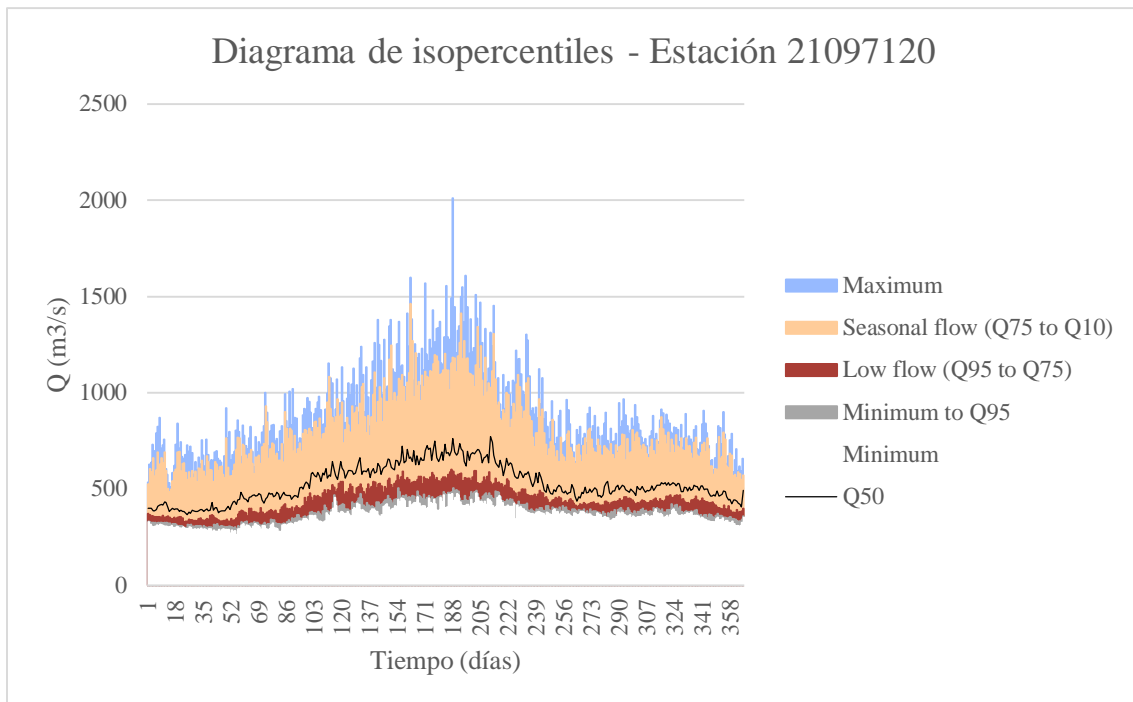


Figura 73. Diagrama de isopercentiles de la estación 21097120 en condición natural. Fuente: Propia.

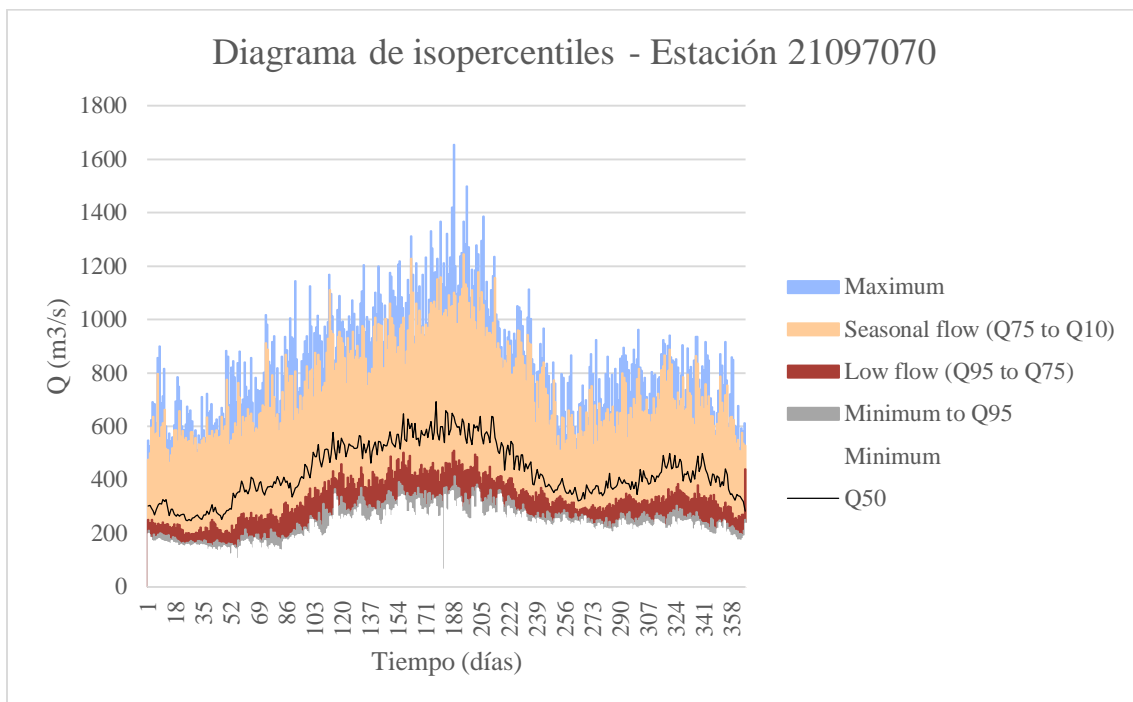


Figura 74. Diagrama de isopercentiles de la estación 21097070 en condición natural. Fuente: Propia.

6.1.2.3. Caracterización ecológica

Para este análisis se contaban con limitaciones de presupuesto y tiempo que no permitían la toma de mediciones sobre el comportamiento de las especies y variables ecológicas asociadas a las condiciones hidrológicas del tramo. Adicionalmente, tampoco fue posible el trabajo conjunto con expertos en el tema de especies en las zonas aledañas a la represa de Betania. Sin embargo, The Nature Conservancy realizó un análisis de caracterización de las relaciones entre la ecología y la hidrología para el río Magdalena a la altura del municipio de Oporapa.

De manera que, no teniendo otra alternativa, en este análisis de caudales ambientales fueron utilizadas dichas relaciones. Dentro de las variables contempladas se encuentran el crecimiento, reproducción y migración de peces, la estabilidad de los sedimentos, el crecimiento de plantas y esparcimiento de semillas y el nivel de conectividad del paisaje.

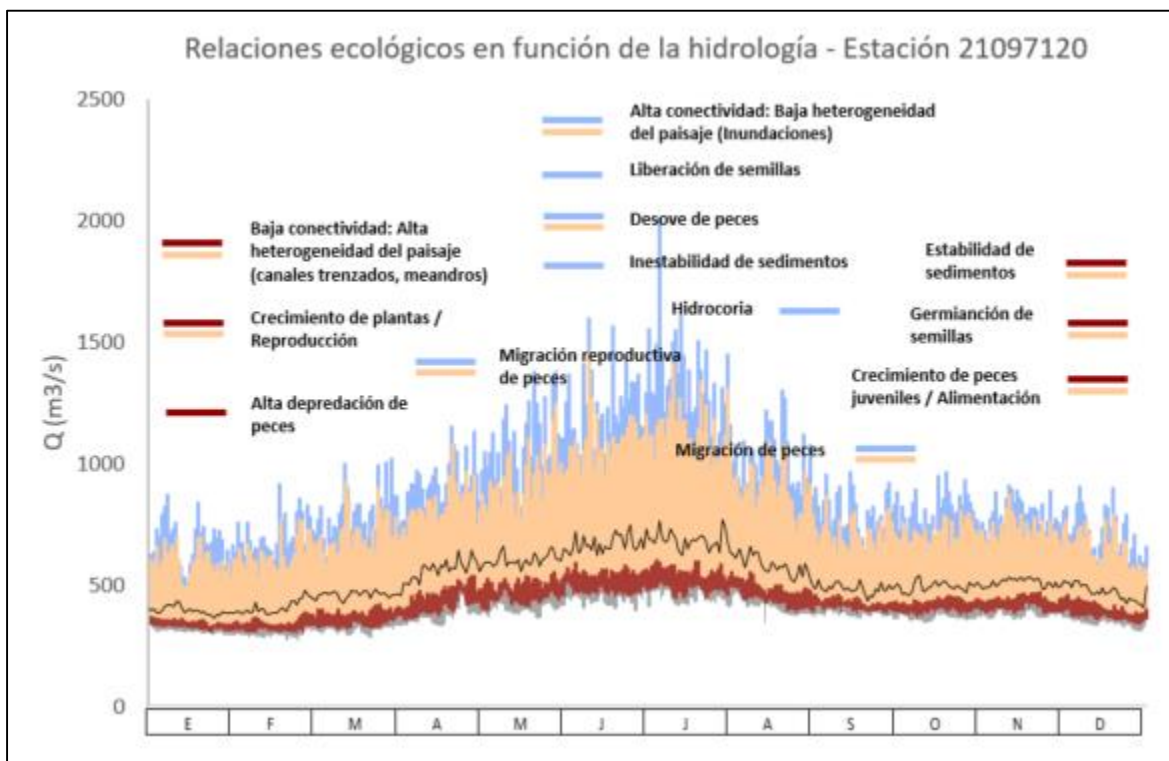


Figura 75. Caracterización ecológica para la estación 21097120. Fuente: TNC, 2019.

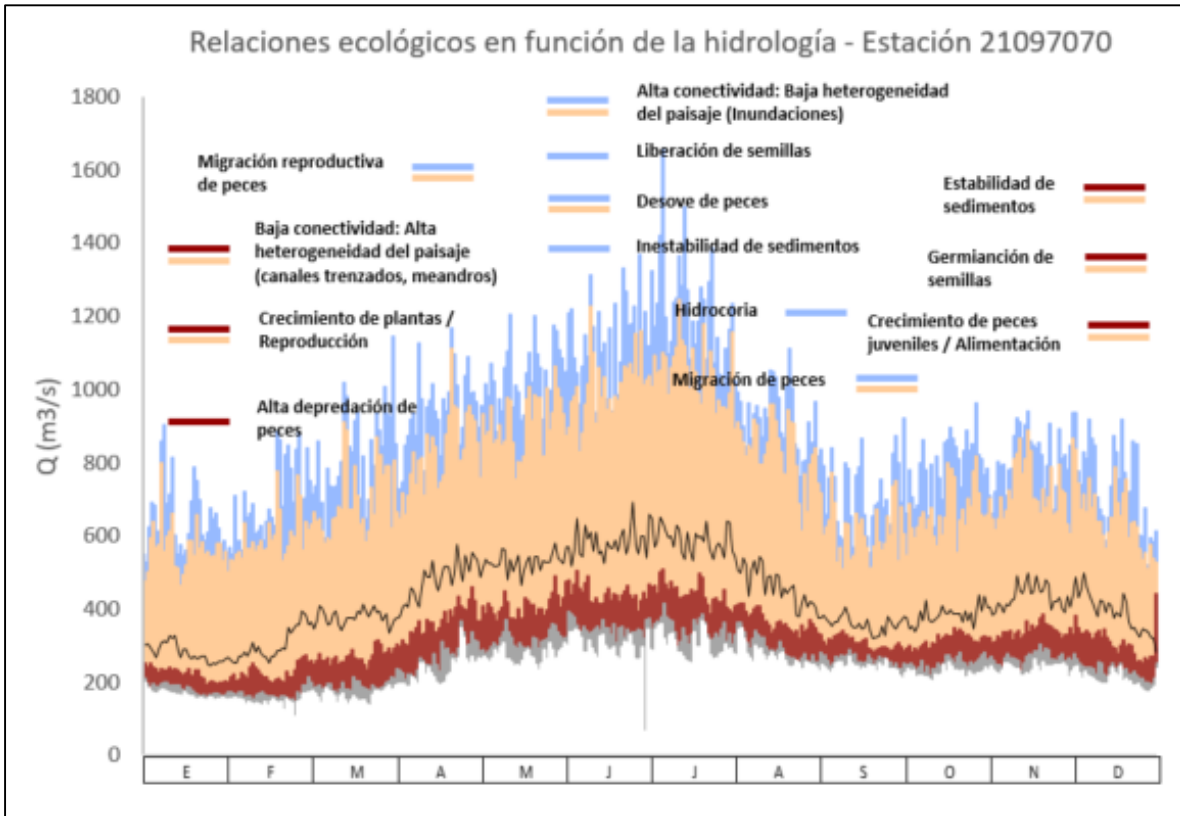


Figura 76. Caracterización ecológica para la estación 21097070. Fuente: TNC, 2019.

6.1.2.4. Escenarios de aprovechamiento de caudales

Para que las metodologías fuesen comparables, los escenarios de aprovechamiento de caudales contemplados para la implementación de ELOHA son exactamente iguales a los ya explicados en la implementación de la GMECAC. Sin embargo, se enunciarán a continuación:

- Caso 1: Regla de operación en función de la demanda de energía.
 - Escenario 1: Regla de operación en función de la demanda de energía diaria.
 - Escenario 2: Regla de operación en función de la demanda de energía promedio mensual.
- Caso 2: Regla de operación en función de las afluencias al embalse.
 - Escenario 3: Regla de operación en la que las salidas de agua son iguales al 80% de las afluencias al embalse.
 - Escenario 4: Regla de operación en la que las salidas de agua son iguales a las afluencias al embalse.

- Caso 3 – Escenario 5: Regla de operación en función del caudal ambiental mínimo o de la generación de energía mínima.
- Caso 4 – Escenario 6: Regla de operación en función del almacenamiento del embalse.

6.1.2.5. Indicadores de aceptación del impacto

Para la estimación de los indicadores del principio de semáforo de la metodología que indican el desempeño de los escenarios para su aceptación o rechazo, es decir, los ecodéficits y ecoexcesos se utilizó un aplicativo de IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) (The Nature Conservancy, 2017). Este permite construir las curvas de duración de caudales para cada escenario en comparación con la condición natural para posteriormente estimar los indicadores. Esto se hizo a partir de una macro en Visual Basic facilitada por TNC que se encuentra en los anexos.





% Change From Unaltered Condition	
	< 10%
	10 to 20%
	20 to 50%
	> 50%

Figura 77. Gradación porcentual del impacto. Fuente: Propia.

En cuanto a los escenarios planteados, los indicadores que se obtuvieron como resultado son los siguientes:

- Escenario 1:

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 1 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.15	0.16	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.09	0.16
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.08	0.08	0.08	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.31	0.33	0.28	0.19	0.15	0.04	0.04	0.11	0.15	0.08	0.18	0.24
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 1 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.03	0.06	0.04	0.03	0.02				
	EcoSur									0.07			
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01				0.01	0.01					
	EcoSur	0.08	0.08	0.08	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.31	0.33	0.28							0.08	0.18	0.24
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 1 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta	Incremento de la depredación de peces, crecimiento inusual de las plantas y desconectividad total de la red												No desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos
Media													No desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos
Baja	Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto												

Figura 78. Indicadores del impacto del escenario 1 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 1 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.15	0.16	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.08	0.15
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.08	0.08	0.08	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.06	0.04	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.29	0.31	0.26	0.18	0.14	0.04	0.04	0.10	0.14	0.07	0.17	0.23
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 1 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.03	0.06	0.04	0.03	0.02				
	EcoSur								0.07				
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01				0.01	0.01					
	EcoSur	0.08	0.08	0.08	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.06	0.04	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.29	0.31	0.26							0.07	0.17	0.23
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración	Escenario 1 - Estación 21097070												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Muy alta													
Alta	Incremento de la depredación de peces, crecimiento inusual de las plantas y desconectividad total de la red										No desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos		
Media											No desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos		
Baja	Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto												

Figura 79. Indicadores del impacto del escenario 1 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.

- Escenario 2:

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 2 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.06	0.05	0.03	0.10	0.10	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.06
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 2 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.02	0.03	0.03	0.01					
	EcoSur												
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01		0.01	
	EcoSur						0.01						
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.01								0.01			
	EcoSur		0.06	0.05								0.02	0.06
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 2 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media													
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 80. Indicadores del impacto del escenario 2 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 2 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.01	0.07	0.06	0.04	0.10	0.10	0.03	0.03	0.00	0.01	0.02	0.06
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 2 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.02	0.02	0.03	0.01					
	EcoSur								0.01				
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02					
	EcoSur						0.01						
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef												
	EcoSur	0.01	0.07	0.06							0.01	0.02	0.06
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 2 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media													
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 81. Indicadores del impacto del escenario 2 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.

- Escenario 3:

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 3 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.06	0.16	0.18	0.19	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.12	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.09	0.11
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
	EcoSur	0.03	0.01	0.04	0.04	0.06	0.08	0.07	0.10	0.03	0.02	0.03	0.03
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.07	0.05	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.03	0.05	0.07	0.06	0.05
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 3 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.06	0.16	0.18	0.19	0.15				
	EcoSur									0.08			
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.01	0.01			0.01	0.04	0.05		0.01	0.01	0.01	0.01
	EcoSur	0.03	0.01	0.04	0.04	0.06	0.08	0.07	0.10	0.03	0.02	0.03	0.03
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.07	0.05	0.03				0.01	0.03	0.05	0.07	0.06	0.05
	EcoSur						0.01	0.01					
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 3 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media		Disminución en la conectividad de la red, riesgo de muerte de huevos de peces liberados y no dispersión de semillas de plantas a través del agua											
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 82. Indicadores del impacto del escenario 3 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 3 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.06	0.15	0.17	0.18	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.12	0.08	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.08	0.11
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
	EcoSur	0.03	0.01	0.04	0.04	0.06	0.08	0.07	0.10	0.04	0.02	0.03	0.03
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.06	0.05	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.05	0.06	0.06	0.05
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 3 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.06	0.15	0.17	0.18	0.14	0.00			
	EcoSur									0.08			
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef		0.01				0.04	0.04		0.00	0.01	0.01	0.01
	EcoSur	0.03	0.01	0.04	0.04	0.06	0.08	0.07	0.10	0.04	0.02	0.03	0.03
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.06	0.05	0.03							0.06	0.06	0.05
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 3 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media		Disminución en la conectividad de la red, riesgo de muerte de huevos de peces liberados y no dispersión de semillas de plantas a través del agua											
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 83. Indicadores del impacto del escenario 3 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.

- Escenario 4:

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 4 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 4 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef												
	EcoSur												
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef		0.01	0.01									
	EcoSur												
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.01	0.01	0.01								0.01	
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración	Escenario 4 - Estación 21097120												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Muy alta													
Alta													
Media													
Baja	Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto												

Figura 84. Indicadores del impacto del escenario 4 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 4 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 4 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef												
	EcoSur								0.01				
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef												
	EcoSur							0.01					
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef		0.01									0.01	
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 4 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media													
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 85. Indicadores del impacto del escenario 4 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.

- Escenario 5:

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 5 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.08	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.15	0.18	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	0.09	0.16
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	EcoSur	0.07	0.08	0.07	0.05	0.08	0.04	0.02	0.05	0.04	0.03	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.17	0.16	0.21	0.20	0.18	0.07	0.10	0.17	0.22	0.15	0.21	0.20
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 5 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.05	0.10	0.08	0.05	0.03				
	EcoSur								0.07				
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.03	0.01	0.01		0.01	0.03	0.03		0.01		0.01	
	EcoSur	0.07	0.08	0.07	0.05	0.08	0.04	0.02	0.05	0.04	0.03	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.17	0.16	0.21							0.15	0.21	0.20
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 5 - Estación 21097120											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta				Incremento de la depredación de peces, crecimiento inusual de las plantas y desconectividad total de la red								No desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos	
Media		Incremento de la depredación de peces, crecimiento inusual de las plantas y mayor desconectividad de la red de lo normal				Reducción de la cantidad de rutas de migración de los peces en subienda					Reducción de la cantidad de rutas de migración de los peces en descenso		
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 86. Indicadores del impacto del escenario 5 según ELOHA para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Indicadores de alteración													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 5 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09	0.08	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	EcoSur	0.15	0.18	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	0.08	0.15
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	EcoSur	0.07	0.08	0.07	0.05	0.08	0.05	0.02	0.05	0.05	0.03	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.15	0.14	0.19	0.18	0.17	0.06	0.10	0.15	0.21	0.14	0.20	0.19
	EcoSur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Indicadores de alteración de acuerdo con las relaciones entre ecología e hidrología													
Tipo de flujo	Dirección de la alteración	Escenario 5 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Flujos altos (Q5-Q10)	EcoDef				0.04	0.09	0.08	0.05	0.03				
	EcoSur								0.07				
Flujos medios (Q10-Q75)	EcoDef	0.02	0.01	0.01			0.03	0.03		0.01		0.01	
	EcoSur	0.07	0.08	0.07	0.05	0.08	0.05	0.02	0.05	0.05	0.03	0.07	0.09
Flujos bajos (Q75-Q95)	EcoDef	0.15	0.14	0.19							0.14	0.20	0.19
	EcoSur												
Alteración ecológica esperada													
Grado de alteración		Escenario 5 - Estación 21097070											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Muy alta													
Alta													
Media		Incremento de la depredación de peces, crecimiento inusual de las plantas y mayor desconectividad de la red de lo normal					Reducción de la cantidad de rutas de migración de los peces en descenso, no desarrollo de peces y semillas y sedimentos secos						
Baja		Aunque hay alteración es irrelevante debido a su bajo grado de impacto											

Figura 87. Indicadores del impacto del escenario 5 según ELOHA para la estación 21097070. Fuente: Propia.

Cabe resaltar que los resultados mostrados anteriormente corresponden a los grados de alteración cruzados con los requerimientos ecológicos por mes y por tipo de flujo del tramo de estudio a través de las relaciones entre la ecología y la hidrología definidas con anterioridad. De modo que, el impacto real corresponde a aquellos indicadores que reflejen una modificación importante del flujo en el tipo de flujo que las variables ecológicas requieren y en el momento correspondiente.

6.1.2.6. Régimen de caudal ambiental

De acuerdo con la modelación realizada en WEAP, los regímenes de caudal ambiental para todos los escenarios son los siguientes, respecto a la condición sin embalse simulada correspondiente al estado natural de río:

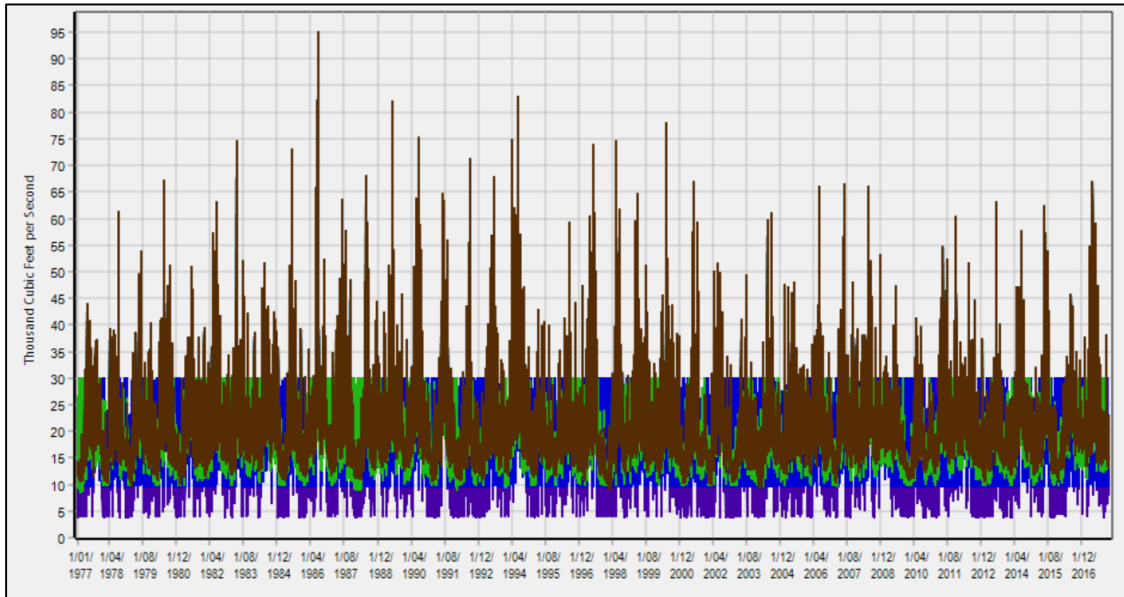


Figura 88. Régimen de caudal ambiental diario en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

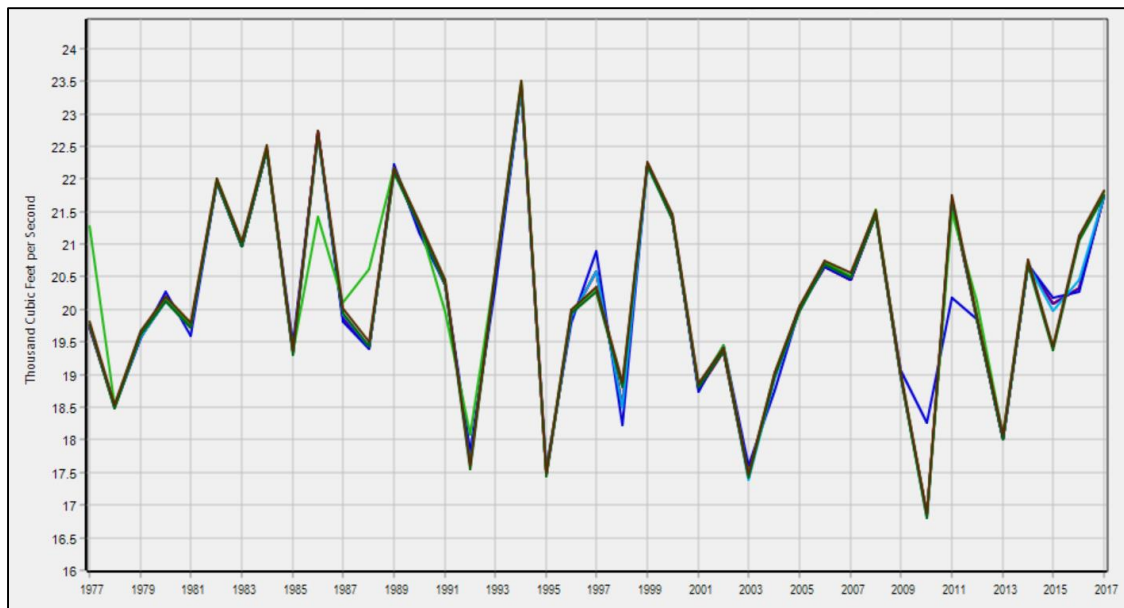


Figura 89. Régimen de caudal ambiental por año en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

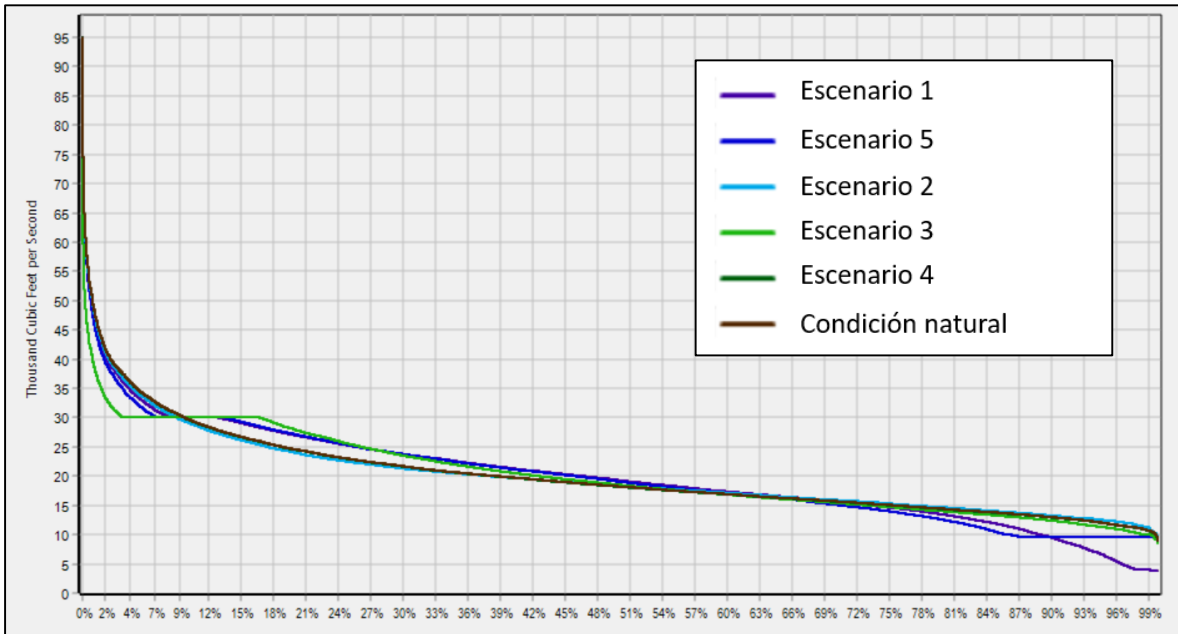


Figura 90. Curva de duración de caudales ambientales en la estación 21097120 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

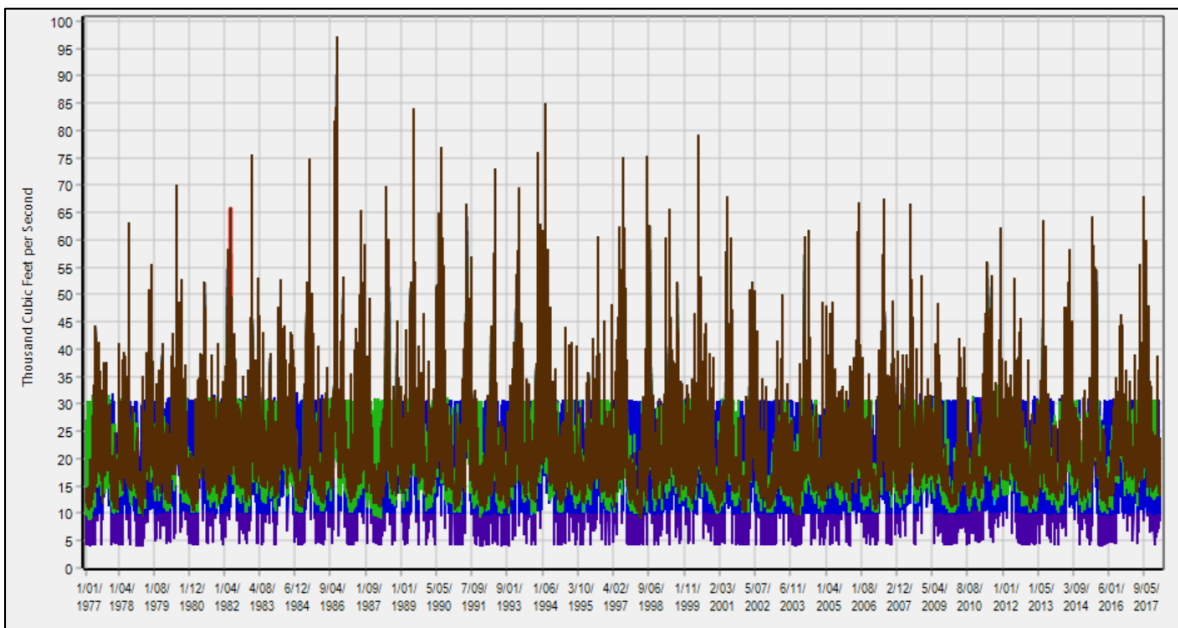


Figura 91. Régimen de caudal ambiental diario en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

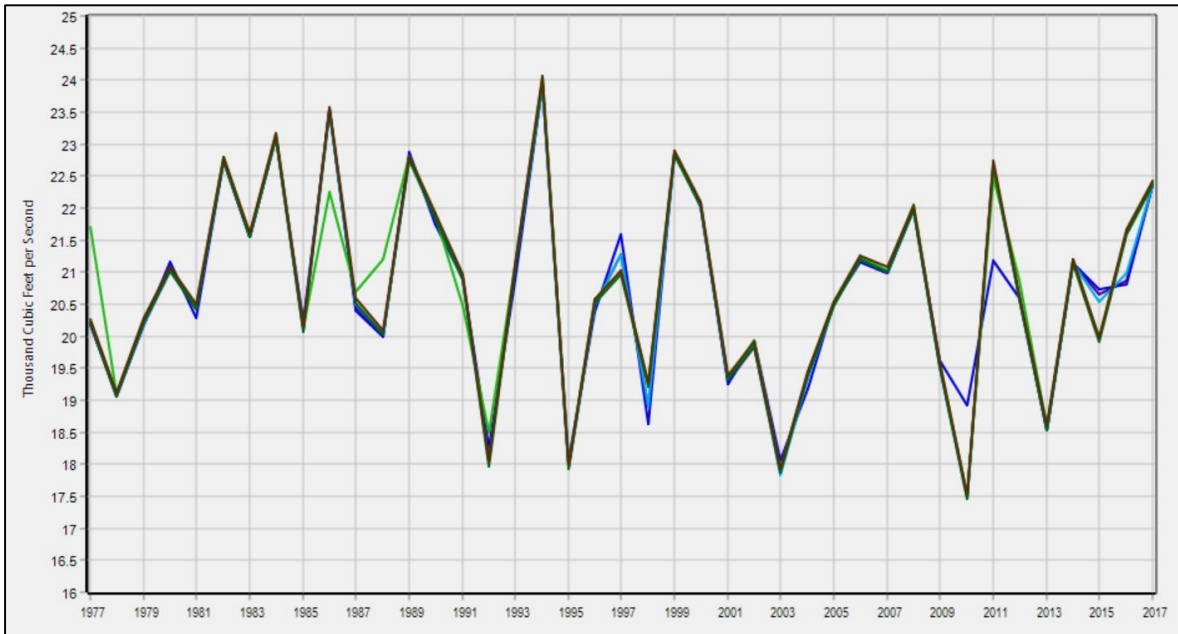


Figura 92. Régimen de caudal ambiental por año en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

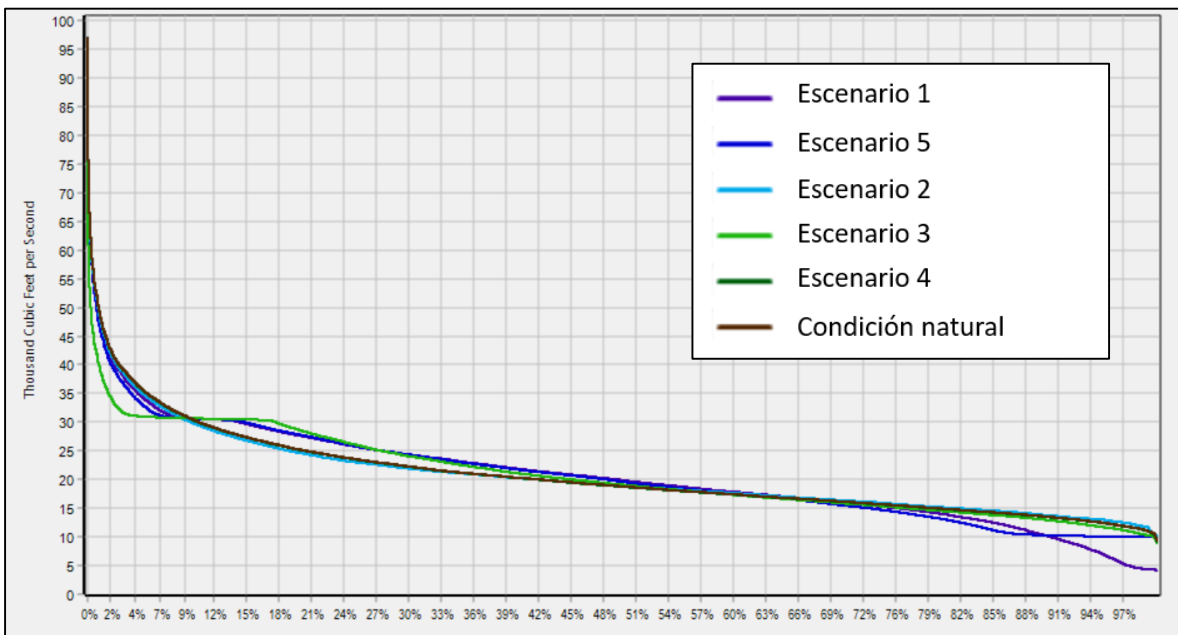


Figura 93. Curva de duración de caudales ambientales en la estación 21097070 - Todos los escenarios. Fuente: Propia.

En los gráficos del régimen de caudal ambiental a nivel diario es indiscutible que los escenarios 1 y 5 reducen considerablemente la variabilidad diaria del flujo. Se mantienen los eventos picos máximos, pero en general se aplanan el hidrograma, a diferencia de los hidrogramas correspondientes a los escenarios 2, 3 y 4 que si mantienen esa variabilidad. Sin embargo, los escenarios 2 y 4 son los que mejor representan el comportamiento natural diario puesto que no se presenta una regulación alguna del hidrograma a través de los años. Así mismo, las curvas de duración de caudales ambientales muestran como para caudales muy altos especialmente el escenario 3 presenta déficits, en flujos estacionales los escenarios 1, 3 y 5 excesos y en los flujos bajos y muy bajos los escenarios 1 y 5 déficits.

6.2.Desarrollo del modelo de simulación de la operación del embalse

6.2.1. Información de entrada

Para el desarrollo del modelo fue necesario contar en primer lugar con las afluencias que confluyen en la represa de Betania, provenientes del río Yaguará, del río Páez y del río Alto Magdalena. En segundo lugar, se requirieron las características físicas de la represa de Betania; así como de la curva de volumen – elevación. Por otro lado, se incluyó la evapotranspiración neta o real como una serie diaria calculada a través de la aplicación del método de Thornthwaite; como se explicó en capítulos anteriores. En último lugar, se precisaron las afluencias procedentes del río Neiva y el río Ceibas entre la estación 21097120 y 21097070; estas afluencias fueron determinadas a partir de los registros históricos diarios registrados en las estaciones 21107020 y 21117080.

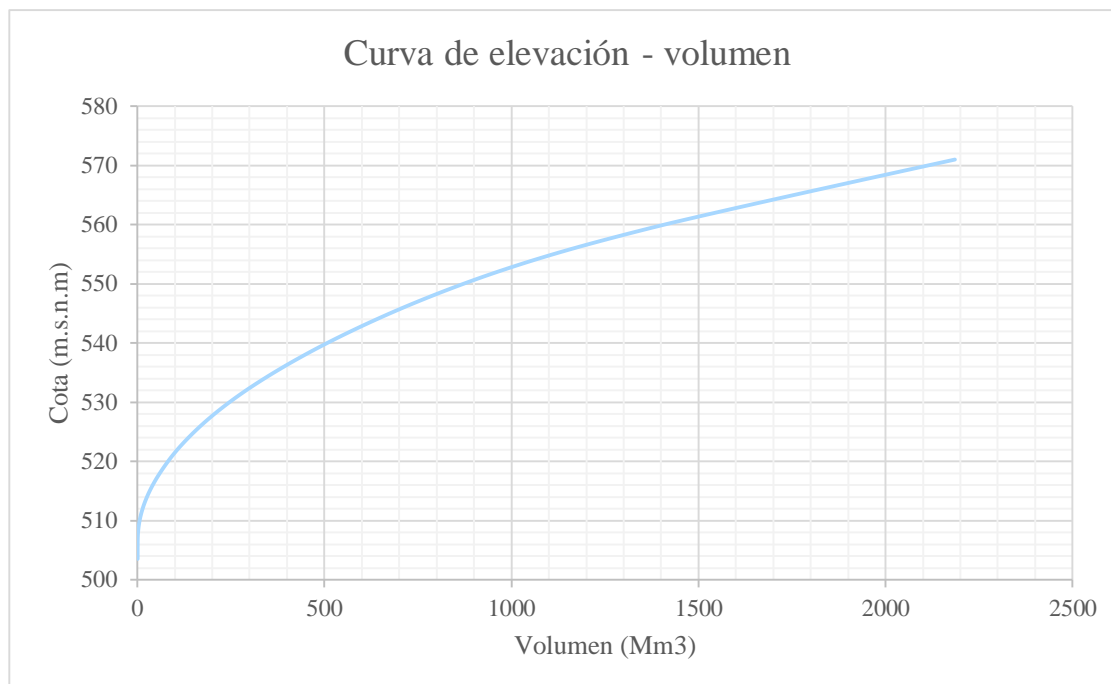


Figura 94. Curva de elevación en función del volumen de la represa de Betania. Fuente: Propia.

Parámetro		Valor
Generales	Nombre embalse	BETANIA
	Central	BETANIA
	Rio	Magdalena
	Localización	1400 metros aguas abajo de la confluencia de los ríos Magdalena y Yaguará
Generación	Potencia instalada (MW)	540
	Número de turbinas	3
	Generación anual (GWh/año)	1832
	Potencia efectiva (MW)	209
	Caudal máximo turbinable (m ³ /s)	850.0
	Caudal aprovechable (medio multianual) (m ³ /s)	475.0
	Factor de carga (Relación entre la generación media y la capacidad instalada)	39%
Volúmenes del embalse	Altura del dique (m)	95.0
	Volumen total (Mm ³ = Hm ³)	1488.2
	Cota máxima m.s.n.m.	571.0
	Cota máxima NORMAL de operación (m.s.n.m.)	561.2
	Volumen operativo (Mm ³ = Hm ³)	850.5
	Cota mínima operativa o técnica (m.s.n.m.)	544.0
	Volumen de amortiguación de mínimos (Mm ³ = Hm ³)	511.9

	Parámetro	Valor
	Cota mínima física (m.s.n.m.)	523.4
	Volumen muerto (Mm ³ = Hm ³)	125.77
Requisitos ambientales	Caudal(es) ambiental(es) (m ³ /s) *	Generación mínima 60 MW
Otros	Cota de entrega (m.s.n.m.)	499.0
	Cabeza neta (m) respecto a máxima operativa	72.0
	Diámetro del túnel de conducción - carga (m)	8.5
	Número de túneles	3.0
	Longitud del túnel carga (m)	570.0
	Capacidad compuertas (m ³ /s)	7500.0

Tabla 11. Ficha técnica de la represa de Betania. Fuente: Propia.

6.2.2. Estructura del modelo

El modelo se encuentra conformado por una sola afluencia que funciona como la sumatoria de las tres afluencias ya mencionadas anteriormente con el fin de simplificar el modelo. Aguas abajo de esta se encuentra localizada la represa de Betania; teniendo en cuenta que la prioridad en la producción de energía varía de acuerdo con el escenario que se esté evaluando. Tanto en el escenario 1 como en el escenario 2 esta prioridad corresponde a 1 porque en estos la operación del embalse está precisamente en función de la producción de energía (ya sea diaria o mensual); en los escenarios restantes (escenario 3, 4 y 5) la prioridad de este parámetro pasa a ser 2 debido a que en estos se pretende ver el efecto de otros parámetros sobre el caudal aguas debajo de la represa de Betania dejando en segundo plano la producción de energía.

Justo después de la represa, se localiza un punto de requerimiento de flujo correspondiente a la estación 21097120; en el que el requerimiento cambia según el escenario analizado. Seguido se encuentra la afluencia que simula los flujos derivados del río Neiva y del río Ceibas como un efecto acumulado o conjunto. Finalmente, se encuentra el segundo punto de requerimiento de flujo asociado a la estación 21097070, de modo que, se pudiera llevar a cabo un análisis del caudal ambiental aguas abajo de la represa de Betania contemplando el flujo adicional de otro río.

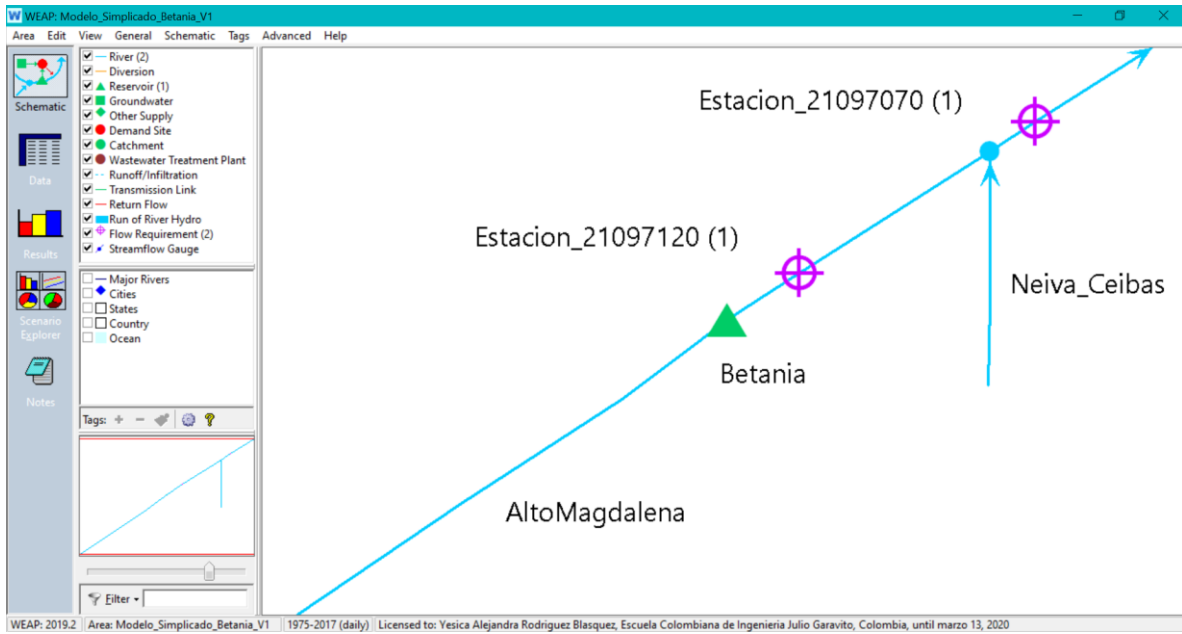


Figura 95. Modelo de simulación de la operación de la represa de Betania en WEAP. Fuente: Propia.

7. Capítulo VII. Resultados y análisis de resultados

7.1. Análisis cualitativo

CONCEPTO		ELOHA	GMECAC
Componente técnico	Caracterización hidrológica	Cinco categorías de flujo, pero la clasificación principal corresponde a flujos altos, flujos estacionales y flujos bajos.	Tres periodos hidrológicos: Condición húmeda (flujos altos), condición normal (flujos típicos) y condición seca (flujos bajos).
	Proceso para la caracterización hidrológica	Construcción de diagramas de isopercentiles a través de las curvas de duración de caudales para cada día del año.	Mejor correlación entre las variables medias mensuales (precipitación, caudal, temperatura) y los índices asociados al fenómeno del Niño (ENOS), tales como ONI, SOI y MEI.
	Métricas de interés ecológico	Ecochange (ecodéficit o ecoexceso), refiriéndose al cambio relativo de la curva de duración de caudales entre la condición natural y alterada comparado con el umbral crítico definido en la base datos que relaciona los procesos hidrológicos con los procesos ecológicos.	Métricas hidrológicas para la caracterización de los eventos extremos (caudal mínimo con periodo de retorno de 10 años y caudal máximo con periodo de retorno de 15 años) e hidromorfométricas asociadas con la conectividad longitudinal y lateral (relación tiempo-caudal y caudal de banca llena, respectivamente).
	Medición del impacto	Basada en el principio de funcionamiento de un semáforo, con una escala de grado de alteración (provocada por la implementación del proyecto) asignando un color dependiendo del rango en el que se encuentre el índice de ecochange para la priorización de los impactos sobre el ecosistema.	Aplicación de pruebas estadísticas que permitan obtener la mínima diferencia entre la distribución de la condición natural y la condición alterada (al implementar la propuesta de aprovechamiento de caudales como un porcentaje del caudal medio mensual), en términos de magnitud, duración e intensidad.
	Régimen de caudal ambiental	Régimen de caudal adoptado que permita conservar los procesos ecológicos priorizados de acuerdo con el grado de alteración obtenido.	Área del hidrograma entre el caudal aguas abajo del proyecto y el caudal mínimo aguas abajo.
Componente social		Da una base científica para una discusión pública en la que los actores puedan definir las condiciones ecológicas aceptables y los objetivos de caudal ambiental a través del grado permisible de alteración del flujo. Adicionalmente, se puede realizar	El componente no es abarcado en detalle, se evidencia un desbalance entre los tres componentes; dejando este en un segundo plano.

CONCEPTO		ELOHA	GMECAC
		el mismo procedimiento para generar la base de datos de los procesos sociales que se presentan en el río y de los cuales dependen las comunidades que en este habitan para cada momento del año en función de la hidrología	
Componente de gestión	Monitoreo	Enfatiza en la importancia de seguimiento al régimen de caudal ambiental adoptado, identificando el porcentaje de objetivos de caudal ambiental establecidos, sin embargo, no establece lineamientos para la ejecución de este componente.	Plantea dos etapas, una de seguimiento y otra de evaluación. En el seguimiento se determina cuán apto es un hábitat para la ictiofauna a través del MSHI.
	Evaluación	Se resalta la importancia del constante mejoramiento de los resultados pero no se establecen lineamientos para ello.	Se analizan perfiles de calidad de agua para la identificación del escenario más crítico de caudal ambiental en términos de asimilación de los cuerpos de agua a cargas contaminantes y de disponibilidad de agua

Tabla 12. Esquema comparativo de acuerdo con la revisión cualitativa realizada a las metodologías. Fuente: Propia.

7.2. Análisis cuantitativo

7.2.1. Comparación en términos ambientales

Una vez calculados los regímenes de caudal ambiental y se han evaluado los impactos generados por cada uno de los escenarios de reglas de operación con ambas metodologías, es necesario determinar qué escenarios pueden ser considerados para el mantenimiento del ecosistema de agua dulce aguas debajo de la represa de Betania. En cuanto a la GMECAC, se planteó que una métrica cumple si todos los parámetros tenían buen comportamiento y si no cumple con uno de los parámetros existe una alerta. Finalmente, el escenario no es bueno en términos de la protección del ecosistema si dos parámetros o más no cumplen con la métrica. A continuación, se muestra el desempeño final de cada escenario para cada una de las metodologías.

Estación 21097120							
Escenario	GMECAC				ELOHA		
	Qmax	Qb	Qmin	Qtq	Flujos altos	Flujos medios	Flujos bajos
1	✓	✓	!	✓	✓	✓	✗
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✗	!	!	✓	!	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	!	✓	!	✓	✗

Figura 96. Desempeño final de todos los escenarios para la estación 21097120. Fuente: Propia.

Estación 21097070							
Escenario	GMECAC				ELOHA		
	Qmax	Qb	Qmin	Qtq	Flujos altos	Flujos medios	Flujos bajos
1	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
2	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
3	✗	!	✓	✗	!	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✗	✓	✓	!

Figura 97. Desempeño final de todos los escenarios para la estación 21097070. Fuente: Propia.

De acuerdo con los resultados mostrados, solamente uno de los escenarios cumple con todas las métricas tanto en la estación 21097120 como en la estación 21097070 para la metodología colombiana. Este es el escenario 4, en el que se el flujo de entrada era el igual al flujo de salida; comportamiento totalmente esperado pues en términos de alteración este escenario debía generar la menor posible puesto que con este se simularon aproximadamente las condiciones naturales del río, es decir, como si no hubiese represa. El segundo escenario con mejor desempeño es el 2 (demanda mensual de energía), luego el 5 (generación mínima de energía para cumplir con un caudal ambiental mínimo), posteriormente el 1 (demanda diaria de energía) y en último lugar el 3 (flujo de salida igual al 80% del flujo de entrada).

Con respecto a ELOHA, el escenario 4 también muestra el mejor comportamiento con un número bastante reducido de alteraciones de flujo de nivel bajo. Así mismo, con una mayor cantidad de alteraciones de nivel bajo el escenario 2 también cumple con los requerimientos de flujo para la conservación del ecosistema. Por último, los escenarios 1, 3 y 5 no corresponden a reglas de operación que puedan ser consideradas como adecuadas en términos de protección ambiental. Consecuentemente, el análisis económico asociado al régimen de caudal ambiental solamente se realizará para el escenario 4 en contraste con el escenario 1, pues este último refleja el modo en el que la represa de Betania ha sido operada hasta el día de hoy.

7.2.2. Comparación en términos económicos

Para la investigación llevada a cabo, la comparación económica se hizo a través de la generación de energía de acuerdo con el caudal ambiental para las dos metodologías. En el caso de ELOHA, la producción de energía hidroeléctrica se obtuvo directamente de la simulación realizada en WEAP. En lo que concierne a la metodología colombiana, la energía generada no corresponde a la que resulta de la simulación puesto que los caudales aguas abajo no son exactamente los que se obtienen del modelo.

Los caudales aguas abajo de la represa se modificaron con la verificación de los mínimos como lo exige la metodología colombiana. De manera que, la energía hidroeléctrica producida se calculó a partir de la ecuación de máquinas con el uso de las elevaciones de almacenamiento generadas por el modelo de WEAP para cada escenario. Una vez se tuvo esta aproximación, se determinó la energía firme correspondiente al percentil 95 de la producción de energía media mensual histórica, así como la energía media generada.

Una vez se calculó la producción hidroenergética resultado de la implementación de cada una de las metodologías, se calcularon los costos asociados a la energía media y firme de acuerdo con un registro del precio de la bolsa de 16 años. Posteriormente, se comparó el escenario de operación viable con el escenario de referencia o línea base correspondiente al escenario 1 (operación basada en la demanda de energía diaria). De manera que, se determinó la variación porcentual en términos de costos respecto al escenario de referencia tanto para la producción de energía hidroeléctrica media como firme. Así mismo, se calculó el costo-beneficio porcentual de la implementación de ELOHA en reemplazo de la metodología colombiana con el fin de determinar el costo relacionado a la aplicación de una metodología que muestra mejores resultados desde una perspectiva ambiental.

Escenario		Energía media			Energía firme		
		Energía (MW)	Costo (\$)	Variación porcentual	Energía (MW)	Costo (\$)	Variación porcentual
1	Línea base	295.5365	\$ 891,136,192		198.3059	\$ 597,955,014	
4	GMECAC	320.5623	\$ 966,596,796	-8.47%	205.5813	\$ 619,892,650	-3.67%
	ELOHA	295.5702	\$ 891,237,691	-0.01%	197.0197	\$ 594,076,751	0.65%

Tabla 13. Comparación económica del escenario más eficiente en contraste con la operación real de Betania. Fuente: Propia.

Tipo de energía	Costo-beneficio porcentual de implementación de ELOHA
Media	7.80%
Firme	4.16%

Figura 98. Costo-beneficio porcentual tras la implementación de ELOHA en reemplazo a la metodología colombiana. Fuente: Propia.

De acuerdo con esto, se obtiene una mayor producción de energía hidroeléctrica con el caudal ambiental correspondiente a la metodología colombiana que con el obtenido con ELOHA. Este era el comportamiento que se esperaba puesto que el caudal ambiental de la metodología colombiana se encuentra amplificado respecto al de ELOHA por las modificaciones realizadas por la condición del caudal mínimo a nivel diario. No obstante, estas se encuentran en el mismo orden de magnitud

Desde otro punto de vista, se encontró que la variación económica en términos porcentuales asociada a la implementación del régimen de caudal ambiental para la metodología colombiana del escenario 4 respecto al escenario de referencia para la energía media es de -8.47% y para la energía firme de -0.01%. En lo referente a ELOHA, esta variación es equivalente al -3.67% para la energía media y de 0.65% para la energía firme. Con esto, se puede concluir que el régimen de caudal ambiental obtenido a partir de ELOHA implica una mejor evaluación ambiental del impacto generado por la operación de la represa y la metodología colombiana puede asociarse con un mayor rendimiento económico en relación con la producción hidroenergética. Adicionalmente, existe una mayor producción de energía hidroeléctrica con la implementación del escenario conservador de operación del embalse, generando así un ahorro en la operación y mejores condiciones ambientales en el ecosistema aguas abajo de la represa.

8. Capítulo VIII. Conclusiones

- I. No existe un equilibrio en cuanto al grado de importancia que se le da a los tres componentes a partir de los cuales se planteó el análisis comparativo de las metodologías. En la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia no se abarca el componente social para ser incluido dentro de la determinación del caudal ambiental; únicamente es mencionado en términos de la identificación y consolidación de conflictos y problemáticas asociados al uso del recurso hídrico. En contraste, ELOHA incluye los valores sociales y culturales asociados a la hidrología dentro de su análisis a través de las relaciones entre estas dos variables. Sin embargo, el acercamiento a las comunidades para la definición de estos valores sigue dejándose en un plano secundario por la falta de claridad en la manera de proceder ante esta situación para generar los espacios adecuados de concertación.
- II. En términos cualitativos, la caracterización hidrológica de ambas metodologías es igual, clasificando el flujo en flujos altos, flujos estacionales y flujos bajos con la diferencia entre los procesos para ello. No obstante, al implementar las metodologías con el caso de estudio seleccionado se observó que debido a que la caracterización hidrológica para la metodología colombiana se hace a partir del índice del fenómeno de El Niño que mejor correlación presente sin tener en consideración la diferencia entre la magnitud real de los diferentes tipos de flujo, el rango para el cuál se debe garantizar el régimen de caudal ambiental no cambia considerablemente entre las condiciones hidrológicas húmeda, normal y seca. Esto se debe a que se pide que la correlación entre el correspondiente índice y las variables hidrológicas se haga a nivel diario cuando es sabido que los índices asociados al ENOS se calculan como una media móvil de 3 meses consecutivos, sesgando la relación que realmente existe entre el índice y el flujo en el tramo. De manera que, se considera que la caracterización hidrológica de la GMECAC debería simplificarse prescindiendo de la clasificación del flujo en función del fenómeno de El Niño puesto que esto no da un valor agregado.
- III. El funcionamiento ecológico del ecosistema no se considera directamente en la estimación del caudal ambiental por la metodología colombiana. Las métricas hidrológicas e hidromorfológicas asociadas a los eventos de interés ecológico representan un reconocimiento general de los requerimientos para el mantenimiento del ecosistema, pero no las necesidades específicas del tipo de río analizado y mucho menos de las especies pertenecientes a este ecosistema. Las variables de análisis biológico son incluidas hasta

después de que se ha implementado el régimen de caudal ambiental, es decir, para una etapa de monitoreo de la eficiencia del caudal implementado para la conservación del ecosistema. Esto no resulta ser apropiado puesto que no se están teniendo en cuenta las funciones ecológicas del ecosistema dentro del caudal ambiental, en otras palabras, no se asocian las necesidades de agua de las especies en términos de cantidad, calidad y momento.

- IV. De acuerdo con el análisis comparativo cualitativo realizado, se pudo determinar que el componente de gestión se abarca con mayor detalle en la GMECAC. El monitoreo y la evaluación tras la implementación del régimen de caudales ambientales se plantea desde el punto de vista de la abundancia de la ictiofauna, con el índice de idoneidad de hábitat y de la calidad del agua, con la capacidad de asimilación del tramo de río a cargas contaminantes. No obstante, no se establecen con claridad los umbrales aceptables de dichos indicadores mientras que con el principio del semáforo de ELOHA existe una idea de los límites de alteración aceptables.
- V. La metodología colombiana para la estimación del caudal ambiental no se encuentra diseñada para todos los tipos de secciones transversales que pueden presentarse en un río. Uno de los requerimientos para el cálculo del caudal ambiental es la caracterización de los eventos relevantes ecológicamente a partir del caudal de banca llena; estableciendo un procedimiento basado en la modelación de la sección en condición de flujo uniforme (ante ausencia de información hidráulica detallada) para posteriormente calcular el caudal como el caudal donde se presenta un máximo local en la potencia específica y un mínimo local en la relación ancho profundidad. Sin embargo, se comprobó que esto solamente es aplicable cuando la sección transversal tiene planicies de inundación, es decir, para secciones transversales inconfiadas; para las cuales si se presenta un cambio abrupto en el ancho hidráulico de la sección. De manera que, queda un interrogante acerca del manejo que se debe dar al caudal ambiental cuando la sección transversal es confinada; no es claro si el ecosistema funciona adecuadamente en esta condición para cualquier caudal que fluya por la sección.
- VI. La comparación estadística propuesta por la metodología colombiana para la evaluación del impacto del uso del agua por parte de la represa no se considera del todo adecuada. No se contempla que las series de los eventos de interés ecológico para cada una de las métricas no corresponden conjuntos de datos pareados entre la condición natural y la condición alterada; motivo por el cual la prueba t no puede ser aplicada directamente. Adicionalmente, cuando

esta es aplicada a series de frecuencias obtenidas a partir de ajustes realizados a las series de datos de los eventos de interés ecológico, se encontró que en muchos casos las diferencias entre las dos condiciones pueden ser consideradas como despreciables y, aun así, esta prueba arroja como resultado que se rechaza la similitud. Por otro lado, está la prueba de Spearman que funciona a partir de la asignación de rangos a la serie de datos para comparar los rangos de las dos muestras en comparación en relación con un coeficiente de correlación de rango; no obstante, una vez más esto se encuentra diseñado para muestras pareadas y no para muestras de diferentes tamaños y con datos no coincidentes.

- VII. La medición del impacto de ELOHA permite determinar el grado de alteración del correspondiente escenario de operación de la represa de manera porcentual, de manera que, el impacto puede ser categorizado según su severidad. Así mismo, se evidencia la dirección en la cual se están alterando los flujos, es decir, si se presenta un déficit de flujo o si por el contrario hay un exceso de caudal para cada tipo de flujo; haciendo posible que haya un mayor entendimiento del modo en el que se está impactando el ecosistema y sus posibles consecuencias. Mientras que con la metodología colombiana la medición del impacto es muy superficial, puesto que solamente se determina si los flujos alterados son estadísticamente similares a los flujos naturales. Consecuentemente, el resultado de la medición del impacto para cada métrica que caracteriza los eventos de interés ecológico solo establece si se cumple la condición de flujo o no; dejando en desconocimiento cómo se afecta el flujo para proponer posteriormente una regla de operación que corrija esta situación.
- VIII. Como era de esperarse, el escenario que mejor desempeño tuvo en términos de la menor alteración del flujo fue el escenario 4, en el que los flujos de salida eran iguales a los flujos de entrada. Esto ocurrió tanto para la metodología colombiana como para ELOHA en los dos tramos de río objetos de estudio. En segundo lugar, se encuentra el escenario 2, correspondiente a una operación del embalse basada en una demanda mensual constante y no en una demanda diaria variable en el tiempo. Sin embargo, tanto este como los otros 3 escenarios no cumplieron con los criterios de aceptación del impacto.
- IX. En cuanto a la comparación de generación hidroenergética entre las dos metodologías se obtuvo como resultado que con los caudales ambientales provenientes de la implementación de la metodología colombiana la producción de energía hidroeléctrica fue mayor. Esta explicación se basa en que con la amplificación de los caudales ambientales obtenidos tras la simulación en WEAP debido a que, aquellos caudales que fueran menores al caudal mínimo

mensual debían ser corregidos con el correspondiente caudal mínimo, incrementando el valor de estos. No obstante, dicha producción se encuentra en el mismo orden de magnitud. De tal manera que, podría sacrificarse un poco la producción hidroenergética con tal de obtener un régimen de caudal ambiental que presenten una menor alteración del ecosistema de agua dulce.

- X. Así mismo, se comprobó que la implementación de una regla de operación conservadora no implica necesariamente una disminución importante en la producción de energía hidroeléctrica. Al comparar el escenario 4 (escenario con mejor desempeño en lo que se refiere a la alteración del flujo) con el escenario de referencia (escenario que plasma la regla de operación real de la represa de Betania hasta la actualidad) en términos de producción de energía, tanto media como firme, se obtuvo que existe una variación económica porcentual para la metodología colombiana de -8.47% y -0.01%, respectivamente. En cuanto a ELOHA dichas desviaciones fueron del -3.67% y 0.65%. De este modo, puede concluirse que, en efecto, es posible generar un ahorro en la generación media de energía a partir del régimen de caudal ambiental correspondiente a un escenario conservador de operación de la represa.
- XI. Si bien se obtienen mayores modificaciones con la metodología colombiana que con ELOHA, estas siguen siendo pequeñas. De modo que, se llega a la conclusión que al mantener los flujos de salida y entrada del embalse iguales o al reducir la flexibilidad del mercado de la hidroenergía en Colombia es posible establecer un balance entre los beneficios económicos asociados a la producción de energía hidroeléctrica y los beneficios ambientales producto de la protección del ecosistema de agua dulce aguas debajo de la represa. De esta manera, se rompe con el esquema en el que suele afirmar que la conservación de los ecosistemas no permite un escenario de alta producción hidroenergética.
- XII. Es importante destacar que el objetivo de la investigación no corresponde a desarrollar una optimización en la regla de operación de la represa de Betania. Lo que se pretendía era evaluar la manera en la que puede variar tanto el régimen de caudales ambientales como la respuesta ecológica asociada a una alteración del flujo a partir de diferentes enfoques de operación de un embalse. Es claro que, una optimización en términos de las funciones ecológicas del ecosistema tiene un carácter multiobjetivo de gran dificultad que no es objeto de solución del estudio realizado.

XIII. Con base en todo lo mencionado, se concluye que ELOHA presenta un mejor comportamiento que la metodología colombiana y, así mismo, se acerca más al concepto de metodología holística. Cabe resaltar que esto no implica que la GMECAC tenga un mal desempeño; sino que aún tiene muchos procesos por mejorar y simplificar para que el operador pueda implementar esta con una mayor facilidad y para que las funciones del ecosistema se reflejen de una manera más directa en la metodología. No obstante, se reconoce el gran esfuerzo que las entidades e instituciones medio ambientales de Colombia han invertido en el desarrollo de la Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales; evidenciando la evolución en la preocupación por la conservación de nuestros tan importantes ecosistemas de agua dulce.

9. Capítulo IX. Recomendaciones y observaciones

- I. De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda que la caracterización del flujo en la metodología colombiana no se realice a partir de la mejor correlación existente entre las diferentes variables hidrológicas y los indicadores del fenómeno de El Niño. Este fenómeno corresponde a eventos macroclimáticos que no pueden asociarse de una manera sencilla a eventos de caudal a nivel diario debido a la escala en la que son calculados dichos indicadores. De manera que, el rango de flujos para los diferentes periodos hidrológicos (seco, normal y húmedo) se mantiene aproximadamente constante, perdiendo el sentido de clasificación de flujo.
- II. La caracterización ecológica para la metodología colombiana debería replantearse debido a que los caudales que identifican los eventos de interés ecológicos se encuentran asociados de manera general a algunos procesos ecológicos. Podría trabajarse a partir de los rangos de flujo que requieren los diferentes procesos ecológicos para desarrollarse de la manera adecuada, realizando la evaluación estadística a partir de estos rangos en la condición natural y en la condición alterada. Así, puede garantizarse que los flujos que se presenten en el río cumplen con los requerimientos para la conservación de las funciones ecológicas del ecosistema de agua dulce aguas abajo de la represa.
- III. De acuerdo con la caracterización hidrológica propuesta por ELOHA, los flujos altos corresponden al rango de percentiles Q5-Q10, esto quiere decir que los caudales dentro de este rango solamente se presentan el 5% de las veces. De manera que, en un periodo de tiempo de 100 años estos caudales se presentan únicamente 5 veces; lo que evidencia que los eventos ecológicos relevantes asociados a los flujos altos ocurren muy pocas veces en la vida del río. Reflexionando respecto a esto, se tiene que para la implementación de ELOHA se requieren series de caudal muy extensas para lograr representar dichos eventos, por lo que, la regla de operación que respete el régimen de caudal ambiental está pensada para un manejo a largo plazo. Por otro lado, queda un cuestionante en relación al grado de importancia de los eventos ecológicos asociados a los flujos altos para el río y el correspondiente ecosistema.
- IV. Es importante que el operador entienda la manera en la que debe ser implementada el régimen de caudal ambiental para la cuenca de interés. Por este motivo, se considera pertinente el desarrollo de una guía simplificada en la que se especifique de manera clara las consecuencias

ante la toma de diferentes decisiones sobre la operación del embalse. Para ello, es fundamental la priorización de los procesos ecológicos a conservar en el ecosistema pues no todos estos cuentan con la misma relevancia para las comunidades y los diferentes stakeholders.

- V. En relación con lo anterior, se piensa que un futuro desarrollo en términos del régimen de caudal ambiental puede encontrarse en la optimización de los objetivos de conservación. Es decir, establecer una metodología en la que se optimice el escenario de operación del embalse en donde las variables de decisión corresponden a los diferentes procesos ecológicos relacionados con la hidrología del río. De esta manera, es posible obtener una operación óptima que considere la conservación de las funciones ecológicas de acuerdo a su nivel de importancia para el ecosistema de agua dulce y para las comunidades que dependen del mismo.

- VI. Por otro lado, se identificó que hay un campo sin explorar en referencia al régimen de caudal ambiental. Generalmente, las metodologías para la estimación del régimen de caudal ambiental se encuentran formuladas para casos en los que existen estructuras hidráulicas interrumpiendo un cauce de un río, tales como las represas hidroeléctricas. Sin embargo, no se han encontrado metodologías enfocadas en la estimación de este caudal para un río en su condición ambiental con fines de caracterización hidrológica y ecológica de los cauces que se encuentran aún inalterados. Consecuentemente, se considera pertinente el empezar a abarcar esta temática que también puede servir como insumo ante la posibilidad de una intervención futura de estos cauces naturales.

10. Referencias

- Angarita, H., Wickel, A. J., Chavarro, J., Escobar-Arias, M., & Delgado, J. (2015). Implicaciones de la expansión de hidroenergía en los ecosistemas de humedales y planicies de inundación de la cuenca del Magdalena.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología en superficie* (Primera). Ciudad de México.
- Avila, P., Beck, U., Denise Soares. et Al., Desarrollo, A. Y., Escobar, A., Global Water Partnership, ... Svampa. (2013). *La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas. Cultura y naturaleza. Aproximaciones a propósito del bicentenario de la independencia de Colombia*. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Banco de Desarrollo de América Latina - CAF. (2015). América Latina: ¿Cómo desarrolla el potencial hidroeléctrico? Retrieved from <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2015/11/america-latina-como-desarrollar-el-potencial-hidroelectrico/?parent=14092>
- Banco Mundial. (2015). Panorama general de la energía hidroeléctrica. Retrieved January 22, 2018, from <http://www.bancomundial.org/es/topic/hydropower/overview>
- Brown, C. A., & Joubert, A. (2003). Using multicriteria analysis to develop environmental flow scenarios for rivers targeted for water resource management. *Water SA*, 29(4), 365–374. <https://doi.org/10.4314/wsa.v29i4.5041>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill.
- CORMAGDALENA. (2013a). Caracterización física, demográfica, social y económica de los municipios ribereños de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena.
- CORMAGDALENA. (2013b). Macrozonificación de la Cuenca del Magdalena-Cauca.
- CORMAGDALENA, & IDEAM. (2001). Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. Resumen ejecutivo, 235.
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.
- Flores, A. N., Bledsoe, B. P., Cuhaciyán, C. O., & Wohl, E. E. (2006). Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data, 42, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005WR004226>
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A. E., Graham, K., Zarfl, C., & Liermann, C. R. (2014). Supplementary information : An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology_Charl* (Primera). Iowa.
- IDEAM. (2013). Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas.
- IDEAM. (2014). MONITOREO DE CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL EN EL RÍO MAGDALENA Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES EN JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ALTO MAGDALENA – CAM AÑO 2013.
- IDEAM. (2017). Guía Metodológica para la Estimación de Caudales Ambientales en Colombia.
- International River Foundation. (2007). The Brisbane Declaration. Brisbane. Retrieved from <http://riverfoundation.org.au/wp-content/uploads/2017/02/THE-BRISBANE-DECLARATION.pdf>

- King, J., & Brown, C. (2009). Integrated basin flow assessments : concepts and method development in Africa and South-east Asia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02316.x>
- King, J., & Brown, C. (2018). Environmental Flows , minimum flows and the mystery of ten percent (pp. 1–5).
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., ... Wissler, D. (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 494–502. <https://doi.org/10.1890/100125>
- Mayes, T. R. (2019). Generating Random Variates in Excel Using Built-in Functions. Retrieved from <http://www.tvmcalcs.com/index.php/calculators/apps/generating-random-variates-in-excel-using-built-in-functions>
- McClain, M. E. (2017). Why do we need environmental flows?
- Meli, P., Rey, J. M., Carabias, J., Ruiz, L., & Martínez, M. (2013). Restauración de los ecosistemas ribereños y sus servicios ecosistémicos: meta-análisis global y un estudio de caso en Chiapas, México. In *Servicios Ecosistémicos Hídricos: Estudios De Caso En América Latina Y El Caribe* (p. 312). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería* (Primera). Bogotá: Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Naggettini, M. (2017). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer.
- Naiman, R. J., Décamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia. Ecology, conservation and management of streamside communities*. London: Elsevier Academic.
- Olade. (2012). Matriz Energética en América Latina y el Caribe , Situación Actual y Perspectivas de la Energías Renovables.
- Opperman, J. J., Kendy, E., Tharme, R. E., Warner, A. T., Barrios, E., & Richter, B. D. (2018). A Three-Level Framework for Assessing and Implementing Environmental Flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6(August), 76. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00076>
- Pelton, W. L., & Tanner, C. B. (1960). An Evaluation of the Thornthwaite and Mean Temperature Methods for Determining Potential Evapotranspiration.
- Rao, A. R., & Hamed, K. H. (2000). *Flood Frequency Analysis*. Florida.
- Ritter, J. (2016). Optimisation of hydropower dam cascade operations with respect to energy generation, flood hazard and flow regime alteration, using operational modelling: a case study in the Nech ^{'i} catchment, Colombia, (44902). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=gQFtQAACAAJ>
- Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., ... Conde, D. (2011). Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. *Informe Final, Acuerdo PNUMA Y Vida Silvestre Uruguay*, 138.
- Sapkota, P., Bharati, L., Gurung, P., Kaushal, N., & Smakhtin, V. (2013). Environmentally sustainable management of water demands under changing climate conditions in the upper ganges basin, India. *Hydrological Processes*, 27(15), 2197–2208. <https://doi.org/10.1002/hyp.9852>

The Nature Conservancy. (2017). Indicators of Hydrologic Alteration (IHA): Software for Understanding Hydrologic Changes in Ecologically-Relevant Terms.

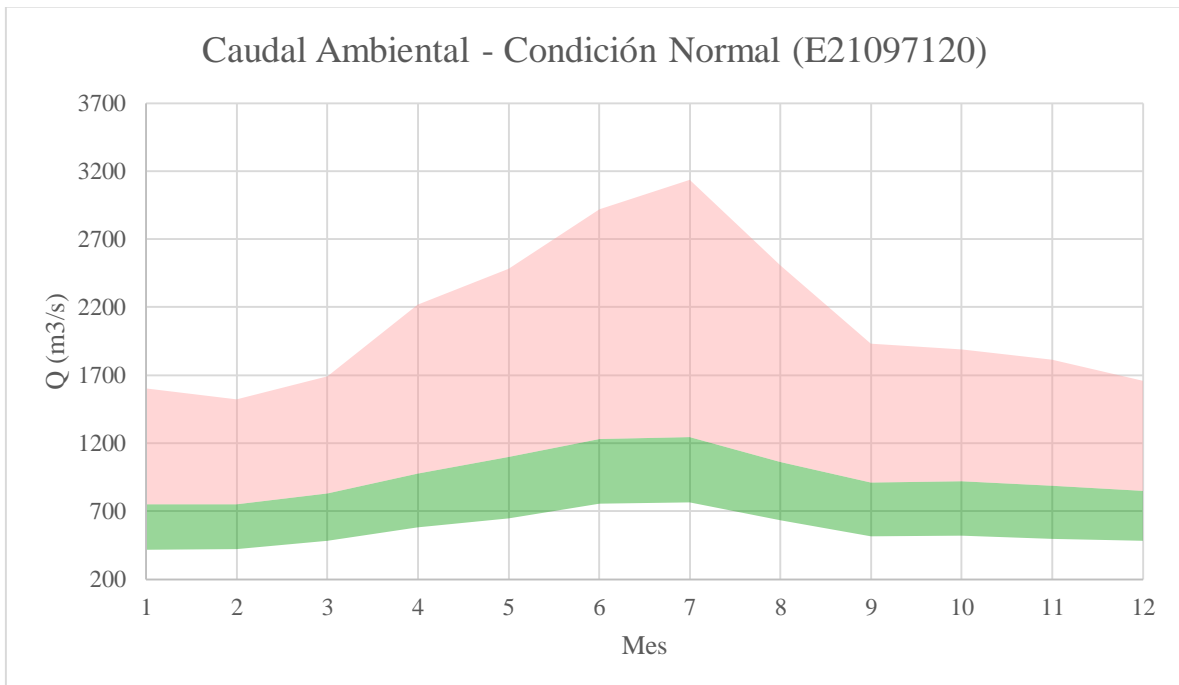
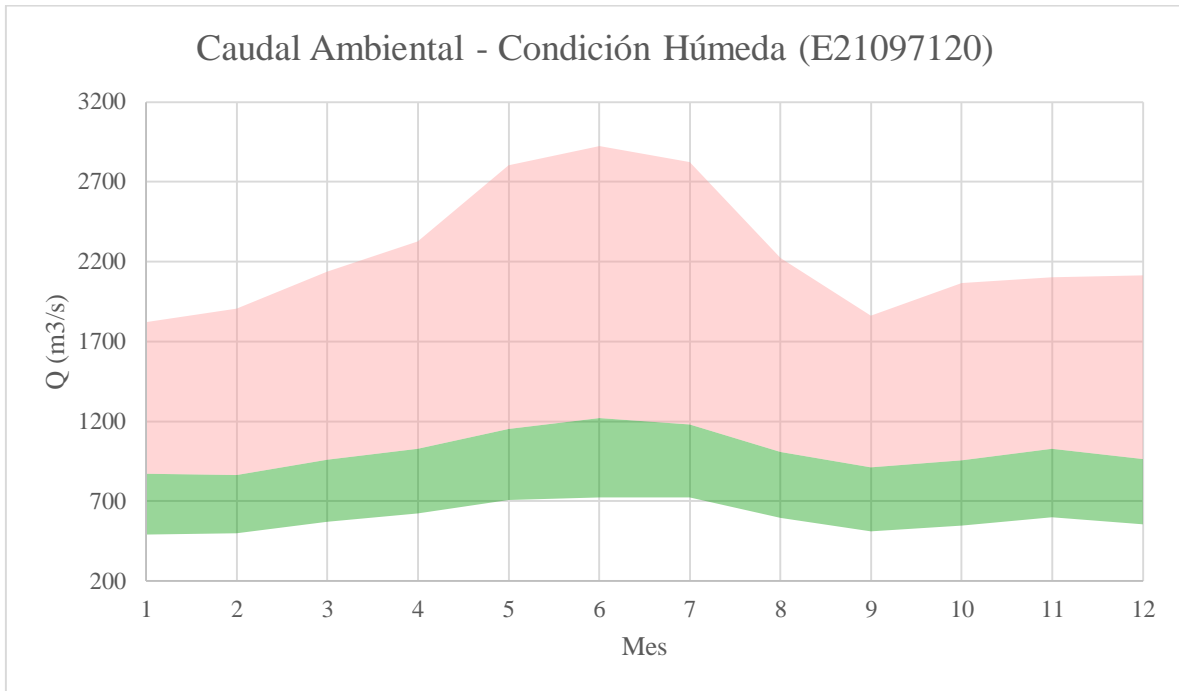
UNESCO. (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo.

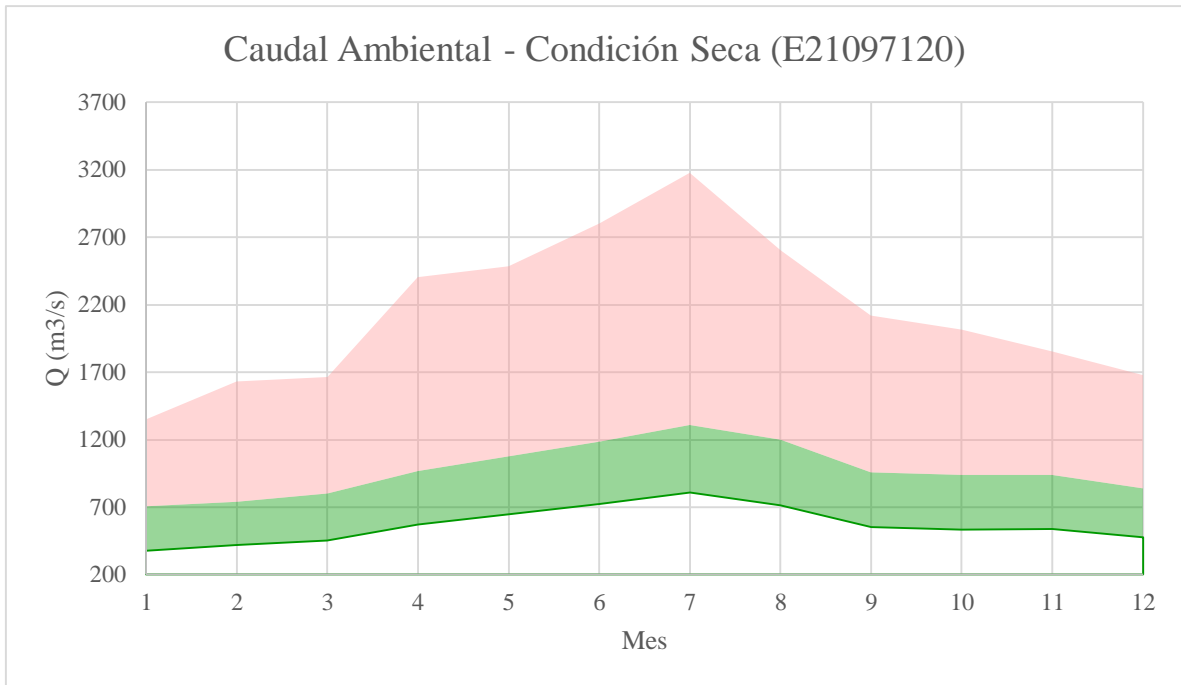
UNESCO-WWAP. (2003). Agua para todos, agua para la vida. *United Nations*, 36. Retrieved from <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenierías y ciencias*. México.

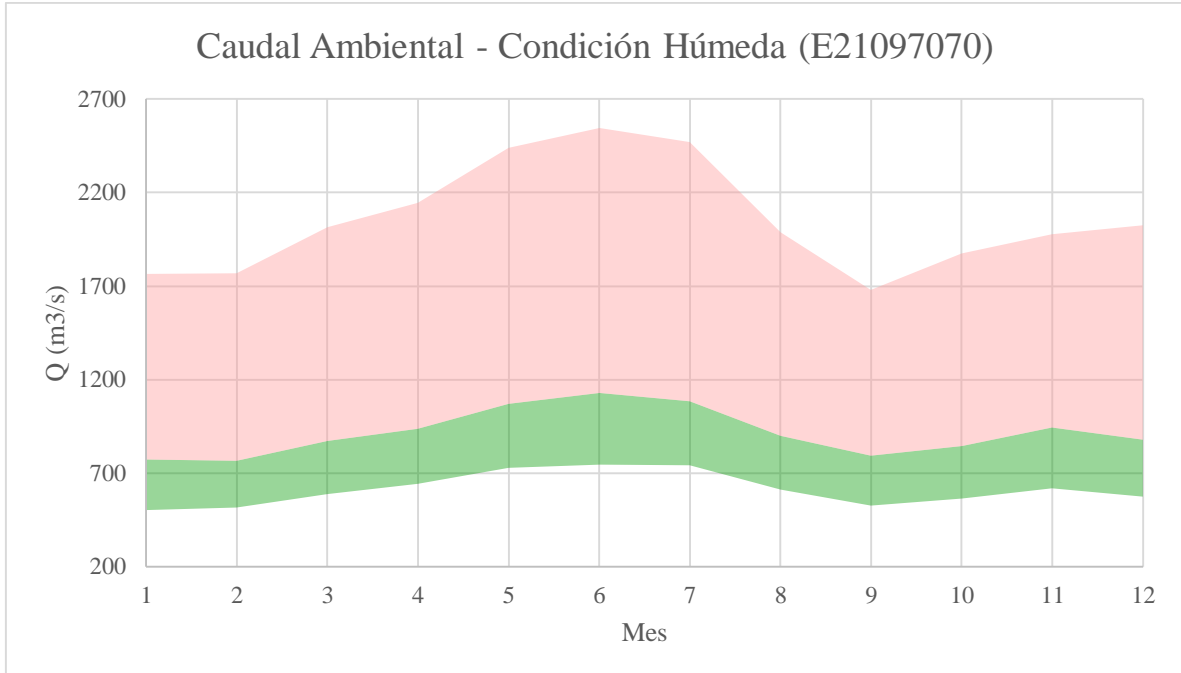
ANEXOS

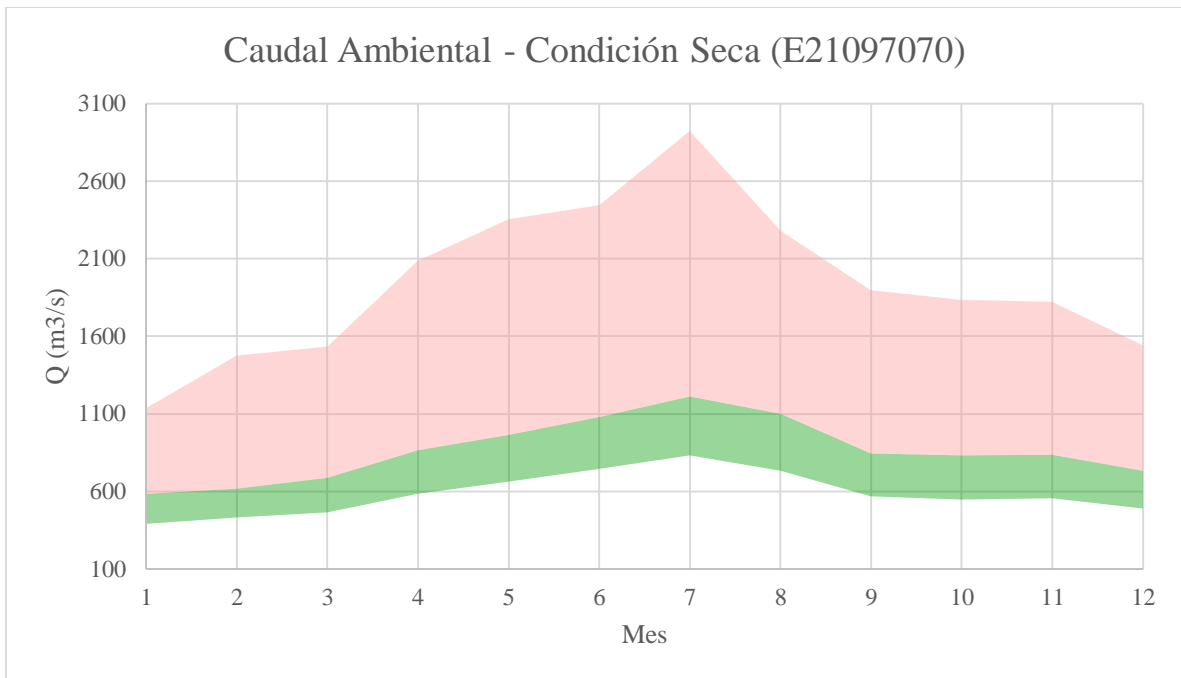
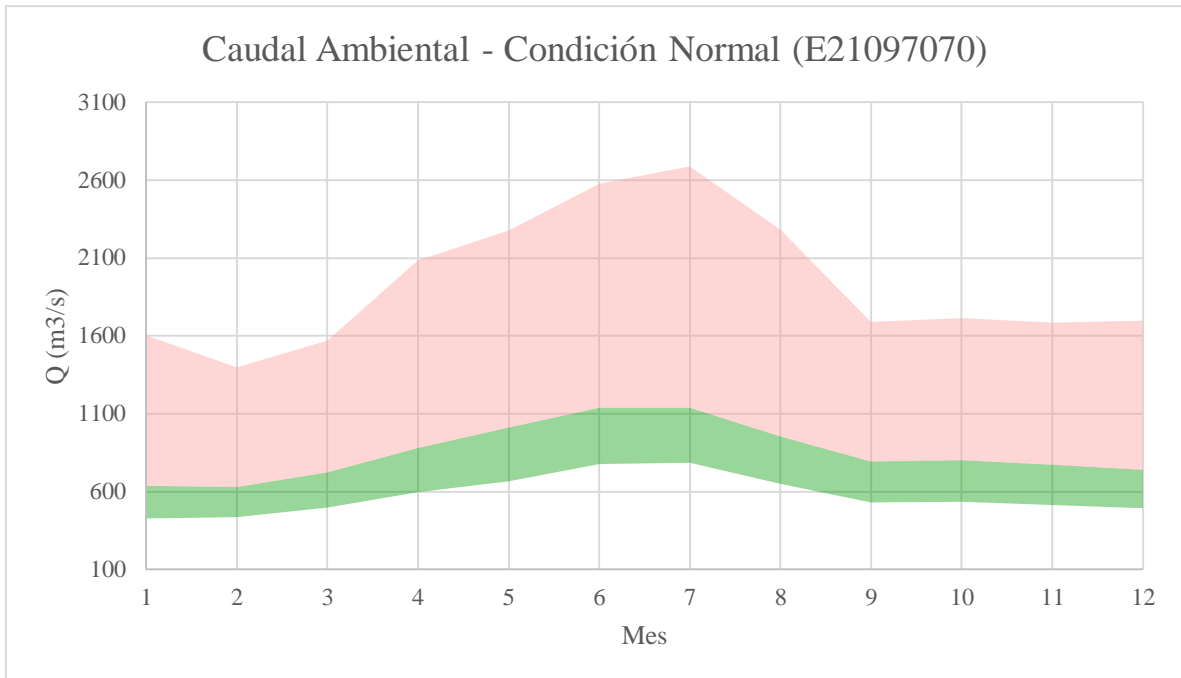
- Regímenes de caudal ambiental GMECAC





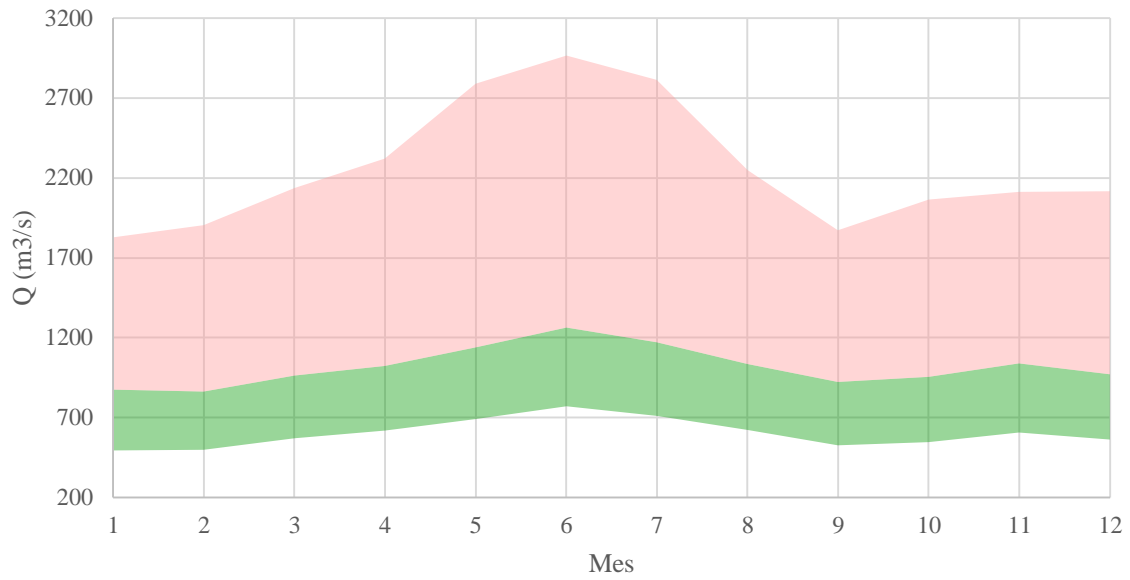
Anexo 1. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 2. Fuente: Propia.



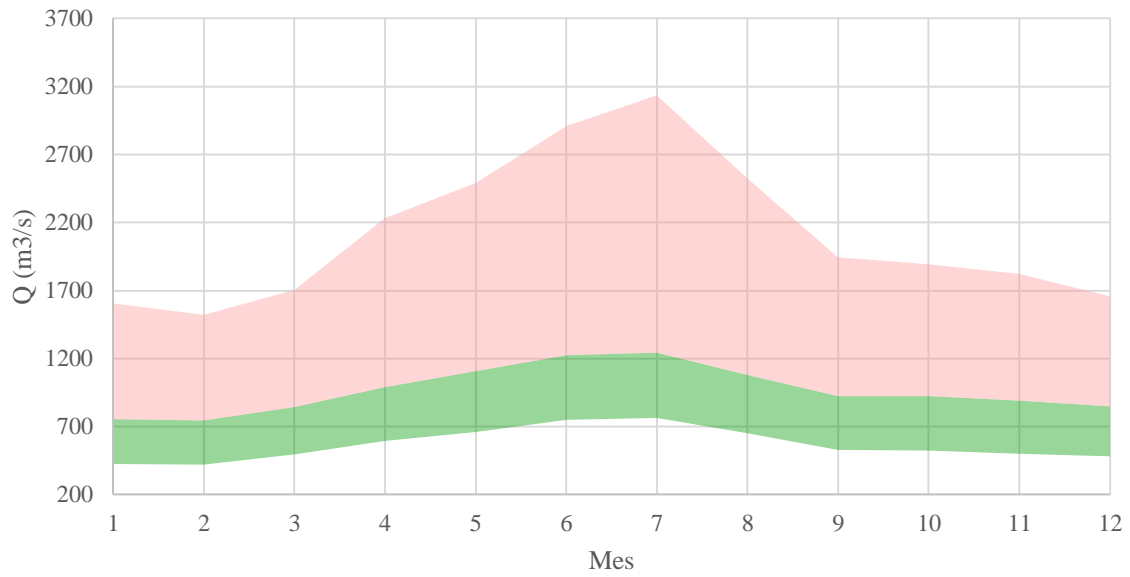


Anexo 2. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 2. Fuente: Propia.

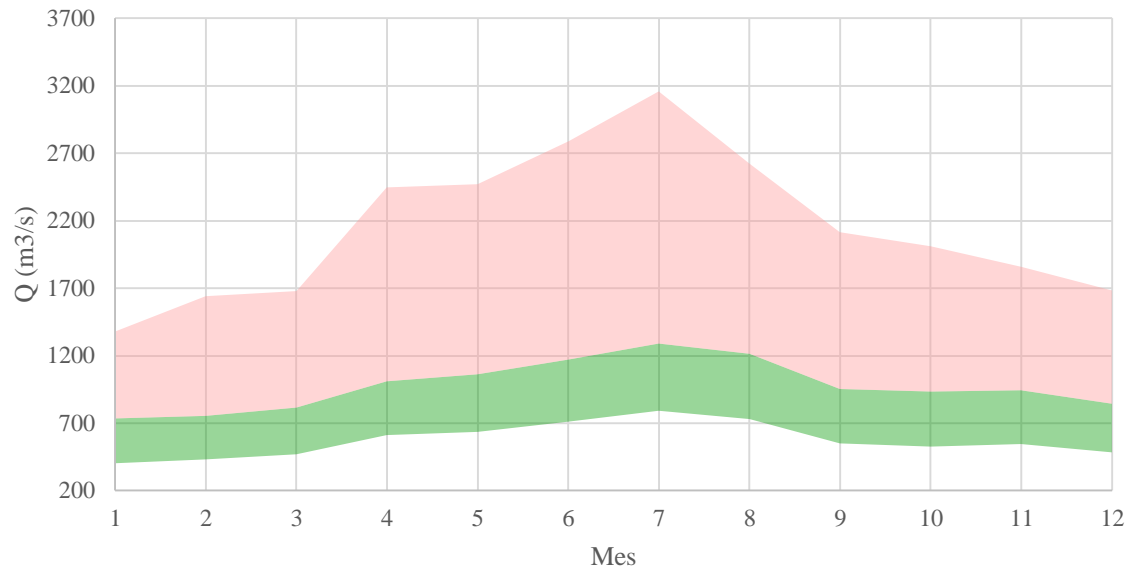
Caudal Ambiental - Condición Húmeda (E21097120)



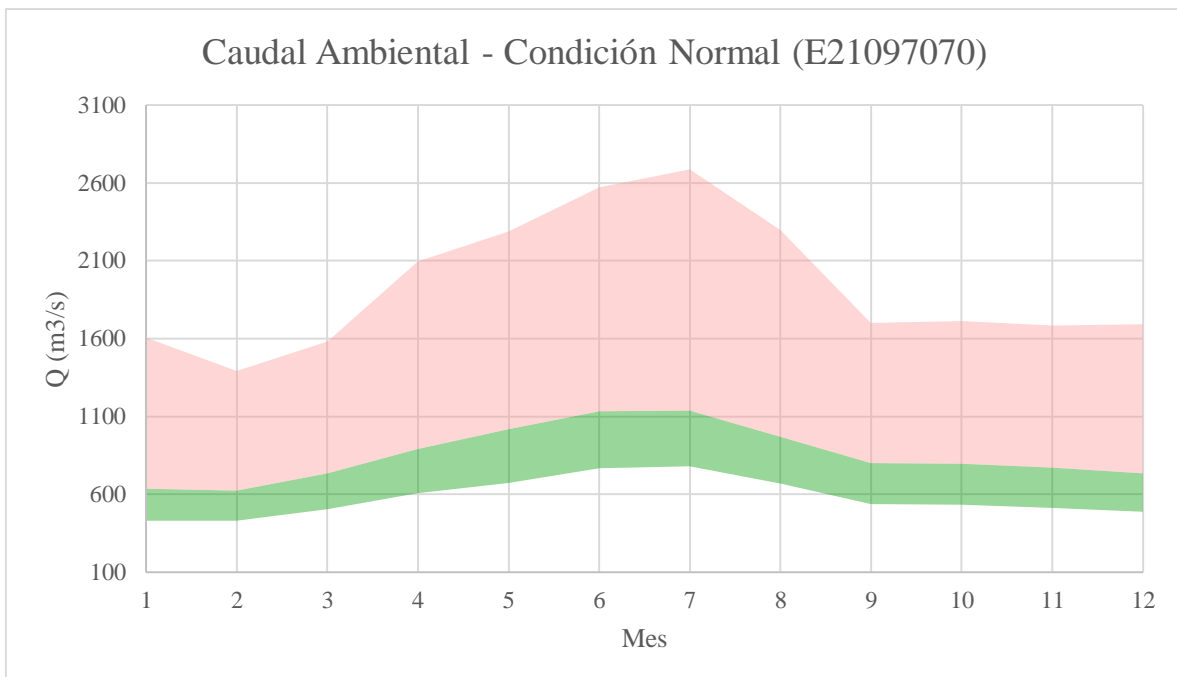
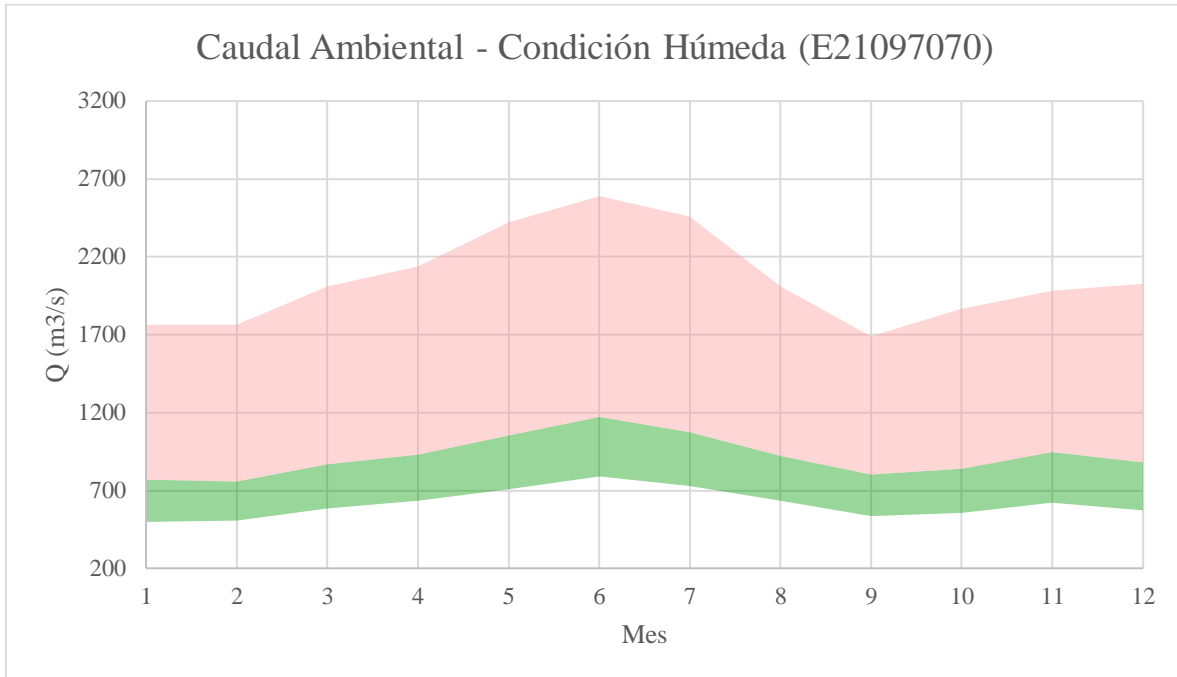
Caudal Ambiental - Condición Normal (E21097120)

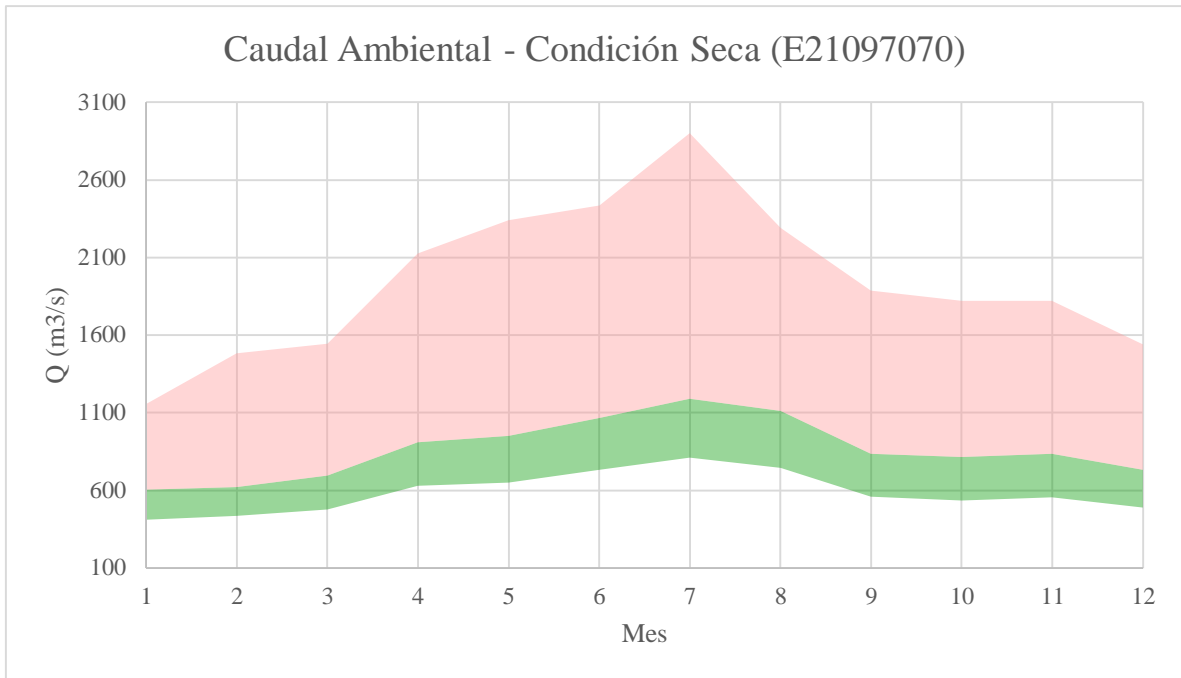


Caudal Ambiental - Condición Seca (E21097120)

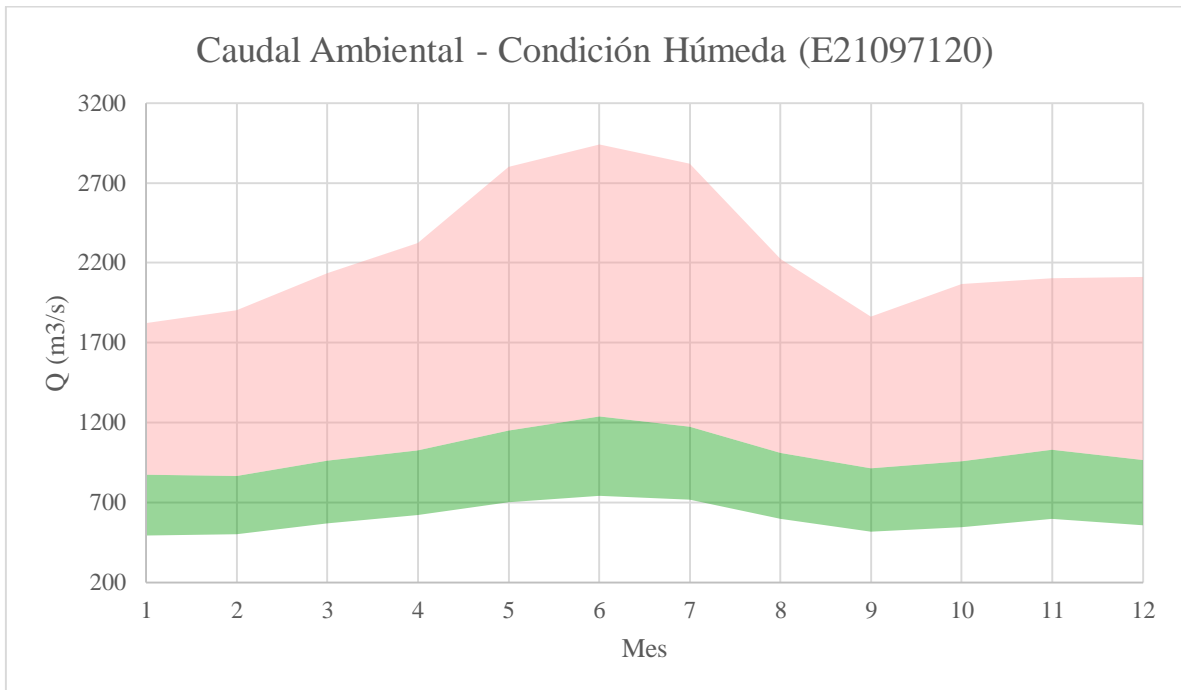


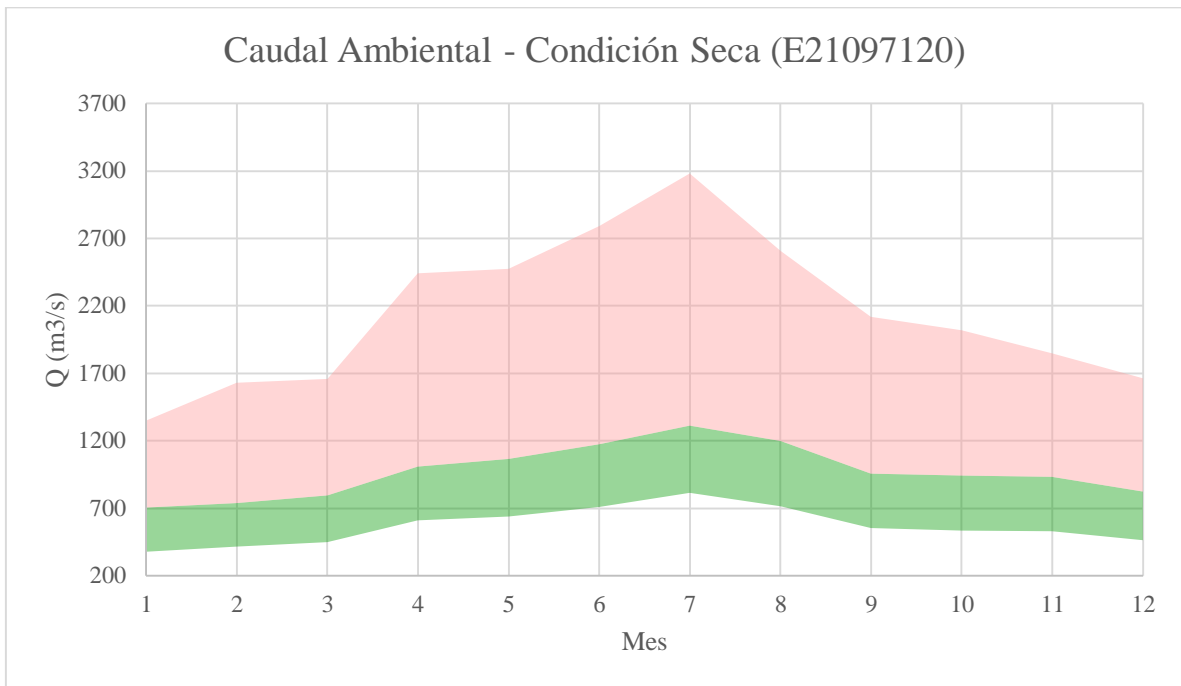
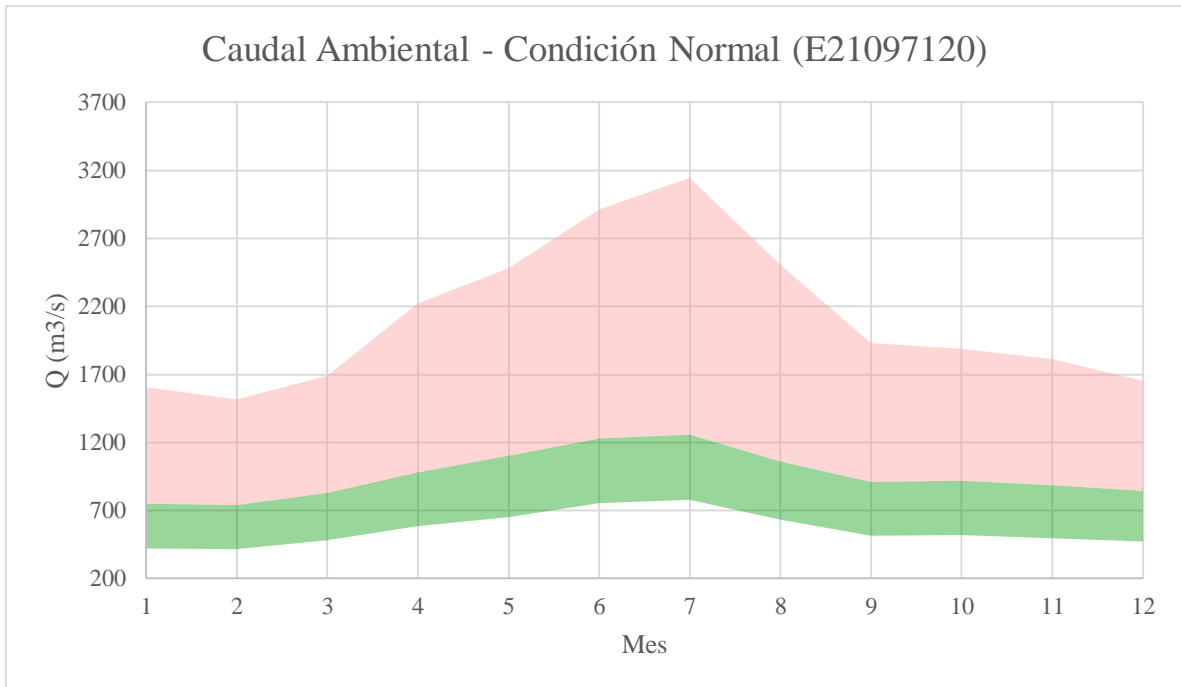
Anexo 3. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 3. Fuente: Propia.



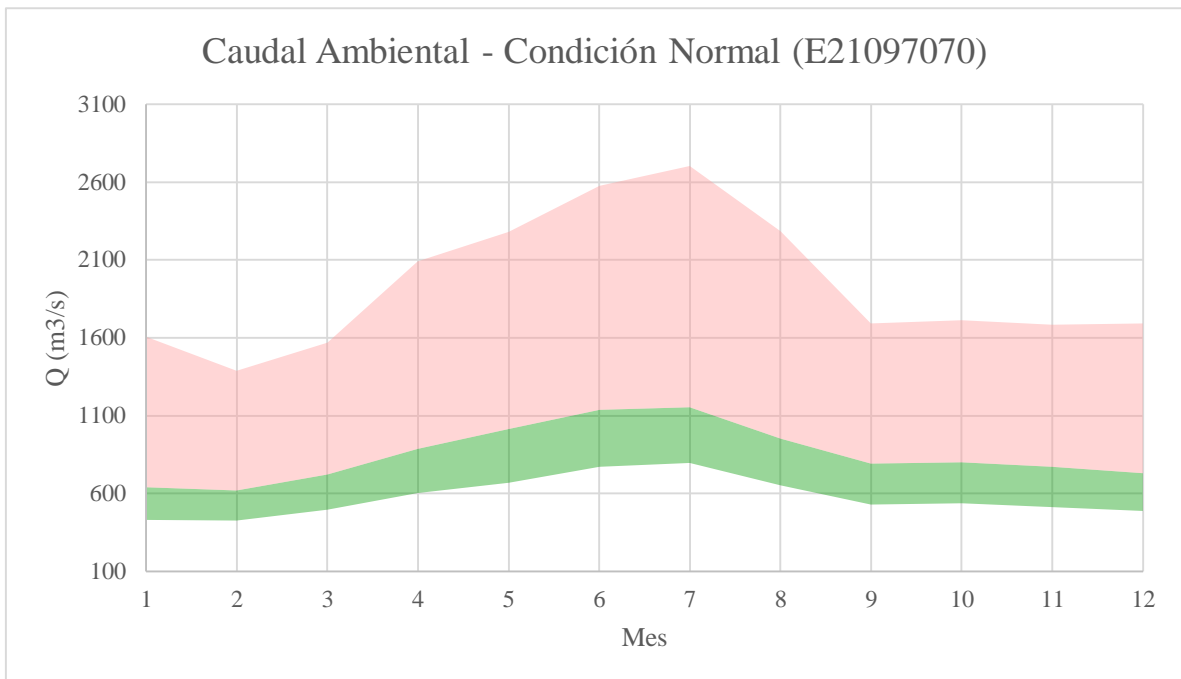
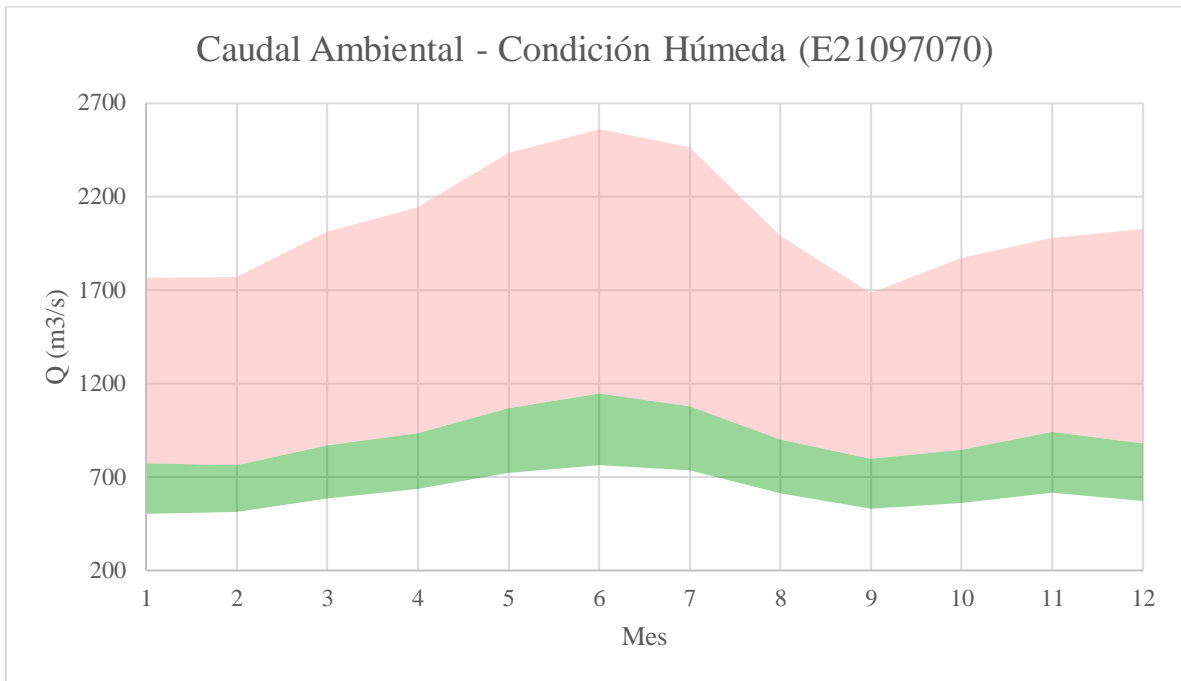


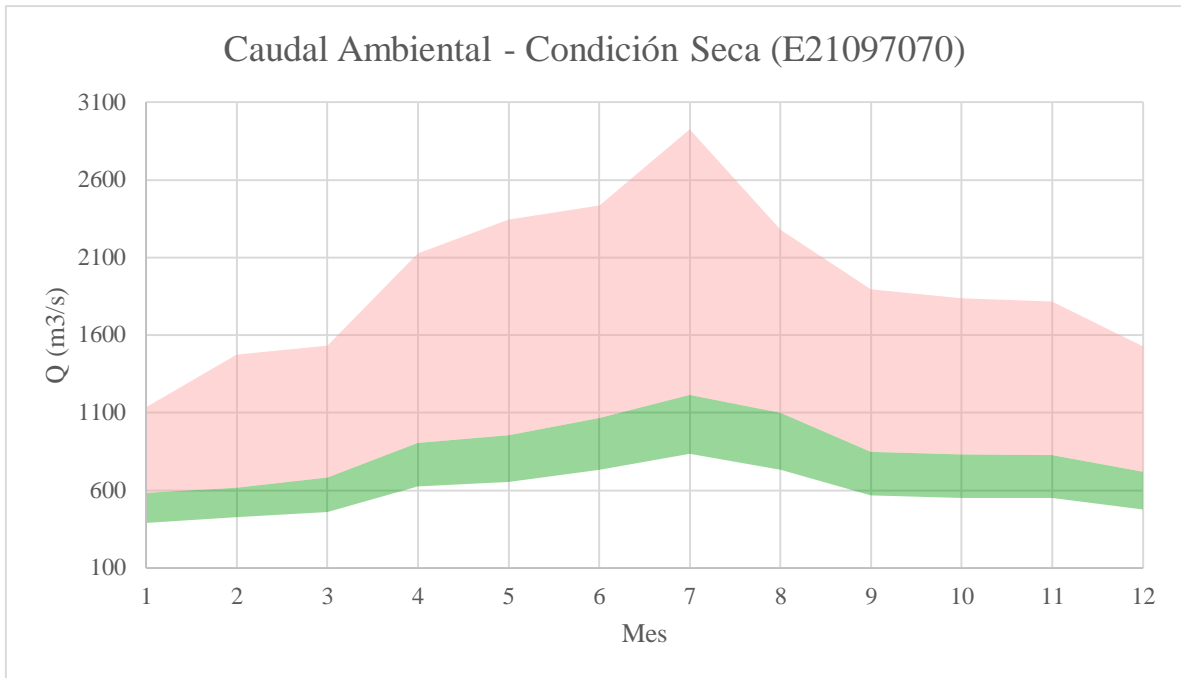
Anexo 4. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 3. Fuente: Propia.



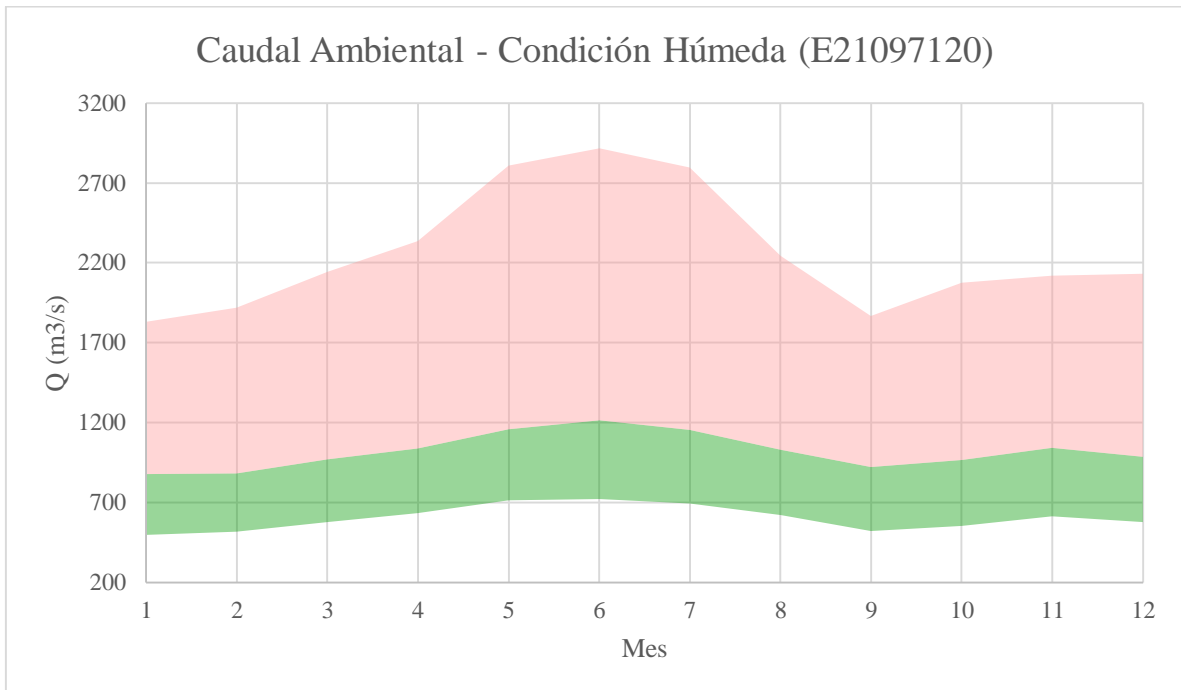


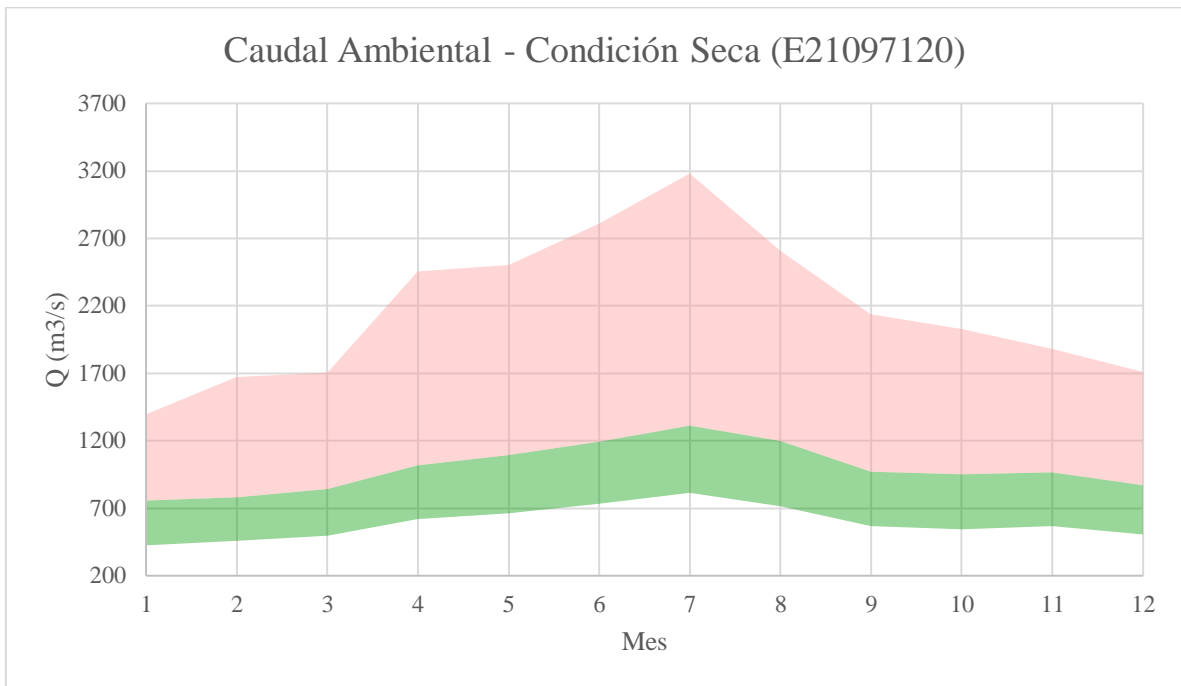
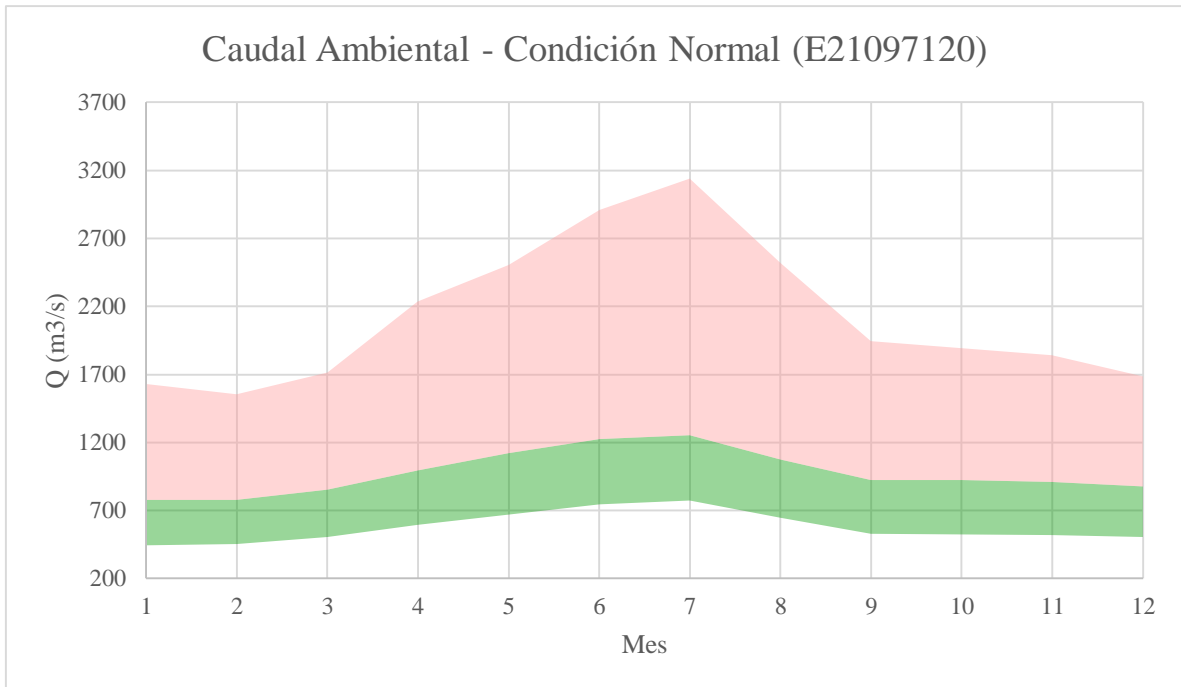
Anexo 5. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 4. Fuente: Propia.





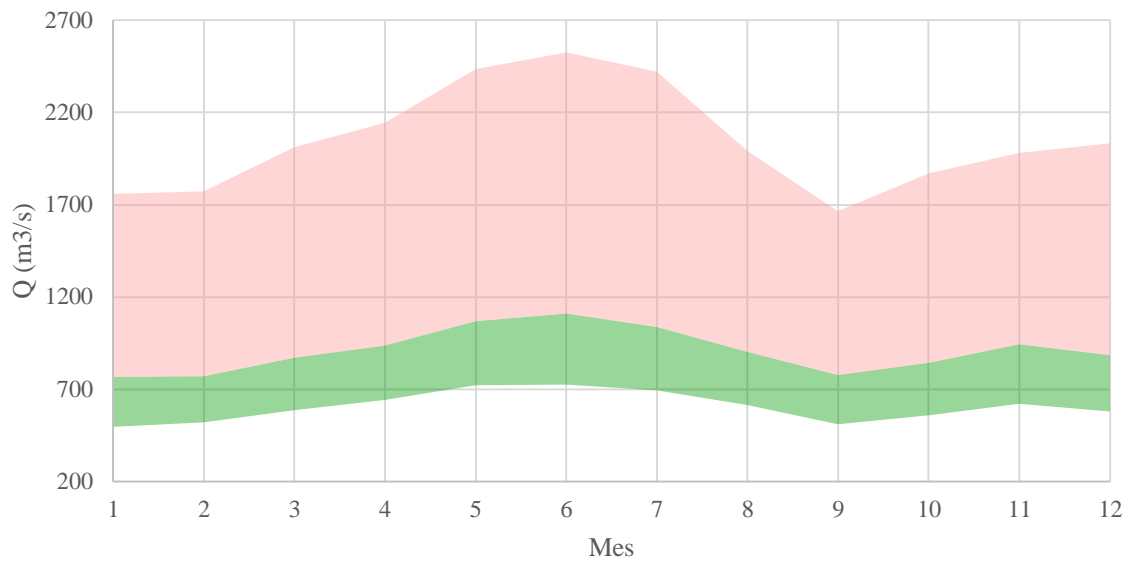
Anexo 6. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 4. Fuente: Propia.



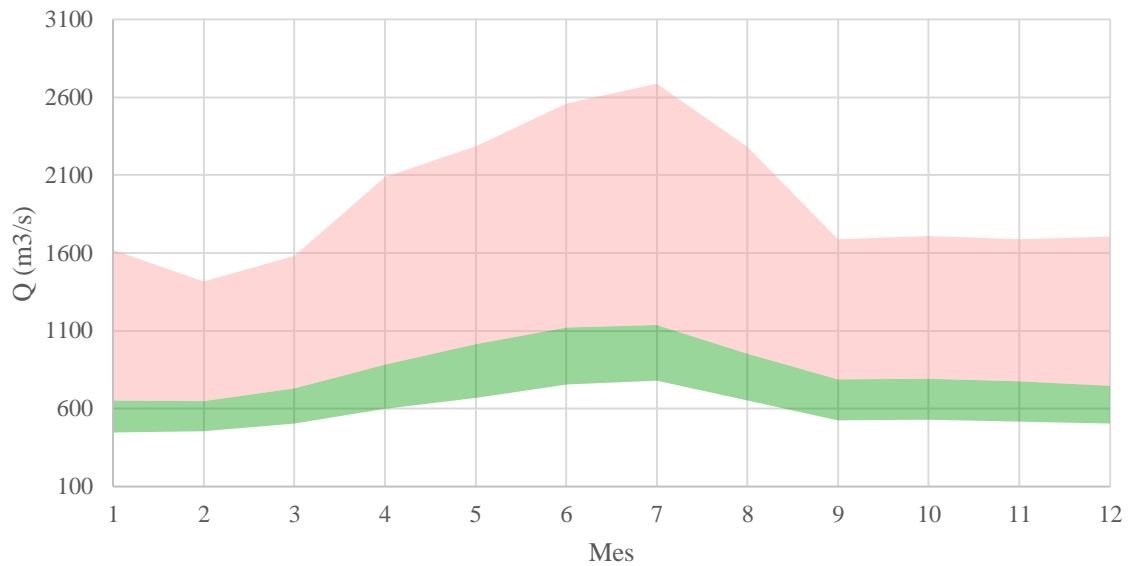


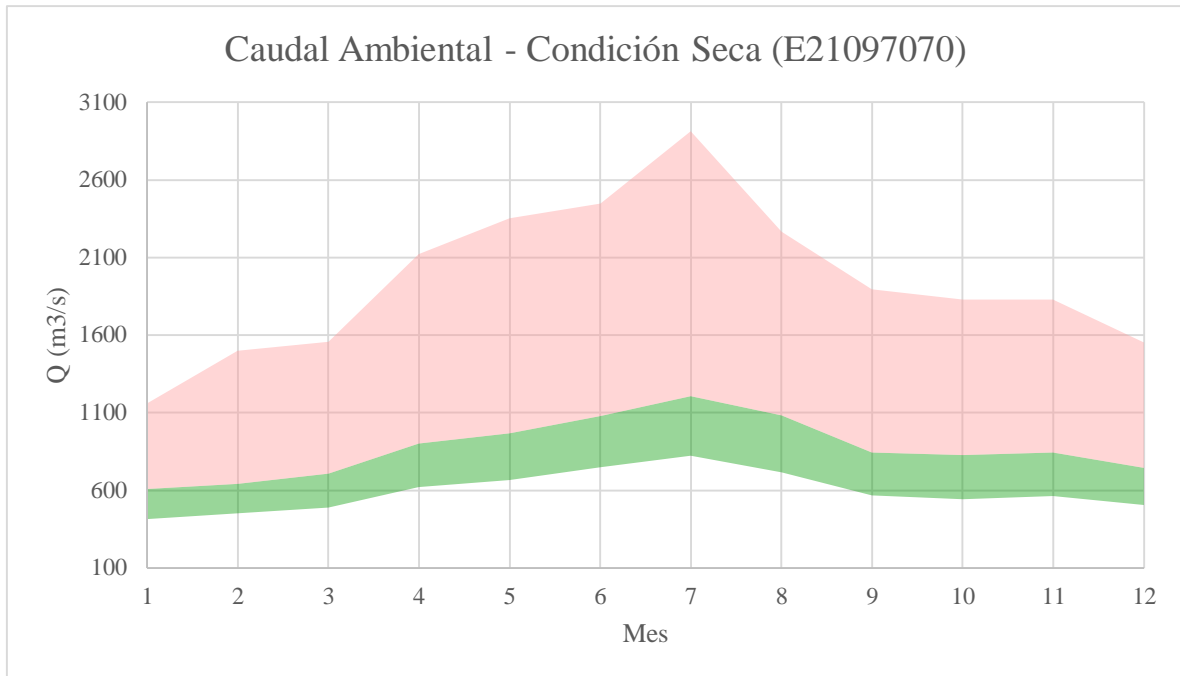
Anexo 7. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097120 según GMECAC – Escenario 5. Fuente: Propia.

Caudal Ambiental - Condición Húmeda (E21097070)



Caudal Ambiental - Condición Normal (E21097070)





Anexo 8. Condición húmeda, normal y seca del régimen de caudal ambiental mensual para la estación 21097070 según GMECAC – Escenario 5. Fuente: Propia.

- **Código para el cálculo de los indicadores de ecodefícit y ecoexceso**

Sub computeecodefsur(quana, quanb, cellvalue)

Application.ScreenUpdating = False

Sheets("IHA_Data").Select

ActiveSheet.Range("C13").Select

Dim defsum(20), sursum(20), area1sum(20) As Double

quan1per = quana * 100

quan2per = quanb * 100

For each month

For i = 1 To 12

defsum(i) = 0

sursum(i) = 0

area1sum(i) = 0

Do Until IsEmpty(ActiveCell.Value)

If ActiveCell.Offset(0, 1).Value > quan1per **And** ActiveCell.Offset(0, 1).Value < quan2per **Then**

'Compute areas under the curves

area1 = (0.5 * (ActiveCell.Offset(0, 1).Value - ActiveCell.Offset(-1, 1).Value) *
(ActiveCell.Offset(-1, 0).Value - ActiveCell.Value)) + (ActiveCell.Value * (ActiveCell.Offset(0,
1).Value - ActiveCell.Offset(-1, 1).Value))

Debug.Print area1

area2 = (0.5 * (ActiveCell.Offset(0, 1).Value - ActiveCell.Offset(-1, 1).Value) *
(ActiveCell.Offset(-1, 26).Value - ActiveCell.Offset(0, 26).Value)) + (ActiveCell.Offset(0,
26).Value * (ActiveCell.Offset(0, 1).Value - ActiveCell.Offset(-1, 1).Value))

'Compute ecodeficit and ecosurplus

If area1 - area2 > 0 **Then**

def = area1 - area2

sur = 0

Else

sur = -1 * (area1 - area2)

def = 0

End If

'Sum variables

defsum(i) = defsum(i) + def

sursum(i) = sursum(i) + sur

area1sum(i) = area1sum(i) + area1

```

        ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    Else

        ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    End If

Loop

ActiveSheet.Range("C13").Select

ActiveCell.Offset(0, i * 2).Select

Next i

Sheets("Summary").Select

ActiveSheet.Range(cellvalue).Select

'Report results

For i = 1 To 12

    If area1sum(i) = 0 Then

        ActiveCell.Value = 0

        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = 0

    Else

        ActiveCell.Value = defsum(i) / area1sum(i)

        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = sursum(i) / area1sum(i)

    End If

    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

Next i

End Sub

```