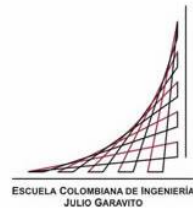


Maestría en Ingeniería Civil

**GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE
EMBALSES. CASO DE ESTUDIO EMBALSE LA COPA**

Jorge Andrés Sanabria Ayala

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019

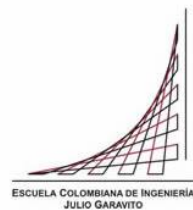


GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE EMBALSES. CASO DE ESTUDIO EMBALSE LA COPA

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos hidráulicos y medio ambiente

Germán Ricardo Santos Granados
Director

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019



La tesis de maestría titulada “GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DE EMBALSES. CASO DE ESTUDIO EMBALSE LA COPA”, presentada por Jorge Andrés Sanabria Ayala, 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

Jurado

Luis Felipe Sierra Ponguta

Codirector

Germán Eduardo Acero Riveros

Bogotá, D.C., 29 de enero de 2019

Dedicatoria

A la música, al arte, y a la forma en que transforman los días.

Agradecimientos

Si se escribieran los nombres de todas las personas a quienes debo agradecer, se desbordaría esta página de personajes increíbles; más es debido realizar algunas menciones, aún a costo de no precisar muchos nombres que lo merecen.

A todos los ingenieros que en calidad de profesores de la Escuela Colombiana de Ingeniería me brindaron la mano en un momento dado, ingenieros Germán Acero y Héctor Matamoros; o bien, que me acompañaron a lo largo del proceso, ingeniero Germán Santos, Felipe Sierra, Germán Acero, Héctor Matamoros.

A mis parceros de estudio y de trabajo, quienes aportaron todos sus conocimientos cada vez que les consulté. Al resto de mis parceros, quienes siempre creyeron en mí.

Y lo más importante, a mis papas, a mi hermana y a mi novia, que son los que realmente hicieron todo posible con su constante apoyo.

Resumen

Como aporte a la solución de la problemática asociada al agua, tanto en épocas de sequías como de crecientes súbitas en cuencas reguladas, se desarrolla en el siguiente trabajo una metodología por medio de la cual es posible estudiar mediante métodos cuantitativos la gestión y operación de los embalses.

Se plantea y ejemplifica, a través de un caso de estudio, un proceso que tiene como objetivo elaborar un modelo de simulación de embalses con la herramienta HEC-ResSim que permita mejorar la operación de un embalse dado a través de la determinación de una curva guía óptima; así como tomar decisiones a de operación partir de los resultados del mismo.

Para lograr este objetivo se realizan procesos complementarios, entre los cuales destacan la creación de un modelo hidrológico de simulación continua (utilizando la herramienta HEC-HMS y el método de pérdidas o abstracciones SMA) que tras su debida calibración brindará las series anuales de caudales diarios que ingresan al modelo de embalses; la creación de un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando (HEC-RAS 2D) que permitirá conocer las bondades de la regulación a través de las simulaciones de condiciones actual y con regulación óptima; y todos los procesos complementarios que se desprendan de estas labores.

El caso de estudio corresponde al embalse La Copa ubicado en el departamento Boyacá, entre las ciudades de Tunja y Paipa. El efluente de este embalse es conocido como río Tuta que posteriormente confluye con el río Jordán y forman el río Chicamocha, del cual se alimenta un distrito de riego del sector.

La determinación de la curva guía es un paso clave para la consecución de la operación óptima de un embalse, puesto que tanto en la actualidad como en el software HEC-ResSim las descargas que se realizan del embalse se realizan en función de la curva guía de cada embalse. En el estudio se proponen distintas metodologías para determinar la curva guía óptima del sistema y se comparan sus resultados; esto sin cerrar la puerta a metodologías alternas que puedan proporcionar un mejor acercamiento a la curva guía óptima.

Para la evaluación de la operación se desarrolló un número de curvas guía, entre las cuales se seleccionan 4; estas se ponen a prueba utilizando el modelo HEC-ResSim a través de la cuantificación de fallos en la descarga de volúmenes mínimos y máximos. Finalmente se seleccionó la curva guía que presenta menor cantidad de fallos y por tanto la que proporciona la mejor operación del sistema.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	2
2.1	ANTECEDENTES COLOMBIA	3
2.1.1	Ola Invernal 2011	3
3.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN	5
4.	GUÍA METODOLÓGICA	5
4.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	5
4.2	INFORMACIÓN NECESARIA BÁSICA.....	10
4.2.1	Información topográfica.....	11
4.2.2	Información Climatológica e hidrométrica.....	11
4.2.3	Información Hidráulica	12
4.2.4	Información de caracterización de los embalses	14
4.3	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	16
4.3.1	Análisis de lluvias máximas	17
4.3.2	Análisis de frecuencias (Caudales) a Nivel Mensual Multianual	27
4.3.3	Uso de la extensión HEC-GeoHMS	28
4.3.4	Uso del software HMS – modelo de eventos extremos.....	28
4.3.5	Uso del modelo de simulación continua, SMA (Soil Moisture Accounting).....	38
4.4	ANÁLISIS HIDRÁULICO	39
4.4.1	USO DEL SOFTWARE HEC-RAS 2D	40
4.4.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO (NIVEL-CAUDAL)	40
4.4.3	CALIBRACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE EN EL MODELO HIDROLÓGICO.....	41
4.5	ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES	43
4.5.1	Determinación de la curva guía de un embalse	43
4.5.2	Uso del software HEC-ResSim	48
4.5.3	Escenarios de simulación: Análisis para periodos hidrológicos húmedos y secos....	57
4.6	VERIFICACIÓN EN EL MODELO HIDRÁULICO 1D Y 2D	57
4.6.1	Verificación en el modelo hidráulico 2D	57
5.	CASO DE ESTUDIO	58
5.1	INFORMACIÓN NECESARIA BÁSICA.....	59
5.1.1	Información topográfica.....	59
5.1.2	Información Climatológica e hidrométrica.....	59

5.1.3	Información Hidráulica	62
5.1.4	Información Batimétrica – Embalses.....	64
5.1.5	Información de curvas de calibración	68
5.2	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	69
5.2.1	Análisis de lluvias máximas	69
5.2.2	Análisis de frecuencias (Caudales)	75
5.2.3	Uso de la extensión HEC-GeoHMS y construcción del modelo lluvia-escorrentía....	78
5.2.4	Uso del método de simulación continua SMA	80
5.2.5	Calibración del modelo SMA	84
5.2.6	Resultados SMA.....	84
5.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO	87
5.3.1	Uso del software HEC-RAS 2D	87
5.4	CALIBRACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE EN EL MODELO HIDROLÓGICO	90
5.4.1	Calibración por medio del modelo hidrodinámico 2D	90
5.5	ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES	94
5.5.1	Determinación de la curva guía de un embalse	94
5.5.2	Resumen de las curvas guía calculadas.....	111
5.5.3	Uso del software HEC-ResSim	112
5.6	VERIFICACIÓN EN EL MODELO HIDRÁULICO 2D	145
5.6.1	Verificación en el modelo hidráulico 2D	145
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
6.1	CONCLUSIONES ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	148
6.2	CONCLUSIONES ANÁLISIS HIDRÁULICO	149
6.3	CONCLUSIONES ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES.....	149
6.4	CONCLUSIONES DE VERIFICACIÓN HIDRÁULICA	151
7.	BIBLIOGRAFÍA	152

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 4-1. Configuración mínima para un modelo hidrológico de eventos extremos.....	30
Tabla 4-2. Modelos disponibles en HMS Para determinar las pérdidas	31
Tabla 4-3. Modelo disponible en HMS para calcular escorrentía directa	32
Tabla 4-4. Modelo disponible es HMS para cálculo de flujo base	32
Tabla 4-5. Modelo disponible en HMS para tránsito de crecientes en un cauce o canal	33
Tabla 4-6. Modelo disponible en HMS para distribución de la lluvia.....	35
Tabla 5-1 Estaciones meteorológicas consultadas.....	60
Tabla 5-2 Estaciones climatológicas en el caso de estudio	61
Tabla 5-3. Estaciones Limnigraficas en el caso de estudio.....	62
Tabla 5-4. Descargas controlada y no controlada par el embalse La Copa.....	68
Tabla 5-5 Precipitación Pmax 24h promedio multianual	70
Tabla 5-6 Parámetros R1 Curvas IDF Sintéticas.....	72
Tabla 5-7 Facto de reducción por área Promedio	73
Tabla 5-8 Selección del Tiempo de Concentración para La Copa 1.....	74
Tabla 5-9 Proyección de Caudales máximos	77
Tabla 5-10. Resumen de datos iniciales- parámetros SMA.....	82
Tabla 5-11 Valores iniciales de los Reservorios Lineales.....	82
Tabla 5-12. Tiempos de viaje y número de tramos recalculados.....	92
Tabla 5-13. Datos de curvas guía para diferentes garantías de suministro	94
Tabla 5-14. Curvas guía con diferentes garantías de suministro generadas con CEH-ECl	95
Tabla 5-15 Volúmenes de Déficit para el mes de enero.	96
Tabla 5-16. Volúmenes de déficit y niveles de reserva asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia	97
Tabla 5-17. Volúmenes de excesos y niveles de espera asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia	99
Tabla 5-18. Factor de temporalidad de los caudales de entrada para el embalse La Copa	102
Tabla 5-19. Series sintéticas máxima y mínima (Thomas & Fiering).....	104
Tabla 5-20 Volumen de Déficit para la serie seca más extrema.	104
Tabla 5-21 Volumen de Excesos para la serie húmeda más extrema.	105
Tabla 5-22. Caudales y volúmenes de afluencias al embalse para los años críticos.....	106
Tabla 5-23. Curvas Guía encontradas a través de las formulaciones de función objetivo empleadas	110
Tabla 5-24. Curvas Guía encontradas a través del método de Montecarlo implementado.....	111
Tabla 5-25. Tabla de resumen de curvas guía	111
Tabla 5-26. Resumen de reglas de operación	122
Tabla 5-27. Volúmenes de incumplimiento por exceso o déficit con la CG1 reserva/espera	132
Tabla 5-28. Escenarios conservados para el análisis y comparación de curvas guía	133
Tabla 5-29. Resumen de resultados de simulación para curvas guía - factores de ponderación 0.6 y 0.4.....	141
Tabla 5-30. Resumen de resultados de simulación para curvas guía - factores de ponderación 0.5 y 0.5.....	142
Tabla 5-31. Resultados de simulación de 5000 hidrologías con las curvas guía analizadas	143
Tabla 5-32. Curvas guía seleccionadas para la verificación hidráulica.....	144

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2-1 Inundaciones en las piscinas de enfriamiento de Termopaipa - Gensa.....	4
Figura 2-2 Inundación del río Jordán a su paso por el municipio de Tunja para el año 2011.....	4
Figura 4-1. Flujograma principal de la guía metodológica para la gestión de embalses	6
Figura 4-2. Flujograma para la creación de la base para la modelación hidrológica en HEC-HMS.....	7
Figura 4-3. Flujograma para el análisis hidrológico del sistema	8
Figura 4-4. Flujograma para el análisis hidráulico del sistema.....	9
Figura 4-5. Flujograma para el análisis de gestión de embalses del sistema.....	9
Figura 4-6. Flujograma para la verificación hidráulica	10
Figura 4-7. Tabla y gráficas de volumen (m ³) y Area (ha) vs elevación (m).....	14
Figura 4-8. Volumen, área y elevación en un embalse. Arriba: vista perfil, abajo: vista en planta. .	15
Figura 4-9 Espacialización de la lluvia por el método de la media aritmética. Fuente: Ven Te Chow, 1994.Hidrología Aplicada	21
Figura 4-10 Espacialización de la lluvia por el método de los polígonos de Thiessen. Fuente: Ven Te Chow,1994 Hidrología Aplicada	22
Figura 4-11 Espacialización de la lluvia por el método de Isoyetas. Fuente: Ven Te Chow, 1994. Hidrología Aplicada.	22
Figura 4-12. Procesos para la transformación de la lluvia en escorrentía. Fuente: Hydrologic Modeling System HEC-HMS-User's Manual. US Army Corps of Engineers. 2016.....	30
Figura 4-13. Método de Muskingum para tránsito de crecientes. Fuente: Hidrología aplicada - Ven Te Chow.....	34
Figura 4-14. Región de combinación de parámetros utilizable en el modelo Muskingum. Fuente HMS Technical Reference Manual - USACE	35
Figura 4-15. Hidrograma de Respuesta.....	37
Figura 4-16 Efecto de los tiempos de viaje para la superposición de hidrogramas.....	42
Figura 4-17. Curvas elevación-almacenamiento y elevación-área.....	51
Figura 4-18. Zonas de operación de un embalse	52
Figura 4-19. Gráfica Plot Operations para un embalse modelado.....	54
Figura 4-20. Parte superior de la gráfica Plot Operations.....	54
Figura 4-21. Parte inferior de la gráfica Plot Opertions	55
Figura 4-22. Tabla Release decision report generada para un sitio de embalse	56
Figura 4-23. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 15 abril 2011	58
Figura 5-1 Ubicación Espacial de Estaciones Pluviométricas.	60
Figura 5-2 Ubicación Espacial de Estaciones Climatológicas.	61
Figura 5-3 Ubicación Espacial de Estaciones Hidrométricas.	62
Figura 5-4. Afluente al río Tuta, condición de frontera para entrada de hidrograma	63
Figura 5-5. Mapa de coberturas vegetales sobre el dominio computacional del modelo 2D	64
Figura 5-6 TIN Embalse La Copa.	65
Figura 5-7 TIN Embalse La Playa.....	65
Figura 5-8 Atributos de Elevación.	66
Figura 5-9 Curva de almacenamiento Embalse La Copa.	66
Figura 5-10 Curva de almacenamiento Embalse La Playa.....	67
Figura 5-11. Curva Elevación – Área Embalse La Copa.....	67

Figura 5-12. Curva Elevación – Área Embalse La Playa	68
Figura 5-13 Interpolación de valores de lluvia mediante el método de kriging en la plataforma ArcGIS	71
Figura 5-14 Interpolación de valores de lluvia mediante el método de IDW en la plataforma ArcGIS	71
Figura 5-15 Incremento Arreglado de Precipitaciones estación La Copa 1.	73
Figura 5-16 Hietograma de Diseño para la subcuenca La Copa 1	75
Figura 5-17 Proyecciones de caudales máximos.....	76
Figura 5-18 Proyecciones de caudales máximos para la estación LA COPA.	77
Figura 5-19 Modelo Digital de Terreno para la generación del modelo hidrológico.....	79
Figura 5-20 Ráster de Dirección de Flujo.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5-21 Shape de Definición de Cauces.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5-22 Tabla de Propiedades de los Cauces.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5-23 Selección de Metodologías para los procesos hidrológicos.¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5-24. Modelo hidrológico lluvia –escorrentía base.....	80
Figura 5-25. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación San Francisco.....	85
Figura 5-26. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación El Palo.....	85
Figura 5-27. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación La Reforma	86
Figura 5-28. Condición de niveles máximos inmediaciones de la ubicación de La Copa (escenario sin embalse).....	87
Figura 5-29. Condición de niveles máximos inmediaciones de la confluencia Tuta-Jordán (escenario sin embalse)	88
Figura 5-30. Mancha de inundación para el 10 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse).....	89
Figura 5-31. Mancha de inundación para el 15 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse).....	89
Figura 5-32. Mancha de inundación para el 21 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse).....	90
Figura 5-33. Hidrograma proveniente de las cuencas aportantes al río Tuta en la ubicación del embalse La Copa	90
Figura 5-34. Ubicación de las confluencias a través del modelo de terreno	91
Figura 5-35. Hidrogramas de inicio y fin del tramo RTuta3	92
Figura 5-36 Curva de Duración de volúmenes déficit para el mes de enero.	97
Figura 5-37 Curva de Duración caudales para el mes de Abril.....	98
Figura 5-38 Curva Guía para una probabilidad de ocurrencia del 5%.....	100
Figura 5-39 Curva Guía para un probabilidad de ocurrencia del 10%	100
Figura 5-40 Curva Guía para un probabilidad de ocurrencia del 15%	101
Figura 5-41. Curva guía por el método de volúmenes de reserva y espera – Prob. Excedencia 5%	101
Figura 5-42. Curva guía Vols Reserva/Espera – factor temporalidad	103
Figura 5-43 Curva Guía para las series sintéticas más extremas 5% de excedencia.....	106
Figura 5-44. Esquema de decisiones No 1 – determinación de curva guía.....	108
Figura 5-45. Esquema de decisiones No 2 – determinación de curva guía.....	109

Figura 5-46. Esquema de decisiones No 3 – determinación de curva guía.....	110
Figura 5-47. Gráfica resumen de curvas guía.....	112
Figura 5-48. Visualización de los mapas base en la ventana principal de HEC-ResSim	114
Figura 5-49. Alimentación de las series de tiempo a través de un archivo DSS.....	115
Figura 5-50. Asignación de parámetros del método de tránsito de crecientes.....	115
Figura 5-51. Asignación de la curva Elevación-Almacenamiento-Área del embalse	116
Figura 5-52. Resumen de las salidas (controladas y no controladas) en la presa del embalse	117
Figura 5-53. Gráfica de las zonas de operación definidas para el caso de estudio.....	118
Figura 5-54. Creación de la regla para el control del caudal aguas abajo.....	119
Figura 5-55. Definición de la regla de operación para una descarga máxima de 30 m3s en el punto J310	119
Figura 5-56. Cambio en la operación del embalse inducido por la nueva regla de operación	120
Figura 5-57. Hidrogramas de entradas y salida en un punto aguas abajo del embalse	120
Figura 5-58. Prioridad entre las reglas de operación	121
Figura 5-59. Descargas del embalse La Copa sin la regla de operación de control de caudal aguas abajo.....	121
Figura 5-60. Descargas del embalse La Copa contemplando la regla de operación de control de caudal aguas abajo.....	122
Figura 5-61. Detalle de la gráfica de operación del mes de abril de 2011 - HECResSim.....	133
Figura 5-62. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario 2011.....	135
Figura 5-63. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario SSMa2	136
Figura 5-64. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario SSMi2.....	136
Figura 5-65. Gráfica de resultados – Escenario 2011 – CG2: CEH-ECI.....	137
Figura 5-66. Gráfica de resultados – Escenario SSMa2 – CG2: CEH-ECI.....	138
Figura 5-67. Gráfica de resultados – Escenario SSMi2 – CG2: CEH-ECI.....	138
Figura 5-68. Gráfica de resultados – Escenario 2011 – CG4: Optimización	139
Figura 5-69. Gráfica de resultados – Escenario SSMa2 – CG4: Optimización	140
Figura 5-70. Gráfica de resultados – Escenario SSMi2 – CG4: Optimización	141
Figura 5-71. Gráfica de las curvas guía seleccionadas para la verificación hidráulica	144
Figura 5-72. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 15 abril 2011	145
Figura 5-73. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG4 – 15 abril 2011	146
Figura 5-74. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 21 abril 2011	146
Figura 5-75. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG4 – 21 abril 2011	147
Figura 5-76. Mancha de inundación con la regla de operación de control aguas abajo – CG1 – Escenario 2011	147

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son parte fundamental en el desarrollo de las ciudades y poblaciones, puesto que su aprovechamiento genera un bienestar y calidad de vida en los habitantes que las conforman. Sin embargo, hay situaciones en que las fuentes y recursos hídricos en vez de representar una oportunidad por aprovechar, se convierten en una amenaza misma, contra la vida y el bienestar, debido a las inundaciones y desbordamientos de cauces o cuerpos de agua que circundan poblaciones aledañas (Sierra, 2015).

Con el objetivo de prevenir los efectos adversos y optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, el ser humano ha estudiado el régimen hidrológico y ha conseguido avances importantes en su uso, aprovechamiento y control.

En cuanto al aprovechamiento se encuentran aplicaciones en labores tales como diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión y control de sedimentos, control de la salinidad, disminución de la contaminación, uso recreacional del agua y protección de la vida terrestres y acuática (Chow, 1988).

Por su parte, los efectos adversos contemplan desbordamientos de ríos, inundaciones a comunidades, ciudades y centros poblados junto con los desastres que provocan a su paso; fenómenos de avalancha asociados a la saturación del suelo y roturas de presas, entre otros.

DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento presenta una guía metodológica con la cual se pueda evaluar la gestión de embalses desde una aproximación por medio de modelos hidrológicos, hidráulicos y de regulación de caudales. Los capítulos del presente documento se distribuyen así:

Capítulo 1: introducción y distribución del documento

Capítulo 2: descripción de la problemática, se describe la razón del estudio enfocado a mejorar la gestión de embalses.

Capítulo 3: Propuesta de solución, se introduce la guía metodológica para dar a los estudios de gestión de embalses una aproximación matemática.

Capítulo 4: se realiza la descripción de los procesos de la guía metodológica; sin embargo, la ejecución de estos procesos para el caso de estudio se realiza en el capítulo 5.

Capítulo 4.1: se realiza una descripción de la guía metodológica en relación a los procesos que se ven a considerar y estudiar dentro de la gestión de embalse, y la relación entre ellos.

Capítulo 4.2: se realiza una descripción de la información base que se requiere como insumo para llevar a cabo los estudios y procesos contemplados por la guía metodológica. Se enfatiza en la calidad de la información y los modos disponibles para su obtención.

Capítulo 4.3: comprende los procesos de análisis hidrológico, allí se explican los procesos para la creación de un modelo hidrológico de eventos y uno de simulación continua (SMA). Para el modelo de eventos simples se describe la generación de lluvias sintéticas; la consecución de los parámetros

para la simulación de abstracciones, transformación y tránsito de hidrogramas; y la calibración de los caudales generados con los caudales pico obtenidos por medio de análisis de frecuencia. Para el modelo de simulación continua, se describen los procesos que este tiene en cuenta de manera adicional al modelo de eventos (evapotranspiración y flujo base) y la descripción y obtención de los parámetros propios del método de pérdidas SMA (Soil Moisture Accounting). Finalmente se obtienen los hidrogramas anuales que serán insumo para la regulación en el capítulo de gestión de embalses.

Capítulo 4.4: comprende los procesos para el análisis hidráulico, allí se hace énfasis en la construcción de un modelo bidimensional (2D) para conocer las bondades de la regulación de caudales por medio de la comparación de resultados de las situaciones con y sin regulación de caudales por medio de los embalses en épocas de crecientes.

Capítulo 4.5: comprende los procesos para el análisis de la gestión de embalses; se dan algunas recomendaciones para la determinación de una curva guía del embalse, y se realiza la simulación en el software HEC-ResSim para comprobar las bondades de estas curvas guía bajo diferentes escenarios de simulación (periodos hidrológicos secos y húmedos).

Capítulo 4.6: se realiza la simulación hidráulica (2D) de la situación regulada basada en los resultados del análisis de gestión de embalses. Consiste en una verificación de la regulación obtenida.

Capítulo 5: el capítulo 5 contiene las mismas subdivisiones que el capítulo 4, y consiste en la ejecución de los procesos descritos en el capítulo 4 aplicados al caso de estudio particular del presente documento.

Capítulo 6: conclusiones y recomendaciones, se enfatizan los hallazgos realizados y se realiza una retroalimentación para futuros trabajos y aplicaciones del presente documento.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Una de las problemáticas específicas que gira en torno al control y el aprovechamiento del agua es el manejo del recurso en cuencas reguladas.

Las cuencas reguladas son aquellas en las cuales dentro de su área contienen proyectos de represamiento de agua (presas y embalses); estas estructuras se construyen para atender propósitos de control y aprovechamiento del agua, entre los cuales uno de los más importantes es el control de inundaciones.

Sin embargo, este no es el único uso que se le da a estas estructuras de almacenamiento y represamiento de agua; ya que existen proyectos de represamiento que satisfacen varias necesidades del ser humano conocidos como proyectos de represamiento multipropósito, entre los propósitos más comunes para las cuales se construyen embalses están: la generación de energía hidráulica, la irrigación, abastecimiento de agua a poblaciones, el suministro industrial, el control de salinidad, la recreación, control de la calidad de agua, suministro en sequías y la preservación del medio ambiente. Así, para el caso colombiano, desde la construcción de los primeros embalses, su operación se ha realizado para atender uno o varios de los fines mencionados.

Algunos de los efectos adversos que presenta el recurso hídrico para el ser humano, son generados a causa de la transformación del medio natural que el ser humano ocasiona de manera paralela al

desarrollo de su población. Dicha transformación se genera cuando se realizan cambios sobre el medio natural tales como deforestación, cambio en las coberturas vegetales (urbanización, agricultura) captaciones de agua en cuerpos naturales, represamiento de agua en cauces naturales, detrimento de la calidad de agua de una corriente y vertimientos de contaminantes.

De las transformaciones del medio natural anteriormente mencionadas, la construcción de estructuras para el represamiento de agua comprende una serie de beneficios; como también genera riesgos ante la sociedad. Entre los propósitos de estas estructuras, el control de los efectos de las crecientes siempre se considera en su operación; sin embargo, la falta de reglas de operación concretas ha desencadenado efectos adversos y grandes pérdidas tanto materiales como inmateriales en diferentes sectores en épocas de temporada invernal.

Los efectos adversos derivados de la construcción de una estructura de represamiento de agua son, en general, generados por una mala operación de las estructuras de descarga, o de eventos de rotura de presas. En general las consecuencias de los motivos expuestos son inundaciones súbitas de gran magnitud en periodos húmedos o falta de capacidad de mantener el suministro y el caudal ecológico en las temporadas secas.

2.1 ANTECEDENTES COLOMBIA

2.1.1 Ola Invernal 2011

Dentro de la variabilidad climática se encuentra la ocurrencia de fenómenos naturales, los cuales corresponden al fenómeno del niño caracterizado de una manera general por un déficit de precipitaciones, y por otro lado se encuentra el fenómeno de la niña el cual corresponde a una época generalmente caracterizada por incrementos en la magnitud de las lluvias en gran parte del territorio nacional. Cada evento de los fenómenos mencionados puede variar en intensidad y así mismo en sus consecuencias sobre el territorio. La ola invernal ocurrida en el trimestre Noviembre, Diciembre de 2010 y Enero de 2011 y en los meses abril y mayo de 2011 obedece a un fenómeno de la niña fuera de lo normal como lo menciona el Banco Interamericano de Desarrollo-BID en su documento de *Valoración de daños y pérdidas Ola invernal en Colombia 2010-2011* "Desde Abril de 2010 ocurrieron niveles de precipitación generalizados muy por encima de los promedios históricos, en particular en julio, noviembre y diciembre de 2010, y marzo y mayo de 2011. Esta anomalía se reflejó en el exceso de precipitación observada en las principales ciudades del país, en particular en los meses de noviembre y diciembre de 2010 y abril y mayo de 2011" (DNP-BID-Cepal, 2012). Esta situación provocó grandes emergencias a lo largo del territorio nacional. Una de estas zonas afectadas por este inusual fenómeno de la niña corresponde al departamento de Boyacá, en donde ciudades como Tunja y Paipa se vieron afectadas por importantes inundaciones. En la Figura 2-1 se puede observar los resultados de estas precipitaciones en cercanías a Paipa donde se observa claramente un desbordamiento del río Chicamocha y en la Figura 2-2 se evidencia el mismo fenómeno de desbordamiento pero esta vez del río Jordán a la altura de la ciudad de Tunja.



Figura 2-1 Inundaciones en las piscinas de enfriamiento de Termopaipa - Gensa



Figura 2-2 Inundación del río Jordán a su paso por el municipio de Tunja para el año 2011

Parte de la responsabilidad de las inundaciones evidenciadas en esta zona se debe a la mala operación de las estructuras de represamiento que con una operación distinta podrían haber

amortiguado los caudales pico de las crecientes presentadas, de manera que se liberaran caudales regulados que mitigaran las inundaciones presentadas en los periodos húmedos del año 2011 y 2012. El embalse La Copa, como se explicará en la presentación del caso de estudio (numeral 5) se encuentra actualmente operado por el distrito de riego USOCHICAMOCHA; sin embargo, es necesario desarrollar un marco de operación que permita a los operarios de este embalse optimizar las descargas controladas realizadas desde el embalse minimizando los procesos de inundación o desabastecimiento que puedan ocasionarse debido a la presencia de hidrologías extremas.

3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Ante la problemática descrita en la descripción del problema a propósito de la operación de embalses. El autor propone la creación de una guía metodológica en la cual se aborde el problema de la operación de embalses desde un enfoque objetivo y basado en la modelación numérica.

Esta propuesta de solución permitiría a quienes la consulten o utilicen un conocimiento amplio acerca de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos que tienen lugar en el área aferente de estudio de cada proyecto en el que se utilice la guía, y en los cuerpos de almacenamiento mismos.

Es importante aclarar que el estudio que se va a llevar a cabo en este documento, siguiendo la metodología propuesta, no contempla los aspectos ambientales y/o sociales que puedan también tener incidencia en el estudio; es decir, que los procedimientos, al igual que el flujo de decisiones que se llevan a cabo a través de la metodología presentada se basa únicamente en criterios hidrológicos, hidráulicos y de los propósitos que tenga cada embalse o red de embalses en particular.

4. GUÍA METODOLÓGICA

La guía metodológica que se desarrolla en el presente documento está basada en la modelación numérica; por esta razón se acuden a diferentes modelos matemáticos hidráulicos e hidrológicos que representan los procesos del ciclo hidrológico para el área de estudio de los proyectos que se suscriban a los lineamientos expuestos en la guía. De esta manera, los resultados que se obtengan a partir de la guía serán concisos y concretos, y su nivel de precisión y exactitud dependerán de la calidad de la información base para la alimentación de los distintos modelos matemáticos.

La guía propuesta no tiene como finalidad reemplazar el conocimiento y saber hacer de aquellos que se apoyen en ésta, sino presentar un flujo de operaciones y actividades, así como las herramientas computacionales necesarias para el estudio y análisis de los elementos de la cuenca y los procesos del ciclo hidrológico con el fin de poseer un entendimiento de estos y tener una base fuerte y fundamentada para la toma de decisiones.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La guía comprende los procesos del ciclo hidrológico desde la precipitación de la lluvia hasta la operación que se requiere en cada uno de los embalses que contenga un área de estudio. Los procesos que se estudien fundamentarán su estudio y desarrollo en la información de campo que se obtenga.

Los procesos que se estudian en la presente guía comprenden la distribución de la lluvia, la interceptación de la lluvia en las plantas, el almacenamiento de la misma en las depresiones del

terreno, la infiltración del agua en el suelo, los flujos intermedios, la percolación, el almacenamiento del agua en acuíferos, la producción de flujo base, la escorrentía superficial, el tránsito de crecientes, la evaporación y transpiración, y la regulación de caudales debido a estructuras de almacenamiento (embalses).

De acuerdo a lo anterior, el primer proceso que se contempla en el estudio apoyado en la guía metodológica es la distribución de la lluvia sobre el área de estudio. Esto se debe a que los procesos contemplados están soportados por información recolectada en campo o información secundaria; la información de campo es transformada en las variables que intervienen a lo largo del ciclo hidrológico. Esta transformación se realiza por medio de leyes físicas, métodos y funciones que permiten la descripción de los procesos del ciclo hidrológico y de la caracterización hidráulica en cuerpos de agua.

Flujo de procedimientos, orden lógico y conexión entre ellos

A continuación, se muestra el esquema principal de los procedimientos contemplados en la guía metodológica mostrando a su vez los productos principales que se obtienen de ellos.

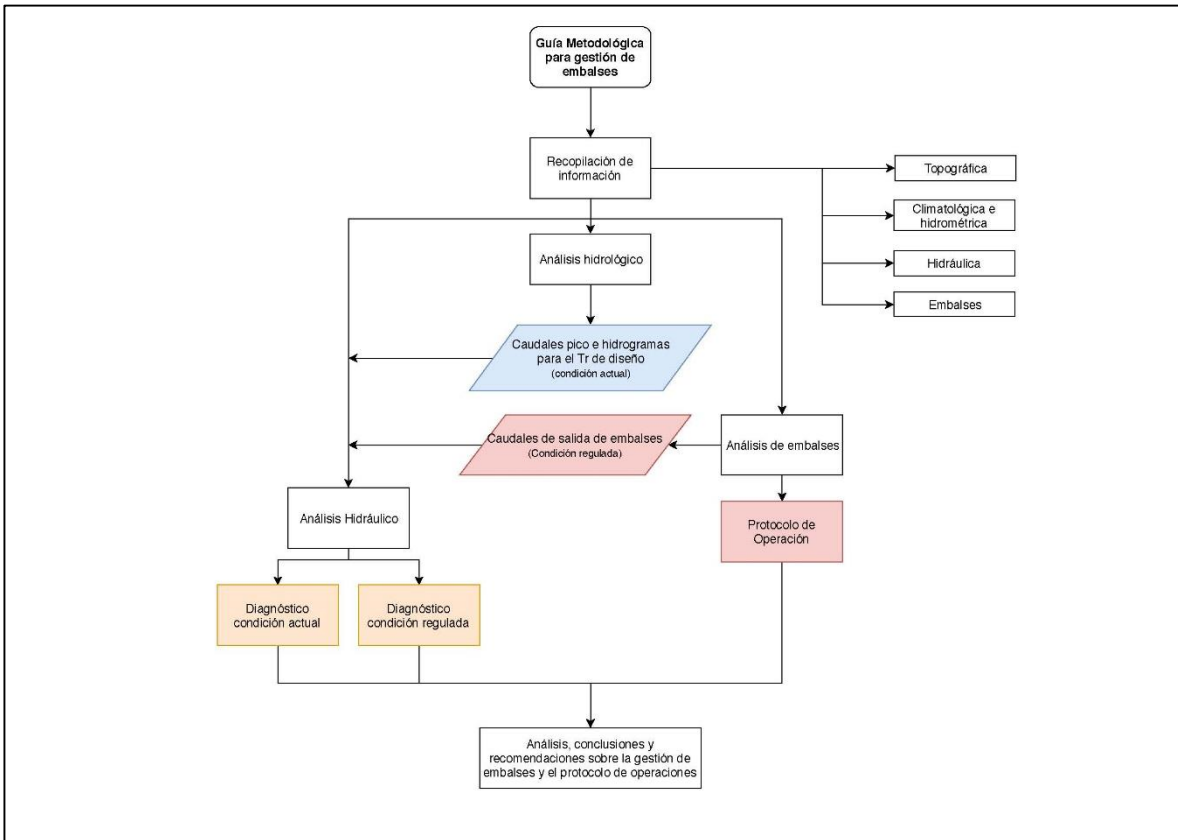


Figura 4-1. Flujograma principal de la guía metodológica para la gestión de embalses

En el esquema mostrado, los procedimientos de análisis hidrológico, hidráulico y de embalses comprenden una gran cantidad de procedimientos, razón por la cual se han generado esquemas que resuman este proceso de análisis para sintetizar los procedimientos que se detallan en la guía.

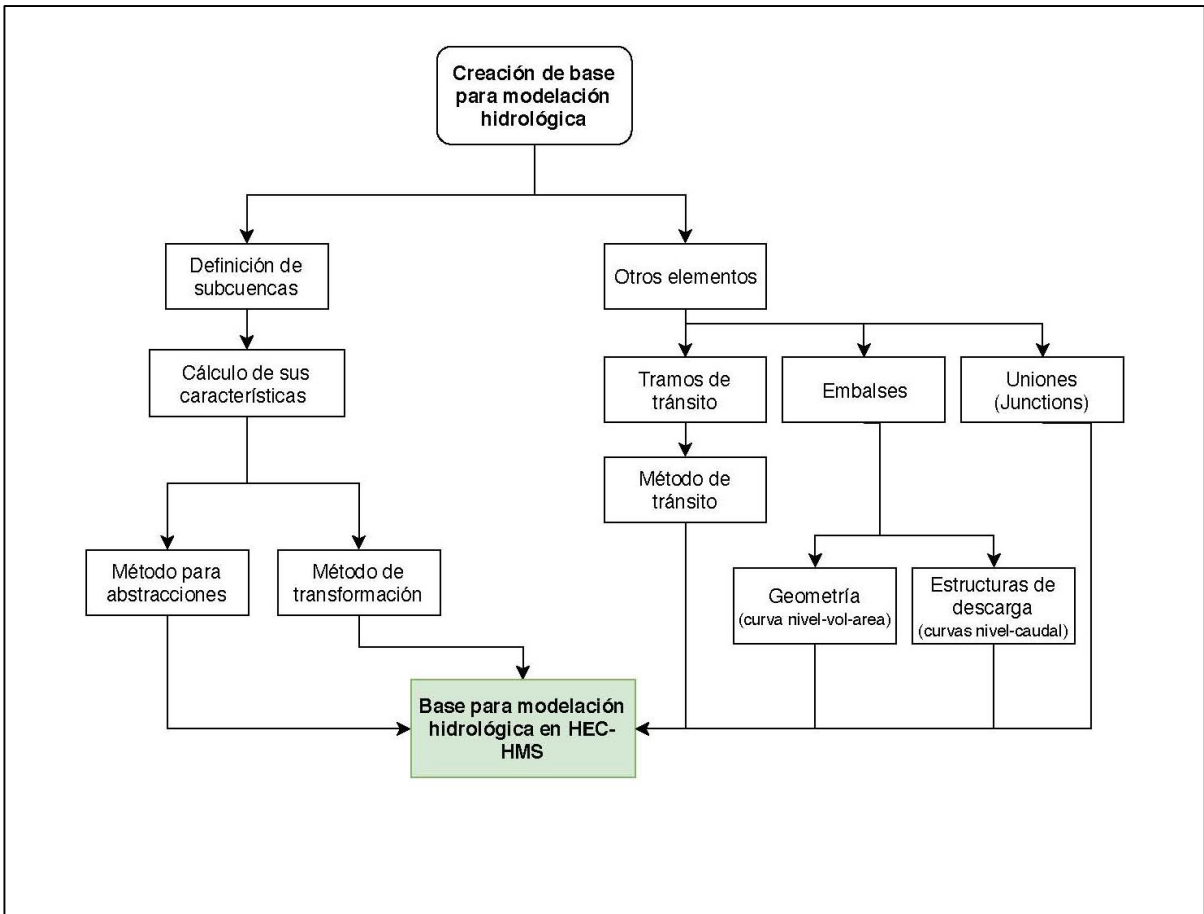


Figura 4-2. Flujograma para la creación de la base para la modelación hidrológica en HEC-HMS

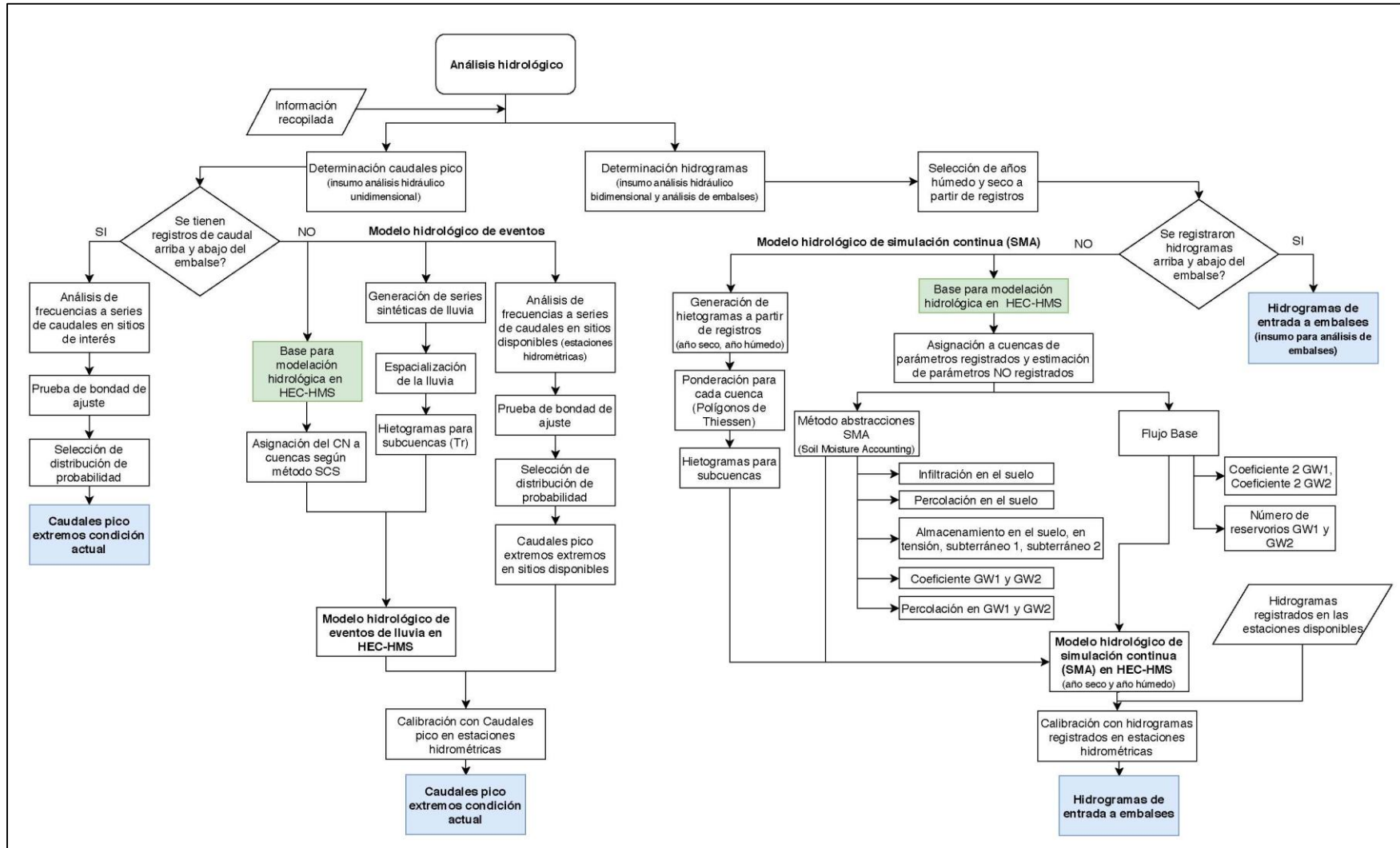


Figura 4-3. Flujograma para el análisis hidrológico del sistema

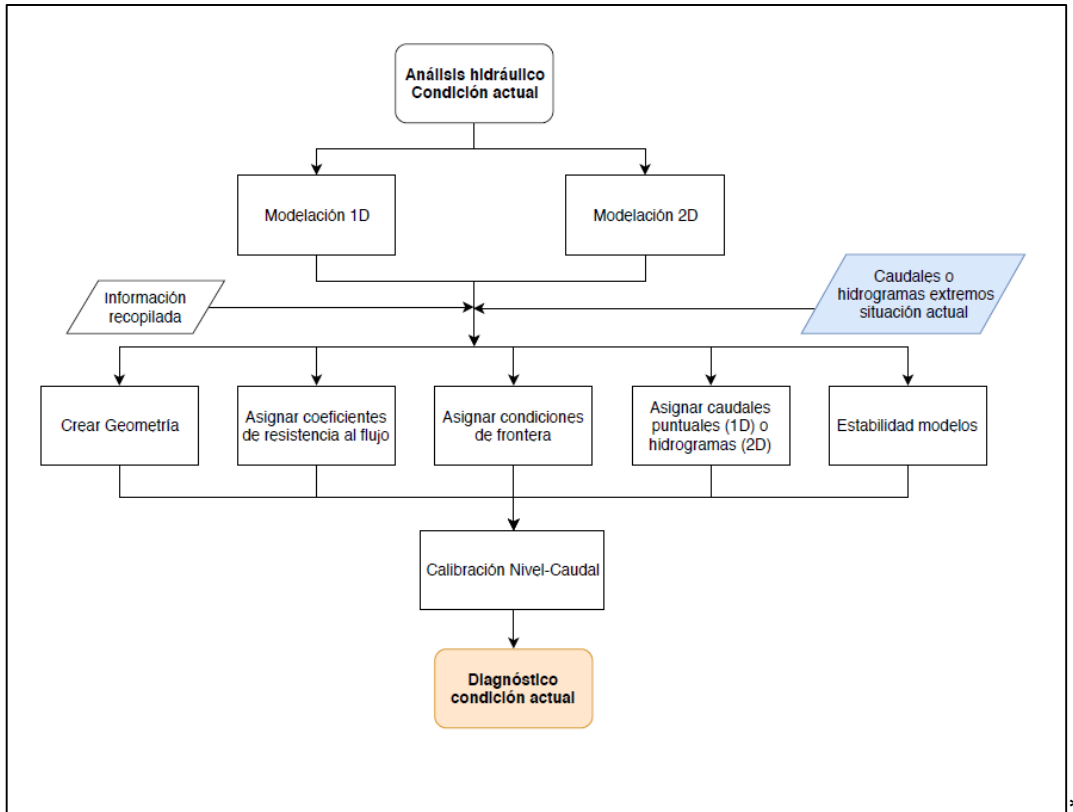


Figura 4-4. Flujograma para el análisis hidráulico del sistema

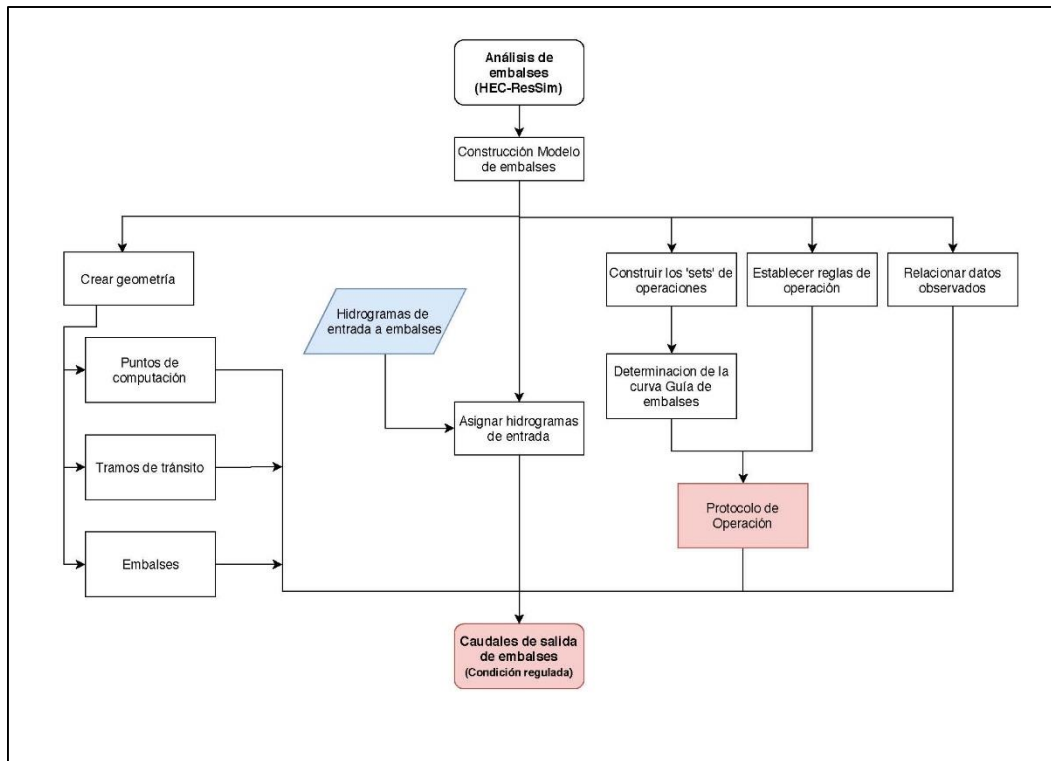


Figura 4-5. Flujograma para el análisis de gestión de embalses del sistema

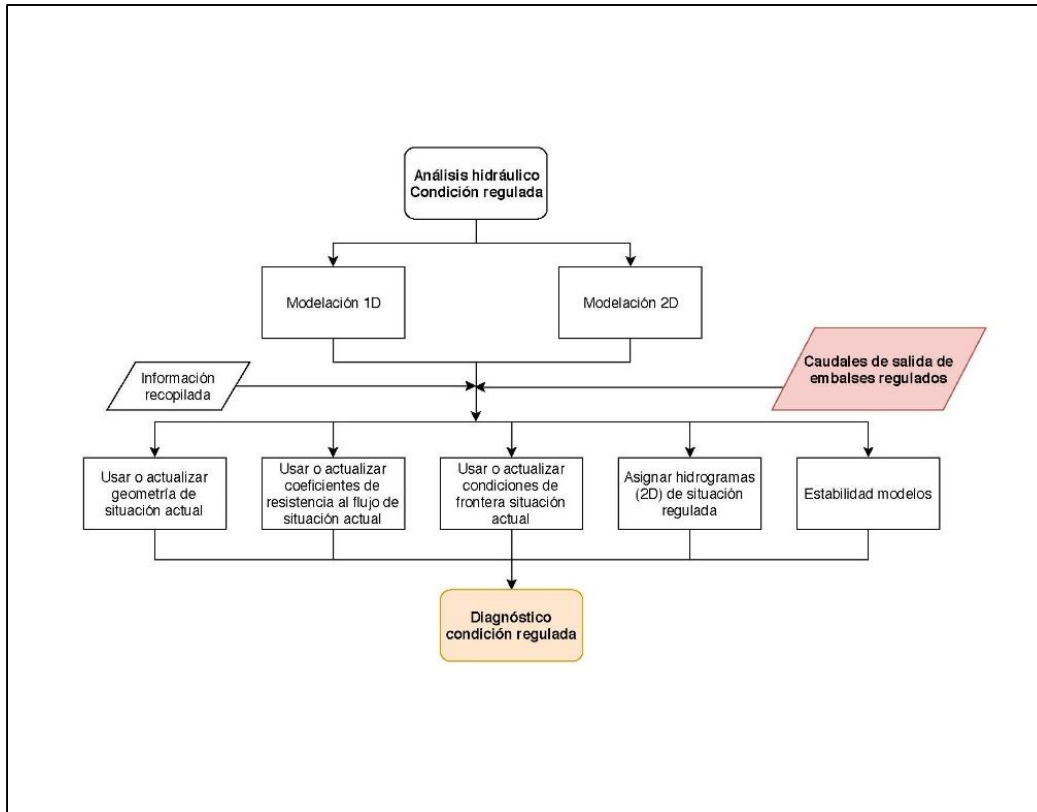


Figura 4-6. Flujo para la verificación hidráulica

4.2 INFORMACIÓN NECESARIA BÁSICA

Los procedimientos que se llevan a cabo en el estudio de una cuenca actualmente regulada o a regularse como condición de diseño, son procedimientos encaminados a describir matemáticamente la condición del ciclo hidrológico en el área de estudio.

Una descripción matemática de los procesos hidrológicos e hidráulicos se refiere a la simulación de los procesos que suceden en las cuencas a través de fórmulas o métodos numéricos que, dadas unas condiciones de partida como datos de entrada, procesen esta información a fin de generar resultados iguales muy semejantes a los que se observan en la naturaleza para las mismas condiciones dadas. Para que este propósito sea posible, toda la información que se use para la generación de las variables que intervienen en los métodos matemáticos, debe tener la mejor calidad de manera que los resultados, deducciones y decisiones que se desprendan de ellas tengan validez y aceptación.

Para obtener la mejor calidad en la información base es altamente recomendable tomar información de campo en lugar de obtenerla de referencias bibliográficas siempre que sea posible. Así mismo, la información tomada debe ser de calidad y los registros deben ser suficientes para considerarlos válidos; estos requisitos se ampliarán en la descripción de cada subclase de información básica necesaria.

4.2.1 Información topográfica

En estudios y modelaciones hidráulicas la topografía se convierte en un elemento estratégico para obtener resultados precisos y confiables ya que su objetivo consiste en representar de una manera espacial la superficie terrestre con sus detalles naturales y artificiales. A lo largo de los años se han presentado desarrollos, mejoras y avances que han generado un impacto en cómo esta actividad se lleva a cabo, estos avances incluyen técnicas y equipos para la recolección de datos y posicionamiento mucho más completos, generando la posibilidad de tener unos resultados que se ajustan de una manera más fiel a la información de la superficie.

La importancia de la información topográfica en la guía se debe a que ésta define las condiciones morfológicas del terreno sobre el cual se llevan a cabo los procesos del ciclo hidrológico desde el momento en que ocurre la precipitación hasta que la escorrentía superficial ingresa al embalse. De esta manera los procesos tanto hidrológicos como hidráulicos que ocurren en la cuenca están determinados por la información topográfica que la caracteriza. Los cálculos realizados se apoyan en la topografía bien sea tomando la información física y geométrica para caracterizar el proceso lluvia-escorrentía en las cuencas, o utilizando la información del terreno para realizar el tránsito de los caudales y para determinar las condiciones de inundabilidad de las riberas de los cauces.

De acuerdo al IDEAM (2013) es recomendable que se realice un levantamiento topográfico de la zona dependiendo del objetivo que se busque, ya sea para modelación de un evento extremo o para la construcción de alguna obra. En general se define que para cuerpos de agua grandes como embalses y lagos el espaciamiento entre los perfiles levantados debe ser de 250 m, para cuerpos de aguas menores la distancia entre secciones corresponde a 100 m. Por otro lado, para aquellos ríos principales de primer orden se deben establecer espaciamientos de 250 m entre secciones y si el tramo presenta curvas pronunciadas este valor debe ser de unos 150 m. Finalmente para ríos secundarios, canales y quebradas la distancia entre secciones debe ser del orden de 150m. Por su parte, el INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 2009) recomienda que el espaciamiento entre secciones para ríos sea igual a una vez el ancho de la sección, tomando adicionalmente secciones en donde existan cambios importantes en planta, perfil o sección transversal. En conclusión, estos levantamientos deben contar con una buena densidad de puntos que permitan caracterizar el terreno de una manera confiable, de modo que se muestren los aspectos de los cuerpos de agua que definen la capacidad de los mismos, y que sirvan para la construcción de los modelos digitales de terreno.

Diferentes métodos por medio de los cuales se puede obtener la información topográfica se presentan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

4.2.2 Información Climatológica e hidrométrica

La información climatológica hace referencia a los registros disponibles de lluvias y caudales principalmente. Estos registros son en general obtenidos de pluviómetros, pluviógrafos, limnímetros y limnógrafos instalados en las diferentes estaciones de medición.

Los tipos de estaciones disponibles sobre el territorio colombiano se clasifican en meteorológicas, hidrológicas e hidrometeorológicas. Entre las meteorológicas se encuentran:

- CO: climatológica ordinaria.
- CP: climatológica principal.
- PM: pluviométrica.
- PG: pluviográfica.
- SP: sinóptica principal.
- SS: sinóptica secundaria.
- AM: agrometeorológica.
- ME: meteorológica especial.

Por su parte las categorías de las estaciones hidrológicas son limnigráfica, limnimétrica y meteorológica marina. Las categorías de las estaciones hidrometeorológicas son limnigráfica, limnimétrica, meteorológica especial y meteorológica marina (IDEAM).

De las estaciones meteorológicas se obtienen en general los asociados a lluvia y evaporación; de las hidrológicas se obtienen aquellos asociados a caudales y niveles en cuerpos de agua; por último, a partir de las estaciones hidrometeorológicas es posible obtener los parámetros asociados a las dos categorías de estaciones ya mencionadas.

La información climatológica está compuesta generalmente por series de registros que se han venido obteniendo desde la instalación de cada estación de medición. Por lo cual cada estación tiene un periodo de registros distinto. Se recomienda que la utilización de esta información comprenda periodos de registro amplios, esto con el fin de no realizar una estimación muy baja o muy alta de una variable (caudal, intensidad de lluvia, etc) debido a la poca representatividad de registros correspondientes a un periodo de tiempo muy corto. Un periodo de tiempo considerado suficientemente amplio puede establecerse de acuerdo con la organización Mundial de Meteorología (2006) la cual sugiere que un periodo mínimo de 30 años de registros se considera aceptable para identificar cambios seculares del clima y así mismo obtener estadísticas confiables.

4.2.3 Información Hidráulica

La información hidráulica hace referencia a las variables necesarias para conocer el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua inmerso en el área de estudio. Las variables que intervienen en dicha caracterización son principalmente:

- las condiciones geométricas (características topográficas y de las estructuras hidráulicas que modifican o restringen la forma del cauce)
- los caudales pico o hidrogramas que ingresan por los afluentes de la cuenca y de manera difusa
- las condiciones de resistencia al flujo que se presentan a lo largo de los cuerpos de agua, y
- las condiciones de contorno las cuales sirven como condiciones de partida para determinar las variables hidráulicas en toda la zona.

En relación con estas variables, aquellas relacionadas con la climatología y la caracterización del terreno a partir de los levantamientos topográficos por medio de las técnicas disponibles, ya fueron descritas en los numerales 4.2.2 Información Climatológica y 4.2.1 Información topográfica.

4.2.3.1 Condiciones de resistencia al flujo

En cuanto a la información correspondiente a la resistencia al flujo, esta depende principalmente del tipo de cobertura vegetal sobre la cual se lleva a cabo el tránsito de los caudales y de un número de factores que dificultan el escurrimiento de agua superficial sobre el cauce y sobre las planicies de inundación.

Como menciona Akan (2006) la resistencia al flujo puede ser explicada en términos de dos fuerzas, denominadas fuerza de fricción interna y fuerza de fricción externa. Las fuerzas de fricción externa se encuentran en la superficie del canal del cauce y están incluidas en la ecuación de momento. Por otro lado, las fuerzas de fricción interna ocurren debido al gradiente de velocidad dentro de una sección transversal. Es más conveniente y tradicional explicar la resistencia al flujo en términos de la fricción de borde.

En la práctica del estudio de la hidráulica de ríos, existen dos ecuaciones de resistencia al flujo más conocidas y ampliamente utilizadas, estas corresponden a las ecuaciones de Chézy y de Manning, siendo esta última la de mayor aplicación. Adicionalmente la ecuación de Darcy Weisbach puede aplicarse a canales abiertos. Una breve descripción de cada una de estas ecuaciones se realiza en el ANEXO B ECUACIONES Y MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA AL FLUJO.

4.2.3.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son valores numéricos que se especifican en los contornos del dominio para completar matemáticamente el problema y que deben ser consistentes con el comportamiento físico que se desea modelar. Dentro de las condiciones de entrada-frontera más usuales que se pueden encontrar para modelamiento hidráulico 1D se encuentran: La profundidad crítica y la profundidad normal. Por otro lado, para un modelamiento 2D las condiciones de frontera más usuales son hidrogramas, profundidad normal y curvas de calibración (U.S Army Corps of Engineers, 2016).

Tanto para el modelo hidráulico 1D como 2D se disponen de condiciones de frontera que sirven como punto de partida para determinar las variables hidráulicas en la zona.

Para el modelo 1D en condición de flujo permanente es necesario asignar estas condiciones en función del tipo de flujo que se espera en el cauce a modelar. El esquema numérico está basado en la ecuación de energía, y su cálculo se realiza iterativamente encontrando el perfil de flujo particular para las condiciones de la geometría del cauce y la hidrología que se transita; las condiciones en función del tipo de flujo son:

- Flujo subcrítico: el control se encuentra en el extremo aguas abajo del cauce, se genera un perfil de flujo o curva de remanso tipo M1, M2, M3.¹
- Flujo supercrítico: el control se encuentra en el extremo aguas arriba del cauce, se genera un perfil de flujo o curva de remanso tipo S1, S2, S3.
- Flujo Mixto: el control se encuentra en ambos extremos del cauce, puesto que es posible que se presente flujo tanto subcrítico como supercrítico en cada uno de los extremos.

¹ La nomenclatura de los perfiles de flujo se extrajo de Hidráulica de canales abiertos – Ven Te Chow

Por su parte, en un modelo 2D se cuenta con condiciones de frontera de entrada tales como hidrogramas o limnigramas que determinan la cantidad de agua que ingresa al cauce; y condiciones de salida en flujo subcrítico tales como la profundidad normal y las curvas de calibración (nivel vs caudal). Las condiciones de flujo son particulares de cada cauce, por lo cual el modelador debe realizar un análisis para determinar cuál es la condición ideal para una modelación particular.

Debido a que en la presente guía se ha escogido realizar las modelaciones del caso de estudio a través del software HEC-RAS, las condiciones de frontera para los modelos unidimensionales serán en general de tipo “flujo uniforme en función del valor de la pendiente de energía”. Por su parte, las condiciones de frontera para los modelos bidimensionales serán en general hidrogramas de flujo obtenidos a partir de las modelaciones hidrológicas en las entradas, y “flujo uniforme a la salida en función de la pendiente de energía” en las salidas.

4.2.4 Información de caracterización de los embalses

4.2.4.1 Información batimétrica de embalses

La información batimétrica corresponde a información topográfica del interior de los cauces que se tengan en cuenta en el área de estudio. La batimetría usualmente complementa los trabajos de topografía que no caracterizan los cauces. Se requiere de técnicas que permitan medir puntos sobre el lecho de los cauces y cuya información no sea distorsionada por el espejo de agua de los mismos. Los resultados de la batimetría deben permitir apreciar la forma de las secciones transversales de los cauces caracterizando los puntos bajos medios y altos de cada sección.

De esta manera, para poder estudiar la operación de los embalses se debe tener un conocimiento de su geometría, de la capacidad que estos tienen para almacenar agua y de las capacidades que tienen de liberarla en un determinado momento. Así, la batimetría de los embalses proporciona una relación del volumen que un embalse puede almacenar a una determinada altura de llenado y el área en planta que utilizada para dicho almacenamiento.

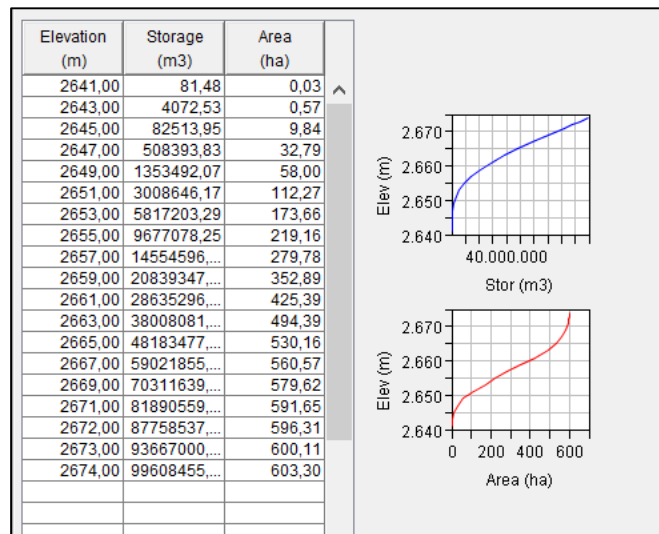


Figura 4-7. Tabla y gráficas de volumen (m3) y Area (ha) vs elevación (m)

Un ejemplo de esta configuración se muestra en la Figura 4-7. Tabla y gráficas de volumen (m³) y Area (ha) vs elevación (m), en donde se relacionan el volumen y el área que caracteriza al embalse en cada uno de sus posibles elevaciones del nivel de agua.

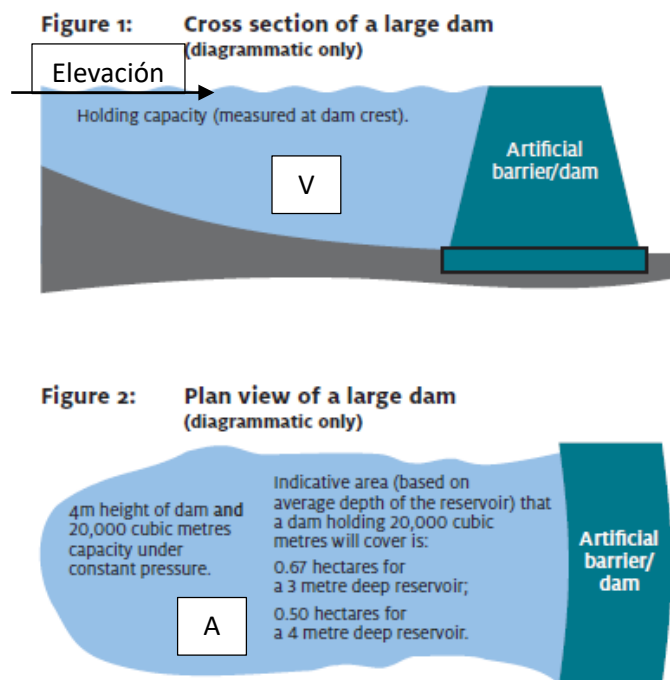


Figura 4-8. Volumen, área y elevación en un embalse. Arriba: vista perfil, abajo: vista en planta.²

4.2.4.2 Información de curvas de calibración (estructuras hidráulicas)

Las curvas de calibración, al igual que la batimetría en los embalses representan las características fundamentales para la operación de los mismos.

Las curvas de calibración de estructuras hidráulicas en embalses representan la relación que existe entre una elevación dada del agua almacenada en el embalse y la descarga que se genera por una estructura determinada. Las estructuras hidráulicas más usuales implementadas en embalses son válvulas, compuertas y vertederos.

Las curvas de calibración en estructuras de descarga, al igual que las curvas de calibración utilizadas en ríos o canales (generalmente obtenidas a partir de mediciones de estaciones hidrométricas), representan una herramienta importante en hidrología superficial. Dicha importancia es debida a que los datos de caudales o descargas obtenidos de las mediciones de niveles dependen fuertemente de la buena construcción de estas curvas (BRACA, 2008).

² Fuente: <https://www.waikatoregion.govt.nz/services/regional-services/consents/dams-safety-requirements-and-building-consents/what-you-need-to-know/>

4.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El análisis hidrológico comprende todos los procedimientos necesarios y encaminados a encontrar los hidrogramas y caudales extremos que caracterizan los flujos en los diferentes afluentes que se encuentran dentro de la cuenca que se estudie. Este análisis se debe realizar tanto para los períodos húmedos extremos (caudales máximos) como para los secos (mínimos).

Los procesos dependerán de la magnitud de la cuenca, existiendo distintos métodos para la estimación de los caudales e hidrogramas. De acuerdo con lo mencionado por el Instituto Nacional de vías (2009) existen los siguientes métodos para la estimación de caudales e hidrogramas para eventos máximos y mínimos:

- Datos históricos de caudal en el lugar de análisis.

Mediante esta metodología se busca generar caudales para eventos máximos haciendo uso de la información recolectada mediante una estación hidrométrica ubicada sobre una corriente de agua en la hoya hidrográfica hasta el sitio de análisis.

- Metodología de transposición de caudales.

Se puede dar el caso en el cual la estación hidrométrica ubicada en la corriente de agua no se encuentre exactamente en el sitio de estudio. De esta manera se pueden transferir caudales máximos de diferentes periodos de retorno de esta estación al sitio del proyecto mediante relaciones de áreas de drenaje y de comportamientos de la lluvia.

- Modelos de lluvia-escorrentía.

Esta metodología es de utilidad cuando no se cuenta con la posibilidad de registros directos de caudales en la cuenca de estudio y mediante su aplicación se busca determinar la escorrentía superficial de la zona. Este cálculo se logra por medio de datos históricos representativos de lluvia existentes en la cuenca y se puede realizar mediante la aplicación de dos métodos: El método racional y el método del hidrograma de escorrentía superficial.

Aunque es ideal trabajar con los registros de una cuenca instrumentada, no en todos los casos se cuenta con estaciones hidrométricas sobre la fuente hídrica regulada y en las cercanías del proyecto. Por el contrario, es frecuente encontrar que la cuenca para el proyecto no está instrumentada o que las estaciones hidrométricas instaladas son recientes. Es por esto que en el caso de estudio del presente trabajo se implementa el uso de un modelo de lluvia-escorrentía.

Los modelos lluvia-escorrentía representan la realidad a través de un número de parámetros que buscan recrear matemáticamente todos los procesos con que cuenta el ciclo hidrológico en la cuenca: precipitación, interceptación, almacenamiento en superficie, evapotranspiración, infiltración, percolación, escorrentía superficial, flujo base, transformación y atenuación.

Con el fin de suplir la carencia de registros de caudales en la cuenca de estudio, estos modelos requieren de amplia información histórica y de campo para la generación de los parámetros propios de cada uno de los procesos; entre estos datos principalmente se encuentra la información pluviométrica, características morfométricas de la cuenca, coberturas del suelo y condiciones de humedad de la cuenca. No obstante, estos datos son frecuentemente existentes y se pueden

obtener a partir de información topográfica, información satelital e información de las entidades a cargo del monitoreo y la gestión ambiental.

El análisis hidrológico propuesto en esta metodología está encaminado en llevar a cabo todos los procedimientos encaminados a la obtención de los parámetros necesarios para llevar a cabo un modelo lluvia-escorrentía que proporcione la información de caudales extremos e hidrogramas de caudal que caractericen los flujos en cada uno de los afluentes que formen parte de la cuenca en estudio. Los insumos necesarios dependen de las metodologías a utilizar en los modelos, sin embargo, los más frecuentes son:

- Información de precipitación asociada a un periodo de retorno
- Información de coberturas vegetales
- Características morfométricas de la(s) cuenca(s): área, pendiente media, longitud del cauce, sinuosidad, tiempo de concentración, entre otras
- Curvas Nivel-área-volumen de los embalses o cuerpos de almacenamiento
- Curvas de calibración de estructuras hidráulicas
- Registros de caudal en un sitio aledaño que permita la calibración del modelo

Una buena parte de estos insumos ya fueron descritos en el numeral 4.2 INFORMACIÓN NECESARIA BÁSICA; en los apartados siguientes se hará una descripción del procesamiento que se debe llevar a cabo para obtener

4.3.1 Análisis de lluvias máximas

Uno de los parámetros principales de un modelo lluvia-escorrentía son las series de tiempo de lluvia a partir de las cuales se producirá el hidrograma de escorrentía.

Para que un modelo lluvia-escorrentía sea válido, éste debe ser probado y calibrado para diferentes escenarios de simulación. Entre los escenarios planteados se recomienda que se consideren periodos en los cuales se presenten registros tanto de precipitaciones como de caudales (escenarios basados en registros); y así mismo, escenarios bajo los cuales se proyecten las condiciones extremas de lluvia y de caudal (análisis de frecuencias o periodos de retorno). Los modelos matemáticos tales como HEC-HMS, MIKE-SHE, PRMS, SWAT, entre otros, utilizan series de tiempo con impulsos de lluvia de modo que permiten estudiar la evolución de la lluvia en el tiempo y de este modo llevar a cabo la producción del hidrograma de escorrentía.

- Para los escenarios basados en registros, debido a que se trata de eventos ya ocurridos, basta con recopilar la información de las estaciones y alimentar los modelos matemáticos con ella. Los modelos lluvia-escorrentía de eventos simples, analizan la escorrentía generada por un aguacero específico cuya duración está frecuentemente entre 2h y 5h. Por esta razón, para conocer los impulsos de lluvia de un aguacero puntual, la serie de registros de lluvia debe provenir de una estación que cuente con registros pluviográficos; esto debido a que en una estación pluviométrica se obtiene únicamente el valor de la lluvia total en un periodo de tiempo (e.g. 24h), lo cual no permite estimar la evolución de la misma a nivel de detalle horario.

- Para los escenarios basados en proyecciones a determinados periodos de retorno, se deben generar series de tiempo sintéticas para las lluvias de una duración acorde con la zona de estudio (ver numeral 4.3.1.2)

Esto funciona especialmente bien cuando la estación de registro caracteriza de forma adecuada la cuenca a modelar. Sin embargo, cuando en un modelo lluvia-escorrentía se tiene una discretización en subcuencas, es frecuente que no se encuentren registros de lluvia directamente sobre cada una de las subcuencas de un proyecto. Por lo anterior para producir series de lluvia en cada subcuenca del modelo lluvia-escorrentía, es posible:

- Escenarios basados en registros: si se cuenta con registros pluviográficos en la zona del proyecto, las series registradas de lluvia pueden validarse para las subcuencas por medio de metodologías espaciales como la ponderación por medio de polígonos de Thiessen.
- Escenarios basados en la proyección de condiciones extremas:
 1. Si se cuenta con datos pluviográficos: estimar series de tiempo sintéticas de lluvia para las estaciones pluviográficas a través de curvas IDF construidas a partir de datos. Validar las series sintéticas a través de metodologías espaciales como la ponderación por medio de polígonos de Thiessen.
 2. Si se cuenta con datos pluviométricos: estimar series de tiempo sintéticas de lluvia con base en curvas IDF sintéticas. Algunas de estas se basan en la espacialización de parámetros de lluvia sobre las subcuencas, tales como los valores máximos de precipitación de las estaciones presentes sobre el área del proyecto. Las series sintéticas se producen para proyecciones con distintos periodos de retorno (ver numeral 4.3.1.4 Generación de series de lluvia sintéticas).

Con las series de lluvia obtenidas, se lleva a cabo la modelación y posterior calibración para el mismo periodo de registros de caudales (registrados o proyectados según el escenario modelado).

En el caso de los escenarios basados en la proyección de las condiciones extremas, se debe realizar un análisis complementario para generar series de lluvia sintéticas. Para este propósito como menciona Moreno y Salazar (2009) se ha originado una disciplina conocida como hidrología estocástica la cual considera que los eventos hidrológicos ocurridos en el pasado y los que tendrán lugar en el futuro, son funciones muestrales de procesos estocásticos (Función aleatoria de un parámetro generalmente el tiempo) y su interés es encontrar modelos que proporcionen alguna idea sobre las variaciones muestrales de dichas series. De esta manera estos modelos permiten generar series de tiempo las cuales son estadísticamente indistinguibles de las series históricas.

De acuerdo con lo expuestos por Díaz y Guevara (2016) la esencia para el análisis estocástico es que el proceso sea estacionario, es decir, que las propiedades estadísticas del proceso no cambien en el tiempo y de esta manera las propiedades de los registros históricos pueden ser utilizadas para generar series sintéticas de una longitud larga.

De esta manera, se debe realizar un análisis para identificar cuál de estas metodologías es la que mejor se ajusta al proyecto particular.

En el caso de estudio de esta guía metodológica, con el fin de representar el caso en el cual no se poseen registros disponibles en la zona, se va a realizar el análisis hidrológico de eventos por medio

de un modelo de lluvia-escorrentía, y el análisis hidrológico continuo por medio del modelo de simulación continua SMA (Soil Moisture Accounting, ver numeral 4.3.5). En este modelo se utilizará la metodología de los polígonos de Thiessen (Chow, Maidment, & Mays, 1994) puesto que se trata de simular los eventos hidrológicos sucedidos para distintos años del periodo de registros.

Por su parte, para el modelo hidrológico de eventos se utilizará la metodología de Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia por Vargas Díaz Granados (Vargas M & Diaz-Granados O, 1998) en conjunto con la metodología de bloque alterno (Chow, Maidment, & Mays, 1994) puesto que se trata de estimar las condiciones extremas de lluvia y la respuesta del sistema ante estas; mientras que para el modelo SMA

4.3.1.1 Complementación de Datos Faltantes.

En ocasiones se puede presentar una situación en la cual, los registros de alguna estación se encuentren incompletos por alguna razón. Por este motivo se han ideado métodos los cuales permiten corregir esta situación y completar la serie histórica. Dentro de las metodologías se encuentran:

- Razones Promedio.

Esta metodología puede ser usada para determinar los valores faltantes de una estación partiendo de la información completa de estaciones cercanas durante el periodo en estudio. De esta manera se tiene que. (Monsalve Sáenz, 1995)

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right]$$

Donde:

n : Total de estaciones con datos de registros completos cercanas a la estación x .

P_x : Precipitación de la estación x para el periodo de tiempo a completar.

P_1 a P_n : Precipitación de las estaciones cercanas para el periodo de tiempo a completar.

N_x : Precipitación media anual a nivel multianual de la estación x .

N_1 a N_n : Precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones cercanas.

- Doble Masas.

El proceso consiste en construir una curva mediante la cual se relacionan los registros de la estación en análisis y los valores de estaciones que se consideran homogéneas

Con este método se analiza la consistencia de la serie de valores de algún elemento hidrometeorológico en la estación "Y", con base en los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "X". Estableciendo de esta manera una regresión y correlación lineal entre las estaciones expresadas como:

$$y = a + bx$$

Donde:

y : Precipitación de la estación incompleta.

x : Precipitación de la estación consistente.

a, b : Constantes de la regresión lineal.

Es posible generar una regresión entre dos estaciones con un grado mayor a uno (lineal). La importancia de este análisis es relacionar la estación con datos incompletos con todas aquellas estaciones cercanas que puedan ser usadas como apoyo para completar los datos. Con las estaciones de apoyo, se generan regresiones de modo que se encuentre una relación entre las variables x y y , en donde x representa los registros de la estación con datos incompletos y y los registros de la estación de apoyo. Cuando se obtengan las relaciones para todas las estaciones de apoyo disponibles se escoge aquella con un mejor nivel de correlación, y se estiman los datos faltantes a través de la relación x vs y de la estación escogida.

4.3.1.2 Duración de la lluvia y de los impulsos de precipitación

La duración de un aguacero típico depende de un número de características tanto geográficas como geométricas de la cuenca o del área de estudio, tales como la altura sobre el nivel del mar, la latitud y longitud, la temperatura media y las condiciones orográficas, entre otros. En otras palabras, la duración de una tormenta de diseño presenta una gran variabilidad en función de la ubicación de la zona de estudio.

Aunque existen algunas recomendaciones para estimar la duración del aguacero de diseño, es importante que ésta sea siempre superior al tiempo de concentración de la cuenca que se esté estudiando.

Sin embargo, la manera de conocer con certeza el patrón de duraciones que siguen las lluvias en un sitio determinado es a través del análisis de los registros horarios generados por un pluviógrafo. De esta manera, la duración del aguacero de diseño debe estimarse de acuerdo a las duraciones de las lluvias más intensas registradas a través de los pluviográficos de las estaciones más cercanas.

4.3.1.3 Espacialización de la lluvia

De acuerdo con el programa hidrológico internacional para América latina y del caribe (2006) a pesar de la gran relevancia que tiene la precipitación en el balance hídrico, esta no se puede estimar de una manera exacta ya que existe una incertidumbre en la evaluación espacial de la profundidad de la precipitación que cae en una superficie partiendo de valores puntuales.

El cálculo de las precipitaciones para una zona en estudio debe contar con una red considerable de estaciones medidoras para poder realizar un cálculo estimativo sobre el nivel medio de precipitaciones sobre un área determinada. A continuación, se mencionan el uso de métodos tradicionales para llevar a cabo este cálculo.

- **Media aritmética.**

De acuerdo con Chow (1994) el procedimiento de la media aritmética es el método más simple para calcular el valor de la precipitación promedio sobre las subcuencas. El cálculo se lleva a cabo promediando los datos registrados por las estaciones dentro del área de análisis, se puede considerar que este método da unos buenos resultados si las estaciones se encuentran distribuidas

de una manera uniforme y sus registros no se desvían de una manera considerable de la media. (Chow V. T., 1994)

Un ejemplo de la aplicación de este método se puede ver en la Figura 4-9.

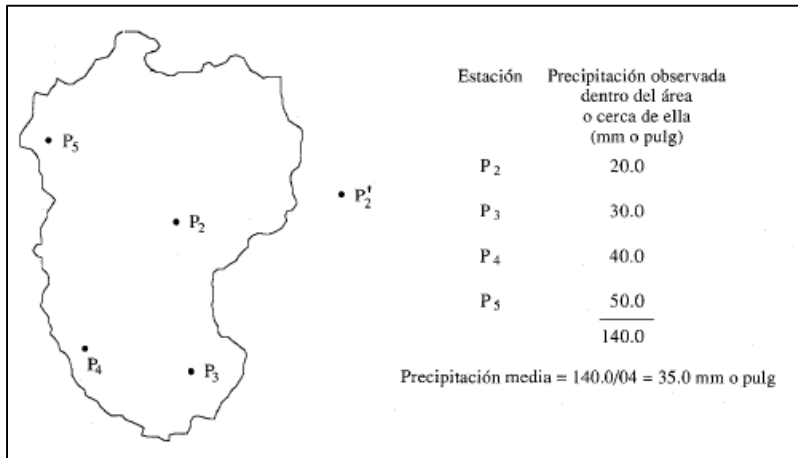


Figura 4-9 Espacialización de la lluvia por el método de la media aritmética. Fuente: Ven Te Chow, 1994. Hidrología Aplicada

- **Polígonos de Thiessen.**

La metodología de Thiessen define que el valor de la precipitación en cualquier punto de la cuenca es igual a la que se registra en la estación más cercana. Es necesario entonces determinar un factor de ponderación el cual depende de las áreas de aplicación de una red de polígonos de Thiessen sobre el área de análisis. Generalmente este método es más preciso que el método de la media aritmética. Si existen J estaciones y el área de la cuenca que se asigna a cada uno de ellos es A_i y P_j es la lluvia registrada en la estación j-ésima entonces el valor de la precipitación promedio para la cuenca se determina como. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

$$\underline{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^j A_j P_j$$

El procedimiento mencionado anteriormente puede verse en la Figura 4-10, donde se muestran los polígonos generados a partir de la ubicación de las estaciones.

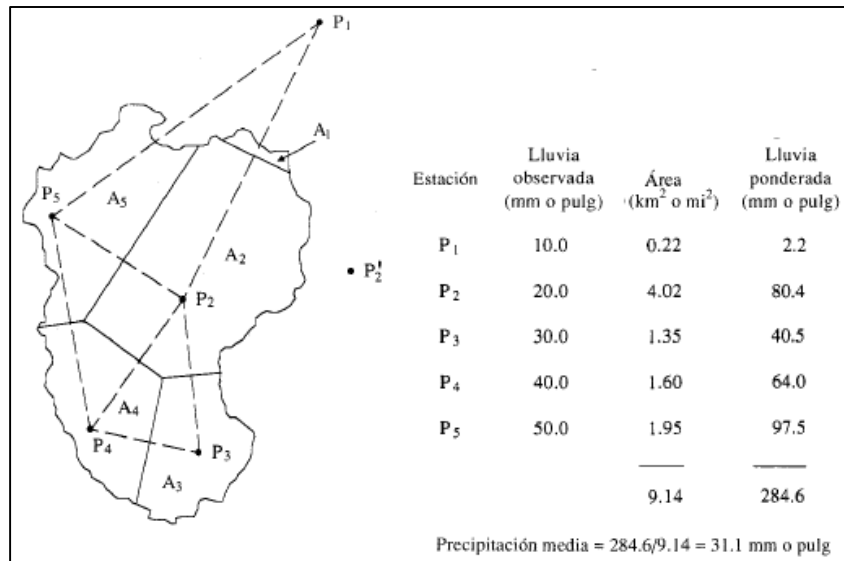


Figura 4-10 Espacialización de la lluvia por el método de los polígonos de Thiessen. Fuente: Ven Te Chow, 1994 Hidrología Aplicada

• **Isoyetas.**

El método de las isoyetas consiste en trazar una curva en un plano la cual, representa puntos de igual precipitación, si la zona es relativamente plana, las isoyetas se pueden distribuir homogéneamente. Hay que tener una red de estaciones relativamente densa para construir de una manera más fiable el mapa de las isoyetas. Una vez que este mapa ha sido construido se calcula el área entre cada par de isoyetas en la cuenca y se multiplica por el promedio del valor de precipitación de las dos isoyetas adyacentes con el objetivo de determinar la precipitación promedio sobre el área de la cuenca, tal como se muestra en la ecuación de los polígonos de Thiessen. (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Una aproximación gráfica del resultado de un mapa de isoyetas se ve en la Figura 4-11.

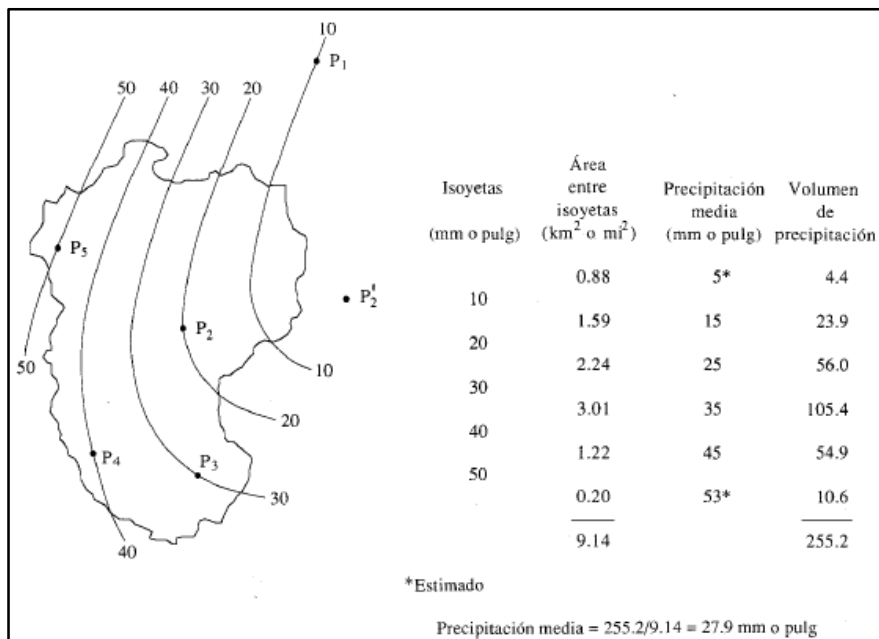


Figura 4-11 Espacialización de la lluvia por el método de Isoyetas. Fuente: Ven Te Chow, 1994. Hidrología Aplicada.

- Método del Inverso de la Distancia.

Este método se asemeja al método de la media aritmética, pero con la adición de la ponderación por distancia, la cual, al tener un factor cuadrático en su cálculo afecta de una manera considerable el valor de la precipitación de las estaciones más cercanas. Este método divide la zona en análisis en celdas teniendo en cuenta que la precipitación de una celda sin dato es una función de la precipitación de las celdas próximas que si poseen algún registro y del inverso de la distancia que las separa. (Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, 2006)

Matemáticamente este método se presenta como

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i(1/d^2)}{\sum_{i=1}^n (1/d^2)}$$

Donde

P_{mj} = Precipitación medio del área en el periodo j (mm)

P_{ij} = Precipitación de la estación i en el periodo j (mm)

d_i = Distancia entre estación y celda correspondiente (km)

- **Métodos de interpolación utilizando herramientas SIG.**

Los sistemas de información geográfica (SIG) proveen herramientas de análisis espacial para determinar estadísticas de las entidades y de esta manera poder llevar a cabo actividades de geoprocésamiento como la interpolación de datos. La interpolación espacial hace referencia al proceso de utilizar puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos en puntos diferentes, de esta manera se pueden estimar datos de precipitación en lugares en los cuales no se cuenta con estos datos utilizando los registros de precipitaciones en estaciones cercanas. Con el objetivo de generar esta información se debe hacer uso de un método de interpolación adecuado para estimar de manera eficiente los valores en aquellas ubicaciones en donde no fueron tomadas muestras o mediciones. (QGIS Development Team, s.f.)

Dentro de los métodos de interpolación mediante herramientas SIG se encuentran:

- IDW (Ponderación por distancia Inversa).
- Kriging.
- Vecino Natural.
- Spline.

4.3.1.4 Generación de series de lluvia sintéticas

La generación de lluvias sintéticas comprende la generación de los impulsos de lluvia y su organización para conformar un hietograma de diseño. Una explicación detallada de estos procedimientos se realiza en el ANEXO C LLUVIAS SINTÉTICAS (HIETOGRAMAS DE DISEÑO): GENERACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE IMPULSOS DE LLUVIA; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; en este, se presentan metodologías para generar hietograma de diseño a partir de registros, bien sean pluviográficos o pluviométricos; así mismo se presenta la metodología de Vargas y Díaz Granados para la generación de impulsos de lluvia a partir de relaciones regionalizadas. Finalmente, en este anexo, se presentan distintos métodos para la organización de los impulsos de

lluvia y ecuaciones para la determinación del factor de corrección/reducción por área; así como un análisis sobre cuándo es necesario aplicar este factor de reducción.

4.3.1.5 **Tiempo de Concentración.**

El tiempo de concentración corresponde al valor del tiempo necesario para que toda la cuenca o sistema de drenaje contribuya a la generación de escorrentía desde el punto más alejado de la hoya hasta su sitio de salida. (Instituto Nacional de Vías, 2009)

Para determinar el valor del tiempo de concentración para cada una de las subcuencas del sistema se ha hecho uso de once fórmulas:

I. **Formula de Bransby-Williams.** (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = 14.6 L A^{-0.1} S^{-0.2}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- L: Longitud del curso de agua más largo o cauce principal, en km.
- A: Área de la cuenca, en km².
- S: Pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).

II. **Fórmula de California Culvert Practice.** (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = 60 \left(\frac{0.87075 L^3}{H} \right)^{0.385}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- L: Longitud del cauce principal, en km.
- H: Es la diferencia de nivel entre la divisorio de aguas y la salida, en m.

III. **Fórmula de Clark.** (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = 0.335 \left(\frac{A}{S^{0.5}} \right)^{0.593}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en horas.
- A: Área de la cuenca, en km².
- S: Pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).

IV. **Fórmula de retardo SCS.** (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = \frac{100 L^{0.8} \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0.7}}{1900 (S 100)^{0.5}}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- L: Longitud del cauce principal, en pies.
- CN: Es el número de curva.
- S: Pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).

V. Fórmula de Giandotti. (Instituto Nacional de Vías, 2009)

$$T_c = \frac{4 \sqrt{A} + 1.5 L}{25.3 \sqrt{S L}}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en horas.
- A: Área de la cuenca, en km².
- L: Longitud del curso de aguas más largo, en km.
- S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

VI. Fórmula de Kerby – Hathaway. (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = \left[\frac{0.67 n L}{\sqrt{S}} \right]^{0.467}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- n: Coeficiente de rugosidad del cauce.
- L: Longitud del curso de aguas más largo, en pies.
- S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

VII. Fórmula Método Racional Generalizado. (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = \left[\frac{60 n L}{H^{0.3}} \right]^{0.467}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr.
- n: Es el coeficiente de rugosidad del cauce.
- L: Longitud del curso de aguas más largo, en Km.
- H: Es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, en m.

VIII. Fórmula de Kirpich. (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = 0.0078 L_p^{0.77} S^{-0.385}$$

En donde:

- Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en min.
- Lp: Longitud del curso de agua más largo, en pies.

S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

IX. Fórmula de Temez. (Instituto Nacional de Vías, 2009)

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

En donde:

Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr.

L: Longitud del curso de aguas más largo, en km.

S: Pendiente promedio del cauce principal, en (m/m).

X. Fórmula de V.T. Chow. (Instituto Nacional de Vías, 2009)

$$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$$

En donde:

Tc: Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, en hr.

L: Longitud del cauce principal, en km.

S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

XI. Fórmula de Ventura-Heras. (Vélez Upegui & Botero Guitérrez, 2011)

$$T_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{S} \quad 0.04 \leq \alpha \leq 0.13$$

En donde:

Tc: Tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica, en horas.

A: Área de la cuenca, en km².

α : Parámetro que depende de las características morfométricas de la cuenca, igual a $\alpha = \frac{L}{\sqrt{A}}$

S: Pendiente total del cauce principal, igual a la caída total entre la longitud del cauce principal, en m/m.

L: Longitud del cauce principal, en Km.

Análisis Estadístico para la eliminación de valores atípicos.

Es claro que las estimaciones pueden variar de una a ecuación a otra, por esta razón es necesario escoger el mejor valor aplicando la siguiente metodología.

Se calcula el valor promedio de los tiempos de concentración, así como su desviación estándar, esto con el fin de eliminar aquellos resultados extremos que sean superiores o inferiores al valor promedio más la desviación estándar y el valor promedio menos la desviación estándar respectivamente.

Si $Tc_i < \mu_{Tc} - \sigma_{Tc}$; Tc_i se elimina

Si $Tc_i > \mu_{Tc} + \sigma_{Tc}$; Tc_i se elimina

Una vez se han eliminado aquellos resultados extremos se toma como valor del tiempo de concentración el promedio de los valores restantes.

$$Tc = \frac{\sum_i^n Tc_i}{n}$$

4.3.2 Análisis de frecuencias (Caudales) a Nivel Mensual Multianual

El objetivo de llevar a cabo un análisis de frecuencia consiste en poder relacionar la magnitud de eventos extremos con una frecuencia de ocurrencia mediante la aplicación de las distribuciones de probabilidad a una serie de registros de caudal; para así poder predecir el comportamiento futuro de los caudales partiendo de registros históricos en un lugar determinado. El objetivo del uso en la guía es generar caudales extremos en los sitios donde se presenten estaciones hidrométricas con el fin de obtener caudales extremos con periodos de retorno elevados que permitan estimar las condiciones críticas del sistema y su respuesta ante estos eventos. Adicionalmente, los caudales extremos calculados en las estaciones de medición servirán para la calibración de subcuencas no instrumentadas en el modelo hidrológico de eventos extremos.

De acuerdo a lo mencionado por el INVIAS (2009) se debe considerar que: “El análisis de frecuencias de datos hidrológicos requiere que los datos sean homogéneos e independientes. La restricción de homogeneidad asegura que los registros provengan de la misma población (por ejemplo, que la cuenca hidrográfica no se haya urbanizado, que no se hayan construido aguas arriba estructuras hidráulicas sobre la corriente principal o sus más importantes tributarios). La restricción de independencia asegura que un evento hidrológico no entre al conjunto de datos más de una vez. Por ejemplo, un sistema de tormenta aislado puede generar dos o más grandes picos de escorrentía y solo uno de ellos (el de mayor magnitud) debe entrar al conjunto de datos. Adicionalmente para la predicción de la frecuencia de eventos futuros, la restricción de homogeneidad requiere que los datos disponibles sean representativos de caudales futuros (por ejemplo, que no habrá nuevas estructuras hidráulicas, desviaciones, cambios en el uso de la tierra, etc., para el caso de datos de caudal)”. (Instituto Nacional de Vías, 2009)

Por tal motivo, teniendo en cuenta que el presente estudio tiene como objeto de análisis los embalses, es frecuente que las series de caudales disponibles posean datos previos y posteriores a la construcción de embalses. Como consecuencia, las series de caudal aguas debajo de estos cuerpos de almacenamiento se deben dividir en el año de construcción del embalse de manera que se tenga en cuenta el cambio en el comportamiento de las descargas debido a la construcción y puesta en marcha de los embalses. En resumen, para realizar el análisis de frecuencia de las series de caudal aguas debajo de los cuerpos de almacenamiento, se utilizan los datos registrados a partir de la construcción de los embalses.

En el caso de estudio del presente documento, con la construcción y puesta en marcha del embalse La Copa en el año 1993 hay que tener en cuenta que la restricción de homogeneidad de los datos hidrológicos se ve afectada a causa de la regulación; por lo cual las series de caudales aguas abajo

del embalse se divide en un antes y después de la construcción de este. De esta manera, para cumplir con la condición de homogeneidad de los registros históricos de caudales es necesario iniciar su análisis de frecuencia a partir del año de la puesta en funcionamiento del embalse.

En el 8.4 ANEXO D ANÁLISIS DE FRECUENCIA PARA LA ESTIMACIÓN DE VAORES EXTREMOS Y PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE, se presenta la ecuación fundamental para el análisis de frecuencias, algunas distribuciones de probabilidad entre las cuales se destacan la distribución Normal, Log Normal, Gumbel, Pearson tipo III y Log Pearson Tipo III. De igual manera, se presentan en ese anexo las pruebas de bondad de ajuste y su funcionalidad en la selección del ajuste generado por medio de las distintas distribuciones de probabilidad.

4.3.3 Uso de la extensión HEC-GeoHMS

La extensión HEC-GeoHMS fue desarrollada por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, esta extensión comprende una serie de herramientas que permiten a los ingenieros e hidrólogos visualizar la información de manera espacial, calcular características físicas de las cuencas, realizar análisis espaciales, delinear subcuencas y cauces, constituir los datos de entrada para modelos hidrológicos, principalmente. El objetivo de la herramienta, al igual que el uso al cual se acude en la presente guía es de preparar los datos de entrada para utilizarlos directamente en el modelo hidrológico HEC-HMS. (ANEXO1_GUIA_HECGEOHMS)

La extensión hace parte del software ArcGIS y se prescinde de este para realizar su ejecución. Aunque existen softwares de uso libre que reemplazan o suplen esta función, el código implementado en la extensión fue desarrollado por el USACE y por lo tanto su funcionalidad tiene un nivel alto de confiabilidad. Sin embargo, es posible desarrollar códigos como extensiones en el software libre QGIS.

El procedimiento de uso de la extensión se detallará en el ANEXO1_GUIA_HECGEOHMS y en el numeral 5.2.3, en el cual se presenta el desarrollo y construcción del modelo para el caso de estudio seleccionado.

4.3.4 Uso del software HMS – modelo de eventos extremos

El objetivo de la modelación hidrológica de eventos en la guía es conocer la magnitud de los caudales pico que puedan presentarse en un evento extremo de lluvia que se presente de manera individual. Las descargas tras la regulación de un embalse suelen ser prolongadas y no presentar variaciones abruptas debido precisamente a la regulación que hacen estos cuerpos de agua sobre, por lo cual los insumos para la modelación de embalses se realizan en periodos más largos (e.g. anuales) que los proporcionados por un modelo de eventos extremos. Sin embargo, es indispensable conocer cuál es el efecto que produce un evento intenso de lluvia a una corta escala de tiempo en términos de caudales pico y tiempos de arribo. Por esta razón se implementa el modelo de eventos extremos de lluvia-escorrentía, que funciona como complemento para el conocimiento de las capacidades de drenaje de la cuenca y la concentración de los hidrogramas en la misma.

El sistema de modelación hidrológica HMS (Hydrological Modeling System) está diseñado para simular los procesos de lluvia-escorrentía en sistemas de cuencas dendríticas. Está diseñado para

ser aplicable en amplio rango de áreas geográficas para resolver la mayor cantidad de problemas, entre los cuales se encuentran la capacidad de suministro y las hidrologías de inundación. Los productos finales del modelo hidrológico son los flujos de caudal en cada intervalo de tiempo de la simulación, es decir los hidrogramas de respuesta; volúmenes de precipitación, infiltración, escorrentía superficial, interceptación, almacenamiento en depresión y evaporación, en los intervalos de tiempo de la simulación y en cada uno de los puntos de control o elementos definidos en el modelo hidrológico. (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2016)

El primero objetivo del uso del modelo hidrológico es la estimación de los hidrogramas asociados a los periodos de retorno estimados en el numeral 4.4.2 *Análisis de frecuencias (Caudales) a Nivel Mensual Multianual* en localizaciones específicas y de interés para el estudio de la regulación de embalses. Estas locaciones de interés son, por ejemplo, los puntos de entrada de caudal a los embalses o puntos sobre los afluentes de los mismos que permitan predecir los hidrogramas de entrada a estos cuerpos de almacenamiento.

El montaje del modelo hidrológico se facilita con el uso de los sistemas de información geográfica, específicamente mediante la extensión HEC-GeoHMS de la plataforma ArcMap de ESRI. Sin embargo, es posible realizar el montaje del modelo desde la interfaz de HEC-HMS sin acudir a la extensión, para lo cual deberá realizarse previamente la división del área en subcuencas y las características físicas de éstas.

4.3.4.1 Métodos de cálculo disponibles en la herramienta HEC-HMS

El proceso de escorrentía superficial a partir de una lluvia dada se puede resumir como se muestra en la Figura 4-12, en la cual este inicia con un evento de precipitación que se deposita en la superficie de la cuenca, en cuerpos de agua o en la vegetación presente en la zona. A través de la evaporación gran cantidad del agua precipitada retorna a la atmósfera, aunque durante los eventos de precipitación este fenómeno se reduce considerablemente. A su vez, una parte de la lluvia que fue interceptada por la vegetación encuentra el camino para llegar a la superficie. Cuando el agua ha alcanzado la superficie, dependiendo del tipo y cobertura de suelo, de la humedad antecedente y algunas otras propiedades, una porción del agua puede terminar por infiltrarse y almacenarse de manera transitoria en capas superiores parcialmente saturadas del suelo. Estando en las capas superiores del suelo el agua puede volver a la superficie por medio de la acción capilar, moverse de manera horizontal como flujo intermedio justo debajo de la superficie o puede percolar por acción de la gravedad hacia algún acuífero. El volumen de agua que viaja como flujo intermedio aflora en a los cauces naturales aportando a su caudal. Por otra parte, el agua que ha alcanzado acuíferos se mueve lentamente y parte de esta eventualmente retorna a los cauces como flujo base. La cantidad de agua que no fue objeto de estancamiento o infiltración viaja como escorrentía superficial hacia los canales o encauzamientos naturales. De esta manera, el flujo que circula por los canales resulta de la combinación de la precipitación que cae directamente en ellos, el flujo base, el flujo intermedio y la escorrentía superficial. (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2016)

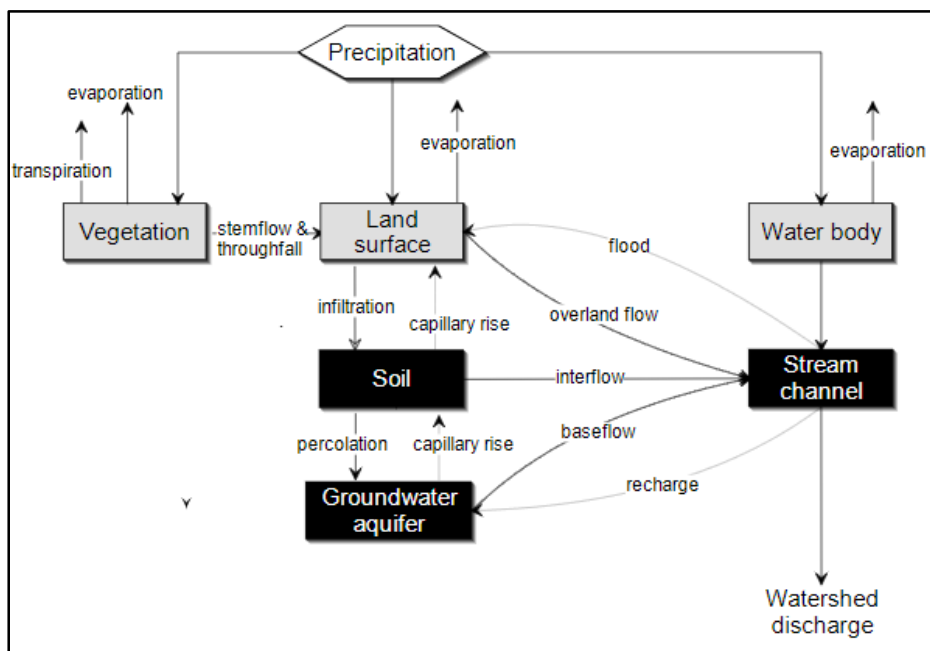


Figura 4-12. Procesos para la transformación de la lluvia en escorrentía. Fuente: Hydrologic Modeling System HEC-HMS-User's Manual. US Army Corps of Engineers. 2016

Con el objetivo de representar y cuantificar el comportamiento natural de una cuenca descrito anteriormente, el programa HEC-HMS contiene en su código modelos mediante los cuales permite al usuario representar dicho comportamiento. Los modelos o métodos están disponibles según el elemento que se desea modelar (cuencas, tramos de tránsito, embalses). Las configuraciones mínimas necesarias para ejecutar un modelo hidrológico de eventos extremos son las siguientes:

Tabla 4-1. Configuración mínima para un modelo hidrológico de eventos extremos

Elemento físico (HMS)	Configuración o proceso hidrológico
Cuencas	Volumen de pérdidas o abstracciones
Cuencas	Cálculo de escorrentía directa (hidrograma)
Cuencas	Cálculo del flujo base
Cuencas	Almacenamiento en la vegetación
Cuencas	Almacenamiento en depresiones de la superficie
Ríos	tránsito de crecientes en cauces
Embalses	Tipo de descarga
General	Distribución de la lluvia – modelo meteorológico
General	Configuración de tiempos de corrida del modelo

La escogencia de estos modelos, en conjunto con los datos que caracterizan el sistema, tales como los valores de área para las cuencas o las curvas Nivel-Área-Almacenamiento en los embalses, componen la estructura del modelo hidrológico. Una vez se hayan alimentado el software con estos datos, es posible predecir el comportamiento de la escorrentía a partir de datos de lluvia.

A continuación, se listan los métodos disponibles para el cálculo de los principales procesos hidrológicos utilizados en un modelo lluvia-escorrentía de eventos extremos.

4.3.4.1.1 Modelo para calcular el volumen de pérdidas o abstracciones.

Para determinar el volumen de pérdidas el programa calcula el volumen de agua que es interceptada, infiltrada, almacenada o evaporada y este volumen lo sustrae del volumen total de precipitación, dando como resultado un volumen de agua denominado precipitación efectiva. El programa HEC HMS ofrece las siguientes alternativas para determinar las pérdidas:

Tabla 4-2. Modelos disponibles en HMS Para determinar las pérdidas

MODELO	Parámetros
Deficit and Constant Loss	Initial Deficit (IN), Maximun Deficit, Impervious (%)
Exponential Loss	Initial Range, Initial Coef, Coef Ratio, Exponent, Impervious (%)
Green and Ampt Loss	Initial Content, Saturated Content, Suction (MM), Conductivity (MM/HR), Impervious (%)
Gridded Deficit Constant Loss	Initial Deficit Grid Ratio, Maximun Deficit Grid Ratio, Constant Rate Grid Ratio, Impervious Ratio
Gridded Green and Ampt Loss	Initial Content Grid, Sat Content Grid, Suction Grid, Conductivity Grid, Impervious Grid
Gridded SCS Curve Number Loss	Curve Number Gird, Ratio, Factor
Gridded Soil Moisture Accounting	Max Infiltration Grid, Initial Soii (%), Soil Storage Grid, Tension Storage Grid, Soil Percolaion Grid, Initial GW1 (%), GW1 Storage Grid, GW1 Percolation Grid, GW1 Coefficient Grid, Initial GW2 (%), GW2 Storage Grid
Initial and Constant Loss	Initial Loss (IN), Constant Rate (IN/HR), Impervious (%)
SCS Curve Number Loss	Initial Abstraction, Curve Number, Impervious (%)
Smith Parlange Loss	Initial Content, Residual Content, Saturated Content, Bubbling Pressure (IN), Pore Distribution, Conductivity (IN/HR), Impervious (%), Temperature Gage, Beta Zero
Soil Mosture Accounting Loss	Soil (%), Ground Water 1 (%), Ground Water 2 (%), Max Infiltration (MM/HR), Impervious (%), Soil Storage (MM), Tension Storage (MM), Soil Percolation (MM/HR), GW1 Storage (MM), GW1 Percolation (MM/HR), GW1 Coeffient (HR)

Para el caso de análisis se escoge para representar el método de abstracciones la metodología del SCS la cual busca estimar los excesos de precipitación como función de la cobertura del suelo, el uso del suelo, la precipitación y las condiciones antecedentes haciendo uso de la siguiente ecuación: (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2000)

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

En donde P_e corresponde al exceso de precipitación acumulada en un tiempo t ; P es la profundidad de lluvia acumulada en el tiempo t ; I_a corresponde a la abstracción inicial, y S hace referencia a la máxima retención potencial. El SCS desarrolló una relación empírica entre los valores de I_a y S como (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2000)

$$I_a = 0.2S$$

Las características de la cuenca y la máxima retención S están relacionadas por medio de un parámetro intermedio el cual se conoce como el número de curva (CN), el cual varía entre un rango entre 0 y 100 para cuerpos de agua y de 30 para suelos permeables con altas tasas de infiltración. La ecuación que relaciona este parámetro y la máxima retención se expresa como (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2000)

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

4.3.4.1.2 Modelo para el cálculo de escorrentía directa.

Estos modelos describen el proceso de escorrentía directa proveniente del exceso de precipitación en una cuenca. Es decir que transforman los datos de precipitación efectiva en escorrentía. Con este objetivo el programa ofrece los siguientes modelos para determinar el proceso de transformación del exceso de precipitación:

Tabla 4-3. Modelo disponible en HMS para calcular escorrentía directa

MODELO	Parámetros
User specified Unit Hydrograph (UH)	S-Graph, Lag Time (HR)
Clark's UH	Time of Concentration (HR), Storage Coefficient (HR)
Snyder's UH	Estándar Lag (HR), Peaking Coefficient
SCS UH	Lag Time (MIN)
ModClark	Tiem of Concentration (HR), Storage Coefficient (HR), Grid Region
Kinematic Wave	Length, Slope, Roughness, area

En el caso de estudio se hace uso del método del hidrograma unitario del SCS, la ecuación que lo rige es:

$$U_p = C \frac{A}{T_p}$$

En donde la variable A corresponde al área de la cuenca, C es una constante de conversión con un valor de 2.08 para el sistema internacional y T_p hace referencia al tiempo al pico el cual está relacionado con la duración del exceso de precipitación unitaria como:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag}$$

En donde Δt es la duración del exceso de precipitación y t_{lag} es el tiempo de demora para cada una de las cuencas definido como la diferencia entre el centro de masa del exceso de lluvia y el pico del hidrograma unitario.

De modo que

$$U_p = C \frac{A}{\frac{\Delta t}{2} + t_{lag}}$$

El parámetro principal de esta metodología es el tiempo de concentración el cual para el presente estudio se calcula como:

$$t_{lag} = 0.6T_c$$

4.3.4.1.3 Modelo para el cálculo de flujo base.

Con el objetivo de representar el flujo base para la cuenca se cuenta con las siguientes opciones:

Tabla 4-4. Modelo disponible es HMS para cálculo de flujo base

MODELO	Parámetros
Bounded Recession Baseflow	Initial Discharge, Recession Constant
Constant Monthly	Valor de flujo base para cada mes
Recession Baseflow	Initial Discharge (CFS/MI2), Recession

MODELO	Parámetros
	Constant, Threshold Type, Ratio
Linear Reservoir	GW 1 Initial (CFS), GW1 Coefficient, GW 1 Reservoirs, GW2 Initial (CFS), GW2 Coefficient, GW2 Reservoirs.
Nonlinear Boussinesq Baseflow	Initial Type, Discharge (CFS), Threshold Type, Ratio, Length (FT), Conductivity (IN/HR), Porosity

4.3.4.1.4 Modelo para el tránsito de crecientes en un cauce o canal

Con el objetivo de simular el flujo en los canales se cuentan con las siguientes opciones:

Tabla 4-5. Modelo disponible en HMS para tránsito de crecientes en un cauce o canal

MODELO	Parámetro
Kinematic Wave	Initial Type, Initial Discharge (CFS), Length (FT), Slope (FT/FT), Manning, Subreaches, Index Celerity, Bottom Width, Side Slope (xH : 1V), Invert (FT)
Lag	Lag (Min)
Lag and K Routing	Constat Lag (HR), Constant K (HR)
Modified Plus	Initial Discharge (CFS), Sot-Dis-Function
Muskingum	Muskingum K (HR), Muskingum X
Muskingum-Cunge	Length (FT), Slope (FT/FT), Manning, Index Celerity, Left Manning, Right Manning, Cross Section
Straddle Stragger	Initial Discharge (CFS), Lag (MIN), Duration (MIN)
Normal Depth	Initial Discharge (CFS), Length (FT), Slope (FT/FT), Manning, Index Flow, Left Manning, Right Manning, Cross Section

En el caso de estudio del presente documento, se escogió el método de tránsito de crecientes de Muskingum; por lo anterior se realiza describe brevemente el método. La ecuación que describe el método corresponde a la adición de un volumen de almacenamiento en prisma y uno en cuña, como se muestra en la Figura 4-13, estos volúmenes están determinados por las entradas y salidas de caudal al volumen de control:

$$S = KQ + KX(I - Q)$$

Donde,

S = almacenamiento

K = tiempo de viaje

X = parámetro de atenuación

I = entrada de caudal

Q = salida de caudal

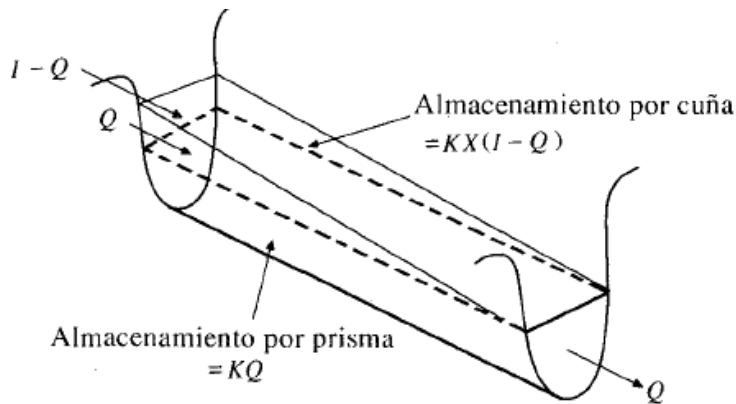


FIGURA 8.4.1
Almacenamientos por prisma y por cuña en un tramo de un canal.

Figura 4-13. Método de Muskingum para tránsito de crecientes. Fuente: Hidrología aplicada - Ven Te Chow

El parámetro del tiempo de viaje (K) se estimó por de una relación distancia-velocidad en la cual la distancia (L) corresponde a longitud de cada tramo y la velocidad se estimó inicialmente como la celeridad de una onda cinemática (C_k).

$$K = \frac{L}{C_k}$$

El parámetro X que representa la atenuación del hidrograma, de acuerdo con el método, varía entre 0, valor con el cual la ecuación se hace idéntica al método del embalse lineal, y 0.5 valor que representa una cuña completamente desarrollada; es decir, máxima atenuación.

El número de tramos indica la longitud de cada paso en el proceso de cálculo. De esta manera está relacionado con una condición de estabilidad del método, similar a la condición de Courant. Su determinación está en función del intervalo de tiempo para el cálculo, esto se expresa matemáticamente así:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{L}{K} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta x * K}{L} \rightarrow N^{\circ} \text{tramos} = \frac{L}{\Delta x} = \frac{K}{\Delta t}$$

El tiempo de viaje es importante en la metodología presentada pues será objeto de calibración en el numeral 4.4.3.

Finalmente, como condición adicional de estabilidad del modelo se debe cumplir que:

$$K > \Delta t > 2KX$$

Así mismo, de acuerdo con (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2000) los parámetros K y X , y el intervalo de tiempo Δt deben seleccionarse para que el modelo sea "racional", condición que se cumple cuando la combinación de parámetros debe cumplirse que la combinación de parámetros se encuentre dentro de la región sombreada en la

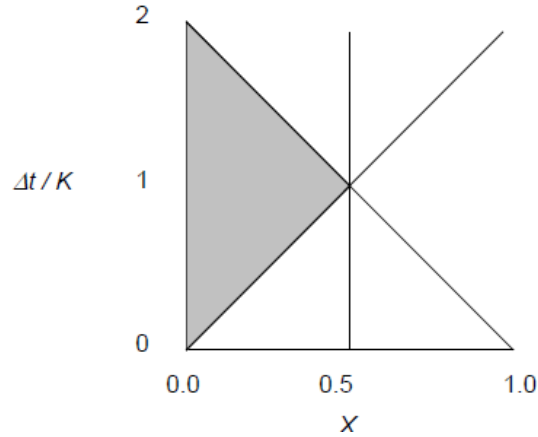


Figura 4-14. Región de combinación de parámetros utilizable en el modelo Muskingum. Fuente HMS Technical Reference Manual - USACE

4.3.4.1.5 Distribución de la lluvia – modelo meteorológico

Los métodos disponibles en HEC-HMS para la distribución de la lluvia en las cuencas son:

Tabla 4-6. Modelo disponible en HMS para distribución de la lluvia

MODELO
Tormenta de frecuencia
Valores ponderados de estaciones (Gage Weights)
Inverse distance
Método de tormenta del SCS
Hietograma especificado
Tormenta proyecto estándar

En esta guía metodológica, el caso de estudio se trabajó con dos de los métodos disponibles en HEC-HMS. El método del hietograma especificado se utilizó para asignar un hietograma sintético (construido en el numeral 4.3.1.4) a cada una de las subcuencas del modelo. Adicionalmente, en el numeral 4.3.5 se construirá un modelo de simulación continua, para el cual se utiliza el método de los valores ponderados (Gage Weights) en el cual se utilizan los polígonos de Thiessen (ver numeral 4.3.1.3) para encontrar los porcentajes de influencia de las estaciones para cada cuenca.

4.3.4.1.6 Escogencia de los modelos disponibles en HEC-HMS

Para cada proceso hidrológico, los distintos modelos matemáticos comprendidos como opciones de cálculo en HEC-HMS presentan diferencias entre sus formulaciones, esto puede hacer que un determinado modelo sea más adecuado para un caso particular. Sin embargo, todos los modelos pueden representar debidamente dicho proceso hidrológico en una cuenca dada si se obtienen los valores correctos de los parámetros que necesarios para su cálculo.

Por lo anterior, un criterio para la escogencia del modelo a utilizar en cada proceso hidrológico es la disponibilidad de información para la obtención de los parámetros del mismo. Sin embargo, el criterio de escogencia de los modelos de cálculo debe estar fundamentado en el conocimiento y experiencia del modelador.

4.3.4.2 Cálculo y calibración de los caudales pico del modelo

La calibración del modelo hidrológico de eventos de lluvia se realiza con respecto a los caudales pico bien sea registrados por una estación limnimétrica (escenario basado en registros) o proyectados a un periodo de retorno por medio de análisis de frecuencia (escenario basado en proyecciones de eventos extremos). Si se cuenta con una estación limnigráfica, se debe calcular la forma del hidrograma además del caudal pico (ver numeral 4.3.4.3)

La calibración de los caudales pico se consigue a partir de la variación y ajuste de los parámetros del modelo lluvia-escorrentía, principalmente del modelo de abstracciones utilizado.

Como se mencionó en la descripción de los métodos disponibles en el software HEC-HMS, el método de pérdidas del SCS es de fácil uso debido a que por medio un único parámetro (*Curve Number CN*) se representan de manera agregada los distintos factores que definen la cantidad de agua que infiltra en el suelo. Por esta razón, se seleccionó éste como método de cálculo para las abstracciones en la presente guía, y el parámetro CN como parámetro principal para la calibración del caudal pico del hidrograma de respuesta.

Este parámetro debe calcularse para cada una de las cuencas, y posteriormente calibrarse; esto con el fin que el modelo alimentado con los hietogramas proyectados a un periodo de retorno represente los caudales proyectados en las estaciones a través del parámetro agregado CN. En otras palabras, los CNs calculados para cada cuenca deben ser ajustados de manera que reproduzcan los hidrogramas de creciente proyectados en los puntos de medición aguas abajo.

Cálculo de los valores iniciales de CN para las subcuencas del modelo

Para estimar el volumen de escorrentía directa o el volumen de pérdidas por infiltración, estancamiento, intercepción y/o evaporación se aplica el método del SCS denominado número de curva de escorrentía (CN). El valor del CN varía de 1 a 100 y depende de ciertas características que varían considerablemente a lo largo del área de la cuenca y que finalmente afectan el resultado del procedimiento de una manera considerable. Estas características productoras de escorrentía de la cuenca son el tipo de suelo hidrológico, uso y tratamiento del suelo, condiciones de la superficie del terreno y la condición de humedad antecedente del suelo. Adicionalmente este método tiene en cuenta tanto las áreas impermeables como las permeables.

Esta metodología se puede considerar bastante sensible a cambios. Por un lado, la tasa de infiltración del suelo varía considerablemente dependiendo del grupo de suelo presente, por esto un cambio en el perfil del mismo puede transformar las características de infiltración significativamente afectando de manera directa el volumen de escorrentía. El tipo de coberturas también juega un papel importante pues es diferente el proceso de pérdida de volumen en una superficie con abundante vegetación a una superficie desnuda o impermeable (Existen varios métodos que permiten determinar este factor como fotografías aéreas, mapas de uso de solo o el reconocimiento de campo). Además, hay que tener en cuenta el porcentaje de estas áreas impermeables. (United States Department of Agriculture, 1986)

Calibración de los valores de CN para las subcuencas del modelo

Siendo el valor del CN una representación de varios factores de la cuenca como un valor adimensional, la incertidumbre en cada uno de los valores que el CN alberga hace que este parámetro sea aún más incierto.

La fuente de error con más peso en la estimación de la escorrentía directa es el cálculo del CN, debido a que es un parámetro que considera un gran número de factores; la única manera para verificar la calidad del valor calculado es una comparación entre el valor de escorrentía estimado y el valor actual medido. Esta comparación permite indicar qué tan bien ha sido calculado el dato del número de curva.

Con el objetivo de mantener la relación entre los CN calculados inicialmente, la calibración de los caudales picos de la modelación hidrológica se realiza variando este parámetro aplicando un factor común a todas las subcuencas.

4.3.4.3 Calibración utilizando la forma del hidrograma (información requerida)

La calibración de los hidrogramas se realiza de la misma manera que aquella realizada para los caudales pico. La diferencia sustancial es que al realizar una calibración de la forma de los hidrogramas se tiene información que permite no solo determinar el caudal pico del hidrograma de respuesta (Figura 4-15), sino también su tiempo de arribo, la curva de ascenso, la curva de remanso del mismo y el volumen de agua de escorrentía.

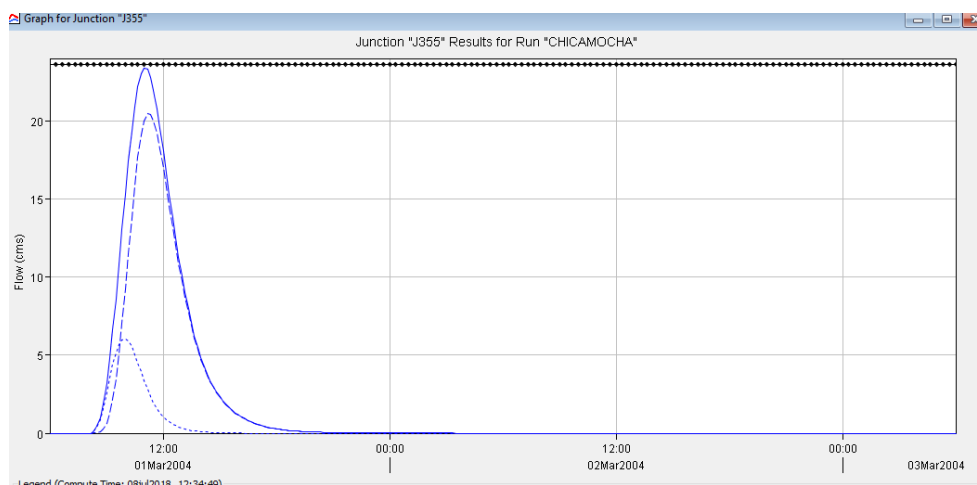


Figura 4-15. Hidrograma de Respuesta

Para poder realizar la calibración de la forma del hidrograma se requiere información de eventos lluvia-escorrentía en los cuales se hayan registrado caudales con tiempos de registro cortos durante la duración del evento en el punto de interés del proyecto; dicha información se consigue a partir de estaciones de hidrométricas que cuenten con medidores limnigráficos. Esta información en conjunto con la información climatológica permite calibrar no solamente el caudal pico que se presenta en el punto de interés, sino el tiempo en que se presenta y la forma del hidrograma.

El tiempo al caudal pico en la calibración representa el tiempo de concentración de las cuencas y el tiempo de tránsito de los tramos que se encuentran aguas arriba del punto de medición de los

caudales. Por su parte, el área bajo la curva del hidrograma representa el volumen de agua que, después de haber sufrido infiltración e interceptación, escurrió hasta el punto de interés para el evento analizado.

Con información de varios eventos aislados es posible conseguir una calibración para generar escenarios con tiempos de retorno distintos a los registrados. Sin embargo, para el caso de estudio no se obtuvo un nivel de información tal para realizar este análisis.

4.3.5 Uso del modelo de simulación continua, SMA (Soil Moisture Accounting)

El comportamiento temporal de los embalses, en general, se estudia en escalas de tiempo superiores a los eventos simples de lluvia. A diferencia del análisis de una cuenca individual, los embalses son construidos aguas abajo de un área aportante considerable con el objetivo que éstos garanticen una cierta capacidad de almacenamiento. Aunque el tamaño y ubicación de los embalses dependen del propósito particular de cada caso, estos están generalmente asociados a áreas de drenaje importantes y tiempo de tránsito prolongados. Así mismo, el volumen de escorrentía que se almacena en el embalse proviene no de un evento de lluvia puntual, sino de una sucesión de eventos de lluvia. Todo lo anterior implica que el estudio de la operación de embalses sea realizado sobre un margen de tiempo mucho más amplio que el utilizado en un estudio de crecientes o estiajes sobre una sub-cuenca individual del sistema.

Consecuentemente, es usual que el estudio sobre la operación de embalses se realice de manera anual; aunque es posible realizarlo sobre escalas de tiempo tanto más pequeñas como más grandes. En esta guía se realizará el estudio de la operación de los cuerpos de almacenamiento, y por tanto la modelación hidrológica continua, con una escala de tiempo anual.

Los modelos de simulación continua responden a la necesidad de tener una mejor estimación tanto de las condiciones de humedad del suelo previas a eventos de lluvia, como de su influencia sobre el proceso lluvia escorrentía. Su uso se ha popularizado a causa de la imprecisión de estimaciones realizada mediante modelos lluvia-escorrentía convencionales o de eventos. Los modelos de simulación continua permiten establecer las condiciones de humedad mediante los procesos del ciclo hidrológico de manera continua y sin despreciar la infiltración en el suelo y el aporte de flujos subterráneos a la escorrentía superficial. Sin embargo, el uso de estos modelos ha tardado en popularizarse debido a la complejidad en la determinación y calibración de los parámetros que estos modelos utilizan. (Holberg, 2015)

Los modelos hidrológicos de eventos revelan como una cuenca responde a un evento individual de lluvia, estos estudian variables tales como cantidad de escorrentía superficial, caudal pico, tiempo al caudal pico, almacenamientos y volumen infiltrado. Por su parte, los modelos hidrológicos continuos representan procesos y fenómenos hidrológicos durante un periodo de tiempo extenso que incluye tanto condiciones secas como húmedas, tales como la respuesta de una cuenca frente a un número de eventos de lluvia y sus efectos acumulativos. (Xuefeng Chu, 2009)

El modelo de eventos del Soil Conservation Service SCS-CN basado en el número de curva es esencialmente empírico, se basa en un único parámetro que relaciona la lluvia y la escorrentía. El número de curva adimensional agrupa los efectos del uso de tierra y cobertura vegetal, tipos de suelo y condiciones hidrológicas para la escorrentía superficial, y crea una relación directa entre la

lluvia y la escorrentía superficial. Aunque este método ha sido ampliamente usado de manera global, siempre ha existido una controversia alrededor de sus limitaciones y aplicabilidad. Por su parte el modelo SMA habilita la introducción de los efectos a largo plazo que se puedan presentar en una cuenca. En síntesis, el SMA es un modelo agregado que representa una cuenca con capacidades de almacenamiento subsuperficial que permite tener en cuenta los procesos de almacenamiento en depresión, intercepción en las plantas, infiltración, evapotranspiración y el almacenamiento y percolación del agua en los estratos subsuperficiales (acuíferos). Una dificultad usual del modelo de simulación continua es la dificultad para conseguir información de campo suficiente, y con los niveles de precisión requeridos. (Xuefeng Chu, 2009)

El objetivo principal de llevar a cabo la modelación hidrológica con los modelos de eventos y de simulación continua es suplir las falencias de cada uno de los modelos entre sí y fortalecer la modelación hidrológica. Adicionalmente, en el presente caso de estudio, el modelo de simulación continua permite la generación de series de caudal anuales en los sitios en que no se tienen estaciones hidrométricas y que son de interés para el estudio (ubicaciones sobre los cauces o afluentes aguas arriba de los embalses); lo cual se consigue por medio de la calibración del modelo SMA durante un año hidrológico.

En el ANEXO E MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: DESCRIPCIÓN, METODOLOGÍA, PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN, se presenta una descripción detallada del modelo en la cual se contempla la estructura del modelo; los procesos simulados en él, los cuales son el almacenamiento en superficie, almacenamiento en la vegetación, infiltración percolación, escorrentía superficial, evapotranspiración y caudal base; se presentan de igual manera las ecuaciones que se resuelven, la metodología, los periodos hidrológicos que se recomiendan enfocados al análisis de embalses; y por último la obtención de parámetros y la calibración del modelo.

4.4 ANÁLISIS HIDRÁULICO

La finalidad del análisis hidráulico en la metodología consiste en verificar las condiciones hidráulicas actuales con el fin de identificar los problemas a resolver en términos de caudales máximos o crecientes. El análisis hidráulico empleado en el presente documento se realiza por medio de la modelación hidráulica en dos dimensiones. De esta manera se puede observar si existen condiciones de desbordamiento e inundación desfavorables y que puedan ser mejoradas a través de la gestión de embalses.

Técnicamente, el análisis hidráulico consiste en el tránsito de hidrogramas de flujo que se ingresan en distintos puntos como entrada al modelo hidráulico. El software HEC-RAS 2D, de acuerdo a las indicaciones del modelador, el tránsito se hará utilizando la ecuación de onda difusiva o las ecuaciones de Saint-Venant completas. El método es un tránsito distribuido de crecientes, de modo que a través del software HEC-RAS y su herramienta RAS Mapper, es posible conocer el caudal, la profundidad de lámina de agua, la velocidad y otras variables hidráulicas en cualquier punto de la extensión de la simulación.

4.4.1 USO DEL SOFTWARE HEC-RAS 2D

4.4.1.1 Montaje del modelo hidráulico bidimensional

Para realizar el montaje del modelo hidráulico bidimensional se debe contar con los siguientes insumos:

- Modelo de terreno proveniente de un levantamiento topográfico en el cual preferiblemente se tenga información de las construcciones y otros obstáculos al flujo.
- Series de tiempo de caudales de acuerdo al análisis hidrológico realizado previamente.
- Archivo de formas (*shapefile*) con información de las coberturas vegetales sobre el sitio de estudio y el coeficiente n de Manning asociado a estas.

La asignación de las series de tiempo es posible realizarla con ayuda de la plataforma DSS (Data Storage System) que incorporan los programas de HEC para su interacción, el proceso consiste en generar las series de tiempo a través del modelo hidrológico y posteriormente ligarlas como entradas al modelo hidráulico a través del archivo que las almacena (tipo .dss). Para conocer el procedimiento que se realiza con los archivos DSS y la importación de series ver el ANEXO4_IMPORTACIÓN_DATOS_A_DSS.

El montaje del modelo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en el ANEXO2_GUIA_HECRAS2D. Por esta razón no se incluye en este numeral una descripción más amplia acerca de los procedimientos llevados a cabo para la construcción del modelo hidráulico bidimensional.

En el ANEXO F FUNDAMENTO TEÓRICO EN EL SOFTWARE DE MODELACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS 2D, se presenta el fundamento teórico bajo el cual se realizan los cálculos en una simulación hidráulica por medio del software HEC-RAS. En este anexo se describen las ecuaciones de Navier-Stokes y sus simplificaciones, entre las cuales, una de las más importantes es considerar presión hidrostática para obtener las ecuaciones para aguas poco profundas. Se presenta, así mismo, el esquema de solución en HEC-RAS caracterizado por el uso de una submalla batimétrica, y la forma de aplicación de las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento a este esquema.

4.4.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO (NIVEL-CAUDAL)

Así como el modelo hidrológico cobra su validez a través de la calibración, el modelo hidráulico se beneficia también de esta fundamental etapa en la modelación.

La calibración ideal de un modelo hidráulico consiste en una comprobación del coeficiente de rugosidad (e.g. n de Manning) tras haberlo medido en campo.

Sin embargo, un procedimiento de calibración teniendo como variable el coeficiente de rugosidad genera un grado de confiabilidad en la modelación. Dicho procedimiento consiste en la determinación del coeficiente de rugosidad en varias secciones de control; utilizando como datos para su deducción los registros de caudal y nivel en dichas secciones. Estos puntos suelen coincidir con estaciones hidrométricas debido a que allí se encuentran datos registrados de las variables involucradas.

Por ejemplo, si se está calibrando el coeficiente n de Manning y se cuenta con una estación hidrométrica operada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la ecuación de Manning que representa el flujo uniforme sobre la sección de control genera una buena estimación del coeficiente de Manning. Con el objetivo de aplicar la ecuación de Manning se consultan los valores de nivel y de caudal para una misma fecha en el periodo de registros; con estos valores se encuentra el área y radio hidráulico de la ecuación dejando como única incógnita el coeficiente n de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \rightarrow n = \frac{1}{Q} A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Al encontrar el valor de n de Manning en varias locaciones del cauce, se puede comparar con el valor encontrado a partir de las coberturas vegetales o de metodologías como Cowan o CORINE-LANDCOVER.

4.4.3 CALIBRACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE EN EL MODELO HIDROLÓGICO

Los tiempos de viaje de los tramos de tránsito en el modelo hidrológico se encargan de determinar el tiempo en que tarda un hidrograma de escorrentía en viajar desde un punto del cauce hasta otro, es decir, del inicio de un tramo del modelo hidrológico al final del mismo.

Los tiempos de viaje como fue mencionado en el apartado 4.3.4.1.4 obtienen un aproximación inicial con las herramientas SIG. La metodología con la que se calculó depende de la celeridad de la onda y de la longitud calculada por medio de los SIG. Aunque esta aproximación inicial es aceptable, mediante el modelo hidráulico es posible determinar el tiempo de tránsito en los tramos hidrológicos con mayor exactitud, puesto que el modelo contempla las características topográficas al detalle del terreno subyacente.

4.4.3.1 Necesidad y justificación de la calibración

Para mostrar la importancia de calibrar los tiempos de tránsito se muestra el análisis para una confluencia como volumen de control. La confluencia representa el lugar en el que se encuentran dos hidrogramas que provienen de dos tramos de tránsito distintos. El tiempo de tránsito, es decir, el tiempo que toma un hidrograma aguas arriba de cada tramo en viajar a través de este determina la hora de llegada del hidrograma a la confluencia; y por consiguiente determina si dos hidrogramas superponen sus caudales pico o no. En la Figura 4-16 se muestra el caso en que, dos hidrogramas que superponen los caudales pico al llegar a la confluencia al mismo tiempo; y el caso en que los mismos dos hidrogramas, pero con tiempos de tránsito confluyen sin que sus picos coincidan y por tanto el caudal máximo resultante sea mucho menor.

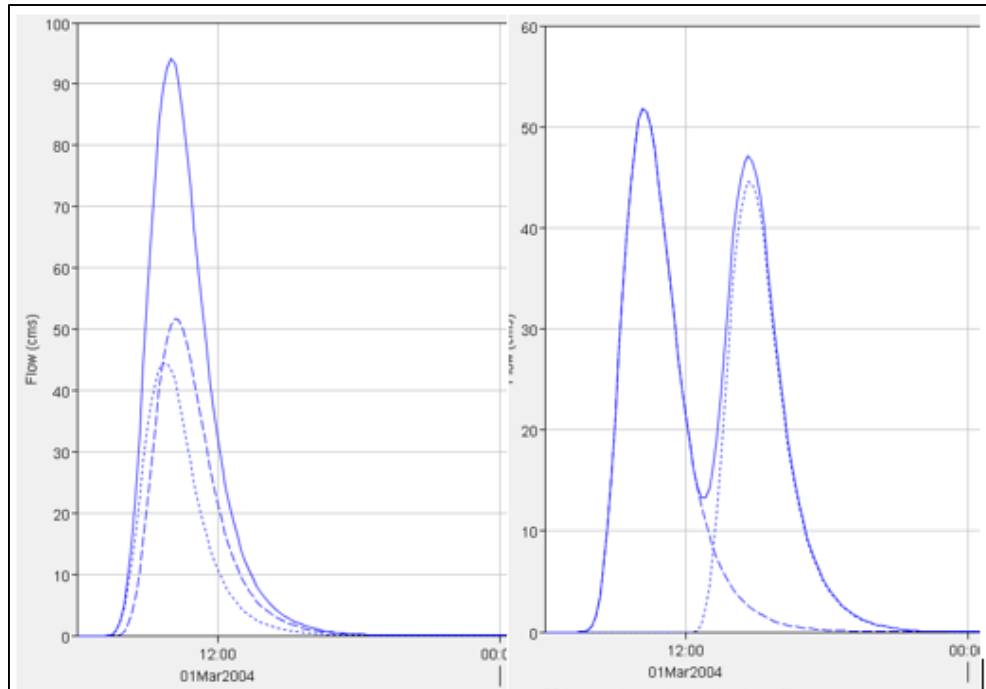


Figura 4-16 Efecto de los tiempos de viaje para la superposición de hidrogramas.

4.4.3.2 Calibración por medio de un modelo hidrodinámico 2D

La comparación o calibración que se busca hacer es posible debido a que los resultados de la modelación hidrológica, y la modelación de flujo no permanente del modelo hidráulico 2D comparten hidrogramas como respuesta en cualquier punto del sistema.

Los hidrogramas en los puntos iniciales (condiciones de frontera) del modelo hidráulico 2D provienen del modelo hidrológico, por lo cual en estos puntos deben ser totalmente coincidentes; sin embargo, a medida que el flujo se transita hacia aguas abajo del sistema los métodos de tránsito de los modelos hidrológico e hidráulico difieren generando tiempos de arribo distintos. La comparación consiste en verificar que los hidrogramas producidos por el modelo hidrológico lleguen al mismo tiempo que los generados por el modelo hidráulico 2D.

Los ajustes producto de la calibración se realizan sobre el modelo hidrológico puesto que el modelo hidráulico resuelve las ecuaciones de Saint-Venant encontrando el tiempo entre hidrogramas como un resultado de la simulación; mientras que para el modelo hidrológico este tiempo consiste en un dato de entrada por el usuario. Por lo anterior, el esquema de las ecuaciones de Saint-Venant representa de mejor manera el tránsito de caudales que el esquema del modelo hidrológico.

El procedimiento a seguir para realizar esta calibración consiste en computar hidrogramas al inicio y al final de cada tramo de tránsito a través del modelo hidráulico no permanente 2D; para esto es necesario encontrar las ubicaciones del modelo hidráulico que corresponden con el inicio y fin de los tramos en el modelo hidrológico. En general estas ubicaciones corresponden con la ubicación de las estaciones de medición o de confluencias.

Con base en los hidrogramas computados al inicio y al final de cada tramo se calcula el tiempo entre caudales pico. Este valor, independiente de la atenuación a la cual se haya dado lugar, corresponde

al tiempo de tránsito para dicho tramo. Un ejemplo de esto, obtenido del caso de estudio se presenta en el numeral 5.4.1.

4.5 ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES

En este capítulo se abarcarán las temáticas de la determinación y optimización de la curva guía de los embalses, en las cuales se construye la curva guía del sistema a partir de diferentes aproximaciones de optimización. Así mismo, se lleva a cabo la modelación de la operación de embalses con la curva guía seleccionada con el fin de comprobar sus bondades, teniendo como criterio de comparación los volúmenes de exceso y de déficit que se presentan en los periodos húmedos y secos respectivamente, utilizando distintos escenarios de simulación.

Los resultados de este análisis corresponden con la curva guía para la operación de embalses optimizada y los caudales liberados por el embalse a través de la regulación para que sean posteriormente objeto de simulación hidráulica.

4.5.1 Determinación de la curva guía de un embalse

En este capítulo se exponen las metodologías seleccionadas para la construcción de la curva guía. Se proponen, fundamentalmente, tres tipos de metodologías para la determinación de la curva guía: metodologías del cálculo regresivo o del balance hídrico (desarrollada por CEH-ECI), y las metodologías por volúmenes de reserva y espera, y por medio de métodos de optimización. La selección de la mejor alternativa estará en función del embalse que se estudie, por lo cual se documentan las tres metodologías con sus respectivas variaciones.

4.5.1.1 Uso del aplicativo para determinar curvas guía CEH-ECI

El aplicativo desarrollado por el centro de estudios hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería (CEH-ECI) tiene como objetivo la elaboración de la curva guía para la operación de un embalse a nivel mensual a partir de insumos básicos como datos de series hidrológicas históricas (Precipitación, Caudales, Evaporación y/o Infiltración) e información básica sobre el embalse como cotas, áreas y volúmenes.

El cálculo de las curvas guías se lleva a cabo mediante la aplicación de la ecuación de balance hídrico, por medio de la cual se operan (Suma o resta) ciertas variables involucradas como las variables hidrológicas y de demandas, obteniendo para cada registro de datos utilizado y para cada periodo de tiempo analizado ciertos niveles en el embalse. (Empresa de Acueducto y Alcantarillado E.S.P de Bogotá - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2008)

La ecuación para determinar los volúmenes y niveles con que se debe contar en cada mes es la siguiente:

$$V_{f \text{ mes anterior}} = V_i - (A - D) * N * 0.0864$$

Donde,

V_f = volumen al final del mes anterior (Mm^3)

V_i = volumen al final del mes actual (Mm^3)

$A = \text{afluencias medias en el mes actual} \left(\frac{m^3}{s} \right)$

$D = \text{demandas medias en el mes actual} \left(\frac{m^3}{s} \right)$

$N = \text{número de días del mes actual}$

Esta ecuación consiste en un cálculo regresivo de los volúmenes mensuales necesarios para garantizar el suministro de agua requerido del embalse. El cálculo está orientado a encontrar el volumen al final del mes anterior necesario para suplir las demandas del mes, teniendo en cuenta las afluencias y el volumen esperado al final del mes actual.

De esta manera, una vez se cuente con los registros de caudales que alimentan el embalse y las demandas que se exigen del mismo, la curva guía se calcula siguiendo los siguientes pasos. Estos pasos se encuentran detallados en el (US Army Corps of Engineers, 2013)

1. Cargar las series hidrológicas históricas de las cuales se dispongan, como mínimo se deben ingresar las series de caudales.
2. Llevar a cabo un análisis estadístico teniendo la posibilidad de determinar ciertos parámetros de las series cargadas como: media aritmética, coeficiente de asimetría, desviación estándar, varianza, valor máximo, valor mínimo, coeficiente de variación. y coeficiente de correlación.
3. Cargar los datos sobre el embalse concerniente a niveles, áreas y volúmenes.
4. De manera opcional, es posible generar una serie sintética mediante el modelo de Thomas & Fiering partiendo de los datos estadísticos calculados en el paso número dos. Esto con el fin de generar otros escenarios para analizar la operación del embalse.
5. Definir las demandas del sistema, las cuales pueden ser constantes o variables para los diferentes meses.
6. Definir los niveles de confianza con los cuales se quieren generar la curva guía.
7. Finalmente, se genera la curva guía.

4.5.1.2 Metodología basada en volúmenes de reserva y de espera

Esta metodología consiste en la determinación de las necesidades de almacenamiento y de abastecimiento para cada mes del mes de manera independiente. El cálculo de las necesidades se realiza a nivel mensual para cada mes por separado; esto quiere decir que no se tienen en cuenta los resultados de los meses adyacentes, sino que el cálculo está basado únicamente en los registros históricos de cada mes y una proyección a condiciones extremas de los mismos. Como insumo principal para el método se requieren las series máxima y mínima que representen los volúmenes máximos y mínimos de aportaciones al embalse que pueden presentarse bajo un análisis probabilístico.

A grandes rasgos, la metodología se desarrolla de la siguiente manera:

- Se estiman los volúmenes de reserva y de espera para cada mes
- Se calculan los niveles correspondientes a los volúmenes encontrados para cada mes según la curva nivel-almacenamiento del embalse

- Se relacionan los niveles de espera y los niveles de reserva para determinar una curva guía conjunta

Debido a que en general se cuenta con un número limitado de datos, 24 años en el caso de estudio, los volúmenes máximos de reserva o de espera que se calculen a partir de estos estarán asociados a un periodo de retorno igual al número de años de registro (24 años). Por lo anterior, en los procedimientos que se llevan a cabo para determinar estos volúmenes se utiliza la generación de series sintéticas con el fin de ampliar el número de datos y poder obtener volúmenes asociados a periodos de retorno más altos (e.g. Tr 100 años). Para que exista consistencia en los datos, es necesario que se genere la misma cantidad de series sintéticas tanto para el análisis de caudales mínimos (volúmenes de reserva) como para el análisis de caudales máximos (volúmenes de espera). El procedimiento detallado se explica en las siguientes secciones.

- Generación de series sintéticas mediante el modelo de Thomas & Fiering.

Dentro de las metodologías para la generación sintética de eventos hidrológicos se encuentra el modelo de Thomas & Fiering el cual mediante una serie de registros históricos como caudales puede extenderlos partiendo del principio del fenómeno de persistencia el cual indica que es más probable que un caudal bajo sea seguido por otro caudal bajo debido al efecto de almacenamiento, ya que después de un periodo seco tanto el nivel del río como el nivel freático son bajos, las depresiones y almacenamientos superficiales están vacíos provocando que ante un evento de altas precipitaciones no se produciría un caudal de gran magnitud. (Monsalve Sáenz, 1995)

La ecuación del modelo se expresa como:

$$q_{i,j} = \bar{X}_j + \frac{\rho_{i,j-1} * S_j}{S_{j-1}} (q_{i,j-1} - \bar{X}_{j-1}) + Z_{i,j} * S_j * \sqrt{1 - (\rho_{i,j-1})^2}$$

Donde:

\bar{X}_j : Corresponde a la media de los caudales históricos para el mes j bajo consideración.

\bar{X}_{j-1} : Media de los caudales históricos para el mes $j-1$ bajo consideración.

$\rho_{i,j-1}$: Coeficiente de correlación de primer orden entre los valores en meses consecutivos.

S_j : Desviación estándar de los caudales históricos para el mes j bajo consideración.

S_{j-1} : Desviación estándar de los caudales históricos para el mes $j-1$ bajo consideración.

$q_{i,j}$: Caudal en el mes j del año i de la secuencia de caudales generados.

$q_{i,j-1}$: Caudal en el mes $j-1$ del año i de la secuencia de caudales generados.

$Z_{i,j}$: Variable aleatoria normalmente distribuida aplicada al mes j del año i .

4.5.1.2.1 Volúmenes de reserva (análisis de caudales mínimos).

Dentro de la operación de embalses es necesario asegurar ciertos volúmenes de almacenamiento con el objetivo de poder garantizar un caudal mínimo aguas abajo en épocas de altas temperaturas y con poca precipitación ya que los caudales de los cauces disminuyen considerablemente. A este volumen se le denomina volumen de reserva. (CVC - Universidad del Valle)

Para determinar este volumen es necesario calcular el volumen de déficit de agua como la diferencia entre el caudal mensual mínimo que debe garantizarse en el cauce (aguas abajo del embalse) y el

caudal no regulado que ingresa al embalse. El caudal mínimo mensual aguas abajo del embalse se puede establecer como la suma del caudal ecológico y el caudal de demanda (Suministro de agua potable, riego, generación de energía). La ecuación que representa el volumen de déficit se define como: (CVC - Universidad del Valle)

$$Q_{\text{mínimo}} = Q_{\text{ecológico}} + Q_{\text{Demanda}}$$

$$V_{\text{deficit}} = (Q_{\text{mínimo}} - Q_{\text{noRegulado}}) * T$$

Donde:

V_{deficit} : Déficit de volumen para garantizar el caudal mínimo en épocas secas (Mm³)

$Q_{\text{mínimo}}$: Caudal mensual mínimo (m³/s)

$Q_{\text{noRegulado}}$: Caudal promedio mensual que ingresa al embalse (m³/s)

T : Periodo de tiempo de un mes (s)

Una vez se cuentan con los resultados de estos volúmenes para cada mes, se procede a realizar una curva de duración con el objetivo de determinar los valores de volúmenes de reserva mensual asociado a una probabilidad de ocurrencia de la curva.

4.5.1.2.2 Volúmenes de espera (análisis de caudales máximos)

Como segundo objetivo principal en la gestión de embalses, se busca la amortiguación de eventos de crecientes almacenando aquellos volúmenes de agua los cuales podrían provocar emergencias aguas abajo en el cauce en épocas de altas precipitaciones. Por esta razón es necesario contar con un volumen libre dentro del embalse denominado volumen de espera para garantizar la seguridad en estas épocas lluviosas.

Con el objetivo de calcular el volumen de espera es necesario determinar el volumen de excesos de agua como la diferencia entre el caudal mensual máximo que ingresa al embalse y el caudal máximo que puede liberar este por medio de sus estructuras de descarga sin ocasionar un desbordamiento del cauce teniendo presente las afluencias por otros cauces. Por este motivo hay que estimar tanto el valor de caudal máximo que puede fluir en el canal natural y los valores de caudales que pueden aportar otras corrientes al cauce presentes entre el embalse y la localización aguas abajo del embalse a proteger de las crecientes (localización de interés). El volumen de excesos se describe como.

$$Q_{\text{Max salida}} = Q_{\text{maxcauce}} - Q_{\text{afluencias}}$$

$$V_{\text{exceso}} = (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{Max salida}}) * T$$

Donde

V_{exceso} : Exceso de volumen de agua para almacenar (Mm³)

Q_{maxcauce} : Caudal máximo que puede soportar la sección del cauce aguas abajo del embalse (m³/s)

$Q_{\text{afluencias}}$: Caudal promedio mensual que aportan corrientes al cauce principal entre el embalse y la localización de interés (m³/s)

Q_{entrada} : Caudal promedio mensual máximo que ingresa al embalse (m³/s)

T : Periodo de tiempo de un mes (s)

Una vez se cuentan con los resultados de estos volúmenes para cada mes, se procede a realizar una curva de duración con el objetivo de determinar los valores de volúmenes de espera mensual asociado a una probabilidad de ocurrencia de la curva.

4.5.1.2.3 Curva guía

Cuando se tiene la información mensual correspondiente tanto para el volumen de espera y de reserva, es necesario encontrar su correspondencia en niveles de altura del embalse. Para esto es necesario contar con información de las curvas de almacenamiento para los embalses ya que estas relacionan el volumen de almacenamiento de la estructura en función de su altura. De esta manera, se encuentran los niveles asociados a los volúmenes de reserva y de espera para cada mes del año.

Es necesario precisar que la curva de niveles de espera determinada es una limitación máxima de niveles en el embalse, puesto que mayores volúmenes de espera también satisfacen la condición de caudales máximos. Volúmenes de espera más grandes están asociados a niveles de espera más bajos; por consiguiente, existe un número de curvas por debajo de la seleccionada como nivel de espera que también satisfacen la condición de caudales máximos.

De manera similar ocurre con la curva de niveles mínimos o de reserva. Existe un número de curvas, por encima de la definida como reserva, que representando volúmenes de reserva mayores también satisfacen la condición de caudales mínimos aguas abajo del embalse.

Dicho lo anterior se puede inferir que, las curvas contenidas por encima de los niveles de reserva y por debajo de los niveles de espera, satisfacen las condiciones de caudales máximos y de mínimos simultáneamente.

Para seleccionar una de las curvas guía que satisfacen el sistema, se puede considerar una combinación de las necesidades de volúmenes de espera y reserva por medio de factores de ponderación. Para el caso de estudio se dio igual importancia a los eventos de inundaciones y a los de estiaje, por lo cual se realizó un promedio entre los niveles de espera y reserva (i.e. factor de ponderación 0.5).

4.5.1.3 Curva guía por medio de métodos de optimización

Debido a la incertidumbre que pueden generar las metodologías trabajadas anteriormente para la determinación de la curva guía, en el presente numeral se hace referencia a los métodos de optimización que pueden aplicarse para encontrar una curva guía que se adapte más a un sistema de embalses específico.

Se trabajaron dos metodologías principalmente para encontrar una curva guía óptima. La primera de ellas hace referencia a la estructuración de una función objetivo, la cual se apoya en unas variables de decisión para encontrar el mejor arreglo de estas.; y en la segunda se realiza un procedimiento utilizando el método de Montecarlo, el cual se basa en la aleatoriedad de los resultados para encontrar un valor óptimo.

- **Curva Guía por medio de optimización mediante función objetivo**

Este método de optimización consiste en crear una función objetivo alrededor del problema a resolver con la finalidad de hacer óptimo el valor de esta función a través de las variables que la explican.

En el caso de embalses, la determinación de la curva guía puede determinarse a partir de la definición de una función objetivo y la determinación de los parámetros que la hacen óptima; los parámetros serán entonces, los valores del nivel de la curva guía en los doce meses del año. En otras palabras, se tiene doce variables de decisión.

En este documento se utilizarán los métodos más simples de optimización, estos consisten en encontrar el mínimo o el máximo de una función real, generando variaciones sobre las variables de optimización a la vez que se tienen en cuenta las restricciones para estos valores.

Es posible encontrar en la bibliografía una gran gama de métodos de solución para una función objetivo; sin embargo, debido a su facilidad y accesibilidad, la función objetivo se optimizará mediante el algoritmo genético incorporado en el Solver de Microsoft Excel. Para conocer más sobre algoritmos genéticos se recomienda consultar la bibliografía dispuesta en internet, puesto que existe una gran variedad de artículos teóricos y prácticos acerca de esta técnica de optimización.

Para resumir, para optimizar por medio de una función objetivo (FO) simple, se debe plantear la ecuación de la FO, determinar las variables de decisión y seleccionar un algoritmo de solución para encontrar el valor mínimo o máximo según la función planteada. Un ejemplo de una función objetivo y sus variables involucradas se presentan en el caso de estudio (numeral 5.5.1.3).

- **Curva Guía por medio de optimización mediante Método de Montecarlo**

Como segundo método de optimización se propuso trabajar con el método de Montecarlo. El objetivo del método de Montecarlo es la generación de números aleatorios de modo que estos puedan evaluarse y determinar el valor objetivo a través de un número elevado de simulaciones.

Estrictamente los algoritmos de Montecarlo (Markov Chain Monte Carlo (MCMC)) se explican así:

“Se considera ahora una densidad objetivo $p_o(x)$ que no se puede muestrear directamente con otros métodos. Los métodos MCMC son métodos de generación de números aleatorios que producen una cadena de Markov con densidad invariante $p_e(x)$ igual a la densidad objetivo $p_o(x)$. En otras palabras, MCMC genera una secuencia de muestras $\{x_t\}_{t=0}^N$, correlacionadas entre ellas, cuya distribución converge a la densidad deseada $p_o(x)$. Los métodos MCMC tienen una estructura común que podría resumirse en dos pasos:

1. Generación: se propone un punto candidato x' como posible nuevo paso x_t . En general, este paso depende de la muestra generada en el instante anterior x_{t-1} .
2. Decisión: se acepta el punto candidato x' con una determinada probabilidad. Dicha probabilidad de aceptación $A(x_{t-1}, x')$ puede ser siempre uno, como en los algoritmos Gibbs Sampling y Slice sampling, o distinta de uno. Si el punto es aceptado $x_t = x'$ sino, con probabilidad $1 - A(x_{t-1}, x')$, se considera $x_t = x_{t-1}$.” (Cádiz, 2011)

4.5.2 Uso del software HEC-ResSim

El objetivo del software HEC-ResSim en la metodología presentada es la modelación de la gestión de embalses, en la cual se destaca la implementación de la curva guía calculada para los embalses a través de una simulación a nivel diario utilizando distintos escenarios que representan hidrologías críticas tanto de años secos como de años húmedos.

Esta etapa es quizá la más importante de la metodología puesto que se aprecia el comportamiento que tienen los cuerpos de agua frente a los escenarios extremos planteados, verificando así la bondad de la curva guía seleccionada frente a un evento con intervalos de tiempo diario.

Como se mostrará en los resultados de la simulación, aun cuando la curva guía contempla eventos extremos en su creación, durante la operación día a día del embalse se presentan situaciones en las cuales se sobrepasan los límites superiores e inferiores del embalse. Estas situaciones generan lo que denominaremos “fallos” sobre las reglas de la operación de embalse; estos fallos se cuantificarán en pro de conseguir una optimización de la curva guía del sistema.

La operación de embalses puede ser muy compleja en función de la cantidad de embalses en un área y los objetivos que debe atender cada uno de ellos. Por lo tanto, el análisis para sistemas más complejos debe contemplar reglas más restrictivas y optimizaciones más complejas; se recomienda para este tipo de cosas consultar las referencias bibliográficas (K.D.W. Nandalal, 2007) (US Army Corps of Engineers, 2013)

En el capítulo se mostrarán los aspectos más importantes de la simulación, como lo son los insumos necesarios (entre los cuales se encuentra la curva guía), y los procesos para la creación y ejecución del modelo.

Los procesos fundamentales llevados a cabo para la construcción del modelo de gestión de embalses se explican en detalle en el ANEXO3_GUIA_HECRESSIM. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Sin embargo, se resaltarán los puntos más importantes en los numerales que acontecen.

4.5.2.1 Información base para la simulación

El software HEC-ResSim es una herramienta de análisis en la cual muchos de los procesos se resuelven mediante modelos hidrológicos agregados; muchos de los cuales han sido contemplados previamente en la simulación hidrológica continua.

Es importante mencionar que HEC-ResSim, al ser un software creado por el Hydrologic Engineering Center (HEC), comparte muchas características y formatos con el resto de paquetes de simulación de HEC. Esta influencia se hace evidente en el formato de recepción de algunos parámetros del programa como lo son las series de tiempo, las cuales deben ingresarse por medio de la plataforma DSS (*Data Storage System*).

Dicho lo anterior, se listan los insumos básicos necesarios para realizar el montaje de un modelo de gestión de embalses en HEC-ResSim.

- *Mapas base*: algunos de los mapas base como las cuencas hidrográficas o las estaciones de medición de lluvias y caudales son opcionales para su visualización como imágenes de fondo. Sin embargo, es necesario cargar un archivo de formas (*Shapefile*) con información de los alineamientos de cauce; esto debido a que estos no serán únicamente utilizados para su visualización sino para definir los alineamientos en el interior del programa.
- *Series de caudales observados*: estos se utilizarán para comparar la respuesta del sistema modelado con los datos que se hayan registrado en puntos de control del sistema (e.g. estaciones de medida, confluencias o cuerpos de almacenamiento).

- *Series de caudales de entrada:* estas series se ingresarán en sitios puntuales de la simulación, serán utilizadas como las fuentes únicas de entradas de agua al sistema puesto que este no contempla procesos de precipitación. Las series de entrada deben ingresarse por medio de la plataforma DSS y son usualmente el resultado de una simulación hidrológica de un año hidrológico (SMA), aunque es posible crear la serie manualmente en el DSS para importarla a HEC-ResSim.
- *Parámetros de tránsito en los tramos de la red:* en general estos coinciden con los utilizados en la simulación hidrológica. En el caso de estudio se utiliza el método de Muskingum para el tránsito en los tramos de la red, y por consiguiente se utilizan los parámetros previamente calibrados en la modelación hidrológica.
- *Curvas Elevación-Área-Almacenamiento de los embalses:* estas curvas se ingresan como una tabla y deben representar la geometría de cada uno de los cuerpos de almacenamiento a modelar.
- *Niveles máximo y muerto del embalse:* se deben ingresar los límites de operación de los embalses, es decir la cota de embalse muerto y la cota máxima que posee el cuerpo de agua (generalmente más alta que la cota de vertedero).
- *Curva guía para la operación del embalse:* este es un insumo fundamental para la simulación de embalses, este generará distintos resultados en la simulación en función de sus propiedades. Una curva guía puede favorecer uno u otro propósito de un embalse según sea construida.
- *Reglas o restricciones del embalse:* estas reglas pueden estar en función de las descargas, de los niveles o de otras variables y condicionarán el comportamiento del cuerpo de almacenamiento.

4.5.2.2 Caracterización física de los embalses

La caracterización física de los embalses hace referencia a la forma o geometría del embalse. Su caracterización se lleva a cabo por medio de las curvas Elevación-Área-Almacenamiento. Un ejemplo de estas curvas se presenta en la Figura 4-17.

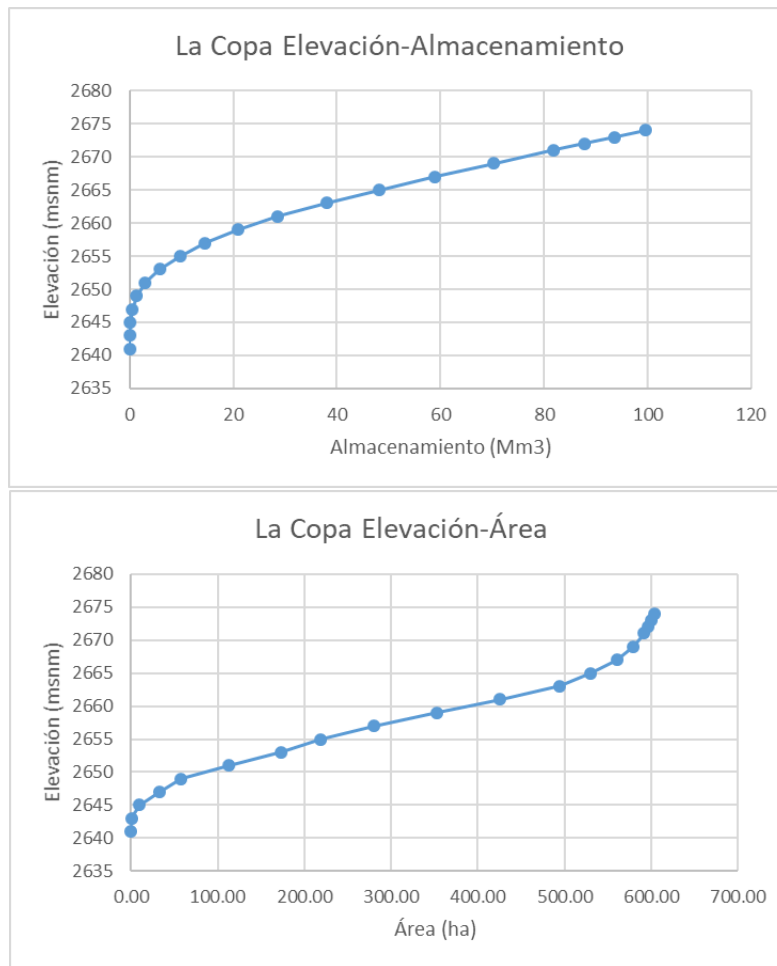


Figura 4-17. Curvas elevación-almacenamiento y elevación-área

Así mismo, la caracterización física de los embalses hace referencia a las estructuras hidráulicas que se encuentren sobre la presa del embalse con el objetivo de descargar agua del mismo. Estas estructuras se ingresan al sistema por medio de curvas de calibración (elevación-Caudal) y se encuentran discriminadas entre:

- Salidas controladas: hace referencia a la curva que representa las salidas de caudal a través de estructuras hidráulicas que se pueden controlar, tales como compuertas o válvulas.
- Salidas no controladas: hace referencia a la curva que representa las salidas de caudal a través del vertedero de excesos. Estas salidas no pueden ser reguladas y serán función únicamente del nivel del agua sobre la cresta del vertedero.

Esta información se ingresa en las características físicas del embalse (ver ANEXO3_GUIA_HECRESSIM; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

4.5.2.3 Tipos de embalses según su función

La operación de embalses dependerá de su función. La construcción de embalses, se realiza en general con motivos de conservación o de control de inundaciones. Entre los motivos de

conservación se encuentra la generación de energía hidráulica, la irrigación, el suministro de agua, el suministro industrial, el control de salinidad, la recreación y la preservación del medio ambiente.

Los embalses pueden tener uno o varios de estos objetivos. El parámetro que define si el comportamiento de los niveles del embalse atiende uno o varios de dichos objetivos es la curva objetivo o la curva guía del sistema. La determinación de esta se desarrolló en el numeral 4.5.1.

4.5.2.4 Definición de zonas de operación dentro del embalse

Las zonas de operación de un embalse definen el tipo de comportamiento que debe adoptar el mismo en función de la elevación de su superficie de agua en cada instante. Como ejemplo, si un embalse se encuentra en zona de control de inundaciones, este debe reducir sus niveles en la medida de lo posible para evitar la descarga por el vertedero de excesos y posibles inundaciones aguas abajo; por el contrario, si un embalse se encuentra en la zona de conservación, este debe almacenar la mayor cantidad de agua posible con el objetivo de satisfacer los requerimientos de caudal aguas abajo del mismo a largo plazo.

Las zonas de operación estarán confinadas por una o varias elevaciones del embalse. Se utilizarán varias elevaciones cuando los límites de la zona varíen, por ejemplo, en función del mes del año. En general, la curva guía dividirá las zonas de conservación y de control de inundaciones de un embalse sencillo, como se muestra en la Figura 4-18.

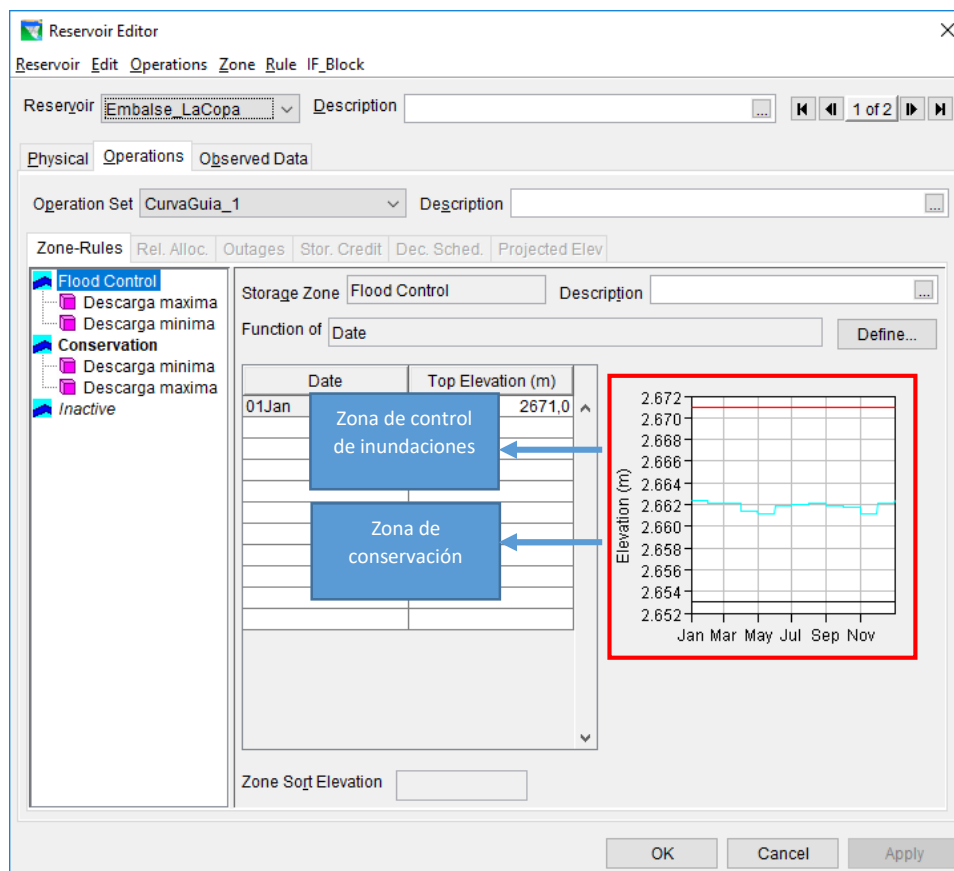


Figura 4-18. Zonas de operación de un embalse

Estos datos se ingresan a través de las características de los embales y su operación (ver ANEXO3_GUIA_HECRESSIM).

4.5.2.5 Definición de reglas de operación por zona

Las reglas de operación se refieren a restricciones del sistema en cuanto a descargas, niveles y otras variables de estado del sistema. Estas reglas pueden ser muy diversas y están en función de los objetivos del embalse y de las características geográficas, económicas, poblacionales, entre otras, del sitio de estudio.

En el caso de estudio se implementarán reglas para controlar la descarga máxima y mínima del embalse, que corresponden con las reglas más sencillas disponibles. Para saber más acerca de los tipos de reglas consultar (US Army Corps of Engineers, 2013).

Esta información se ingresa a través de las características de los embales y su operación (ver ANEXO3_GUIA_HECRESSIM).

4.5.2.6 Definición de alternativas o escenarios de simulación

En la simulación de gestión de embalses a través de HEC-ResSim es posible generar varios escenarios con un mismo modelo físico de embalses (configuración de nodos de una red, tramos de red y cuerpos de almacenamiento). Las características que diferencian cada escenario de simulación son las series de tiempo, las condiciones iniciales y la curva guía usada para cada embalse.

Con esto se quiere decir que un escenario de simulación puede diferenciarse de otro simplemente al ingresar las series de caudal de entrada de un año de registro en un escenario y de un año distinto en el otro. Así mismo, es posible variar el nivel, la descarga y otras variables iniciales de un embalse como punto de partida de la simulación. Finalmente, es posible también generar varias curvas de operación de un embalse de modo que puedan ser puestas a prueba a través de distintos escenarios.

La información de escenarios de simulación se ingresa a través de la definición de alternativas en la ventana principal del programa (ver ANEXO3_GUIA_HECRESSIM).

4.5.2.7 Corrida y análisis de resultados

La información necesaria para una corrida del sistema de gestión de embalses corresponde a los tiempos e intervalos de simulación del modelo. Es posible crear distintas corridas del sistema, estas estarán caracterizadas por las fechas para la ejecución del modelo y la selección de los escenarios o alternativas.

Cuando se ha ejecutado el modelo es posible generar resultados en cualquiera de los elementos físicos que componen el sistema. Sin embargo, en el presente documento se presta especial atención a los resultados generados sobre los cuerpos de almacenamiento. Entre los resultados para los embalses se tienen tres tipos de gráficas o *Plots* y una tabla de decisiones de operación.

Gráficas o *Plots* del sistema

De las gráficas que se pueden generar como resultado, aquella que comprende la mayor cantidad de información es la gráfica *Plot Operations* (Figura 4-19). Para ejemplificar el análisis realizado sobre las gráficas respuesta de la simulación, se toman como ejemplo las gráficas generadas para el caso de estudio; sin embargo, este análisis puede extenderse a los resultados de cualquier

simulación realizada siempre y cuando se tengan en cuenta las características particulares propias de cada sistema modelado.

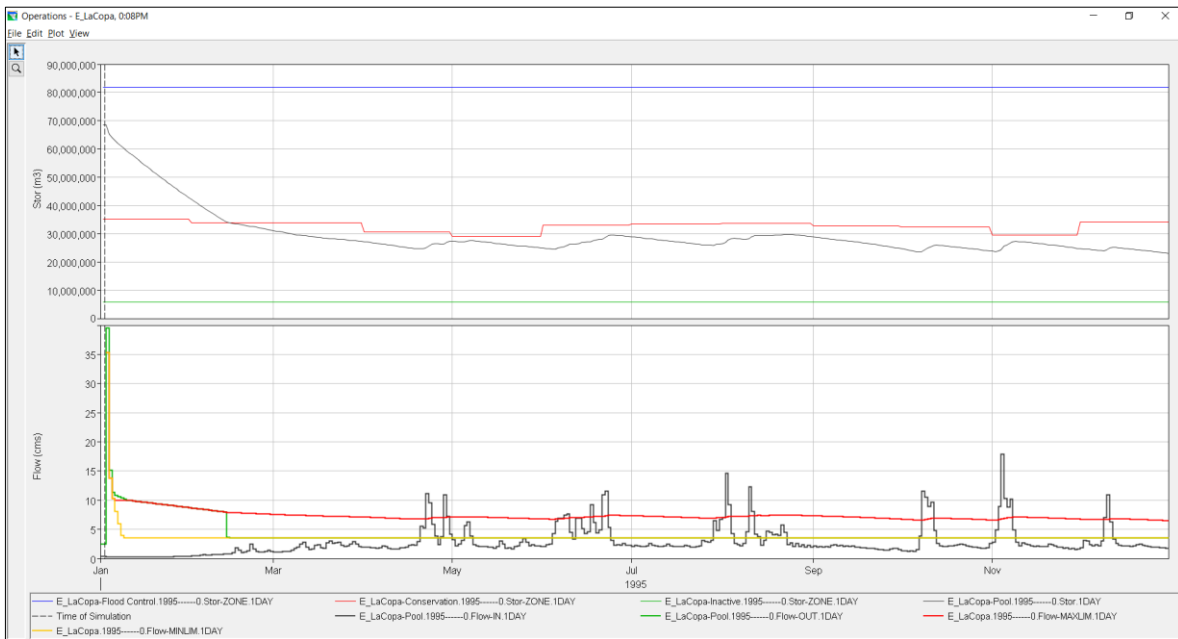


Figura 4-19. Gráfica Plot Operations para un embalse modelado

Iniciando con la parte superior, en la Figura 4-20 se observan los resultados de la simulación de un año hidrológico. Lo primero que se debe observar en esta imagen son las líneas azul, roja y verde, puesto que estas representan los límites de las zonas de operación del embalse definidas previamente.

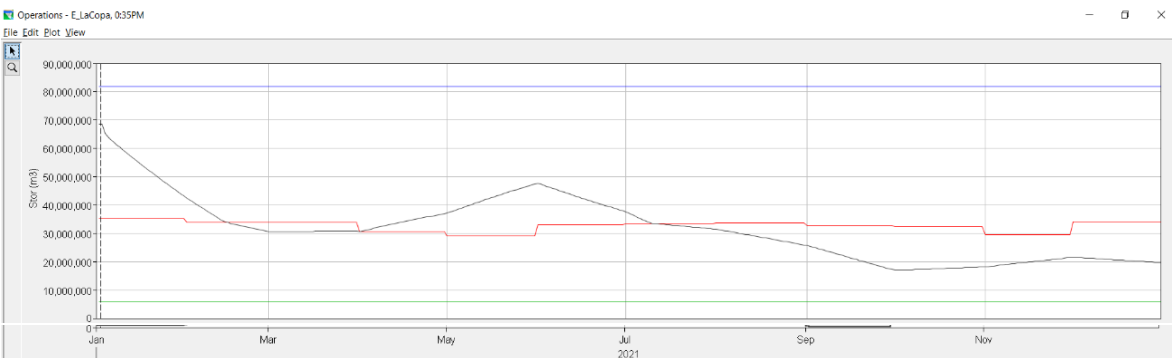


Figura 4-20. Parte superior de la gráfica Plot Operations

La línea azul representa la cota máxima del embalse o límite superior de la zona de control de inundaciones, la línea roja representa la curva guía del sistema y por lo tanto los niveles objetivo del embalse en todo momento, y la línea verde representa la cota del embalse muerto, por debajo de la cual no se pueden realizar descargas.

Las zonas de operación del embalse están definidas por estas líneas, de modo que para estas tres líneas existen fundamentalmente dos zonas de operación. La zona comprendida entre la cota máxima y la curva guía la denominaremos “zona de control de inundaciones”, mientras que la zona

comprendida entre la cota del embalse muerto y la curva guía la denominaremos “zona de conservación”.

Los comportamientos del embalse en estas zonas, de acuerdo al funcionamiento del HEC-ResSim, son simples de comprender: cuando el nivel del embalse (línea negra) se encuentre en la zona de control de inundaciones éste liberará la mayor cantidad de caudal físicamente posible respetando las reglas de operación; así mismo, cuando el nivel del embalse se encuentre en la zona de conservación éste liberará la menor cantidad de caudal posible respetando igualmente las reglas de operación. Esta sencilla operación genera que el nivel del embalse tienda a hacerse igual al nivel definido por la curva guía tan rápido como le sea posible.

Cada zona tiene sus propias reglas de operación que, en su forma más simple, corresponden a restricciones de descargas máximas y mínimas; pero que pueden ser tan complejas como el caso de estudio lo requiera. En cuanto a lo mencionado como “mayor cantidad de caudal físicamente posible”, esta está determinada por la capacidad de descarga de las estructuras hidráulicas en el embalse (e.g. compuertas, válvulas y vertederos) ingresada como curvas de calibración.

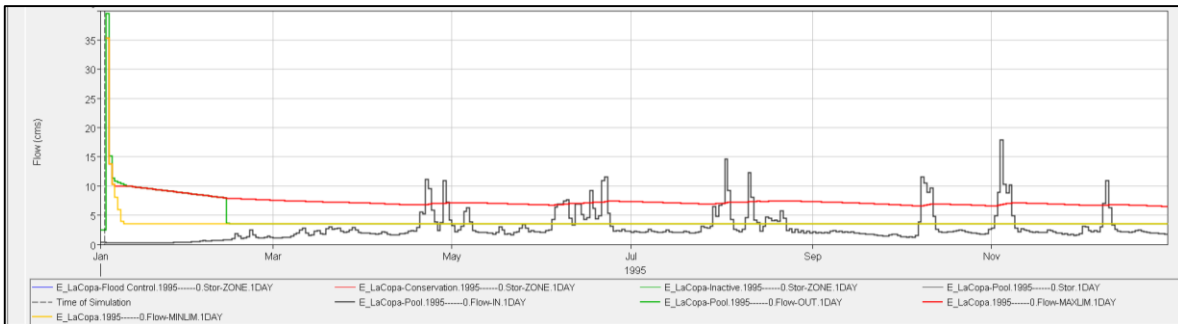


Figura 4-21. Parte inferior de la gráfica Plot Operations

En cuanto a la parte inferior de la gráfica (Figura 4-21) se observan los caudales que ingresan al embalse (línea negra), la restricción de la descarga mínima (línea amarilla), la restricción de la descarga máxima (línea roja) y la descarga realizada por el embalse tras la regulación generada con las condiciones impuestas (línea verde).

El comportamiento de las descargas realizadas por el embalse (línea verde) se debe a las decisiones tomadas basadas en la zona de operación activa de la elevación del embalse. Observando el ejemplo se puede notar un cambio determinante en mirad de febrero, en donde se pasa de la descarga máxima (línea roja), determinada por la capacidad de descarga de las estructuras existentes, a la descarga mínima establecida. Este cambio se genera debido al cambio de zona del embalse el cual se evidencia en el punto en que se cruza la curva guía en la parte superior de la gráfica (Figura 4-20).

Tabla del flujo de decisiones

De manera complementaria a las gráficas, y de una manera más estricta, se presentan la tabla de decisiones para las descargas (*Release decision report*). Este reporte es de principal interés para el análisis puesto que presentan las decisiones y los resultados para cada intervalo de tiempo de la simulación que se llevó a cabo.

Release Decision Report: E_LaCopa

File

Alternative: 2011-----:2011
Run: 2011-----0

Lookback: 02 Jan 2011, 0000
Start Time: 03 Jan 2011, 0000
End Time: 31 Dec 2011, 0000
Rule Key: GC=Guide Curve, RO=Release Override, EO=Elevation Override, ZB=Zone Boundary

Date-Time	E_LaCopa						
	Active Zone Elev (m)	Net Inflow (cms)	E_LaCopa Active Rule Flow (cms)	-Dam at Rio_tuta Active Rule Flow (cms)	-Dam at Rio_tuta L&O Uncontrolled Flow (cms)	-Controlled Outlet Active Rule Flow (cms)	-Uncontrolled Outlet Uncontrolled Flow (cms)
02Jan2011, 24:00	2,668.70	3.04	2.50	2.50	Unctrl 0.00	2.50	Unctrl 0.00
03Jan2011, 24:00	1 Flood Control 2,668.13	2 2.92	3 GC:DescargaMax 40.50	MinRelease 40.50	Unctrl 0.00	MinRelease 0.00	Unctrl 40.50
04Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.91	2.37	GC:DescargaMax 16.19	MinRelease 16.19	Unctrl 0.00	MinRelease 0.00	5 Unctrl 16.19
05Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.76	1.98	GC:DescargaMax 12.03	GC:DescargaMax 12.03	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 0.00	Unctrl 12.03
06Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.62	1.87	GC:DescargaMax 10.95	GC:DescargaMax 10.95	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 1.02	Unctrl 9.93
07Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.48	1.77	GC:DescargaMax 10.75	GC:DescargaMax 10.75	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 2.82	Unctrl 7.93
08Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.34	1.39	GC:DescargaMax 10.56	GC:DescargaMax 10.56	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 4.64	Unctrl 5.93
09Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.20	1.06	GC:DescargaMax 10.37	GC:DescargaMax 10.37	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 6.48	Unctrl 3.89
10Jan2011, 24:00	Flood Control 2,667.06	0.86	GC:DescargaMax 10.17	GC:DescargaMax 10.17	Unctrl 0.00	GC:DescargaMax 8.34	Unctrl 1.83
11Jan2011, 24:00	Flood Control 2,666.91	0.72	GC:MaxLimit 10.00	GC:MaxLimit 10.00	Unctrl 0.00	GC:PhysMaxCap 9.84	Unctrl 0.16
12Jan2011, 24:00	Flood Control 2,666.76	0.62	GC:MaxLimit 9.93	GC:MaxLimit 9.93	Unctrl 0.00	GC:PhysMaxCap 9.93	Unctrl 0.00
13Jan2011, 24:00	Flood Control 2,666.62	0.54	GC:MaxLimit 9.87	GC:MaxLimit 9.87	Unctrl 0.00	GC:PhysMaxCap 9.87	Unctrl 0.00
14Jan2011, 24:00	Flood Control 2,666.47	0.48	GC:MaxLimit 9.81	GC:MaxLimit 9.81	Unctrl 0.00	GC:PhysMaxCap 9.81	Unctrl 0.00
15Jan2011, 24:00	Flood Control 2,666.32	0.42	GC:MaxLimit 9.75	GC:MaxLimit 9.75	Unctrl 0.00	GC:PhysMaxCap 9.75	Unctrl 0.00

Figura 4-22. Tabla Release decision report generada para un sitio de embalse

El primer renglón de la tabla está resaltado en un color más oscuro y corresponde siempre con las condiciones iniciales de simulación (lookback). Este siempre mantendrá los valores indicados, aun cuando no sean totalmente lógicos (e.g. en el ejemplo se inició con una cota del embalse de 2668.70 m, es decir, 70 cm por encima de cota de vertedero; y una descarga no controlada de 0 m³/s, lo cual es imposible para esta cota).

En los renglones que acontecen se presentan los distintos pasos de tiempo simulados. Para cada uno de estos intervalos se presentará la siguiente información numerada como se encuentra en la Figura 4-22.

1. la elevación del embalse en el intervalo y la zona a la cual esta corresponde
2. El caudal total de entrada al embalse
3. El caudal regulado de salida del embalse y la zona que determina las reglas a aplicar. Si el texto que indica la zona está en negrita, entonces este indicará el nombre de la regla que está restringiendo el flujo. En caso de no estar en negrita, quiere decir que la descarga calculada para la elevación del embalse no excede las reglas de la zona y por lo tanto no está siendo restringida por estas; en su lugar está descargando lo mínimo (*MinRelease*) o lo máximo (*MaxLimit*) que permiten las estructuras hidráulicas (válvulas, compuertas, vertederos u otros).
4. Descarga controlada realizada de acuerdo a flujo de decisiones.
5. Descarga no controlada realizada de acuerdo a flujo de decisiones.

4.5.3 Escenarios de simulación: Análisis para periodos hidrológicos húmedos y secos

Como se ha mencionado previamente, el análisis de la operación de embalses de un sistema sencillo debe considerar los propósitos de control de inundaciones y de conservación (abastecimiento, irrigación, recreación, suministro industrial, control de salinidad, preservación ambiental, entre otros).

Por tal razón, es importante que el análisis se lleve a cabo tanto en épocas de estiaje como en épocas de lluvias intensas, esto se explica principalmente con el hecho de que algunos de los objetivos del embalse tienen un impacto mayor sobre la operación de embalses cuando se presenta un periodo de caudales altos, mientras que otros objetivos tienen un mayor impacto sobre la operación en periodos secos.

Consecuentemente, y teniendo en cuenta que la escala de tiempo tenida en cuenta para el análisis de gestión de embalses en el presente documento es la escala anual, se deben generar escenarios tanto para años húmedos como para años secos.

De esta forma, es posible garantizar que una única curva guía, acompañada con unas reglas de operación definidas provee el mejor comportamiento del embalse para suplir los objetivos para los cuales fue construido; sin importar qué tipo de hidrología entre al mismo.

4.6 VERIFICACIÓN EN EL MODELO HIDRÁULICO 1D Y 2D

4.6.1 Verificación en el modelo hidráulico 2D

La verificación en el modelo hidráulico bidimensional consiste en el tránsito de los hidrogramas generados a partir de la regulación de los cuerpos de agua una vez ajustadas las curvas guía. La modelación hidráulica se realiza bajo el mismo esquema planteado en el numeral 4.4.1. El objetivo de la verificación hidráulica es confirmar las bondades de la curva guía y por consiguiente de la regulación conseguida a través de los embalses, en época de crecientes.

Puntualmente se verifica la extensión de las manchas de inundación generadas por la modelación bidimensional. También es posible verificar una mejora en las velocidades del cauce, las alturas de lámina

de agua, capacidades de arrastre de sedimentos u otros parámetros hidráulicos en función de las necesidades del proyecto. A manera de ejemplo, se muestran los resultados de mancha de inundación sin regulación y con ésta para el caso de estudio.

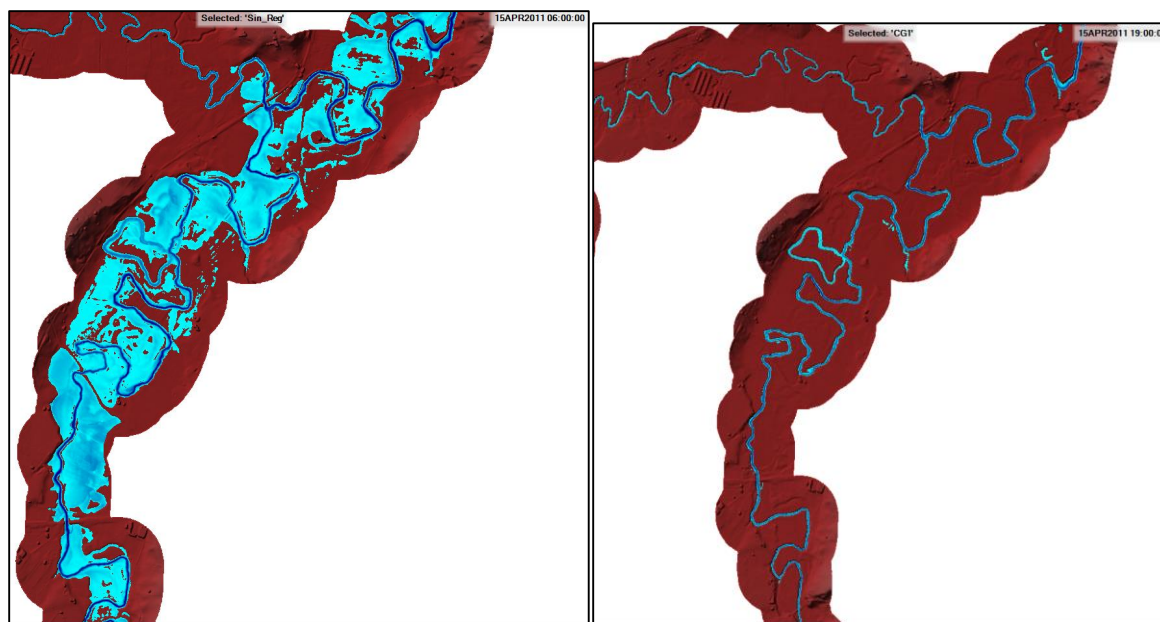


Figura 4-23. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 15 abril 2011

5. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio del presente documento corresponde con el embalse La Copa que se encuentra ubicado en la cuenca alta del río Chicamocha y regula las aguas que, tras su descarga, formarán parte del río Tuta. El río Tuta, aguas abajo del embalse La Copa, presenta una confluencia con el río Jordán en las coordenadas 1094483E-1122862N (Magna Sirgas Origen Bogotá).

La historia del embalse se remonta a 1955, cuando la firma ESCOBAR, VENEGAS Y RODRÍGUEZ preparó para el instituto ELECTRAGUAS un informe en el que se recomendó construir la presa sobre el río Tuta con motivo de prevenir inundaciones en el valle.

En 1963 la caja agraria realizó un estudio titulado “Sistema de riego Alto Chicamocha y Firavitoba”, y en el mismo año, el manejo y administración del sistema de drenaje pasó de ELECTRAGUAS al INCORA.

En 1964 la firma RESTREPO Y URIBE LTDA ejecutó para el INCORA el diseño de obra para el proyecto de Adecuación de Tierras de los Valles del Alto Chicamocha y Firavitoba. Con base en estos estudios se construye inicialmente la represa La Playa. (presentación Usochicamocha).

EN 1974 y 1975 el INCORA con asesoría de la firma israelí TAHAL CONSULTING ENGINEERS LTD. realizó el estudio de factibilidad del proyecto Boyacá – Valles del Alto Chicamocha y Firavitoba. En 1976 e proyecto pasó a ser administrado y operado por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT.

En 1987 la firma RESTREPO Y URIBE LTDA hace una revisión de los diseños previos de la represa. Posteriormente, en 1990 se inicia la construcción del embalse La Copa con los propósitos de control de sedimentos, control de crecientes y suministro de agua en épocas de estiaje y para el distrito de riego. El embalse se construyó con una capacidad de 60 millones de metros cúbicos y un área en planta de 880 hectáreas.

Como se mencionó, este embalse fue construido con el objetivo de mitigar las inundaciones sobre el valle del alto Chicamocha; no obstante, posteriormente se constituye el distrito de riego, el cual adiciona el objetivo de suministro de agua a los agricultores.

Sin embargo, a falta de una gestión del embalse, la operación del mismo fue tomada por el distrito de riego Usochicamocha, el cual opera el embalse sin tener unos patrones de operación específicos, que pueden ser evaluados y optimizados para aumentar los beneficios obtenidos a partir de la operación del embalse.

5.1 INFORMACIÓN NECESARIA BÁSICA

En el siguiente numeral se muestra la información que se hizo necesaria para llevar a cabo el estudio presentado como caso de aplicación de la metodología. En adelante, con la información presentada en este numeral se mostrarán los procesos llevados a cabo para transformar la información base en un modelo de gestión de embalses predictivo.

5.1.1 Información topográfica

Dentro de la información topográfica suministrada por CORPOBOYACA se cuenta con un modelo digital de elevaciones (DEM) el cual ayuda a describir la zona de estudio incluyendo los cauces objeto de modelación, sus respectivas bancas y las llanuras de inundación. Esta información nace a partir del complemento de levantamientos topo batimétricos convencionales con información recogida mediante vuelos LIDAR. Adicionalmente se cuenta con una recopilación en modo de fichas en las cuales se registran la información correspondiente de estructuras como puentes presentes en los cauces de análisis.

Adicionalmente para la modelación hidrológica es necesario contar con un modelo digital de terreno que abarque un área mayor (correspondiente a la totalidad de las cuencas aportantes a los cauces a modelar) con el objetivo de delimitar y caracterizar las subcuencas con las que se va a trabajar. Esta información se obtuvo por medio de la página <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/> siguiendo el proceso explicado previamente. En la Figura 5-19 se puede observar una imagen del modelo digital de terreno utilizado.

5.1.2 Información Climatológica e hidrométrica

Con el propósito de realizar un adecuado análisis hidrológico de la zona de estudio se hace uso de información hidroclimatológica e hidrométrica suministrada por el instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales (IDEAM). Para el caso de estudio, se recopiló información de datos históricos medidos por (2) estaciones climatológicas agrometeorológicas, (4) climatológicas ordinarias, (6) climatológicas principales, (19) estaciones pluviométricas y (6) pluviográficas. Finalmente se cuenta con los registros de (3) estaciones limnigráficas y (3) limnimétricas.

En la Tabla 5-1 se presenta el listado de las estaciones de tipo meteorológicas consultadas, de las cuales, se extraen datos de precipitación total y de precipitación máxima en 24 horas y en la Figura 5-1 se presenta un mapa con su ubicación espacial. Estas tablas contienen información propia de la estación como su código, ubicación, elevación y fecha de instalación.

Tabla 5-1 Estaciones meteorológicas consultadas.

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PERIODO
35070310	PG	TEATINOS	SAMACÁ	525	7322	3250	jun-57
35070010	PG	RAMIRIQUI	RAMIRIRQUÍ	526	7319	2360	abr-81
24030820	PG	LOS AZULEJOS	TUTA	539	7312	2780	ene-59
24030350	PG	DUITAMA	DUITAMA	550	7302	2540	dic-57
24030120	PG	PESCA	PESCA	531	7304	2678	ago-80
24010830	PG	SAN PEDRO DE IGUAQUE	CHÍQUIZA	538	7327	2985	feb-71
24010630	PM	ARCABUCO	ARCABUCO	545	7326	2600	feb-74
24010840	PM	PANELAS	MOTAVITA	538	7323	3195	ago-80
24010850	PM	LA PALMA	GÁMBITA	552	7323	2110	ago-80
24010870	PM	PALERMO	PAIPA	553	7311	2200	dic-70
24030140	PM	SIACHOQUE	SIACHOQUE	530	7315	2720	jul-57
24030230	PM	IZA	IZA	536	7258	2470	ago-58
24030310	PM	COMBITA	CÓMBITA	537	7319	2820	sep-60
24030380	PM	SOTQUIRA	SOTAQUIRÁ	545	7314	2860	feb-64
24030400	PM	STA ROSA D VITERBO	STA ROSA DE VITERBO	552	7259	2690	ene-64
24030410	PM	TIBASOSA	TIBASOSA	544	7300	2500	may-92
24030420	PM	PILA LA FCA	SARACÁ	531	7318	2873	may-92
24030450	PM	EL ENCANTO	OICATÁ	536	7319	2645	may-92
24030500	PM	COL DPTAL AGROP	CHIVATÁ	533	7316	2900	ene-70
24030510	PM	EL CEREZO	PAIPA	531	7318	2900	abr-71
24030530	PM	SAN ANTONIO	TUTA	541	7314	2580	abr-71
24030540	PM	FIRAVITOBA	FIRAVITOBA	539	7258	2486	abr-71
24030770	PM	EL GARROCHO	TOCA	537	7307	2836	mar-74
24030800	PM	CASA AMARILLA	TOCA	532	7309	3200	mar-74
24030840	PM	ANTENA TV LA RUSIA	DUITAMA	553	7304	3650	ago-80

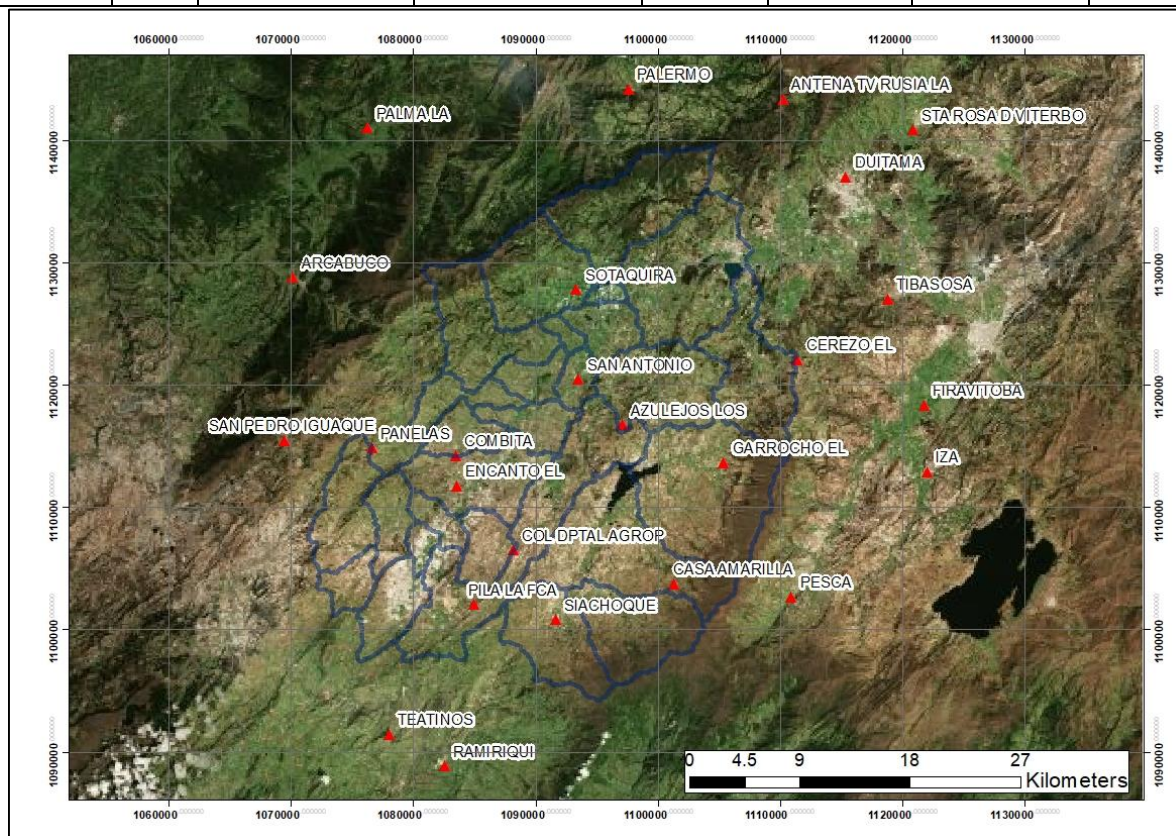


Figura 5-1 Ubicación Espacial de Estaciones Pluviométricas.

Por otra parte, en la Tabla 5-2 se identifican las estaciones de tipo climatológicas mediante las cuales se obtiene para el proyecto la información de precipitación y del parámetro climatológico denominado evaporación. Adicionalmente en la Figura 5-2 se identifican espacialmente la ubicación de cada una de estas estaciones.

Tabla 5-2 Estaciones climatológicas en el caso de estudio

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PERIODO
2405350	CP	ANDALUCÍA	DUITAMA	554	7303	3265	sep-76
24035340	CP	APTO A LLERAS C	SOGAMOSO	540	7258	2500	ene-74
24035130	CP	UPTC	TUNJA	533	7321	2690	feb-62
24025030	CP	LA SIERRA	DUITAMA	558	7309	2700	feb-67
24015300	CP	VILLA DE LEIVA	VILLA DE LEYVA	539	7332	2215	dic-79
24015220	CP	VILLA DEL CARMEN	SAMACÁ	530	7329	2600	feb-68
35085020	CO	RONDON	RONDON	521	7312	2120	dic-70
35075030	CO	VILLA LUISA	RAMIRIQUÍ	525	7320	2200	jul-81
24035040	CO	LA COPA	TOCA	534	7312	2700	dic-91
24015280	CO	GAMBITA	GAMBITA	556	7320	1900	may-74
24035170	AM	TUNGUAVITA	PAIPA	554	7306	2470	ene-68
24035120	AM	SURBATA BONZA	DUITAMA	548	7304	2485	mar-44
24035300	ME	SAN CRISTOBAL	TOCA	535	270	jul-71	

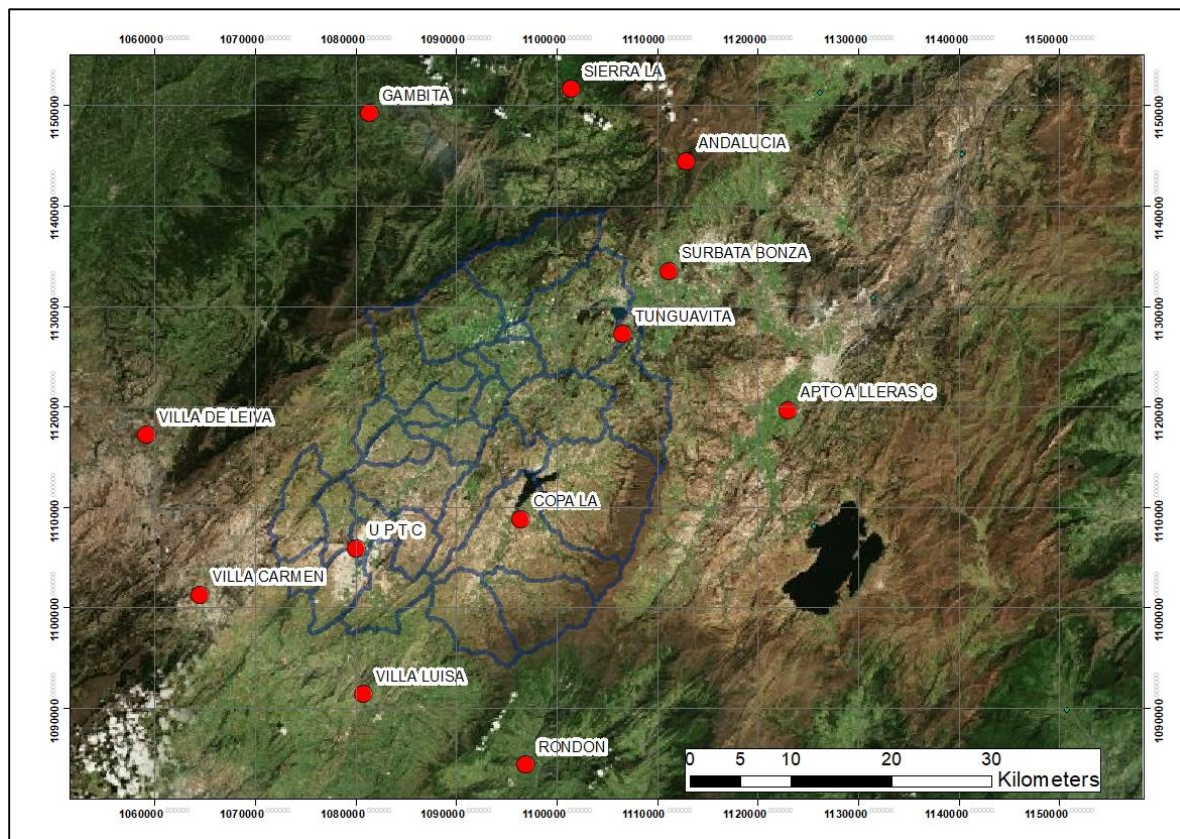


Figura 5-2 Ubicación Espacial de Estaciones Climatológicas.

Finalmente, las estaciones consultadas para obtener la serie de registro de caudales dentro del área de estudio se mencionan en la Tabla 5-3. Estos datos se utilizarán posteriormente como insumo para la

simulación hidrológica continua y para determinar caudales pico proyectados a distintos periodos de retorno a partir de análisis de frecuencias que serán utilizados en el modelo hidrológico de eventos.

Tabla 5-3. Estaciones Limnigráficas en el caso de estudio

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PERIODO
24037030	LG	EL PALO	TUTA	540	7313	2600	may-55
24037130	LG	LA REFORMA	SOTAQUIRÁ	544	7311	2522	jun-66
24015300	LG	LA SIBERIA	PAIPA	546	7306	2490	abr-71
24037020	LM	LA COPA	TOCA	537	7312	2700	abr-90
24037070	LM	MAGUNCIA	SOTAQUIRÁ	544	7312	2534	ene-64
24037090	LM	SAN RAFAEL	TUTA	542	7314	2500	ene-64
24037590	LM	LA CHORRERA	TOCA	537	7309	2700	mar-91
24037580	LM	SAN FRANCISCO	TOCA	534	7312	2700	Mar-91

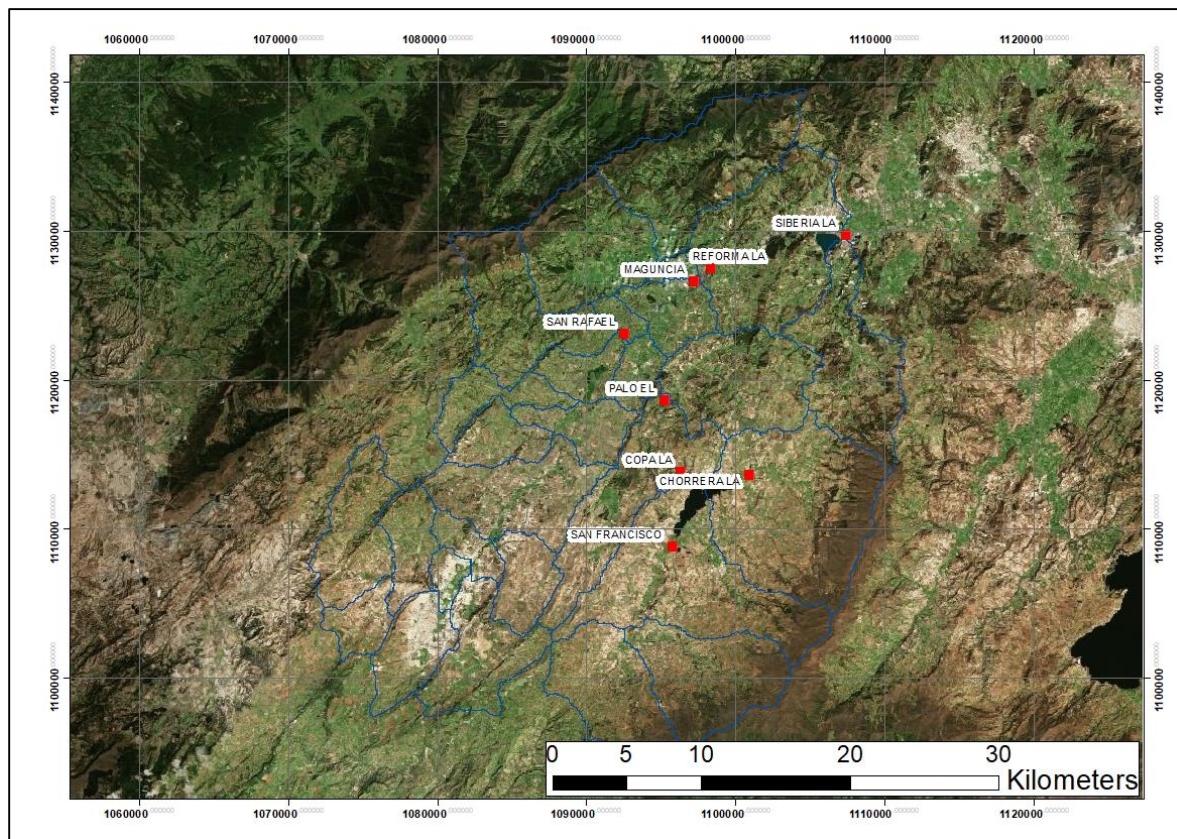


Figura 5-3 Ubicación Espacial de Estaciones Hidrométricas.

5.1.3 Información Hidráulica

Para la modelación hidráulica se hace uso de información suministrada por CORPOBOYACA dentro de las que se encuentran: Información topográfica que consiste en un modelo digital de elevaciones (DEM) el inventario fichas con información de estructuras hidráulicas en los cauces de análisis y las imágenes satelitales Landsat TM como se ha mencionado en el numeral 5.1.1; el objetivo de esta información es describir la zona de estudio incluyendo los cauces a modelar, sus respectivas bancas y las llanuras de inundación; delimitar y caracterizar subcuencas hidrográficas; y aplicar la metodología Corine Land Cover para la zonificación de las coberturas de tierra y su posterior asociación del coeficiente de Manning.

En este punto de la modelación hidráulica se cuenta con los caudales picos o hidrogramas los cuales son el resultado de la modelación hidrológica, estos caudales ingresan a los cauces principales por los afluentes de estos y como escorrentía difusa. En la modelación hidráulica, se utilizan los afluentes como puntos de entrada para ingresar la totalidad del caudal o hidrograma.

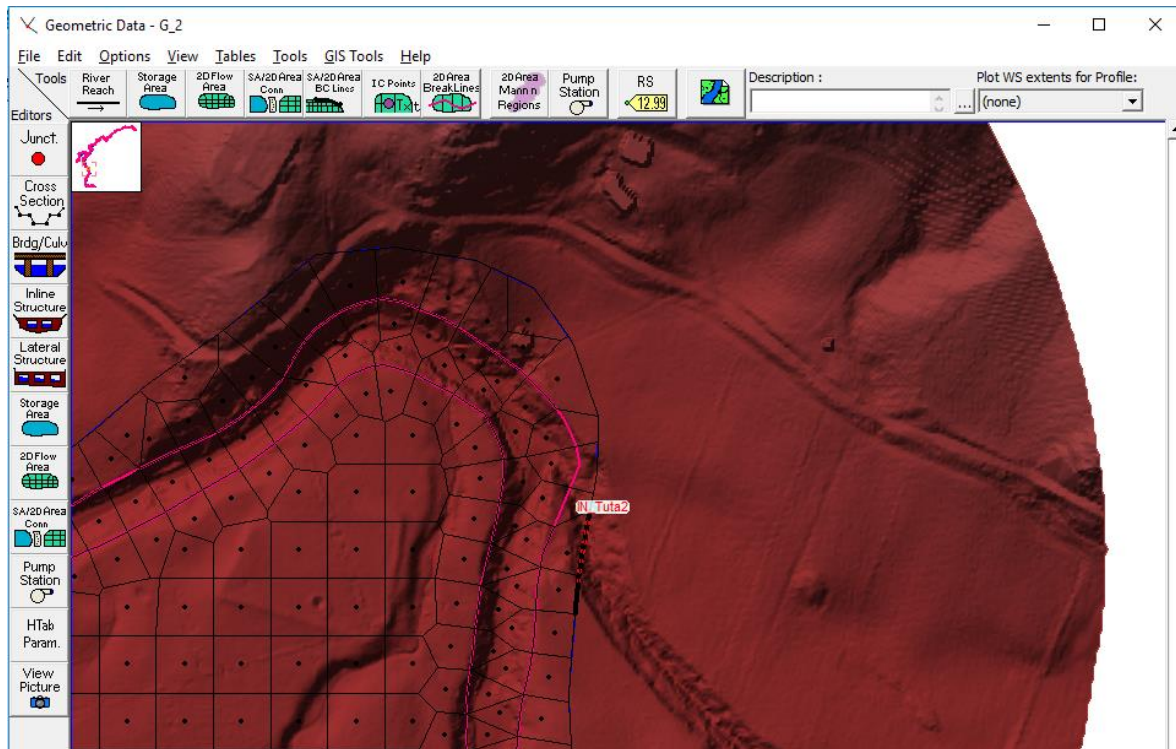


Figura 5-4. Afluente al río Tuta, condición de frontera para entrada de hidrograma

En la Figura 5-4 se observa un afluente al río Tuta, que ingresa al cauce principal. Estos puntos son seleccionados para definir las entradas por medio de las condiciones de frontera dispuestas en el software. Estas condiciones se ilustran en el ANEXO I CREACIÓN, EJECUCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO PARA EL CASO DE ESTUDIO.

En cuanto a los coeficientes de resistencia al flujo, como información base se obtuvo el archivo de formas (*shapefile*) que contiene polígonos que representa el tipo de cobertura en la zona de estudio. A estas coberturas se les asignará posteriormente un coeficiente de resistencia al flujo para ser incorporados al modelo hidráulico (ver numeral ANEXO I CREACIÓN, EJECUCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO PARA EL CASO DE ESTUDIO).

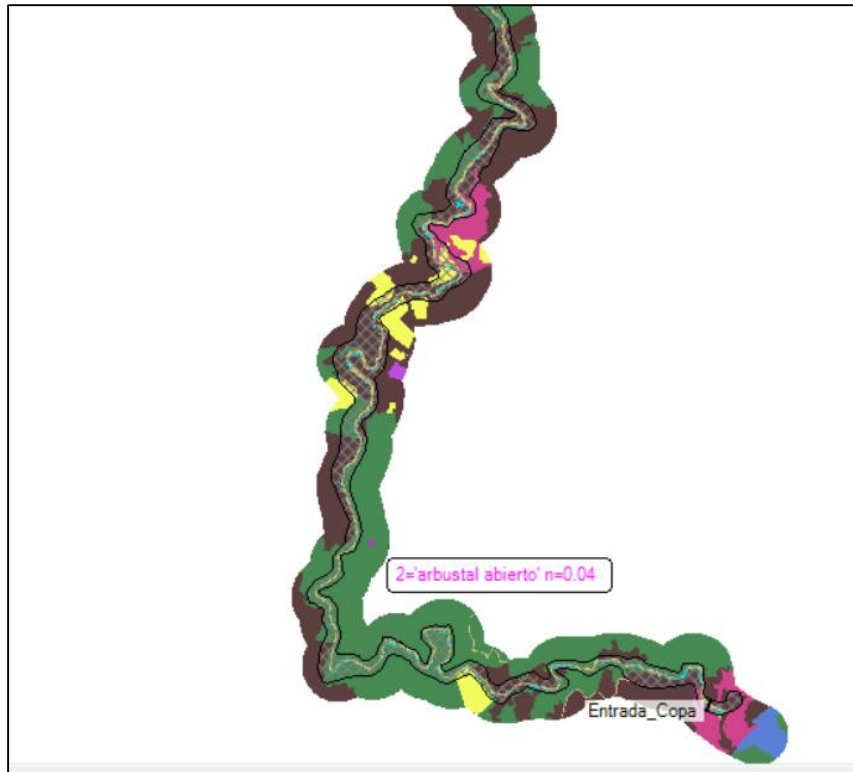


Figura 5-5. Mapa de coberturas vegetales sobre el dominio computacional del modelo 2D

5.1.4 Información Batimétrica – Embalses

Con el objetivo de calcular la capacidad de almacenamiento y el área en planta que utilizan los cuerpos de agua que se encuentran en la zona de estudio, es necesario hacer uso de información digital cartográfica y de herramientas computacionales para el tratamiento espacial de la misma (ArcGis 10.2). Por estos motivos se cuenta con archivos digitales de tipo TIN ya que resultan útiles en el procedimiento de los cálculos de áreas planimétricas, de superficie y de volumen.

En la Figura 5-6 y en la Figura 5-7 se identifican los modelos de terreno en formato TIN con los que se cuenta para el cálculo de los volúmenes de almacenamiento. Aunque el estudio de la operación de embalses solo se utiliza en el embalse La Copa, el embalse La Playa se incluye en el modelo hidrológico.

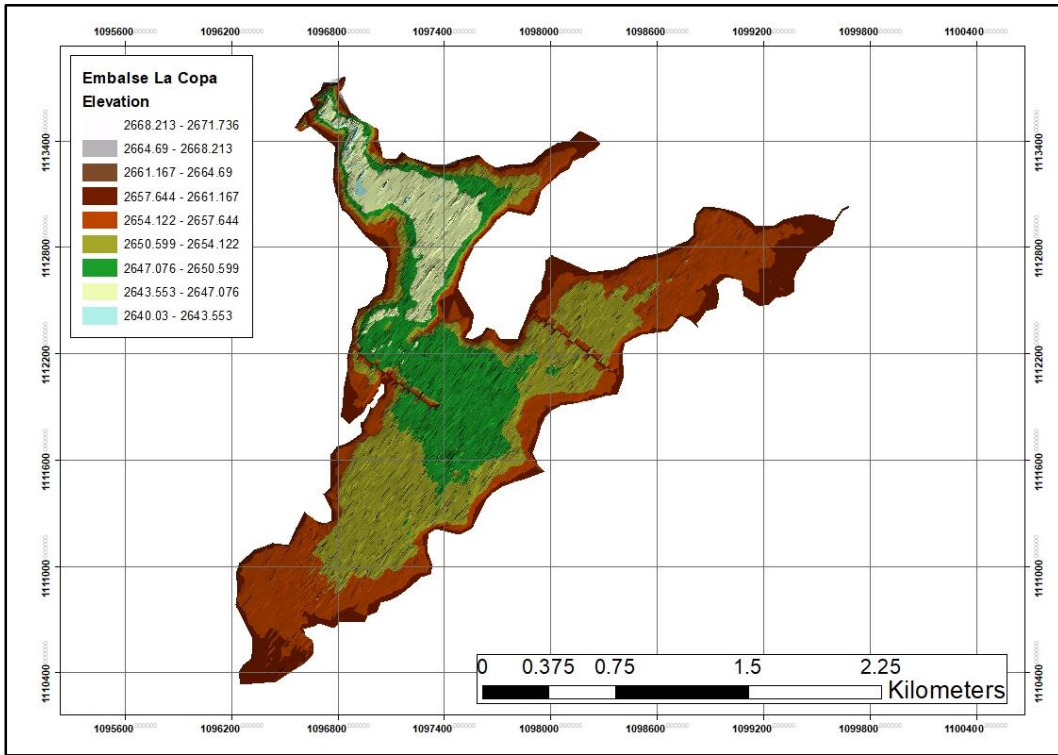


Figura 5-6 TIN Embalse La Copa.

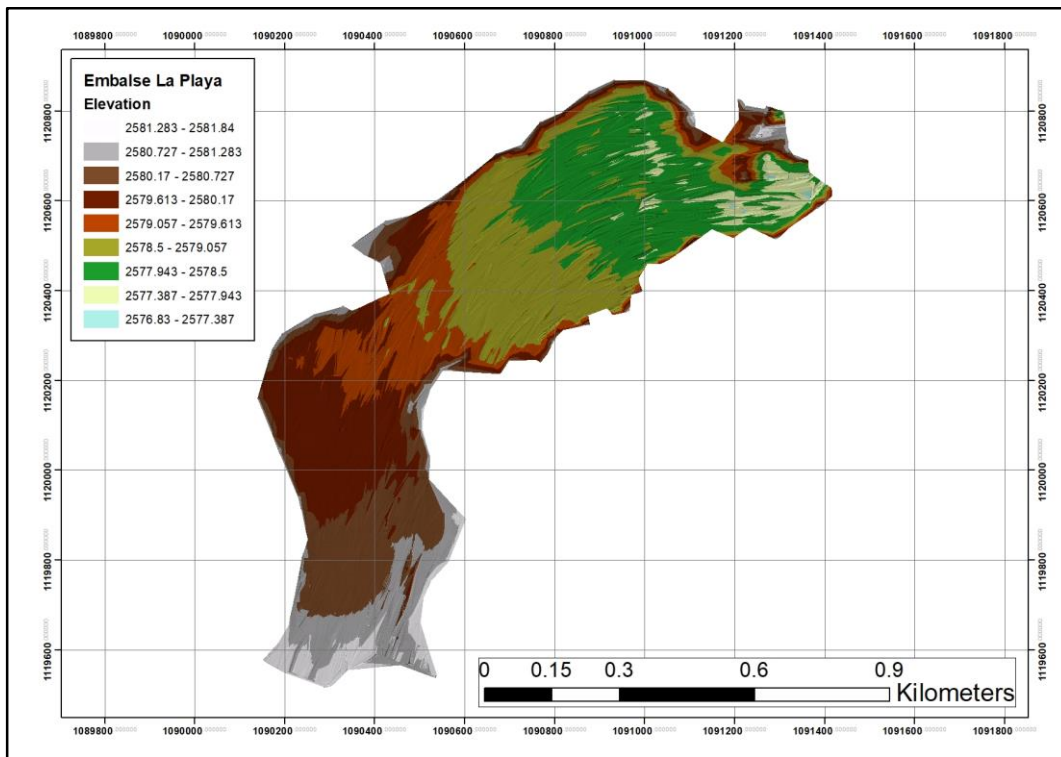


Figura 5-7 TIN Embalse La Playa.

El procedimiento mediante el cual se busca la determinación del volumen de almacenamiento se lleva a cabo por métodos indirectos en los cuales se hace necesario la creación de nuevas entidades de tipo polígono, esto con el fin de calcular el volumen a diferentes cotas solamente con los archivos tipo TIN, a partir de la plataforma ArcGIS 10.2

Partiendo de la información otorgada por la red irregular de triángulos (TIN) se determinan los niveles mínimos y máximos de elevación del terreno para cada cuerpo de agua. Se crea entonces nuevas capas de tipo polígono a las cuales se les asigna una propiedad de elevación mediante su tabla de atributos. Estas elevaciones irán variando desde el nivel inferior hasta llegar a un punto cercano al límite superior de elevación de los embalses.

Una vez se han creado los polígonos y se les ha asignado su atributo de elevación, el cálculo de la capacidad de almacenamiento se lleva a cabo mediante la herramienta de nombre *Polygon Volume (ArcToolBox > 3D Analyst Tools > Triangulated Surface > Polygon Volume)*. Esta función permite determinar el volumen comprendido entre la intersección de dos elementos los cuales, para este caso son los archivos tipo TIN y las capas de polígonos.

El resultado final de este proceso consiste en que en la tabla de atributos de los polígonos se agregan nuevos campos los cuales hacen referencia al volumen y al área superficial del embalse. En la Figura 5-8 se puede ver que un ejemplo de los resultados obtenidos para un polígono con un atributo de cota de 2663 m.s.n.m

Pol_2663				
	FID	Shape	Id	Cota
	0	Polygon	0	2663

Figura 5-8 Atributos de Elevación.

El procedimiento se repite cuantas veces se crea conveniente para tener una buena densidad de información con el objetivo de construir unas curvas de almacenamiento detalladas.

En el caso del análisis del embalse La Copa, se llevó a cabo el cálculo para un total de 19 polígonos los cuales varían en su valor de cota desde 2641 a 2671 m.s.n.m. Para el embalse La Playa el procedimiento se realiza mediante un total de 31 entidades con alturas que van desde la cota 2577 hasta la cota 2581 m.s.n.m.

Finalmente, y por medio de los resultados obtenidos se logra graficar esta información que se presenta en la Figura 5-9 para el embalse la Copa y en la Figura 5-10 para el embalse la Playa.

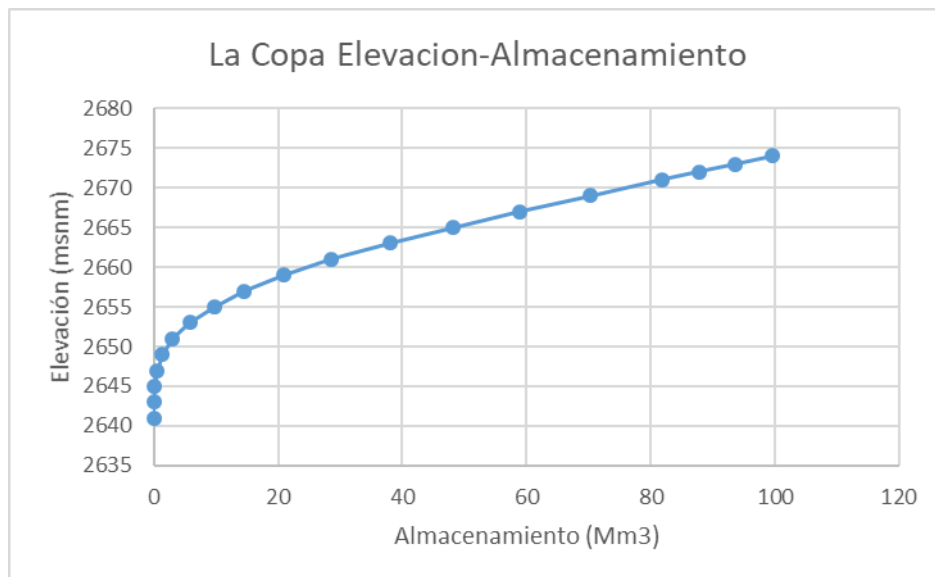


Figura 5-9 Curva de almacenamiento Embalse La Copa.

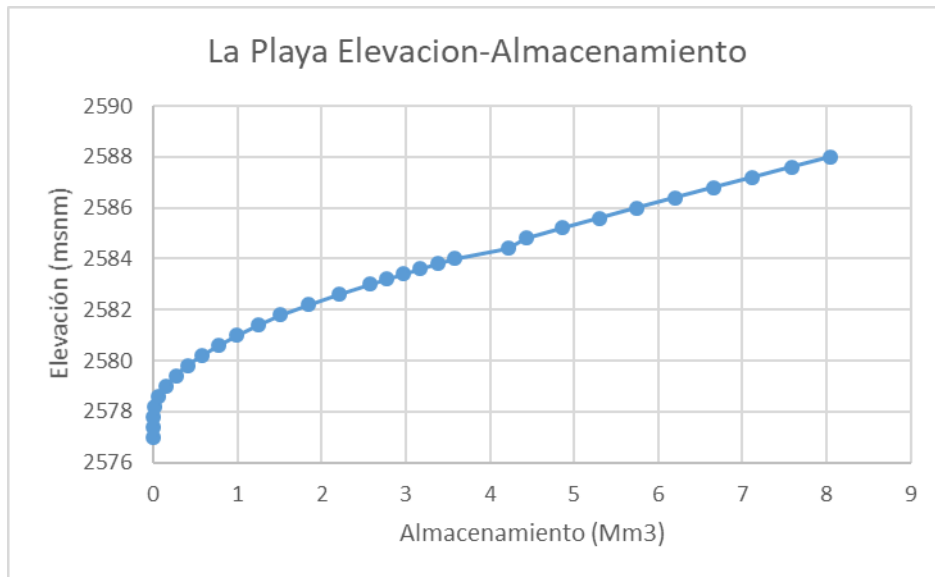


Figura 5-10 Curva de almacenamiento Embalse La Playa.

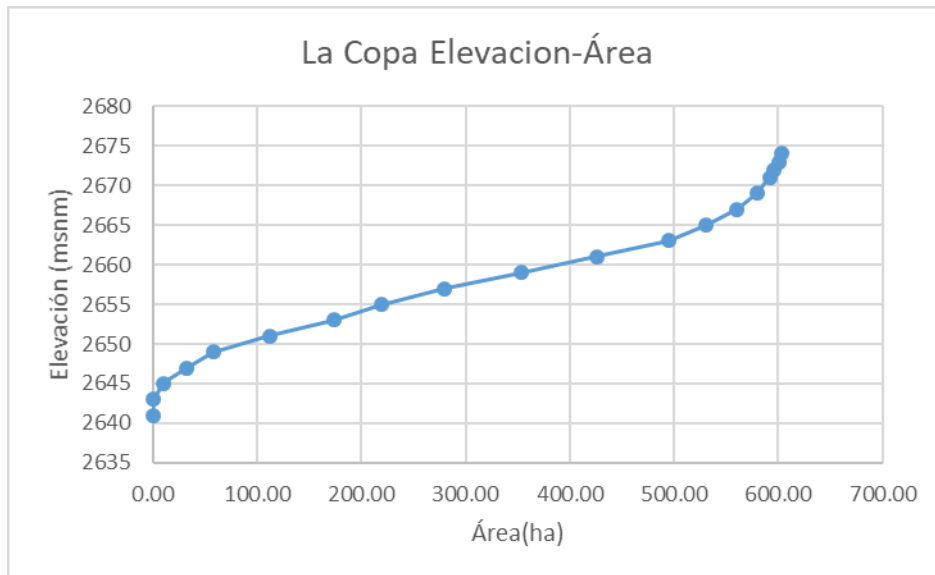


Figura 5-11. Curva Elevación – Área Embalse La Copa

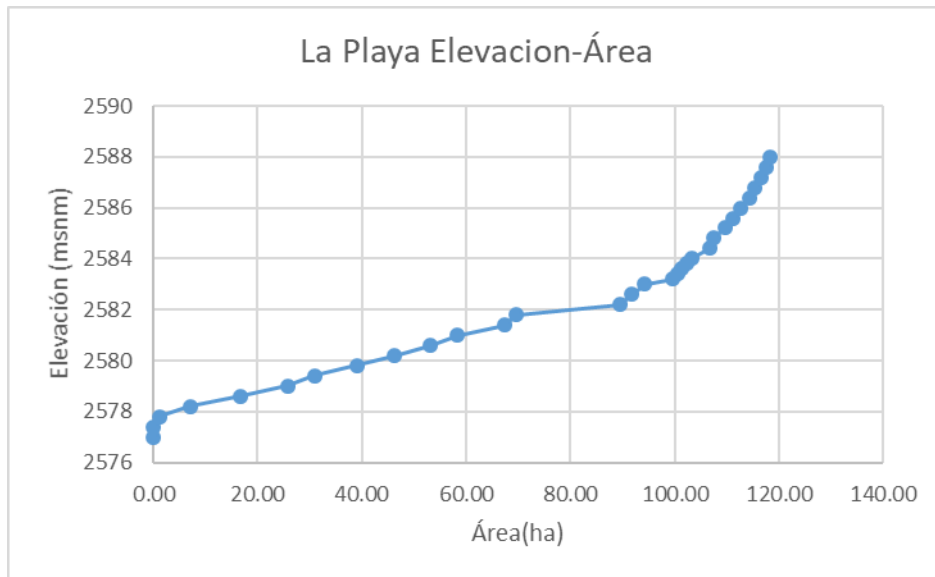


Figura 5-12. Curva Elevación – Área Embalse La Playa

5.1.5 Información de curvas de calibración

La curva de descarga controlada se obtuvo a partir del uso de la ecuación del orificio para determinar las salidas que se producen en función de la elevación de la lámina de agua sobre dicha salida.

$$Q_{orificio} = KA\sqrt{2gH}$$

Donde,

Q = caudal de salida por la descarga controlada $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

K = coeficiente de descarga

A = área del orificio (m²)

g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

H = Altura sobre el orificio, representada por los niveles del embalse (m)

Para la operación, el embalse cuenta con una válvula Howell Bunger con un diámetro característico de 42 pulgadas equivalente a un área de 0.894 m² y un coeficiente de descarga de $K=0.7$. Con estos datos se construyó la tabla de descargas controladas (Tabla 5-4).

La curva de descarga no controlada se presenta a través del vertedero de excesos ubicado en la cota 2668 msnm del embalse La Copa. Las capacidades de descarga en función de la lámina sobre el vertedero se observan igualmente en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Descargas controlada y no controlada par el embalse La Copa

Descarga La Copa		
Elevación (msnm)	Descarga Controlada (m ³ /s)	Descarga No controlada (m ³ /s)
2654	0	0.00
2655	2.771426957	0.00
2656	3.91938959	0.00
2657	4.800252299	0.00

Descarga La Copa		
2658	5.542853914	0.00
2659	6.197099071	0.00
2660	6.788581904	0.00
2661	7.332506505	0.00
2662	7.83877918	0.00
2663	8.314280871	0.00
2664	8.764021553	0.00
2665	9.19178335	0.00
2666	9.600504598	0.00
2667	9.992522	0.00
2667.9	10.33262902	0.00
2668	10.36973015	14.43
2669	10.73369045	86.62
2670	11.08570783	251.13
2671	11.42688608	514.32

5.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

5.2.1 Análisis de lluvias máximas

Para llevar a cabo un análisis de lluvias máximas se seleccionó una duración total de 180 minutos (3 horas) y de un intervalo de tiempo de 10 minutos para la discretización de los hietogramas. Esta selección de la duración de la lluvia y el intervalo de tiempo para la discretización de los hietogramas se realizó con base en lo presentado en el numeral 4.3.1.2.

5.2.1.1 Determinación del valor *M* para cada subcuenca del modelo

El valor *M* corresponde al valor promedio multianual de la precipitación máxima en 24 horas a nivel anual calculado para cada una de las subcuencas de la zona de análisis. Para determinar este valor se requieren realizar los siguientes pasos:

- Calcular el valor máximo de precipitación en 24 horas a nivel anual para cada año de registros en la estación medidora de lluvia
- Calcular el valor promedio multianual teniendo en cuenta los periodos de registro válidos para cada estación medidora de lluvia
- Espacializar los valores medios multianuales de las estaciones por medio de métodos de interpolación disponibles en las herramientas GIS
- Encontrar el valor de *M*, que corresponde al valor medio de la variable especializada (*P* max 24h) para cada una de las subcuencas del sistema. Esto se realiza por medio de un análisis zonal de la variable especializada.

5.2.1.2 Espacialización de la lluvia máxima en 24h.

Para generar la espacialización de la lluvia máxima en 24 horas es necesario como primer paso el tratamiento de la información base de las estaciones hidroclimatológicas, este tratamiento consiste en calcular las precipitaciones promedio máximas en cada una de las estaciones estudiadas. Esto se calcula promediando los valores máximos anuales para el periodo de registro. El resultado de este proceso se muestra en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Precipitación Pmax 24h promedio multianual

ESTACIÓN	Pmax 24h promedio multianual	ESTACIÓN	Pmax 24h promedio multianual.
	[mm]		[mm]
SURBATA BONZA	36.607	ARCABUCO	55.27
TUNGUAVITA	42.657	PANELAS	32.538
GAMBITA	63.293	PALMA LA	64.759
COPA LA	37.848	PALERMO	46.819
VILLA LUISA	38.806	SIACHOQUE	30.65
RONDON	58.198	IZA	41.108
VILLA CARMEN	44.063	COMBITA	37.846
VILLA DE LEIVA	50.397	SOTAQUIRA	45.714
SIERRA LA	52.794	STA ROSA D VITERBO	47.815
U P T C	31.784	TIBASOSA	38.274
APTO A LLERAS C	34.226	PILA LA FCA	40.34
ANDALUCIA	40.943	ENCANTO EL	38.264
SAN CRISTOBAL	32.786	COL DPTAL AGROP	31.244
SAN PEDRO IGUAQUE	42.47	CEREZO EL	44.302
PESCA	30.293	SAN ANTONIO	43.991
DUITAMA	42.752	FIRAVITIBA	37.357
AZULEJOS LOS	39.280	GARROCHO EL	38.8
RAMIRIQUI	36.093	CASA AMARILLA	39.269
TEATINOS	43.300	ANTENA TV RUSIA LA	40.035

Con la precipitación máxima en 24h (Pmax 24h) calculada para cada estación se dispone ahora a llevar a cabo la espacialización de la misma con ayuda de un sistema de información geográfica. En el presente caso de estudio se utilizó la plataforma ArcGIS 10.2, en la cual están disponibles los métodos de interpolación IDW y Kirging.

Como se menciona en el numeral 4.3.1.3 la decisión de escogencia del método de interpolación por ponderación de distancia (IDW) se basa en las características de la variable y en la densidad de la información de campo. En este caso al ser una variable de precipitación máxima anual en 24 horas lo que se busca es resaltar estos valores extremos en periodos cortos de tiempo y esto es precisamente lo que se logra mediante la interpolación por IDW ya que esta metodología en los resultados no crea valores extremos si estos no han sido recogidos. Adicionalmente, al tener una buena cantidad de datos de entrada (16 estaciones dentro de la zona de estudio y 16 en zonas muy cercanas) se puede asegurar una buena interpolación por un método directo como el de IDW que se base en distancias entre los puntos de muestreo y los de interés.

En la Figura 5-13 y en la Figura 5-14 se puede evidenciar los resultados obtenidos mediante el método de Kriging y el método IDW respectivamente. Como se observa, mediante IDW se da una mayor relevancia a estos eventos puntuales que suceden en periodos de tiempo muy cortos generando el efecto conocido como “ojos de buey”.

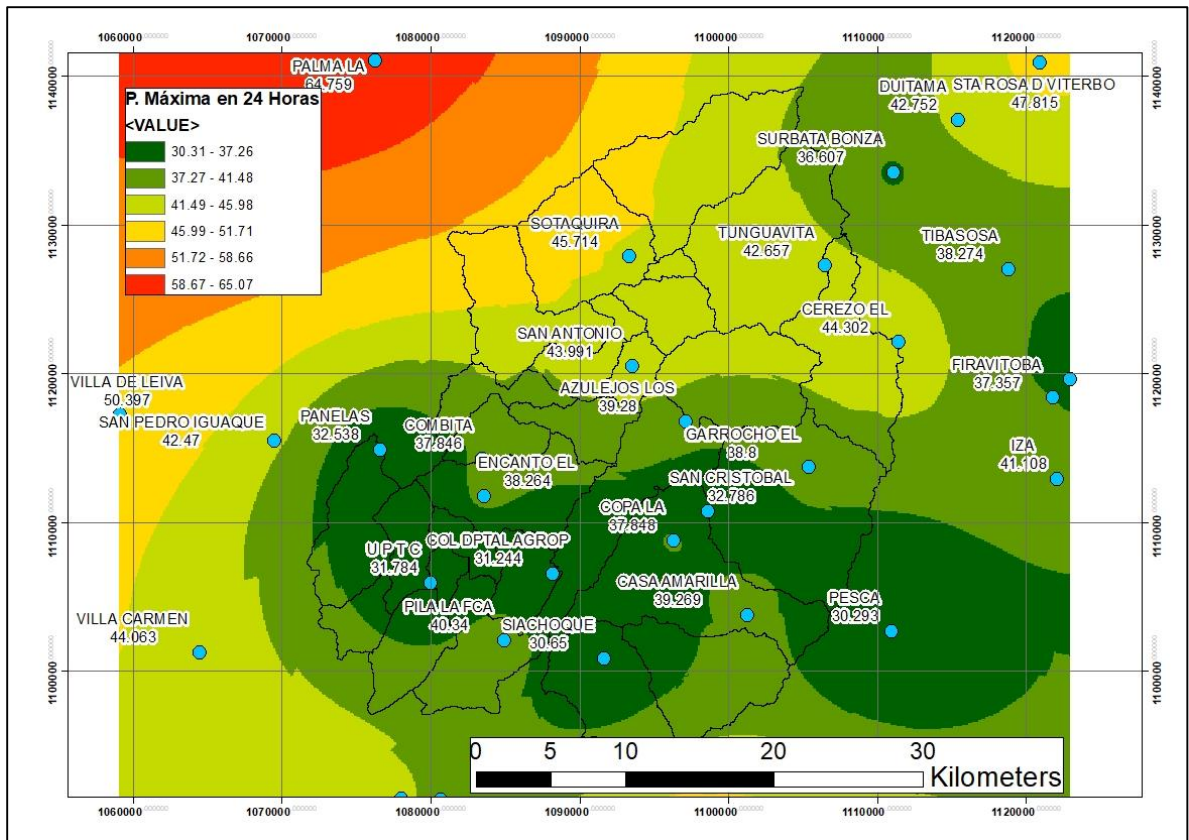


Figura 5-13 Interpolación de valores de lluvia mediante el método de kriging en la plataforma ArcGIS

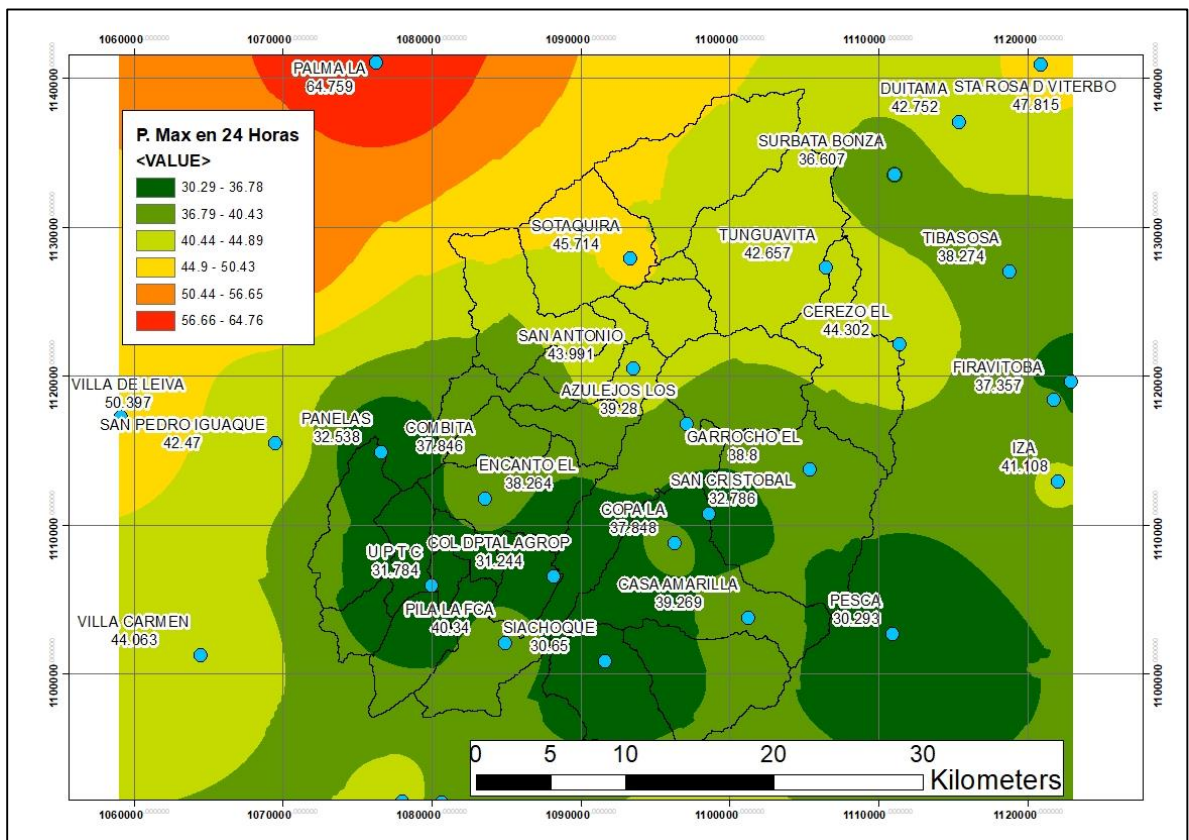


Figura 5-14 Interpolación de valores de lluvia mediante el método de IDW en la plataforma ArcGIS

5.2.1.3 Generación de series de lluvia sintéticas – Método regionalizado curvas IDF

Una vez se cuenta con la información espacializada, el paso siguiente para llevar a cabo la metodología Vargas y Díaz Granados (1998) consiste en calcular un valor promedio de precipitación en 24h máxima anual, este valor representa la variable M para cada subcuenca.

- Construcción de curvas IDF.

Como la zona del proyecto se encuentra dentro de la Región andina (R1) entonces el valor de la intensidad se define a partir de los coeficientes de la región como:

Tabla 5-6 Parámetros R1 Curvas IDF Sintéticas

REGIÓN	a	b	c	d
Región Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83

$$I = 0.94 * \frac{T^{0.18}}{t^{0.66}} M^{0.83}$$

Donde los valores de M corresponden al promedio máximo anual de precipitación en 24 horas, el valor del parámetro T corresponde al periodo de retorno seleccionado de 100 años y finalmente el factor t varía entre 10 y 180 minutos. Aplicando esta ecuación para cada una de las subcuencas se genera entonces una curva IDF propia. En el ANEXO_514_Hietogramas_Diseño se pueden consultar las curvas IDF encontradas para cada cuenca y cada T_r .

5.2.1.4 Construcción de Hietogramas de diseño – Método de los bloques alternos

Partiendo de las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) generadas en el proceso anterior se procede a llevar a cabo el procedimiento para el cálculo de los hietogramas de diseño mediante la metodología de bloques alternos.

Como primer paso se determinan los valores de la curva de masa de los hietogramas de diseño para duraciones entre 0 y 180 minutos (para el caso particular de tormentas de diseño de 3h de duración) para cada uno de los periodos de retorno seleccionados, como se mencionó en el ANEXO C LLUVIAS SINTÉTICAS (HIETOGRAMAS DE DISEÑO): GENERACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE IMPULSOS DE LLUVIA.

Se procede a determinar los incrementos de precipitación puntual para un intervalo de tiempo (Δt) de 10 minutos para cada sub cuenca.

Como paso siguiente y con el objetivo de darle a los resultados conseguidos hasta el momento una secuencia más crítica se procede a hacer uso del método de los Bloques Alternos y de esta manera conseguir una serie de incrementos arreglados de precipitación. De esta manera, el hietograma toma la forma que se presenta en la Figura 5-15.

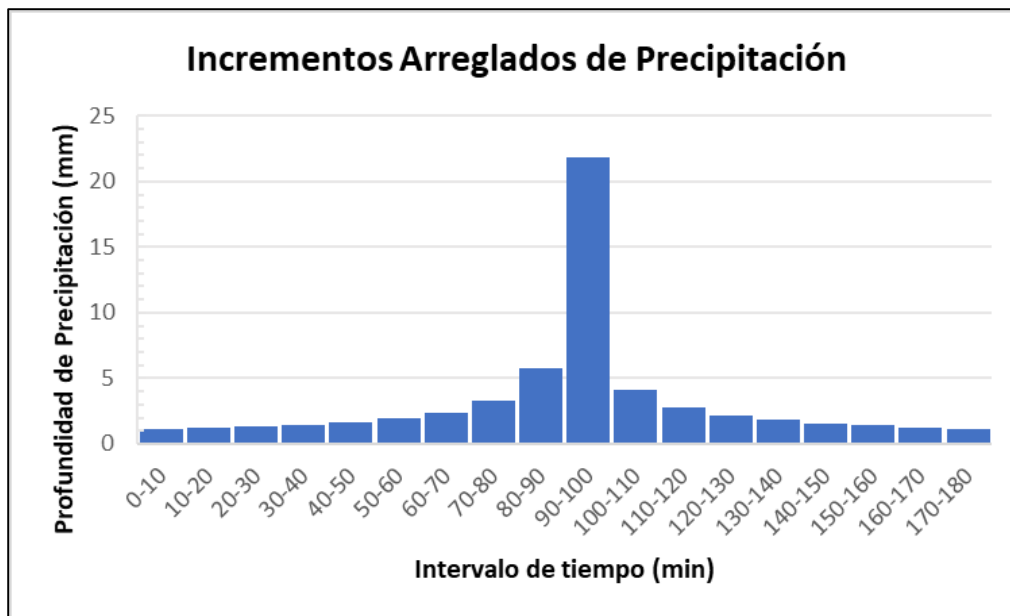


Figura 5-15 Incremento Arreglado de Precipitaciones estación La Copa 1.

5.2.1.5 Corrección por representatividad de área / Factores de reducción por área

Se realizó la aplicación del factor de espacialidad promedio de la lluvia.

Teniendo en cuenta que estas tres ecuaciones para el cálculo del factor de corrección de la lluvia fueron propuestas a partir de datos de cuencas con características particulares en el caso de estudio se trabajó utilizando el valor promedio de estas fórmulas. El resultado final para definir el valor del factor de espacialidad de la lluvia se puede ver en la Tabla 5-7

Tabla 5-7 Facto de reducción por área Promedio

Sub-Cuenca	Factor Promedio	Sub-Cuenca	Factor Promedio
Chicamocha1	0.86	Jordan9	0.80
Chicamocha2	0.83	LaCopa1	0.75
Chicamocha3	0.80	LaCopa2	0.74
Chicamocha4	0.70	LaCopa3	0.69
Jordan1	0.78	LaCopa4	0.68
Jordan10	0.82	LaVega1	0.76
Jordan11	0.74	LaVega2	0.82
Jordan2	0.85	LaVega3	0.80
Jordan3	0.75	Maguncia1	0.74
Jordan4	0.83	Maguncia2	0.71
Jordan5	0.80	Maguncia3	0.87
Jordan6	0.75	Sochagota_	0.73
Jordan7	0.81	Tuta1	0.72
Jordan8	0.80	Tuta2	0.73

Finalmente, estos valores se aplican a los hietogramas organizados por medio del método de los bloques alternos para obtener los hietogramas de diseño.

5.2.1.5.1 Tiempos de Concentración.

Para poder haber calculado el valor de los factores de reducción por área, se tuvieron que calcular los tiempos de concentración para cada cuenca. Aplicando la metodología mencionada en el capítulo 4.3.1.5 se obtienen los valores de tiempos de concentración mediante las once ecuaciones mencionadas.

En seguida, se eliminaron aquellos valores extremos que sean superiores al valor promedio más la desviación estándar o aquellos resultados que sean inferiores al valor promedio menos la desviación estándar, el resultado de este procedimiento para una subcuenca del modelo (La Copa 1) se puede ver en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8 Selección del Tiempo de Concentración para La Copa 1

CUENCA HIDROGRÁFICA	LaCopa1
AUTOR DE LA ECUACIÓN	Tc (minutos)
Tc BRANSBY WILLIAMS	264,53
Tc CALIFORNIA CULVERT PRACTICE	99,82
TC CLARK	-
ECUACIÓN DE RETARDO SCS	270,13
Tc GIANDOTTI	138,29
Tc KERBY - HATHAWAY	-
Tc METODO RACIONAL GENERALIZADO	125,63
Tc KIRPICH	99,68
Tc TEMEZ	245,06
Tc VT CHOW	238,39
Tc VENTURA-HERAS	293,26
PROMEDIO	197,20
Tc SELECCIONADO	197,20

En el ANEXO 6.4 se puede encontrar la información completa del cálculo y selección del tiempo de concentración para cada una de las sub-cuencas del sistema.

5.2.1.5.2 Hietogramas de Diseño.

En el ANEXO_514_Hietogramas_Disenio se presenta el resultado final de los hietogramas correspondientes a cada una de las subcuencas para el periodo de retorno seleccionado de 100 años con un intervalo Δt de 10 minutos para una duración total del evento de precipitación de 180 minutos o 3 horas. En la Figura 5-16 se puede ver el resultado para la cuenca La Copa 1.

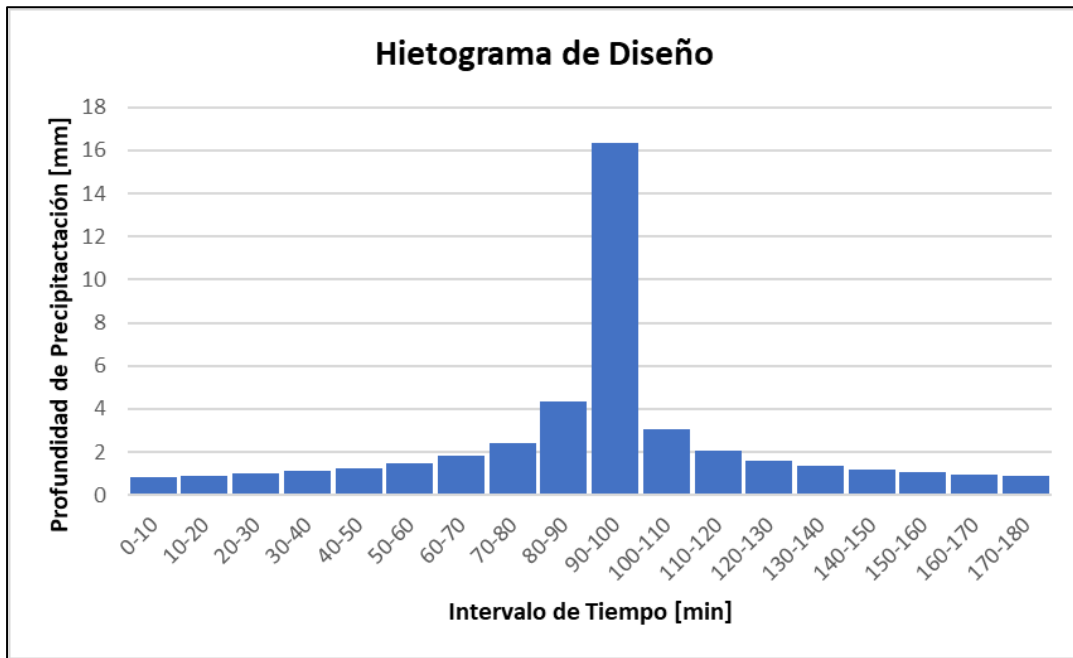


Figura 5-16 Hietograma de Diseño para la subcuenca La Copa 1

5.2.2 Análisis de frecuencias (Caudales)

Las estaciones hidrométricas, las cuales proporcionan mediciones de caudal en puntos específicos de la cuenca fueron presentadas en el numeral 5.1.2. Las mediciones de caudal en el análisis hidrológico permiten calcular los valores extremos a los cuales se deben ajustar los resultados del modelo hidrológico. Esto se logra por medio de los registros de las estaciones hidrométricas y un análisis de frecuencias.

De las 16 estaciones del IDEAM de las cuales se recopiló información, en el análisis presente se utilizarán 6 estaciones para llevar a cabo el análisis de frecuencias, puesto que son estas cuentan con un periodo representativo de registros y se encuentran dentro del perímetro de estudio. Éstas se citan a continuación:

- El Palo
- La Copa
- La Reforma
- Maguncia
- San Rafael
- Siberia

Su ubicación se puede observar en el numeral 5.1.2.

En el caso de estudio del presente documento, con la construcción y puesta en marcha del embalse La Copa en el año 1990 hay que tener en cuenta que la restricción de homogeneidad de los datos hidrológicos se ve afectada a causa de la regulación; por lo cual las series de caudales aguas abajo del embalse se divide en un antes y después de la construcción del mismo. De esta manera, para cumplir con la condición de homogeneidad de los registros históricos de caudales es necesario iniciar su análisis de frecuencia a partir del año de la puesta en funcionamiento del embalse.

Para el análisis de frecuencias se utilizaron las distribuciones que se mencionaron en el numeral 4.3.2 *Análisis de frecuencias (Caudales) a Nivel Mensual Multianual* (Gumbel, Normal, Log -Normal, Pearson Tipo III y Log - Pearson Tipo III.)

Inicialmente se encontraron los valores máximos mensuales multianuales de la serie de datos de cada estación hidrométrica. Seguido de los máximos anuales para la serie, con estos valores se ordenaron de mayor a menor y se calcularon los parámetros de cada distribución de probabilidad.

Los ajustes generaron proyecciones de caudales máximos para diferentes periodos de retorno o probabilidades de excedencia como se observa en la Figura 5-17.

De la misma manera en que se realizó el ajuste y la gráfica para la estación La Siberia, se llevó a cabo este proceso para las demás 5 estaciones seleccionadas. Los ajustes, tablas de procesamiento y resultados, y gráficas para cada estación analizada se presentan en el ANEXO 63_Análisis_Frecuencia.

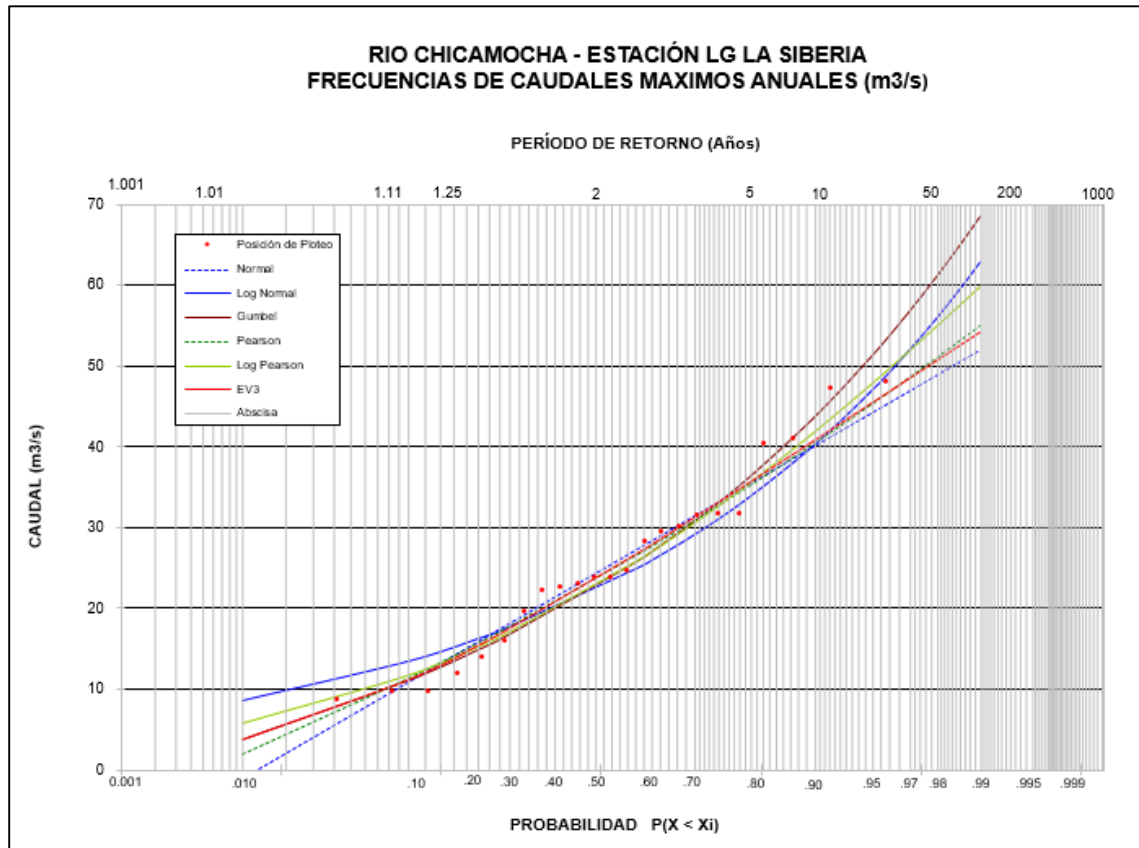


Figura 5-17 Proyecciones de caudales máximos

Como se observa, es posible ajustar cualquier serie de valores a una distribución de probabilidad; sin embargo, una de estas presenta una correlación mejor o menor que el resto de las distribuciones. Por lo anterior se realizó la prueba de bondad de ajuste para todas las estaciones seleccionadas.

5.2.2.1 Prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado

La prueba de bondad de ajuste se llevó a cabo para cada una de las seis estaciones mencionadas en el numeral anterior obteniendo de esta manera un valor de Chi-cuadrado para cada una de las distribuciones a las cuales fueron ajustados los datos. Cabe resaltar que varias distribuciones pueden tener un buen resultado en esta prueba, es decir, que más de una distribución se ajusta de una manera adecuada a los datos obteniendo un valor de Chi-Cuadrado muy similar, por esta razón, se determina con cuál de ellas trabajar mediante una comparación gráfica observando el comportamiento de la nube de puntos de los datos con las curvas de ajustes.

Los resultados obtenidos para la estación LA COPA muestran que la distribución con un mejor ajuste es la EV3 al tener un valor de 0.38 para la prueba Chi-Cuadrado. Igualmente, también se nota que las distribuciones Pearson y Log-Pearson tienen resultados cercanos (0.41 y 0.42), por esta razón, es conveniente revisar el comportamiento entre estas distribuciones y los puntos, como se ve en la Figura 5-18. Se puede observar que la distribución probabilística EV3 es la que se encuentra más cercana a la mayoría de los puntos graficados por esta razón se toma la decisión de estimar los caudales para diferentes periodos de retorno haciendo uso de esta distribución.

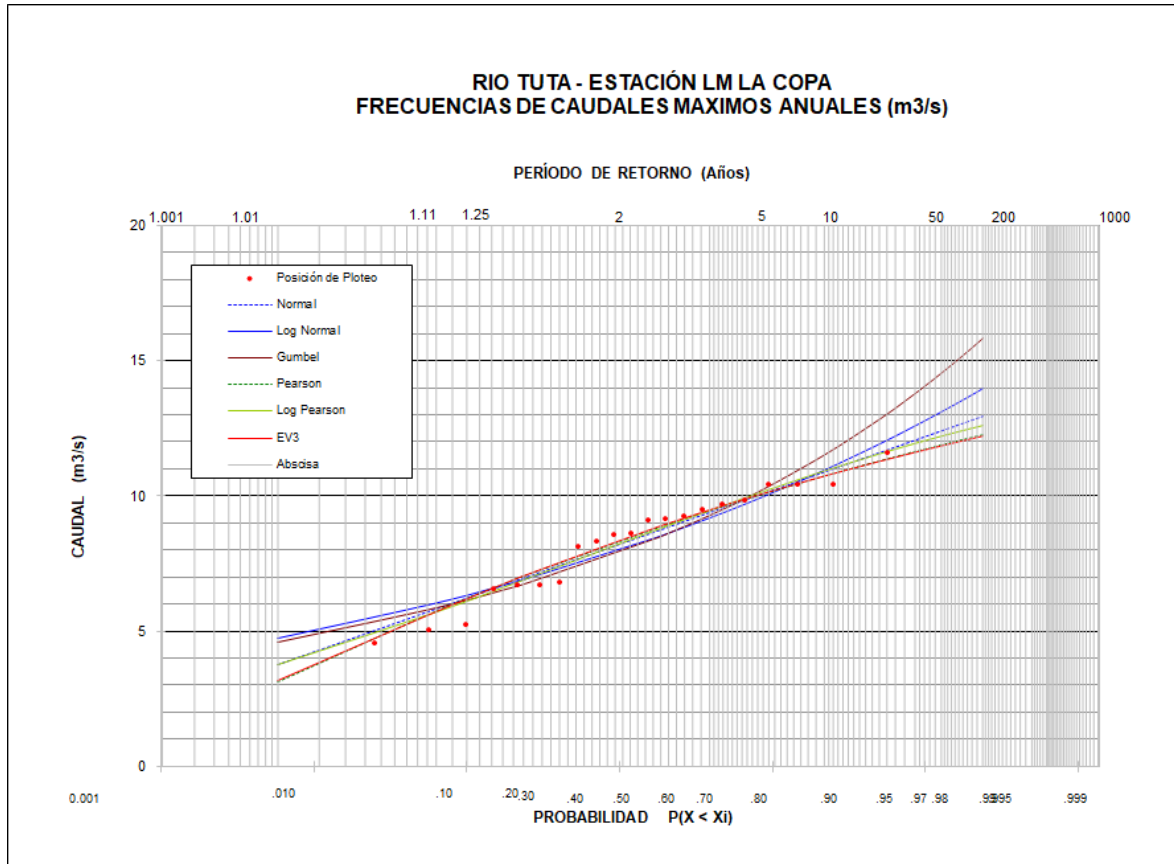


Figura 5-18 Proyecciones de caudales máximos para la estación LA COPA.

5.2.2.2 Resumen de resultados de los ajustes a distribuciones de probabilidad

Tabla 5-9 Proyección de Caudales máximos

ESTACIÓN	Periodo de Retorno	Caudal	Distribución Probabilística
	(años)	(m3/s)	
El Palo	2.33	15.72	EV3
	5	21.68	
	10	25.92	
	20	29.55	
	50	33.74	
	100	36.58	
	500	42.45	
La Copa	2.33	8.86	EV3
	5	10.04	
	10	10.75	
	20	11.29	
	50	11.87	

ESTACIÓN	Periodo de Retorno	Caudal	Distribución Probabilística
	(años)	(m ³ /s)	
	100	12.23	
	500	12.92	
La Reforma	2.33	27.11	EV3
	5	36.00	
	10	42.05	
	20	47.10	
	50	52.79	
	100	56.59	
	500	64.25	
Maguncia	2.33	9.59	LOG-PEARSON
	5	12.85	
	10	15.49	
	20	17.99	
	50	21.18	
	100	23.55	
	500	29.00	
San Rafael	2.33	7.08	GUMBEL
	5	9.80	
	10	12.02	
	20	14.15	
	50	16.90	
	100	18.96	
	500	23.73	
La Siberia	2.33	26.12	LOG-PEARSON
	5	35.15	
	10	41.92	
	20	47.93	
	50	55.04	
	100	59.94	
	500	70.09	

5.2.3 Uso de la extensión HEC-GeoHMS y construcción del modelo lluvia-escorrentía

5.2.3.1 Uso de la extensión HEC-GeoHMS

Con ayuda de la extensión HEC-GeoHMS, y de acuerdo a lo consignado en el ANEXO1_GUIA_HECGEOHMS, se hace uso de los siguientes insumos:

- Imagen Satelital de resolución 12.5 m descargada de la página www.vertex.daac.asf.alaska.edu. En la Figura 5-19, se muestra el modelo digital de terreno en el software ArcGis 10.2.

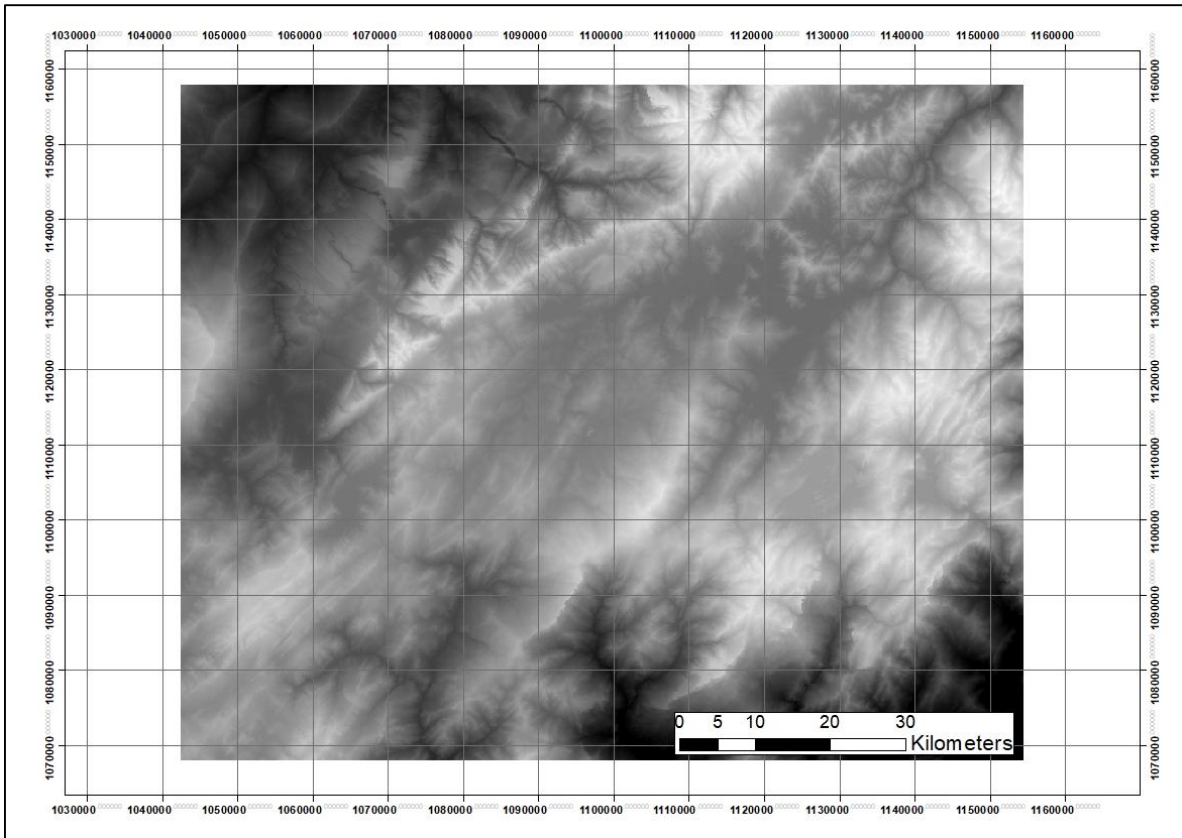


Figura 5-19 Modelo Digital de Terreno para la generación del modelo hidrológico.

Mediante el uso del software ArcGis 10.2 y la extensión Hec-GeoHMS se construyen los ráster de direcciones de flujo y acumulación de flujo, modelo de terreno corregido, definición de cauces y de cuencas; y con base en ellos se calcularon las características morfométricas de cada cuenca (longitud del cauce más largo, pendiente del cauce, pendiente media de la cuenca, ubicación y elevación del centroide).

Se seleccionaron los métodos para representar los diferentes procesos hidrológicos en el modelo de eventos.

Finalmente se exportó el modelo hidrológico, que visualizado directamente en el software HEC-HMS se observa en la Figura 5-20.

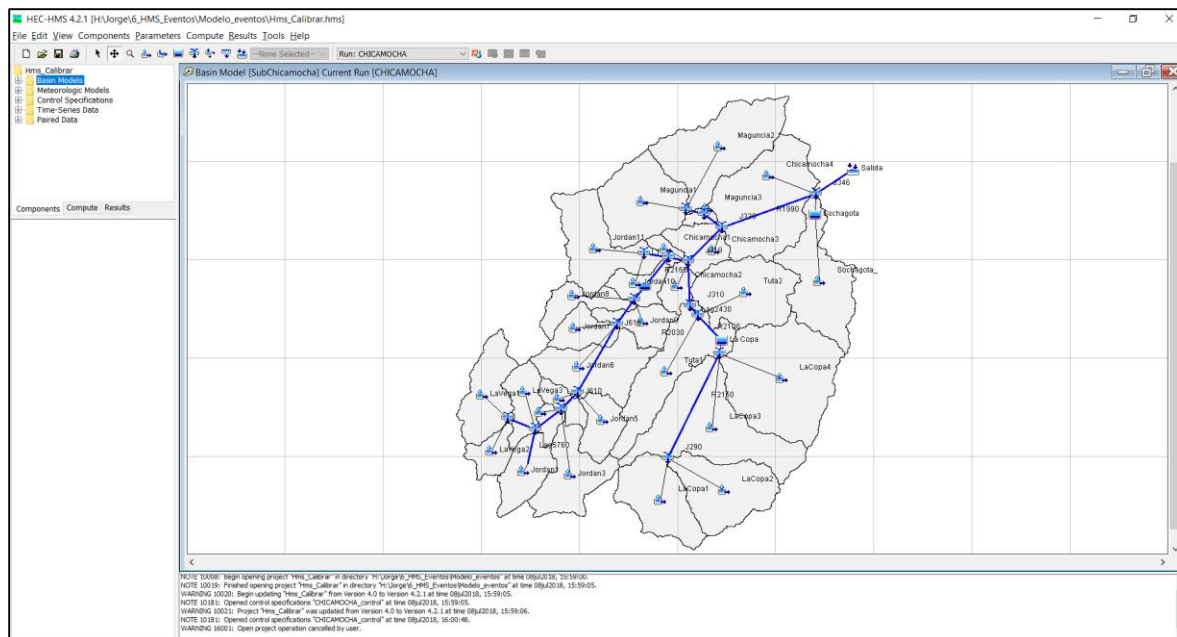


Figura 5-20. Modelo hidrológico lluvia –escorrentía base

5.2.3.2 Construcción del modelo lluvia-escorrentía – asignación de parámetros

Dentro de la construcción del modelo hidrológico de eventos se resaltan principalmente los siguientes componentes:

- Creación de la geometría del modelo
- Selección de los métodos para representar los procesos hidrológicos
- Determinación y asignación de los parámetros para los métodos seleccionados
- Importación de las series de tiempo cargadas previamente al DSS

La creación de la geometría del modelo se detalla en el ANEXO1_GUIA_HECGEOHMS.

Por su parte, para el caso de estudio, en el ANEXO G CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE EVENTOS **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los procesos de forma detallada para la selección de los métodos para representar procesos hidrológicos, la determinación y asignación de los parámetros para los métodos seleccionados y la importación de series de tiempo cargadas previamente al DSS.

5.2.3.3 Calibración de los caudales pico del modelo

Finalmente, se validaron los hidrogramas encontrados a partir del modelo de eventos por medio de la calibración del mismo. Esta calibración consiste en reproducir los caudales pico encontrados a través del análisis de frecuencias, por medio de la simulación y el ajuste de los parámetros del modelo. Este proceso se observa en detalle en el ANEXO G CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE EVENTOS.

5.2.4 Uso del método de simulación continua SMA

El modelo SMA, tal y como se ha mencionado previamente, se construyó sobre la misma base del modelo lluvia-escorrentía de eventos del numeral 5.2.3.

En el ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN **Error! No se encuentra**

el origen de la referencia., se describen en detalle los parámetros necesarios para ejecutar este modelo, la forma en que se determinaron y la información base que se usó para ello. Así mismo, en dicho anexo se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros en aras de ejemplificar el proceso de calibración de los mismos, puesto que en este caso de estudio se decidió realizar una calibración manual de los mismos.

A continuación, se presentan los resultados destacados del proceso de construcción y calibración del modelo SMA; los cuales provienen del contenido del ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN.

Se seleccionó el método de pérdidas *Soil Moisture Accounting* (SMA), el cual contempla los procesos de infiltración, percolación, evapotranspiración, almacenamiento subsuperficial y transformación del mismo en flujo base. Adicionalmente el modelo SMA se trabajó en una base anual, de esta manera cada uno de los modelos construidos representa un año de simulación.

De acuerdo a lo anterior el modelo se alimentó con series de tiempo (precipitación, caudales para calibración, nivel de embalses) con intervalo de tiempo diario.

5.2.4.1 Periodos analizados

Se sugirió contemplar la mayor cantidad de años para la calibración del modelo, teniendo en cuenta tanto años hidrológicos húmedos como años hidrológicos secos. Por esta razón, en el caso de estudio se implementaron inicialmente los años 2011 y 1995 como años húmedo y seco respectivamente.

Sin embargo, para cubrir una mayor cantidad de registros en la calibración se incluyeron en el análisis 6 años en total, para lo cual se tenían tres años húmedos (2011, 2000 y 1999) y tres años secos (1995, 1997 y 2001). Estos años fueron seleccionados por tener los registros más altos/bajos respectivamente tanto en las estaciones pluviométricas como en las hidrométricas.

5.2.4.2 Obtención y asignación de parámetros del modelo SMA

Debido a que las cuencas del sitio de estudio no se encuentran lo suficientemente instrumentadas para proporcionar las características del suelo necesarias para definir los parámetros del modelo, los parámetros del modelo hidrológico de simulación continua SMA para el caso de estudio fueron estimados a través de fuentes bibliográficas accesibles. Estos valores, al ser teóricos, se tienen en cuenta únicamente como valores iniciales para luego ser objeto de calibración.

En los numerales siguientes se describe la obtención de la estimación inicial de los parámetros para las cuencas del modelo de simulación continua. Sin embargo, se debe resaltar que la documentación consultada no es extensa y que no se tiene un amplio conocimiento de estos parámetros para cuencas en Colombia; esto se debe en gran parte a que, al requerir gran cantidad de información, el modelo SMA no es de uso común en el país. Se requiere mayor instrumentación en las e investigación acerca de la interacción de estos en un modelo hidrológico cuencas para medir o estimar este tipo de parámetros.

5.2.4.2.1 Características morfométricas de las subcuencas

Las cuencas hidrográficas son las mismas utilizadas en el modelo hidrológico de eventos, como se mencionó estas se trazaron a partir de modelos digitales de terreno y con el uso del complemento para ArcGIS HEC-GeoHMS. Las características morfométricas de las 28 cuencas seleccionadas, tales como su área, longitud de cauces y tiempo de concentración se calcularon a partir de los sistemas de información geográfica y con post procesamiento como se mencionó en el numeral 4.3.1.5. Ver ANEXO1_GUIA_HECGEOHMS.

5.2.4.2.2 Valores para Almacenamiento por Intercepción de la Vegetación (Canopy storage) y Almacenamiento en la Superficie (Surface storage)

De acuerdo con (Holberg, 2015) se asignaron valores típicos para la intercepción y almacenamiento en la superficie en función de las características de cada cuenca.

Dichas características se estimaron con ayuda de los SIG e imágenes satelitales. En el caso de la intercepción (Canopy) se trabajó con mapas de coberturas vegetales; mientras que para el almacenamiento en superficie se trabajó con el DEM obtenido del satélite ALOS.

5.2.4.2.3 Parámetros del Modelo SMA para Pérdidas

Los parámetros necesarios para caracterizar las abstracciones en cada subcuenca hidrográfica utilizando el modelo SMA son la tasa de infiltración máxima del suelo, porcentaje de impermeabilidad, almacenamiento del suelo, almacenamiento de la zona de tensión, capacidad de percolación del suelo, almacenamientos subterráneos 1 y 2, capacidad de percolación de los almacenamientos subterráneos 1 y 2 y el coeficiente de embalses lineales para flujo base de los almacenamientos subterráneos 1 y 2.

Estos parámetros fueron estimados a partir de referencias bibliográficas y/o por medio de procesamiento de información base. En el ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta en detalle la estimación de cada uno de los parámetros.

Resumen de la estimación inicial de parámetros para una cuenca del método de pérdidas SMA

Tabla 5-10. Resumen de datos iniciales- parámetros SMA

Parámetro	Valor inicial
Tasa máxima de infiltración	6.21 mm/hr
Almacenamiento del Suelo	300 mm
Almacenamiento de Zona de Tensión	80 mm
Percolación del Suelo	0.44 mm/hr
Almacenamiento Subterráneo 1	30 mm
Percolación Almacenamiento Subterráneo 1	5.56 mm/hr
Coficiente Almacenamiento Subterráneo 1	73.53
Almacenamiento Subterráneo 2	260 mm
Percolación Almacenamiento Subterráneo 2	0.5 mm/hr
Coficiente Almacenamiento Subterráneo 2	500

Modelo de flujo base (Baseflow) basado en reservorios Lineales

En este modelo el flujo se mueve a través de reservorios; en estos, el caudal de salida en cada intervalo de tiempo es una función lineal del almacenamiento medio durante el intervalo de tiempo. Por lo anterior, el valor de los coeficientes de GW1 y GW2 representa la constante k que relaciona el almacenamiento y la salida de cada reservorio lineal, esta constante tiene unidades de tiempo puesto y puede ser relacionada con un tiempo de retención en el almacenamiento subterráneo:

Se tomaron valores referencia para todas las subcuencas para ser posteriormente objeto de calibración.

Tabla 5-11 Valores iniciales de los Reservorios Lineales.

Parámetro Flujo base	Valor inicial
Flujo base inicial GW1 (m ³ /s)	0.2
Coficiente Embalse lineal GW 1	70

Parámetro Flujo base	Valor inicial
Número de reservorios GW1	1
Flujo base inicial GW2 (m ³ /s)	0.2
Coefficiente Embalse lineal GW 2	500
Número de reservorios GW2	10

Datos de Precipitación

La información de lluvias se extrajo de la misma fuente que la utilizada en el análisis para lluvias máximas; la cual corresponde a las series de tiempo registradas por el IDEAM.

Por medio del modelo meteorológico denominado Gage Weights, se determinaron las series de tiempo de lluvia para cada subcuenca con base en la espacialización y por consiguiente en los valores ponderados de las estaciones cercanas. La determinación de los porcentajes de influencia que tiene cada estación medidora de precipitación en cada una de las subcuencas se realizó por medio de la metodología de los polígonos de Thiessen. El procedimiento con los polígonos de Thiessen se explica en detalle para el caso de estudio en el ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN.

Gage Weights

Los pesos de las estaciones son asignados como porcentajes de interacción de los polígonos en las subcuencas. Para cada hoya hidrográfica se asignaron la o las estaciones que la influncian y para cada una de estas se asignaron los factores de ponderación que se calcularon externamente.

Finalmente, para la aplicación de la ecuación de ponderación, se obtienen los factores de ponderación de cada estación para las subcuencas del modelo.

Curvas de Capacidad de Embalses

Uno de los insumos para la modelación hidrológica continua, al igual que en la modelación hidrológica de eventos son las curvas de capacidad de los embales que relacionan las distintas elevaciones posibles para los embalses (msnm) con la capacidad de almacenamiento (volumen m³) y el área en planta que ocupa dicha capacidad. Esta información se elaboró en el numeral 5.1.4.

Estructuras de Descarga

Se ingresaron las curvas de calibración determinadas previamente para la descarga controlada del embalse la copa (válvula Howell Bunger) y para la descarga no controlada (vertedero de excesos).

Descargas y Niveles

Se obtuvieron datos mensuales de descarga del cuerpo de agua embalse La Copa, lo cual, aunque no representa el nivel de precisión más adecuado, fue utilizado para definir la descarga realizada en los periodos simulados. Esta información está contenida en el modelo hidrológico de simulación continua como las series de tiempo observadas de caudal y nivel en el embalse La Copa.

Datos de Caudales

Los caudales medios diarios fueron obtenidos a través del IDEAM. La ubicación de los mismos corresponde a las estaciones hidrométricas presentes en la cuenca, mostradas en la Figura 5-3. Se utilizaron 8 de éstas para representar éstas descargas observadas por medio de la ejecución y calibración modelo hidrológico de largo plazo o SMA; los registros utilizados son los caudales medios diarios y se presentan en el

ANEXO62_Datos_Caudal\Caudales Medios Diarios. La selección de estas estaciones se debe a que se encuentran ubicadas sobre los cauces principales del sitio de estudio.

Después de analizar la cantidad y calidad de los datos conjuntos de precipitación y caudal, se escogieron los años con mayor cantidad de datos registrados en las 8 estaciones de caudal y en las 16 estaciones de lluvia. Los años seleccionados son los siguientes: 1995, 1997, 1999, 2000, 2001, 2011. Los registros de estas estaciones se presentan en el ANEXO_611_Datos_Lluvia\Precipitación Total Diaria.

Datos de Evapotranspiración Potencial

Para la estimación de la tasa de evapotranspiración potencial se utilizó la aplicación del método de Thorntwaite, en el cual se correlacionan los datos de evapotranspiración potencial, con la temperatura media. Para aplicar la ecuación de evapotranspiración potencial presentada se hicieron necesarios los datos de temperatura en los diferentes meses de los años simulados (suministrados por el IDEAM).

Los datos de temperatura y evapotranspiración de los demás años hidrológicos analizados se encuentran en el ANEXO_68_Evapotranspiracion. Debido a que la evapotranspiración estimada se encuentra disponible para las estaciones utilizadas, de manera similar a la espacialización que se realizó de la lluvia, se utilizó el método de interpolación de Kriging debido a que se trata de una variable de comportamiento medio y no extremo. Finalmente se realizó un análisis zonal estadístico (*Zonal Statistics* en ArcGIS**) para encontrar el valor medio de la EVT espacializada para cada subcuenca del modelo.

Los resultados de evapotranspiración potencial para cada cuenca del modelo se presentan en el ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN.

5.2.5 Calibración del modelo SMA

La calibración del método SMA consistió en determinar un arreglo único de parámetros que pudiese explicar de la manera más acertada todos los escenarios de simulación que se llevaron a cabo. Estos escenarios correspondieron a los años 1995, 1997, 1999, 2000, 2001 y 2011. Debe resaltarse la restricción que sugiere tener un solo arreglo de parámetros para representar varios años hidrológicos entre los cuales se encuentran escenarios muy húmedos y otros muy secos. Esta restricción implica que algunos de los resultados no tendrán una calibración perfecta; por el contrario, algunos de estos perderán la precisión que podrían obtener en un análisis para la calibración aislado, con el fin de representar de la mejor manera todo el conjunto de escenarios.

En el ANEXO H APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL MODELO DE SIMULACIÓN CONTÍNUA UTILIZANDO MÉTODO SMA: CONSTRUCCIÓN, ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS Y CALIBRACIÓN; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la influencia de los parámetros (sobre el hidrograma de respuesta y sobre los otros parámetros) por medio de ejemplos de la variación en sus valores. En dicho ejercicio se varía uno a uno los parámetros el método y se analiza la sensibilidad de cada uno de los mismos.

5.2.6 Resultados SMA

Una vez calibrados los parámetros de manera que estos representaran de la manera más adecuada todos los escenarios modelados, se obtuvieron los hidrogramas de respuesta que se observan en las siguientes imágenes para cada estación en el escenario modelado para el año 2011. Debido a la cantidad de estaciones y a los seis años simulados en el modelo SMA solo se presentan los resultados del 2011, sin embargo, el resto de resultados pueden consultarse en el ANEXO_69_HMS_SMA_Completo.

San Francisco

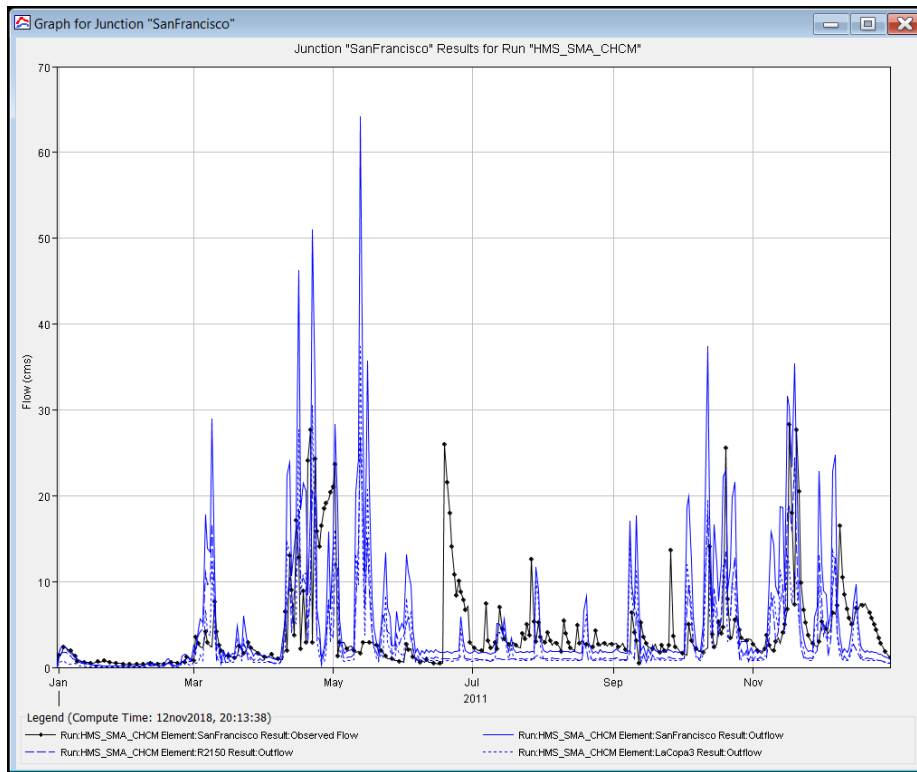


Figura 5-21. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación San Francisco

El Palo

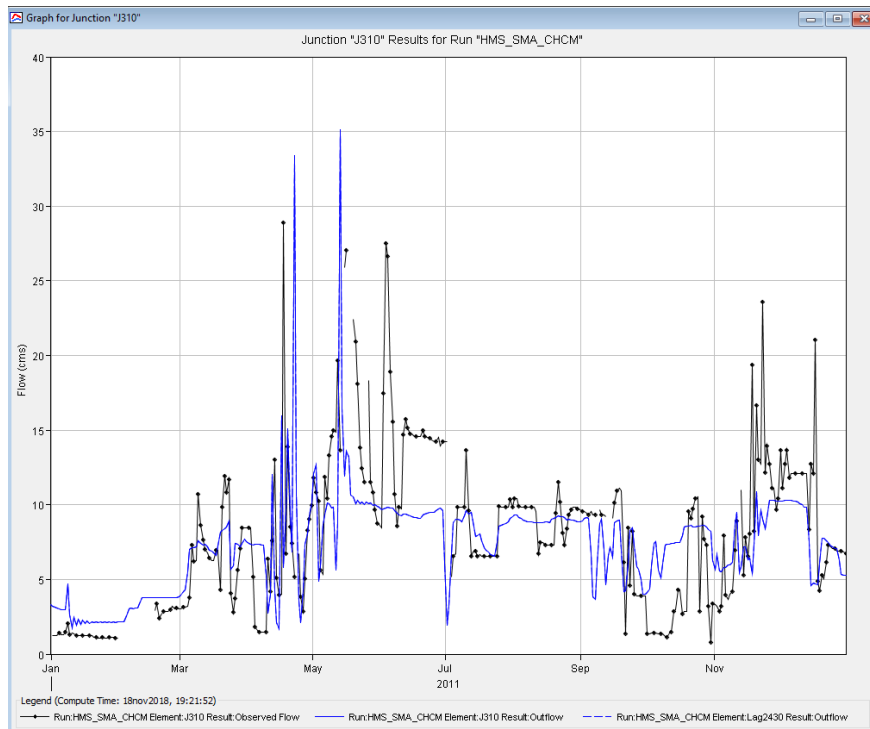


Figura 5-22. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación El Palo

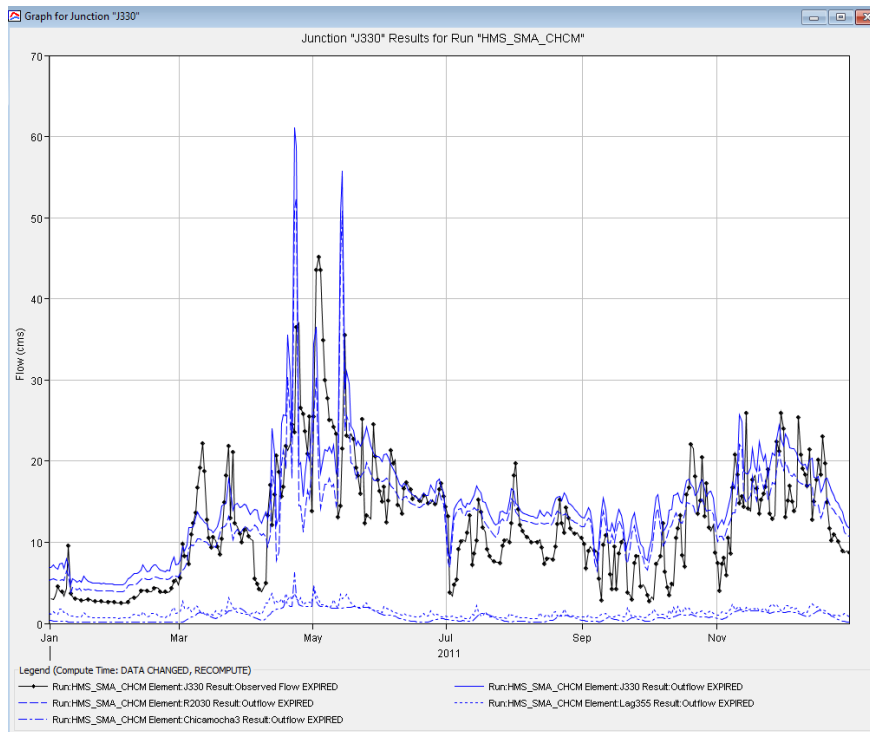


Figura 5-23. Hidrograma de respuesta para el año 2011 en la estación La Reforma

Como se observa, la calibración del modelo hidrológico de largo plazo es adecuada de acuerdo a los resultados obtenidos en las locaciones de las estaciones de medición.

Sin embargo, el verdadero objetivo de la realización del modelo de simulación continua para el presente documento consistió en determinar la serie de caudales de entrada al embalse; por consiguiente, se extrajo la serie de caudales del nodo (J300) que representa la entrada al embalse para cada uno de los años simulados. Esta información será utilizada posteriormente como entrada al modelo de gestión de embalses.

Así mismo, las entradas de caudal al modelo hidráulico serán asignadas a partir de los resultados del modelo hidrológico; con lo cual se realizará el análisis hidráulico para la situación actual y regulada.

5.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO

5.3.1 Uso del software HEC-RAS 2D

El objetivo de la simulación hidráulica bidimensional en el presente documento es la verificación de las condiciones no reguladas y las condiciones con operación de embalses generadas a través del análisis hidrológico.

En el ANEXO I CREACIÓN, EJECUCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO PARA EL CASO DE ESTUDIO se muestra con detalle la creación de la geometría del modelo hidráulico, la asignación de hidrogramas de entrada a partir del modelo hidrológico, la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning, la determinación del tiempo de simulación para garantizar la estabilidad del modelo de acuerdo a la condición de Courant y finalmente, una calibración del modelo basada en registros de nivel y caudal.

5.3.1.1 Simulación de la condición No regulada

Para analizar los resultados de la simulación en su condición no regulada se obtuvieron las manchas de inundación generadas en varios instantes de tiempo en el periodo simulado (06 abril al 15 de mayo de 2011). Es importante ver la simulación a través del RAS Mapper en el software HEC-RAS, sin embargo, en el presente documento se presentan los instantes más representativos como capturas de pantalla.

En la primera imagen se presenta la condición de niveles máximos en el sector inmediatamente aguas abajo de la represa de La Copa. En esta imagen se puede observar que el cauce se encuentra totalmente encañonado, de modo que aun cuando se presentan caudales muy grandes, este no sufre ningún tiempo de desbordamientos.

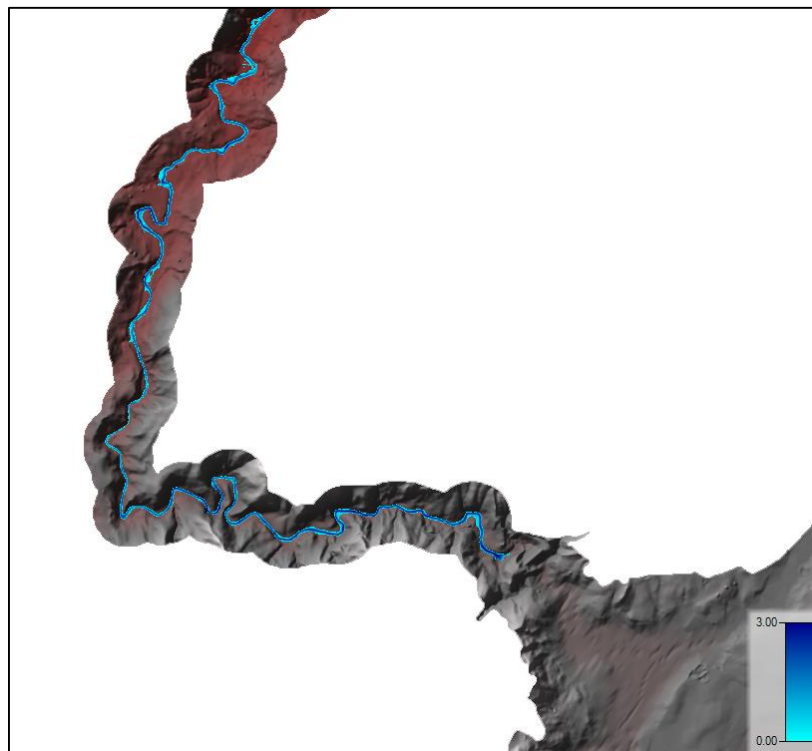


Figura 5-24. Condición de niveles máximos inmediaciones de la ubicación de La Copa (escenario sin embalse)

En la Figura 5-24 y Figura 5-25 se observan las condiciones máximas para dos ubicaciones diferentes aguas abajo del embalse La Copa para una situación sin ningún tipo de regulación; de estas figuras puede observarse que el sector que se encuentra en las inmediaciones de la confluencia del río Tuta con el río Jordán es el más afectado por los fenómenos de inundación, esto debido a sus condiciones de planicies inundables y de bajas pendientes en el cauce.

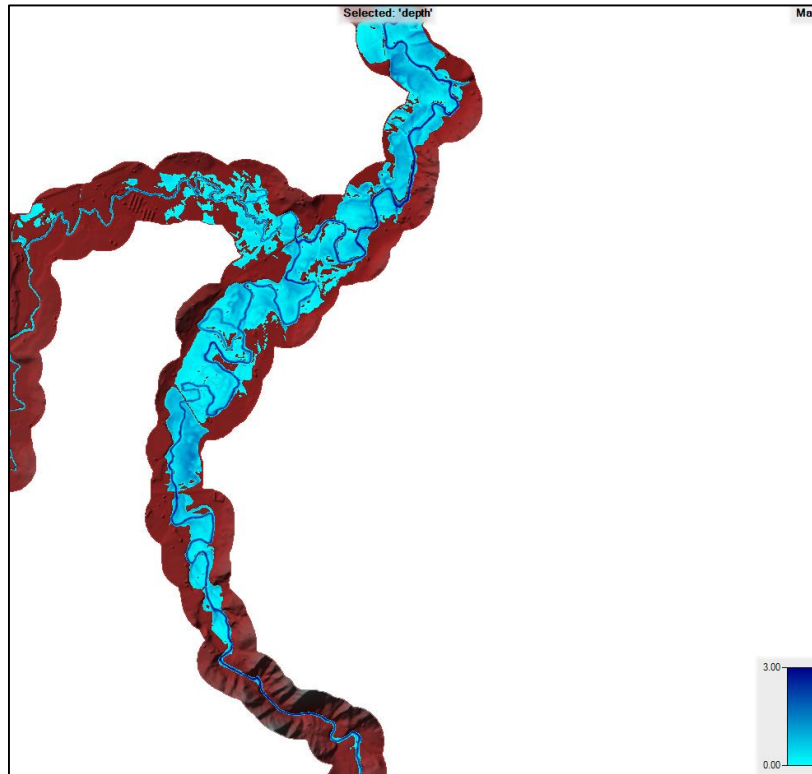


Figura 5-25. Condición de niveles máximos inmediaciones de la confluencia Tuta-Jordán (escenario sin embalse)

En la Figura 5-26, Figura 5-27 y Figura 5-28 se observa el sector cercano a la confluencia de los ríos Tuta y Jordán en distintos instantes de tiempo dentro de la simulación. Se observa que el día 10 de abril, no se presentan caudales altos en el río Tuta, por lo cual el cauce del río no presenta desbordamientos manteniendo el flujo dentro de su cauce. Por el contrario, para los días 15 y 21 de abril, se presentan desbordamientos importantes caracterizados por una mancha de inundación amplia alrededor del cauce; esto se debe a caudales de aportación importantes provenientes de las cuencas aguas arriba, esta situación se presenta conforme se aproximan los picos del hidrograma de las cuencas aportantes a este punto como se observa en el hidrograma de entrada mostrado en la Figura 5-29. Estos son los caudales que deben ser objeto de regulación, por medio del embalse La Copa, en los capítulos que acontecen se encontrará la curva guía del sistema para realizar la regulación de estos caudales y posteriormente realizar la verificación con el modelo hidráulico bidimensional.

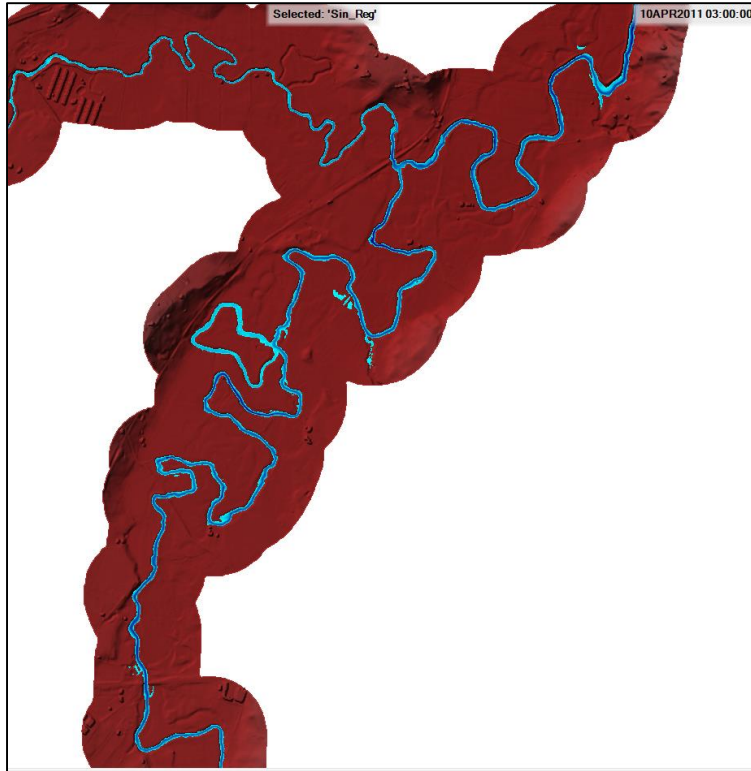


Figura 5-26. Mancha de inundación para el 10 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse)

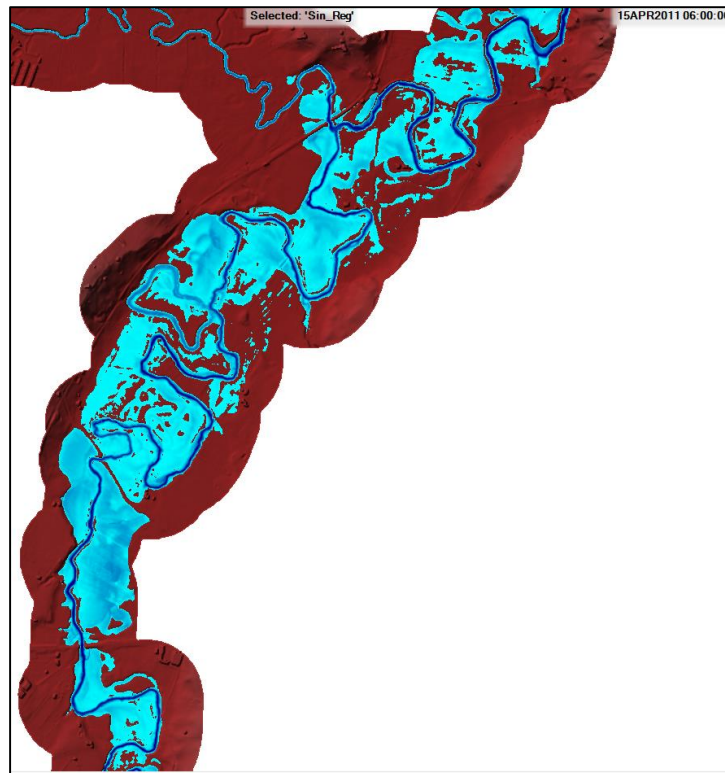


Figura 5-27. Mancha de inundación para el 15 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse)

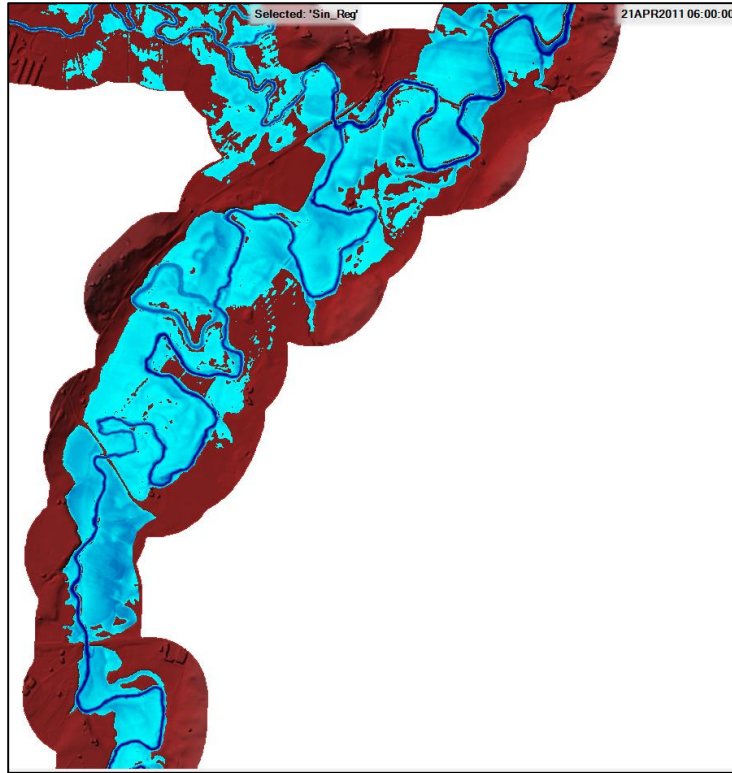


Figura 5-28. Mancha de inundación para el 21 de abril de 2011 – inmediaciones de la confluencia (escenario sin embalse)

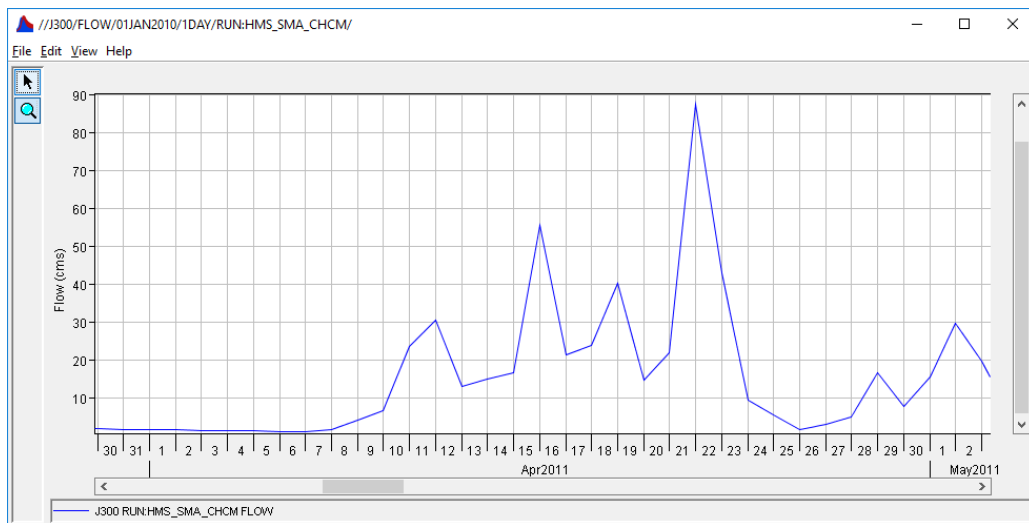


Figura 5-29. Hidrograma proveniente de las cuencas aportantes al río Tuta en la ubicación del embalse La Copa

5.4 CALIBRACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE EN EL MODELO HIDROLÓGICO

5.4.1 Calibración por medio del modelo hidrodinámico 2D

Como se mencionó, el procedimiento llevado a cabo consistió en computar hidrogramas al inicio y al final de cada tramo de tránsito a través del modelo hidráulico. Para lo cual se determinaron las ubicaciones del

inicio y fin de los tramos de tránsito, los cuales corresponden a confluencias y estaciones de medida. Las confluencias se encontraron por medio del modelo de terreno como se muestra en la Figura 5-30, mientras que las estaciones se ubicaron de acuerdo a las coordenadas suministradas por el IDEAM.

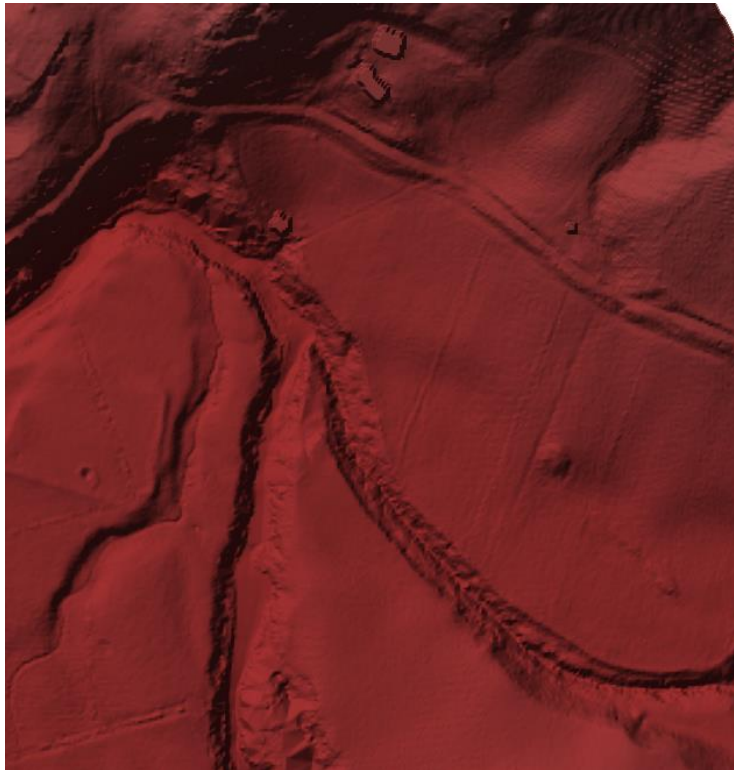


Figura 5-30. Ubicación de las confluencias a través del modelo de terreno

Con base en los hidrogramas computados al inicio y al final de cada tramo se calculó la diferencia entre el tiempo al caudal pico de los dos hidrogramas para cada tramo. Esta distancia, independiente de la atenuación, corresponde al tiempo de tránsito para el tramo. En la Figura 5-31 se observa uno de los tramos analizados, en la parte superior están las ubicaciones en las cuales se computaron los hidrogramas que se muestran en la parte inferior junto con la hora en la que se presentó el pico. Dado que se tiene tiempo al pico en la entrada de la cuenca Tuta2 a las 11:50 y tiempo al pico en la confluencia con el río Jordán (*junction J318*) a las 14:20, el tiempo de tránsito en el tramo analizado es igual a 2 h 30 min (2.5h).

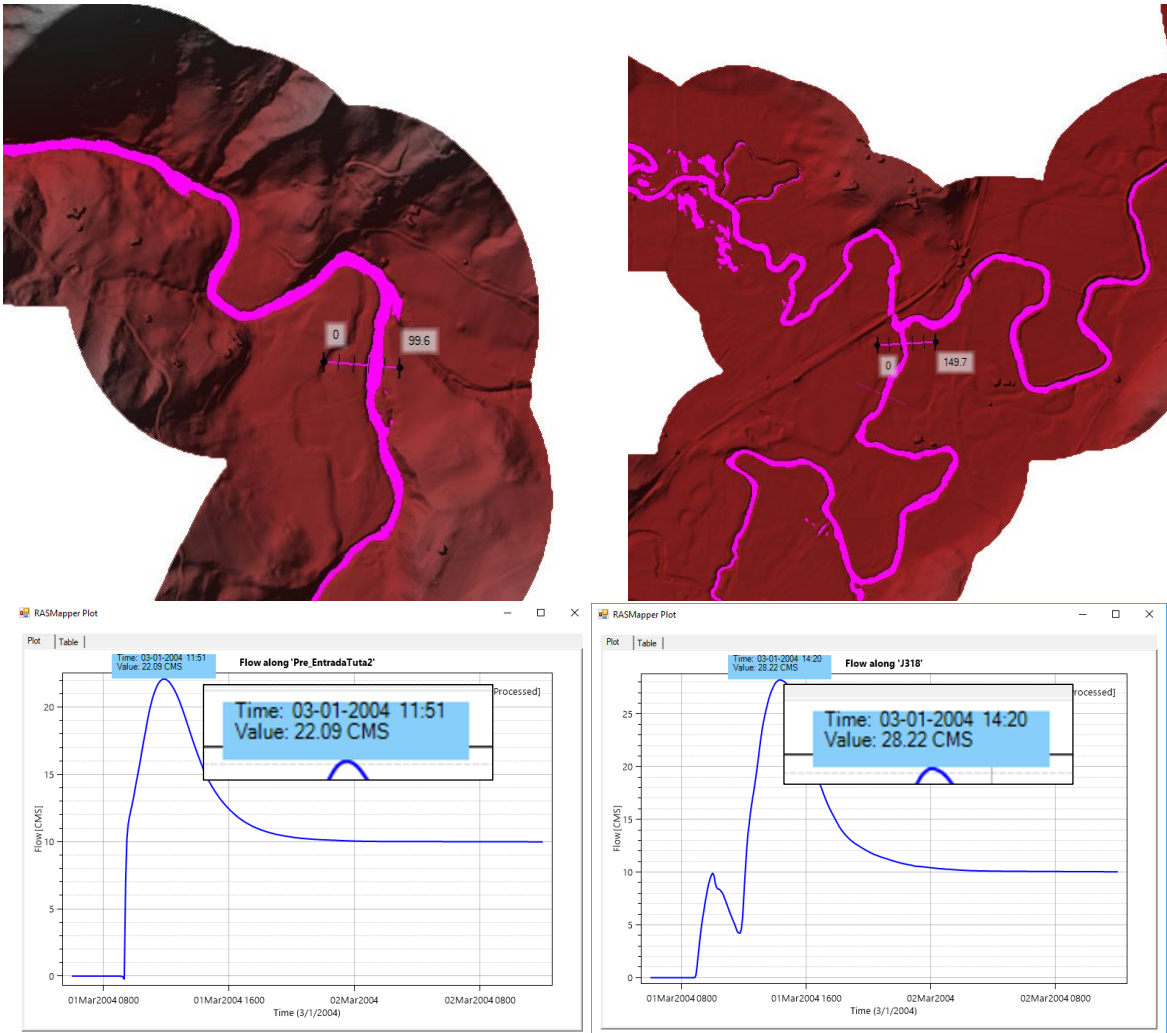


Figura 5-31. Hidrogramas de inicio y fin del tramo RTuta3

Este procedimiento se realizó para cada uno de los tramos del modelo hidrológico encontrando los siguientes resultados:

Tabla 5-12. Tiempos de viaje y número de tramos recalculados

Tiempos de viaje calibrados con el modelo hidráulico 2D					
Tramo	LagTime-K	K (min)	K (h)	NT	X
RLaVega	40m	40	0.667	4	0.1
RJordan1	50m	50	0.833	5	0.1
RJordan2	10m	10	0.167	1	0.1
RJordan3	1h40m	100	1.667	10	0.1
RJordan4	20m	20	0.333	2	0.1
RJordan5	30m	30	0.500	3	0.1
RJordan6	37m	37	0.621	4	0.1
RJordan7	1h19m	79	1.324	8	0.1
RTuta1	1h28m	88	1.469	9	0.1
RTuta2	10m	10	0.167	1	0.1
RTuta3	2h30m	150	2.500	14	0.1

Una vez se encontraron los tiempo de tránsito calibrados en horas (presentados en la columna 3 de la Tabla 5-12), se recalculó el número de sub-tramos en función de la ecuación del modelo Muskingum (ver apartado 4.3.4.1.4), estos se presentan en la columna 4 de la Tabla 5-12.

5.5 ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES

En el este capítulo, se presentan los procedimientos llevados a cabo para la determinación de la curva guía del embalse y para la construcción y ejecución del modelo de gestión de embalses HEC-ResSim, así como la construcción de escenarios basados principalmente en las diferentes curvas guía encontradas. Como ítem más importante del capítulo, se presenta el análisis de resultados para los escenarios simulados en HEC-ResSim.

5.5.1 Determinación de la curva guía de un embalse

La curva guía del embalse la copa se determinó por medio de las dos metodologías propuestas en la parte conceptual del presente documento. Esto se realizó con el fin de tener un abanico de opciones.

En este capítulo se calculan las curvas guía de acuerdo a las dos metodologías presentadas y se comparan mediante análisis preliminar. Posteriormente se realizará un análisis a profundidad a través de la modelación de la gestión del embalse a través de HEC-ResSim (ver numeral 5.5.3.7).

5.5.1.1 Uso del aplicativo para determinar curvas guía CEH-ECI

El aplicativo desarrollado por el Centro de Estudios Hidráulicos de la ECI, está escrito en lenguaje de visual basic para Excel. Además, cuenta con una barra de herramientas en la cual se encuentran programados los siguientes procedimientos.

- Cargar series históricas
- Realizar un análisis estadístico sobre las series históricas
- Introducir geometría del embalse
- Crear series sintéticas (Thomas & Fiering)
- Ingresar caudales de demanda
- Seleccionar garantías de suministro
- Generar curvas guía
- Probar la bondad de las curvas generadas
- Simular la operación del embalse

En el presente caso de estudio se llevó a cabo el procedimiento hasta la generación de las curvas guía. Se generaron curvas para distintas garantías de suministros, las cuales se muestran en la Tabla 5-13.

Tabla 5-13. Datos de curvas guía para diferentes garantías de suministro

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
99%	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06
95%	2668.06	2668.06	2667.64	2668.04	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2668.06	2667.90	2668.06	2668.06
90%	2668.06	2667.26	2666.13	2666.29	2668.06	2668.06	2667.96	2667.62	2667.10	2667.42	2667.95	2668.06
85%	2666.36	2665.32	2664.64	2665.34	2667.74	2668.06	2667.41	2666.76	2666.41	2666.26	2667.19	2667.63

En la Figura 5-32 se muestran las curvas guía encontradas a través del aplicativo de CEH-ECI. Como se puede observar, las curvas generadas tienen como objetivo el suministro de caudal y por lo tanto tienden a presentar valores de niveles más altos que los encontrados a través del resto de las metodologías analizadas. Para la comparación de curvas guía entre metodologías, se seleccionó la curva con una garantía de suministro del 90%.

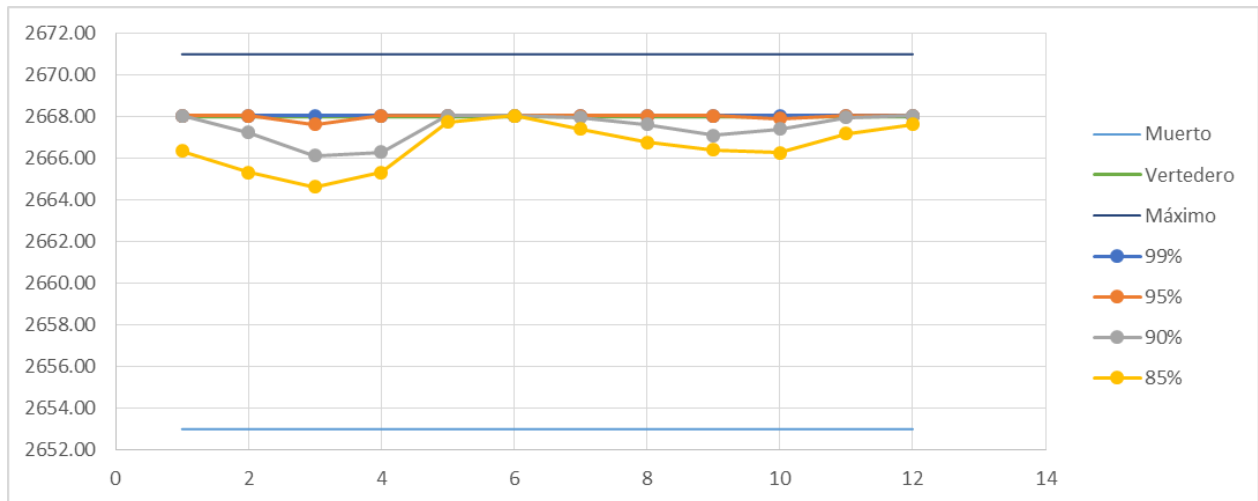


Figura 5-32. Curvas guía con diferentes garantías de suministro generadas con CEH-ECI

5.5.1.2 Metodología basada en volúmenes de reserva y de espera

5.5.1.2.1 Utilizando condiciones extremas mensuales independientes

Se muestran en este capítulo los procedimientos desarrollados para encontrar los volúmenes de reserva y de espera del embalse bajo hidrologías anuales críticas.

Para el cálculo de los niveles de reserva, es importante recordar que los volúmenes con este propósito deben estar disponibles para descargarse en cuanto se presente el periodo seco previsto; esto implica que los volúmenes de reserva no tienen en cuenta el volumen del embalse muerto (5.82 Mm³) y por consiguiente se debe calcular el nivel a partir de la cota del mismo (2653 msnm).

De la misma manera, para el cálculo de los niveles de espera, estos deben estar disponibles para el almacenamiento de las crecientes de diseño, por lo cual deben corresponder a volúmenes ubicados por debajo de la cota de vertedero. En el presente caso de estudio, la cota de vertedero está ubicada 2668 msnm con un volumen correspondiente a 65 Mm³; lo que implica que los volúmenes de reserva se contemplan para que al presentarse dichas crecientes la cota del embalse suba hasta un máximo igual a la cota del vertedero.

Debido a que en general se cuenta con un número limitado de datos, 24 años en el caso de estudio, los volúmenes máximos de reserva o de espera que se calculen a partir de estos estarán asociados a un periodo de retorno igual al número de años de registro (24 años). Por lo anterior, en los procedimientos que se llevan a cabo para determinar estos volúmenes se utilizó la generación de series sintéticas con el fin de ampliar el número de datos y poder obtener volúmenes asociados a periodos de retorno más altos. Para que exista consistencia en los datos, es necesario que se genere la misma cantidad de series sintéticas tanto para el análisis de caudales mínimos (volúmenes de reserva) como para el análisis de caudales máximos (volúmenes de espera), en este caso de estudio se generaron 100 series sintéticas (Tr 100) que se presentan en el ANEXO_822_Series_Sintéticas.

- **Volúmenes de reserva (análisis de caudales mínimos)**

Con el objetivo de calcular los volúmenes de reserva como primer paso se generaron series sintéticas de datos con el objetivo de tener una extensión de datos considerable que permitan considerar varios

escenarios. La serie sintética cuenta con un valor de 1200 datos mensuales lo que equivale a un registro de 100 años los cuales se presentan en el ANEXO_822_Series_Sintéticas\Series_Sintéticas_Tr100. Partiendo de estas series sintéticas se procede entonces a determinar el volumen de déficit mensual tal como se mencionó en el numeral 4.5.1.2.1, de esta manera se tiene que, para el mes de enero se calculan 100 volúmenes diferentes como se puede ver en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14 Volúmenes de Déficit para el mes de enero.

ENERO	
Demanda promedio mensual[m ³ /s] = 3 m ³ /s	
Caudal ecológico [m ³ /s] = 0.453 m ³ /s	
Caudal mínimo [m ³ /s] = 3.453 m ³ /s	
Caudal medio de entrada al embalse	Vol _{Déficit}
m ³ /s	(Mm ³)
1,86	4,256
1,44	5,395
1,06	6,408
1,90	4,169
1,16	6,133
0,88	6,878
1,60	4,962
0,66	7,472
1,09	6,331
0,30	8,440
1,75	4,549
0,78	7,168
...	...

Este procedimiento se repite para cada uno de los meses. Utilizando estos datos se construye una curva de duración para los volúmenes de déficit a través de las fórmulas de California, Hazen o Weibull (Chow, Maidment, & Mays, 1994); mediante la cual se extraen los valores de volumen de reserva para determinadas probabilidades de ocurrencia, en la Figura 5-33 se muestra la curva de duración para el mes de enero.

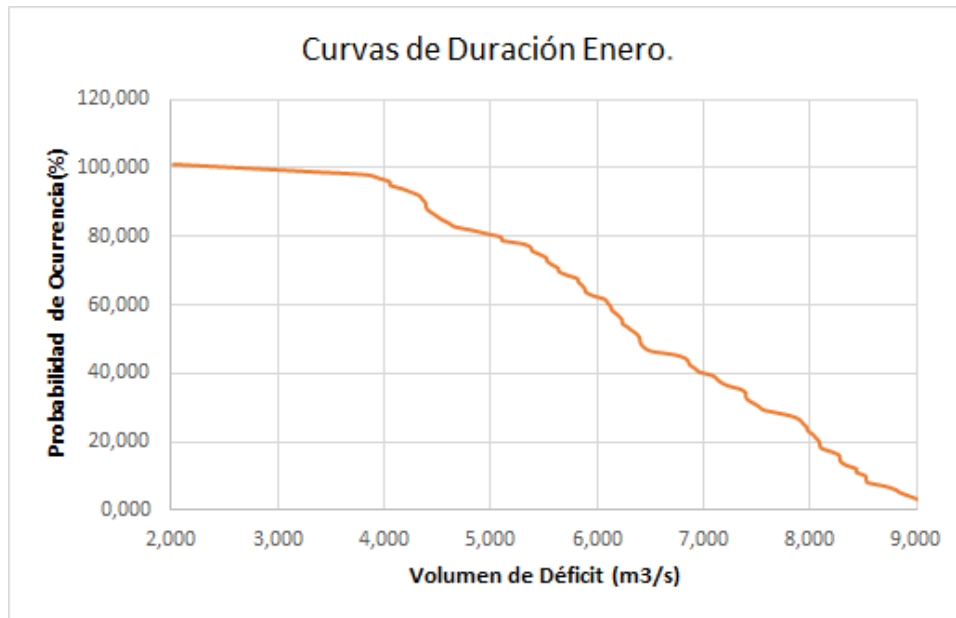


Figura 5-33 Curva de Duración de volúmenes déficit para el mes de enero.

Finalmente se determinan los volúmenes de déficit para los meses secos con probabilidades de excedencia del 5%, 10% y 15%. Estos volúmenes de déficit asociados a probabilidades de excedencia corresponden a los volúmenes de reserva con que se debe contar para un año de estiaje de la misma frecuencia. Con los volúmenes de reserva y la información de la curva de almacenamiento del embalse, se determinan los niveles de reserva del embalse obteniendo como resultado lo representado por la Tabla 5-15. La curva guía para probabilidad de excedencia del 5%, teniendo en cuenta únicamente los niveles de reserva, se puede ver en la Figura 5-35 en color azul.

Tabla 5-15. Volúmenes de déficit y niveles de reserva asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia

	Probabilidad del 5%		Probabilidad del 10%		Probabilidad del 15%	
	VolDeficit (Mm ³)	Nivel de Reserva	VolDeficit (Mm ³)	Nivel de Reserva	VolDeficit (Mm ³)	Nivel de Reserva
Enero	8.506	2656.905	8.275	2656.810	8.096	2656.737
Febrero	7.199	2656.369	6.979	2656.279	6.809	2656.209
Marzo	7.120	2656.337	6.944	2656.264	6.771	2656.193
Abril	7.986	2656.692	7.686	2656.569	7.484	2656.486
Mayo	6.972	2656.276	6.906	2656.249	6.783	2656.199
Junio	7.504	2656.494	6.053	2655.899	5.770	2655.783
Julio	6.877	2656.237	6.657	2656.147	6.392	2656.038
Agosto	6.961	2656.272	6.780	2656.198	6.497	2656.081
Septiembre	6.484	2656.076	5.852	2655.817	5.610	2655.718
Octubre	7.427	2656.463	6.366	2656.027	6.264	2655.986
Noviembre	5.120	2655.517	4.811	2655.390	4.070	2655.086
Diciembre	8.130	2656.751	7.358	2656.434	7.030	2656.300

- **Volúmenes de espera (análisis de caudales máximos)**

Con el objetivo de calcular los volúmenes de espera como primer paso se generaron una serie sintética de datos con el objetivo de tener una extensión de datos, correspondientes a caudales de entrada al

embalse, considerable que permitan evaluar varios escenarios. La serie sintética cuenta con un valor de 1200 datos mensuales lo que equivale a un registro de 100 años, estas series se pueden consultar dirigiéndose ANEXO_822_Series_Sintéticas\Series_Sintéticas_Tr100. Partiendo de estas series sintéticas se procede a determinar la correspondiente curva de duración para cada uno de los meses como se puede ver en la Figura 5-34.

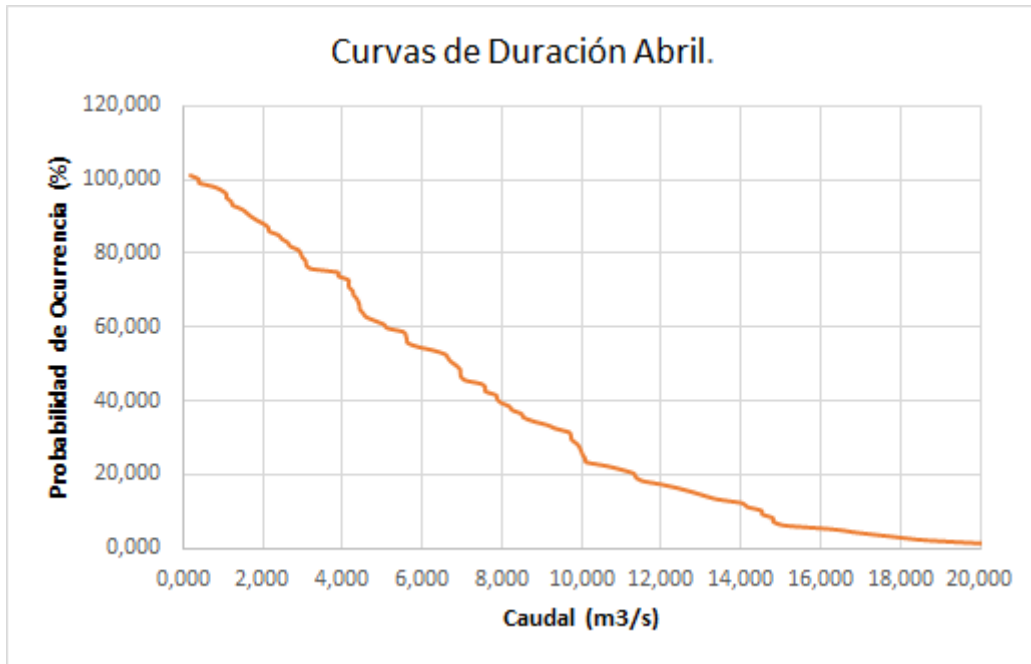


Figura 5-34 Curva de Duración caudales para el mes de Abril.

Como paso siguiente, se extrajo el caudal para una probabilidad de excedencia de 5%, 10% y 15% con el objetivo de calcular los volúmenes de exceso para cada mes siguiendo las ecuaciones establecidas en el numeral 4.5.1.2.2; para lo cual es necesario determinar el caudal máximo que puede ser transportado sin provocar inundaciones, y determinar el caudal que generan los cauces secundarios al cauce principal de estudio.

Con respecto al caudal máximo que puede ser transportado en el río Tuta tras la descarga de La Copa, se realizó el siguiente análisis. Se verificó en el modelo hidráulico, que las secciones aguas abajo del embalse La Copa pueden transportar un caudal de 30 m³/s sin presentar desbordamientos debido a que el cauce se encuentra muy encañonado. Desde ahí en adelante, aproximadamente 11 kilómetros aguas abajo de la descarga de La Copa, el cauce presenta un comportamiento meándrico y, de acuerdo a la revisión en el modelo hidráulico 2D, presenta desbordamientos cuando el caudal sobrepasa 30 m³/s. Esta condición es crítica para la operación puesto que, en el recorrido de 11 km a partir del embalse, se presenta la entrada de caudal de quebradas que ingresan al cauce. Mediante la modelación hidrológica de eventos se determina que, en estos 11 km, para un periodo de retorno de 100 años las cuencas adyacentes generarán un caudal de 20 m³/s. Por lo tanto, la descarga máxima permitida al embalse en un evento de precipitación extraordinario se establece en 10 m³/s para el análisis.

Con el caudal máximo de descarga (10 m³/s) y los caudales de entrada al embalse asociados a probabilidades de ocurrencia, se calcula el volumen de exceso a través de la ecuación mencionada en el numeral 4.5.1.2.2. Para determinar el nivel del embalse correspondiente a los volúmenes de espera

encontrados, se debe tener en cuenta que estos se almacenarán en la parte superior del embalse, es decir, inmediatamente debajo de la cota del vertedero de excesos. Los resultados volúmenes y niveles de espera se pueden ver en la Tabla 5-16.

Las gráficas de la curva guía de caudales máximos para probabilidades de ocurrencia se pueden ver en la Figura 5-35, Figura 5-36 y Figura 5-37 como una línea de color naranja.

Tabla 5-16. Volúmenes de excesos y niveles de espera asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia

	Probabilidad del 5%		Probabilidad del 10%		Probabilidad del 15%	
	VolExceso (Mm ³)	Nivel de Espera	VolExceso (Mm ³)	Nivel de Espera	VolExceso (Mm ³)	Nivel de Espera
Enero	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Febrero	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Marzo	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Abril	14.551	2665.418	11.674	2665.949	9.542	2666.342
Mayo	17.403	2664.885	13.680	2665.579	11.378	2666.004
Junio	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Julio	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Agosto	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Septiembre	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059
Octubre	7.943	2666.637	4.880	2667.195	2.569	2667.604
Noviembre	10.398	2666.184	8.584	2666.519	4.484	2667.265
Diciembre	0.000	2668.059	0.000	2668.059	0.000	2668.059

- **Curva guía resultante de la metodología Volúmenes de Reserva/espera**

La curva guía para caudales mínimos y máximos para cada uno de los meses y probabilidades seleccionados se pueden ver en la Figura 5-35, Figura 5-36 y Figura 5-37.

Es importante mencionar que estas curvas generadas a partir de los volúmenes de reserva y de espera asociados a periodos de retorno actúan independientemente para cumplir las necesidades en épocas de lluvia y de estiaje.

Si se analiza la curva de niveles de espera de la Figura 5-35 se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En los meses de enero, febrero y marzo, los caudales máximos mensuales que ingresan al embalse son inferiores a la descarga máxima posible para el cauce y por consiguiente no se requiere un volumen de espera en esos meses.
- Por su parte, en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, los caudales máximos mensuales determinados son superiores a la descarga máxima establecida, y por consiguiente se debe embalsarlos, evidenciando la necesidad de volúmenes de espera.
- Sin embargo, esta curva de niveles de espera es una limitación máxima de niveles en el embalse, puesto que mayores volúmenes de espera también satisfacen la condición de caudales máximos. Volúmenes de espera más grandes están asociados a niveles de espera más bajos; por consiguiente, existe un número de curvas por debajo de la seleccionada como nivel de espera que también satisfacen la condición de caudales máximos.

De manera similar ocurre con la curva de niveles mínimos o de reserva. Existe un número de curvas, por encima de la definida como reserva, que representando volúmenes de reserva mayores también satisfacen la condición de caudales mínimos aguas abajo del embalse.

Dicho lo anterior se puede inferir que, las curvas contenidas por encima de los niveles de reserva y por debajo de los niveles de espera, satisfacen las condiciones de caudales máximos y de mínimos simultáneamente.

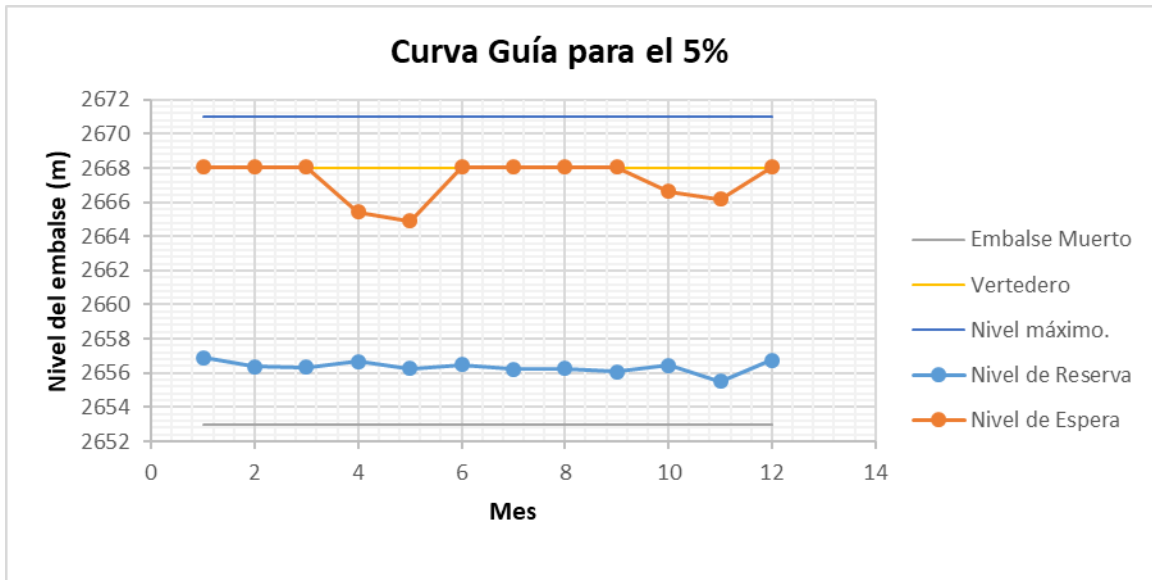


Figura 5-35 Curva Guía para una probabilidad de ocurrencia del 5%

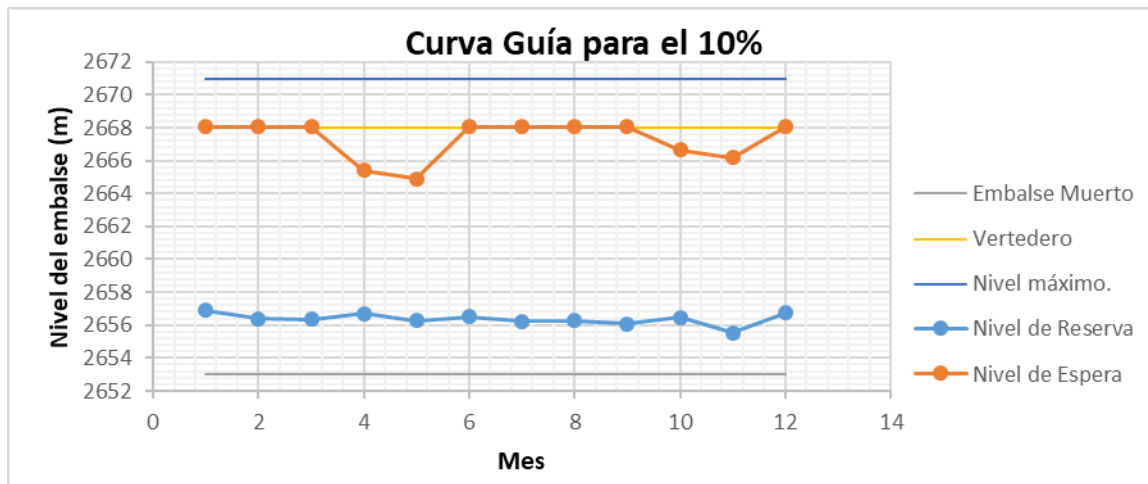


Figura 5-36 Curva Guía para un probabilidad de ocurrencia del 10%

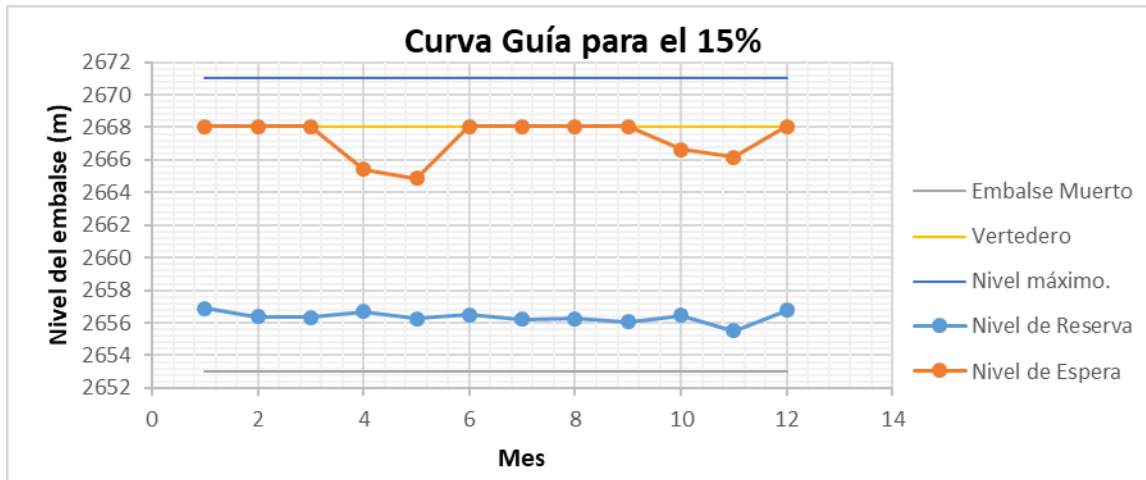


Figura 5-37 Curva Guía para un probabilidad de ocurrencia del 15%

Para seleccionar una de las curvas guía que satisfacen el sistema, se considera una combinación de las necesidades de volúmenes de espera y reserva por medio de factores de ponderación. Para el caso de estudio se dio igual importancia a los eventos de inundaciones y a los de estiaje, por lo cual se realizó un promedio entre los niveles de espera y reserva (i.e. factor de ponderación 0.5).

El nivel de confiabilidad para la determinación de curvas guía mediante esta metodología se estableció en el 95%, por lo anterior, en el caso de estudio, en adelante se trabajará únicamente con probabilidades de excedencia del 5%.

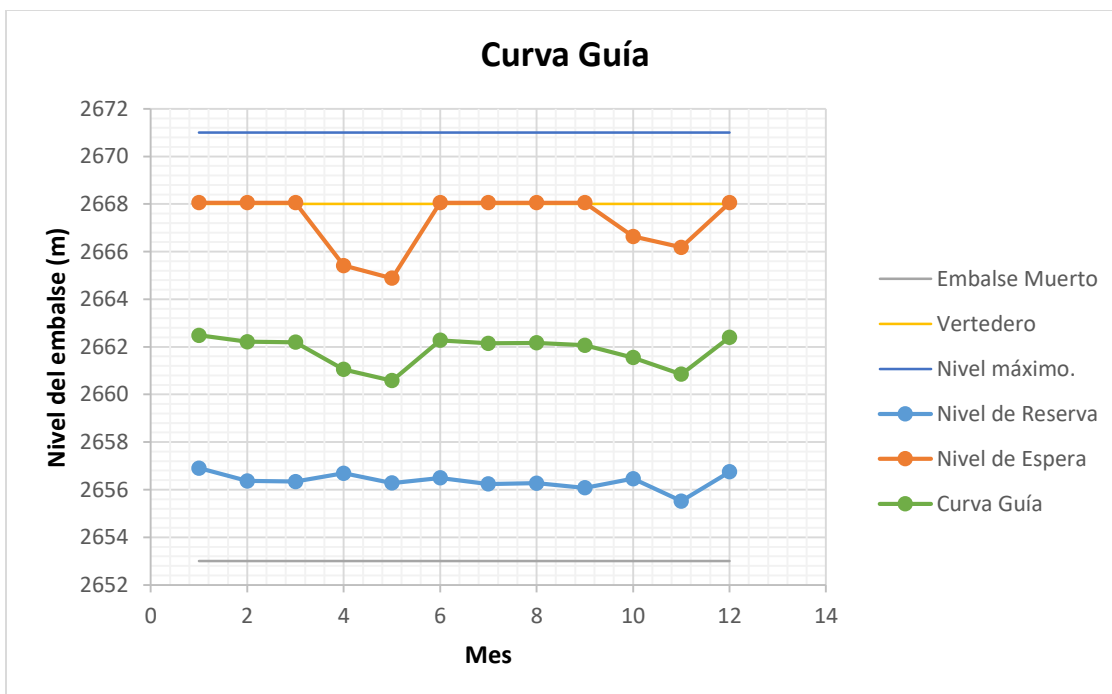


Figura 5-38. Curva guía por el método de volúmenes de reserva y espera – Prob. Excedencia 5%

- **FACTOR DE TEMPORALIDAD DE LOS CAUDALES DE ENTRADA**

Como producto del análisis de resultados realizado en el numeral 5.5.3.7 con respecto a la operación de la curva guía seleccionada por el método de volúmenes de reserva y de espera, se realizó un énfasis sobre el año 2011 y los desbordamientos presentado en el mismo, este análisis se presenta en el numeral 5.5.3.7.3.

- **Determinación del factor**

De acuerdo a dicho análisis, se decidió contemplar la temporalidad de los caudales de entrada materializada en un factor de temporalidad que se determina mediante el siguiente procedimiento; es de aclarar que para el procedimiento se requieren un nivel de información de caudales medios diarios:

- Se selecciona la serie de caudales que caracterizan el ingreso al embalse, bien sea a partir registros mediante una estación de medición, o a partir de la predicción mediante un modelo SMA.
- Se seleccionan los 15 días continuos de cada mes para los cuales se presentan los mayores caudales de entrada. Este paso se realiza de manera independiente para cada uno de los años con series de caudal de entrada al embalse disponible. Esto quiere decir que en enero de un año específico los 15 días de caudal máximo no coinciden con los respectivos para el enero de otro año distinto. Producto de este paso es el valor de la suma de los aportes máximos para un periodo de 15 días en cada mes de cada uno de los años disponibles.
- Se obtienen el porcentaje del caudal total del mes que ingresó en un periodo de 15 días. Este valor se obtiene como una razón entre los aportes máximos en 15 días de un mes determinado y los aportes totales para el mismo mes. Producto de este paso es un valor porcentual para cada mes de cada uno de los años analizados.
- Se promedian los porcentajes del mes de enero para todos los años disponibles y analizados. Este proceso se realiza de igual manera para el resto de los meses. Resultado de este paso es el factor de temporalidad de la lluvia para cada uno de los meses.

Este proceso se realizó para el embalse La Copa con base en las series de entrada de los 24 años de registro y se presenta en el ANEXO_825_Determinación_Factor.

Una vez obtenidos los factores se tiene una tabla como la siguiente, en donde, por ejemplo, se observa que para el mes de junio el 71.5% del caudal ingresa al embalse en un periodo de 15 días:

Tabla 5-17. Factor de temporalidad de los caudales de entrada para el embalse La Copa

Mes	Factor 15d
Enero	0.640
Febrero	0.732
Marzo	0.765
Abril	0.792
Mayo	0.721
Junio	0.725
Julio	0.715
Agosto	0.666
Septiembre	0.684
Octubre	0.701
Noviembre	0.710
Diciembre	0.723

- **Aplicación del factor**

La aplicación del factor de temporalidad de los caudales de entrada consiste en realizar el mismo proceso para la determinación de los volúmenes de espera, con la diferencia que ahora se trabaja teniendo en cuenta únicamente los 15 días de caudal de entrada máximo. De esta manera, el volumen de entrada al embalse equivale al volumen total mensual afectado por el factor de temporalidad para 15 días, y el volumen de salida se restringe al caudal máximo de salida liberado durante únicamente 15 días.

Este procedimiento se llevó a cabo para el embalse La Copa con base en los factores de temporalidad determinados para 15 días, y se presenta en el ANEXO_826_Curva_Guía_Reserva_Espera_3_Factor.

- **Curva guía resultante de la metodología Volúmenes de Reserva/espera utilizando el factor de temporalidad**

Nótese que el factor sólo obtiene una aplicación lógica cuando se trata de caudales de crecientes, puesto que es en estos casos que la temporalidad representa una subutilización de la capacidad de descarga (ver numeral 5.5.3.7.3); mientras que en periodos secos la temporalidad de los caudales de entrada permitiría la recuperación del embalse al nivel de la curva guía.

La curva guía resultante se presenta en la Figura 5-39.

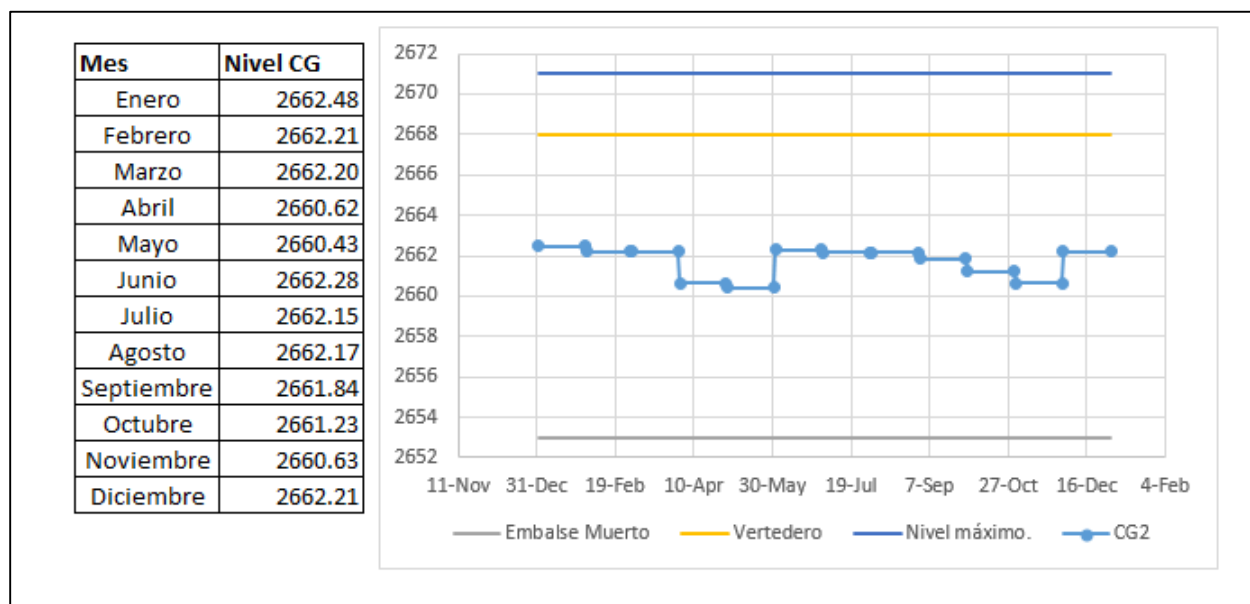


Figura 5-39. Curva guía Vols Reserva/Espera – factor temporalidad

Cada una de las curvas guía encontradas se pusieron a prueba con la simulación de gestión de embalses en el software HEC-ResSim en el capítulo 5.5.3.7.

5.5.1.2.2 Metodología Reserva/Espera basada en las series sintéticas máxima y mínima

En la metodología expuesta en el numeral 5.5.1.2 se utilizaron los caudales más críticos para cada mes de manera independiente; sin embargo, un año hidrológico de inundaciones extremas no necesariamente presenta los caudales más altos en todos los meses, sino únicamente en algunos de ellos. Con el fin de considerar esta premisa, en este numeral se utilizan series sintéticas anuales tal y como fueron generadas a partir del modelo Thomas & Fiering, y con base en estas determinar los volúmenes de espera y reserva.

Partiendo de la generación de 250 series sintéticas escogió la serie que representa las condiciones más críticas tanto para un periodo húmedo como para un periodo seco. Los resultados de este proceso se pueden consultar en la Tabla 5-18.

Tabla 5-18. Series sintéticas máxima y mínima (Thomas & Fiering)

	Serie Periodo Húmedo	Serie Periodo Seco
	m ³ /s	m ³ /s
Enero	0.954	0.761
Febrero	1.532	0.868
Marzo	5.545	0.956
Abril	15.795	0.791
Mayo	21.002	0.150
Junio	5.647	2.573
Julio	3.545	2.348
Agosto	3.208	2.891
Septiembre	0.095	0.512
Octubre	8.112	0.914
Noviembre	9.232	1.315
Diciembre	5.870	0.633

Partiendo del resultado de la selección de series más críticas se procede entonces a determinar tanto los volúmenes de espera y de reserva para el embalse.

- **Volúmenes de Reserva**

Conociendo la serie sintética para el periodo de estiaje se procede a determinar el volumen de déficit mensual tal como se mencionó en el numeral 4.5.1.2.1, que corresponde a las reservas que se deben almacenar de manera mensual en el embalse para el periodo de estiaje considerado. En seguida, con la información de la curva de almacenamiento del embalse, se calcularon los niveles de reserva asociados.

Tabla 5-19 Volumen de Déficit para la serie seca más extrema.

	Caudal Generado	Caudal Mínimo	Caudal Demanda	Vol _{Deficit}	Nivel de Reserva
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	(Mm ³)	(msnm)
Enero	0.761	0.453	3	7.208	2656.37
Febrero	0.868	0.453	3	6.924	2656.26
Marzo	0.956	0.453	3	6.688	2656.16
Abril	0.791	0.453	3	7.129	2656.34
Mayo	0.150	0.453	3	8.847	2657.03
Junio	2.573	0.453	3	2.356	2654.22
Julio	2.348	0.453	3	2.958	2654.53
Agosto	2.891	0.453	3	1.504	2653.78
Septiembre	0.512	0.453	3	7.876	2656.65
Octubre	0.914	0.453	3	6.800	2656.21

	Caudal Generado	Caudal Mínimo	Caudal Demanda	Vol _{Deficit}	Nivel de Reserva
Noviembre	1.315	0.453	3	5.726	2655.77
Diciembre	0.633	0.453	3	7.553	2656.51

- **Volúmenes de Espera**

Partiendo de la serie sintética de caudales máximos seleccionada se procede a determinar el volumen de exceso o de espera para cada mes como se puede ver en la Tabla 5-20. Con los volúmenes de espera y la información de la curva de almacenamiento del embalse se calculan los niveles de espera.

Tabla 5-20 Volumen de Excesos para la serie húmeda más extrema.

	Caudal máximo (SS)	Vol. Máximo (SS)	Caudal de salida	Vol. Salida	Vol _{Exceso}	Nivel de Espera
	m ³ /s	(Mm3)	m ³ /s	(Mm3)	(Mm3)	(msnm)
Enero	0.954	2.55	10	26.78	0.00	2668.06
Febrero	1.532	4.10	10	24.19	0.00	2668.06
Marzo	5.545	14.85	10	26.78	0.00	2668.06
Abril	15.795	42.30	10	25.92	16.38	2665.08
Mayo	21.002	56.25	10	26.78	29.47	2662.47
Junio	5.647	15.12	10	25.92	0.00	2668.06
Julio	3.545	9.50	10	26.78	0.00	2668.06
Agosto	3.208	8.59	10	26.78	0.00	2668.06
Septiembre	0.095	0.25	10	25.92	0.00	2668.06
Octubre	8.112	21.73	10	26.78	0.00	2668.06
Noviembre	9.232	24.73	10	25.92	0.00	2668.06
Diciembre	5.870	15.72	10	26.78	0.00	2668.06

*(SS) serie sintética generada por el modelo Thomas & Fiering

- **Curva Guía**

De acuerdo a los resultados obtenidos en el numeral anterior, es posible generar las curvas de niveles de espera y reserva como se puede ver en la Figura 5-40. Partiendo de estos niveles y de acuerdo a lo mencionado en el numeral 4.5.1.2, las curvas contenidas por encima de los niveles de reserva y por debajo de los niveles de espera, satisfacen las condiciones de caudales máximos y de mínimos simultáneamente. Para el caso de estudio, con el fin de seleccionar una de estas se utilizaron factores de ponderación para los volúmenes de reserva y espera iguales a 0.5.

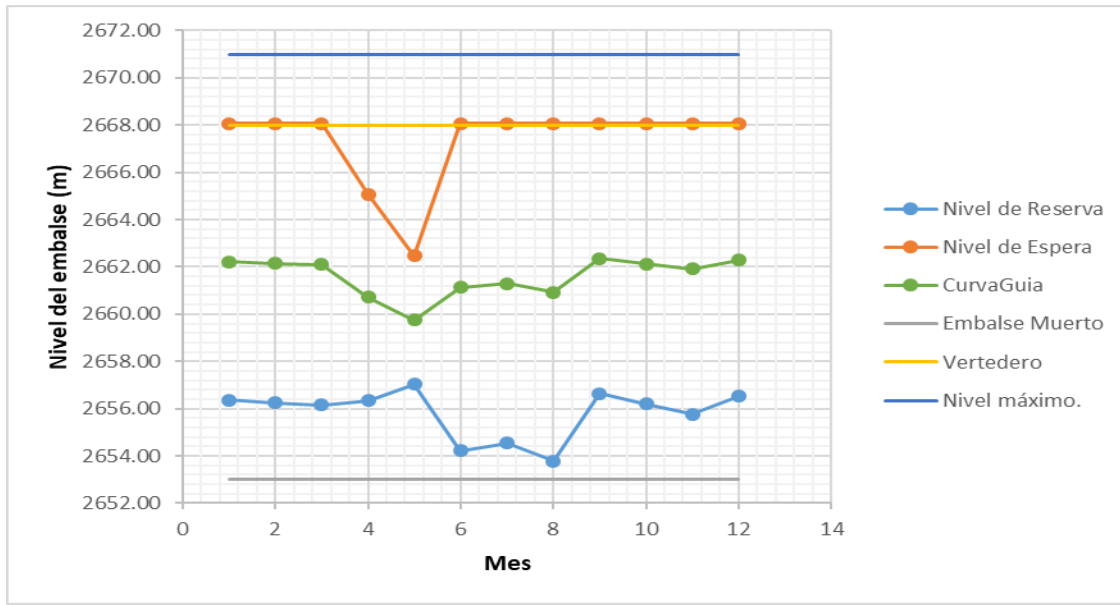


Figura 5-40 Curva Guía para las series sintéticas más extremas 5% de excedencia

Cada una de las curvas guía encontradas se puso a prueba con la simulación de gestión de embalses en el software HEC-ResSim en el capítulo 5.5.3.7.

5.5.1.3 Curva Guía por medio de métodos de optimización

- **Curva Guía por medio de optimización mediante función objetivo**

Como se mencionó previamente, se utilizará para la optimización una función objetivo simple consistente en determinar el valor mínimo o máximo que se genera con un arreglo determinado de parámetros.

Como lo que se quiere es determinar la curva guía del sistema, como variables de decisión se seleccionan los valores de nivel objetivo mensuales (12) que confirmarían la curva guía del embalse La Copa. El objetivo de la función que se plantea es encontrar los volúmenes de déficit y de excesos que se presentan en la operación de una hidrología máxima y una mínima. Las hidrologías corresponden a valores extremos de caudales promedio mensuales encontrados previamente en el caso de estudio (numeral 5.5.1.2) y que se muestran a continuación:

Tabla 5-21. Caudales y volúmenes de afluencias al embalse para los años críticos

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviem.	Dic.
No días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Q(m3/s) afluyente Año crítico húmedo	1.64	1.99	5.23	15.61	16.50	6.45	4.39	5.07	8.75	12.97	14.01	7.80
Q(m3/s) afluyente Año crítico seco	0.38	0.58	0.86	0.50	0.88	1.12	4.56	0.92	1.20	1.09	1.63	0.75
Volúmen (Mm3) Año crítico húmedo	4.40	4.82	14.01	40.47	44.19	16.73	11.77	13.59	22.67	34.73	36.32	20.89
Volúmen (Mm3) Año crítico seco	1.01	1.41	2.31	1.29	2.37	2.91	12.20	2.47	3.12	2.92	4.21	2.00

En la tabla Tabla 5-21, en las primeras dos filas, se muestran los caudales extremos para la condición mínima y para la condición máxima, encontrados como se mostró en el numeral 5.5.1.2; por su parte, en las dos últimas filas se muestran los volúmenes correspondientes a la acumulación de estos caudales si se mantienen constantes durante un mes.

La función objetivo corresponde a la sumatoria ponderada de los volúmenes de exceso y de déficit que representan los fallos en presencia de afluencias críticas húmedas y secas respectivamente. El valor óptimo de esta función se obtiene cuando se minimizan dichos volúmenes de fallo.

$$FO = \text{mín} (V_{\text{excesos}} + V_{\text{déficit}})$$

Los volúmenes de déficit y de excesos se calculan a partir de los valores de nivel objetivo en cada uno de los meses, es decir la curva guía. La forma en que se encuentran estos volúmenes depende de la operación del embalse, y esta depende de la elevación de la lámina de agua en un instante dado con respecto al nivel de la curva guía para el mismo instante.

Para poder determinar el nivel del embalse en cada momento se requiere utilizar un aplicativo complejo o bien, un software como el HEC-ResSim. Sin embargo, poder aplicar un número grande de casos con el fin de encontrar el valor mínimo de la función objetivo planteada usando requiere poder realizar un algoritmo que incluya dentro del mismo la alimentación de parámetros y ejecución del modelo HEC-ResSim.

Debido a esta dificultad, se programó en Excel una hoja de cálculo con procedimientos similares a los realizados dentro del software HEC-ResSim, pero utilizando una escala mensual.

La hoja de Excel programada, no brinda el mismo nivel de confiabilidad en la simulación que el software HEC-ResSim, sin embargo, los resultados tienen un nivel de detalle suficiente para poder realizar un número grande de cálculos con el objetivo de encontrar el valor óptimo de la función objetivo; la formulación funciona mediante un sistema de decisiones en el cual se elige una descarga controlada constante para todo el mes, en función de la posición del nivel del embalse con respecto al nivel de la curva guía.

El ANEXO_827_CG_FuncionObjetivo corresponde al archivo de Excel en donde se ha realizado la formulación para determinar los volúmenes de fallo a nivel mensual y anual, y en donde se formuló y resolvió la función objetivo. Se plantearon tres (3) esquemas de decisión para la simulación de operación de embalses, y se encontraron como resultado tres curvas guía mostradas en la Tabla 5-22. Bajo todos los esquemas, la función objetivo se mantuvo de modo que se minimiza la sumatoria de los volúmenes de exceso y déficit. Los esquemas objetivo se citan a continuación:

1. Minimizar la sumatoria de los volúmenes de exceso y de déficit que se presentan en los 12 meses, utilizando un esquema de decisión basado en la comparación del nivel de la curva guía (objetivo) del mes en estudio con respecto al del nivel del embalse al final del mes precedente. En la Figura 5-41 se muestra un ejemplo en el cual el nivel del embalse al final del mes de marzo se encuentra por encima del nivel de la curva guía para el mes de abril y por lo tanto se escoge el caudal máximo para la descarga controlada en el mes de abril.

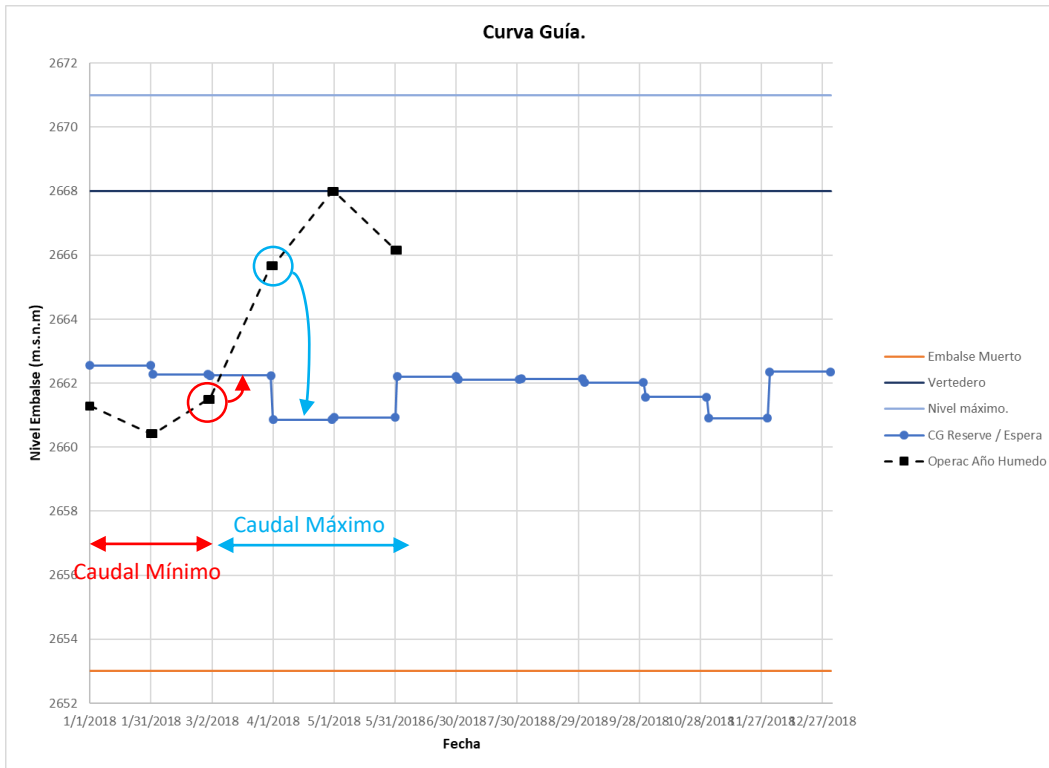


Figura 5-41. Esquema de decisiones No 1 – determinación de curva guía

Las simulaciones llevadas a cabo mediante esta opción presentaron la complicación de actuar sobre la marcha; es decir de plantear las descargas para llegar a la función objetivo basándose en los niveles actuales del embalse, sin contemplar el comportamiento estacionario de la hidrología. A manera de ejemplo se plantea el mes de abril el cual está caracterizado por fuertes lluvias, para este mes podría predecirse su comportamiento y generar mayor espacio disponible antes de que se presenten las crecientes.

2. Como segunda función objetivo y con el fin de predecir el comportamiento futuro y anticiparse a éste, se escogió minimizar la sumatoria de los volúmenes de exceso y de déficit que se presentan en los 12 meses, utilizando un esquema de decisión basado en la comparación del nivel de la curva guía (objetivo) del mes en estudio con respecto al del nivel del embalse al inicio del mes precedente.

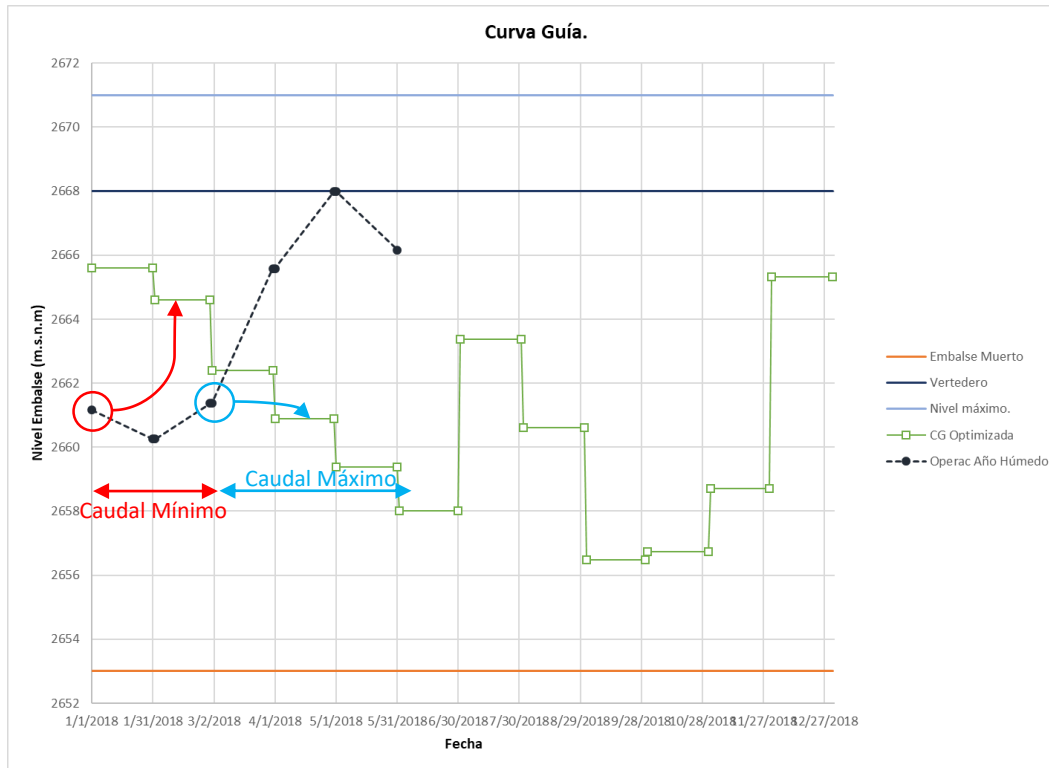


Figura 5-42. Esquema de decisiones No 2 – determinación de curva guía

- Como tercera formulación, se implementó un esquema de decisión por medio del cual se realiza una predicción de los niveles sobre el embalse, al final del mes en estudio, utilizando tanto la descarga máxima posible (de acuerdo al nivel del embalse) como la descarga mínima establecida; las predicciones revelan el estado del embalse al final del mes si se mantiene una de estas descargas como constantes durante el mismo. Con base en los resultados de las predicciones realizadas, se escoge el caudal para el cual el nivel estará más cercano a la elevación objetivo (dada por curva guía) del mes siguiente. A manera de ejemplo, en la Figura 5-43 se muestran las predicciones que se realizan a partir de la elevación dada al final del mes de enero; se observa que la predicción generada utilizando el caudal máximo es más cercana al nivel objetivo en el mes de marzo (de acuerdo a la curva guía), y por consiguiente se escoge esta como la descarga controlada para el mes de febrero.

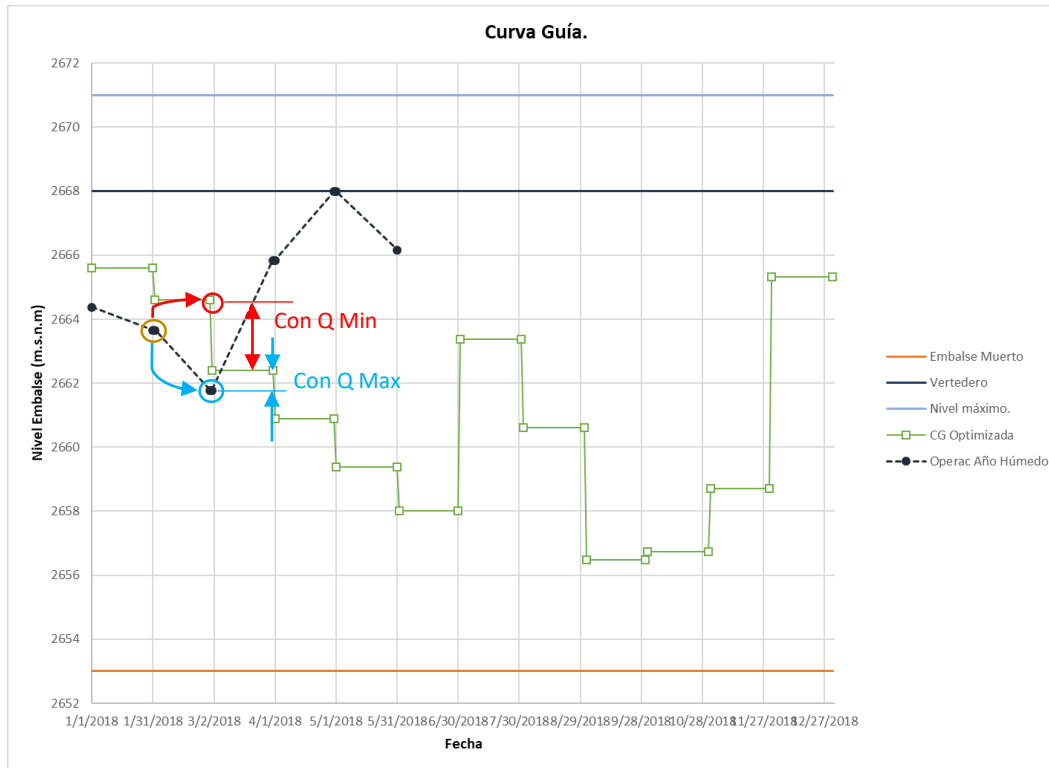


Figura 5-43. Esquema de decisiones No 3 – determinación de curva guía

Las curvas guía encontradas bajo cada esquema se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5-22. Curvas Guía encontradas a través de las formulaciones de función objetivo empleadas

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Novie.	Dicie.
Opt1	2665.59	2664.61	2662.39	2660.88	2659.38	2658.01	2663.37	2660.60	2656.47	2656.73	2658.70	2665.33
Opt2	2657.83	2667.76	2666.17	2664.53	2662.21	2660.82	2659.82	2661.92	2664.33	2661.64	2661.04	2666.30
Opt3	2662.61	2661.46	2660.59	2659.56	2661.94	2660.38	2661.68	2661.78	2660.59	2660.23	2661.81	2662.64

Cada una de las curvas guía encontradas se pusieron a prueba con la simulación de gestión de embalses en el software HEC-ResSim en el capítulo 5.5.3.7.

4. Curva Guía por medio de optimización mediante Método de Montecarlo

Para el caso de estudio se empleó el siguiente procedimiento con el fin de utilizar soluciones aleatorias que generaran un resultado óptimo para la operación del embalse. El objetivo se mantuvo igual al mencionado en el capítulo de la optimización con función objetivo: minimizar los volúmenes de exceso y de déficit derivados de la operación de periodos secos y húmedos.

Sin embargo, el esquema no es el mismo. En este procedimiento se utilizaron 5000 series sintéticas de caudal promedio mensuales generadas a través del modelo de Thomas & Fiering. En seguida se desarrolló un algoritmo en el entorno Visual Basic que está asociado a Microsoft Excel, que realizaba las siguientes acciones:

1. Seleccionar una curva guía asignando valores aleatorios a los niveles objetivo en cada mes. En seguida se escribe esta curva guía en la hoja de Excel para al final determinar cuál iteración obtuvo los mejores resultados.
2. Evaluar las 5000 series sintéticas generadas encontrando el volumen de exceso y de déficit en cada año de evaluación. Estos volúmenes se acumulan para los “5000 años” simulados (con el fin de considerar un gran número de hidrologías posibles). La simulación o evaluación consiste en llevar a cabo la operación del embalse de manera similar a como lo realiza el software HEC-ResSim, pero utilizando una escala de tiempo mensual. Tras la evaluación, se escriben los valores de los volúmenes de fallo acumulados para los “5000 años” en frente de la curva guía con la cual fueron simulados y se genera una sumatoria ponderada asignando un peso al volumen de déficit y al volumen de exceso.
3. Realizar una nueva iteración, seleccionando una nueva curva guía en el primer paso hasta completar 1000 curvas guía evaluadas. La evaluación del segundo paso se realiza con las mismas series sintéticas.
4. Seleccionar la curva guía cuya sumatoria ponderada de volúmenes de déficit y excesos sea mínima entre el rango de curvas evaluadas.

El código y los resultados se observan en el ANEXO_828_CG_Montecarlo. Del anterior procedimiento se obtuvieron las siguientes curvas guía en función de los coeficientes de ponderación:

Tabla 5-23. Curvas Guía encontradas a través del método de Montecarlo implementado

Curva Guía	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviem.	Diciem.
Montecarlo 1	2654.98	2667.72	2666.99	2663.49	2666.76	2666.97	2660.52	2660.64	2664.93	2667.77	2665.07	2666.57
Montecarlo 2	2653.48	2667.95	2654.57	2660.61	2663.14	2662.29	2663.14	2667.05	2663.56	2667.86	2657.19	2667.66

En donde Montecarlo 1 hace referencia a coeficientes de ponderación de 0.5 para volumen de excesos y déficit; y Montecarlo 2 hace referencia a coeficientes de ponderación de 0.6 para volumen de excesos y 0.4 para volumen de déficit.

5.5.2 Resumen de las curvas guía calculadas

Para resumir las curvas guía que se encontraron a lo largo del capítulo 5.5.1, y que se utilizarán en la modelación de embalses; se presenta la Tabla 5-24 y la Figura 5-44 que describen las curvas guía de operación.

Tabla 5-24. Tabla de resumen de curvas guía

	CG Reserve / Espera	CG (Factor)	CG CEH - ECI	CG Montecarlo 2	CG Optimizada	Embalse Muerto	Vertedero	Nivel máximo.
Enero	2662.55	2662.55	2668	2653.48	2665.59	2653	2668	2671
Febrero	2662.27	2662.27	2667.26	2667.95	2664.61	2653	2668	2671
Marzo	2662.24	2662.24	2666.13	2654.57	2662.39	2653	2668	2671
Abril	2660.86	2660.46	2666.29	2660.61	2660.88	2653	2668	2671
Mayo	2660.93	2660.72	2668	2663.14	2659.38	2653	2668	2671
Junio	2662.21	2662.21	2668	2662.29	2658.01	2653	2668	2671
Julio	2662.12	2662.12	2667.96	2663.14	2663.37	2653	2668	2671

	CG Reserve / Espera	CG (Factor)	CG CEH - ECI	CG Montecarlo 2	CG Optimizada	Embalse Muerto	Vertedero	Nivel máximo.
Agosto	2662.14	2662.14	2667.62	2667.05	2660.6	2653	2668	2671
Septiembre	2662.02	2661.81	2667.1	2663.56	2656.47	2653	2668	2671
Octubre	2661.57	2661.21	2667.42	2667.86	2656.73	2653	2668	2671
Noviembre	2660.91	2660.66	2667.95	2657.19	2658.7	2653	2668	2671
Diciembre	2662.35	2662.25	2668	2667.66	2665.33	2653	2668	2671

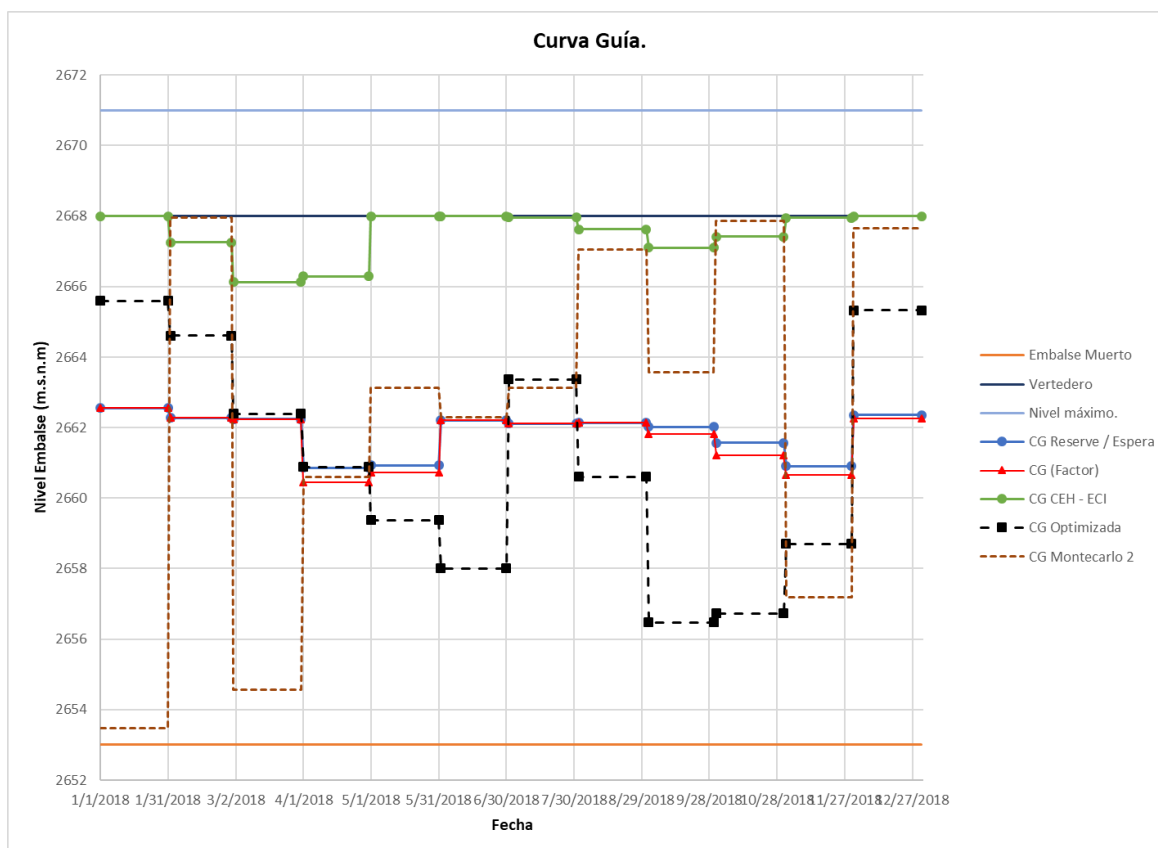


Figura 5-44. Gráfica resumen de curvas guía

5.5.3 Uso del software HEC-ResSim

En este capítulo se muestran los resultados de la construcción, caracterización, corrida y análisis de resultados del modelo de gestión de embalses para el caso de estudio. En este apartado no se muestra el procedimiento empleado para llevar a cabo la construcción y alimentación del programa puesto que esto está emprendido en el ANEXO3_GUIA_HECRESSIM; sin embargo, se mostrarán mediante figuras los resultados del procedimiento en algunas etapas de la construcción del modelo. El capítulo está enfocado en la presentación de resultados y el análisis de los mismos, el cual correspondió con un proceso cíclico o iterativo con el fin de conseguir una curva guía óptima para el sistema.

5.5.3.1 Escenarios de simulación: Análisis para periodos hidrológicos húmedos y secos

Los escenarios comprendidos para el análisis de la curva guía promedio corresponden a las simulaciones del año seco (1995) y del año húmedo (2011) identificados por medio de los registros hidrológicos históricos.

Adicionalmente se añaden dos simulaciones que nacen a partir de la generación de series sintéticas de caudales mensuales de las cuales se seleccionaron los escenarios más críticos, en otras palabras, el año más seco y el año más húmedo generados. El análisis se realiza con el objetivo adicional de evaluar el comportamiento en un intervalo de tiempo más amplio, en este caso de 3 años. Por lo tanto, estos escenarios se componen de la serie crítica y de su serie anterior y posterior, en el orden estadístico en que fueron generadas. El orden en que se generaron las series sintéticas se mantiene con el objetivo de que la series anual sea hidrológicamente lógica; esto se explica bajo el hecho que un año en que se presenten los caudales más grandes en abril-mayo no necesariamente presenta caudales máximos en otros meses como enero-marzo.

5.5.3.2 Propósitos del embalse y función de la curva guía

El cuerpo de almacenamiento del caso de estudio hace referencia al embalse La Copa, ubicado en la cuenca alta del río Chicamocha para la regulación del caudal que transita por el río Tuta. Como se mencionó al inicio del numeral 0 , este embalse fue construido con el objetivo de mitigar las inundaciones sobre el valle del alto Chicamocha; no obstante, posteriormente se constituye el distrito de riego, el cual adiciona el objetivo de suministro de agua a los agricultores.

Sin embargo, a falta de una gestión del embalse, la operación del mismo fue tomada por el distrito de riego Usochicamocha, el cual opera el embalse sin tener unos patrones de operación específicos, que pueden ser evaluados y optimizados para aumentar los beneficios obtenidos a partir de la operación del embalse.

La curva guía que se busca a través del análisis de la gestión de embalses para este caso de estudio, tiene como objetivo satisfacer estos dos objetivos principalmente. Se buscará entonces una configuración de niveles objetivos mensuales que permitan minimizar las probabilidades de inundaciones y desabastecimientos que se adquieran al regular distintas hidrologías posibles.

5.5.3.3 Información base para la simulación

Como información base para la simulación de gestión de embalses para el caso de estudio se tuvo:

- *Mapas base*: se cargó información de alineamientos de cauce, y de las subcuenca del modelo hidrológico para una visualización y ubicación geográfica del sistema.

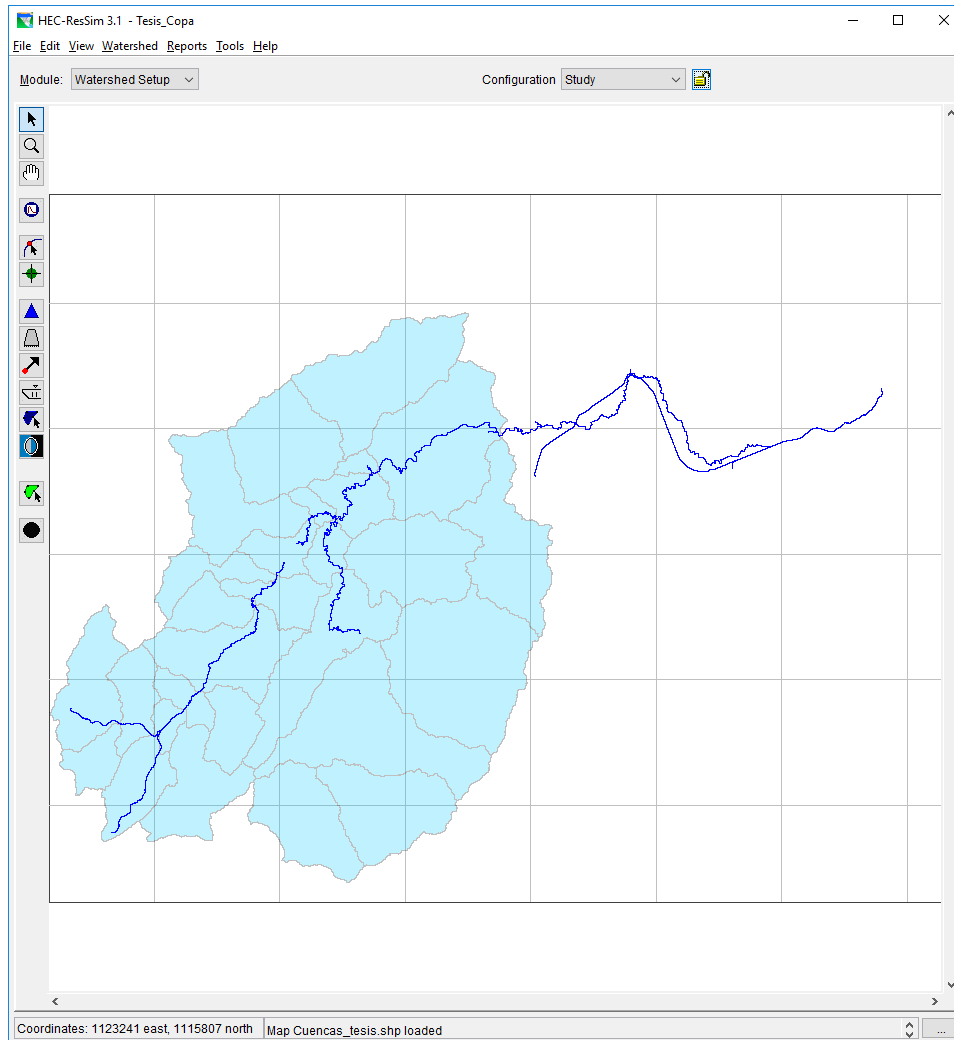


Figura 5-45. Visualización de los mapas base en la ventana principal de HEC-ResSim

- *Series de caudales observados:* debido a que no se contó con información acerca de la operación del sistema en los años de registro, no fue posible realizar una calibración de las descargas del sistema en dichos años. Por lo anterior, no se ingresó información de caudales observados.
- *Series de caudales de entrada:* Se utilizaron las series de tiempo utilizadas se obtuvieron a partir del archivo DSS (Data Storage System) que se produjo tras la simulación del modelo hidrológico de largo plazo (SMA). Se asignó esta información a través del archivo DSS correspondiente para cada uno de los años simulados.

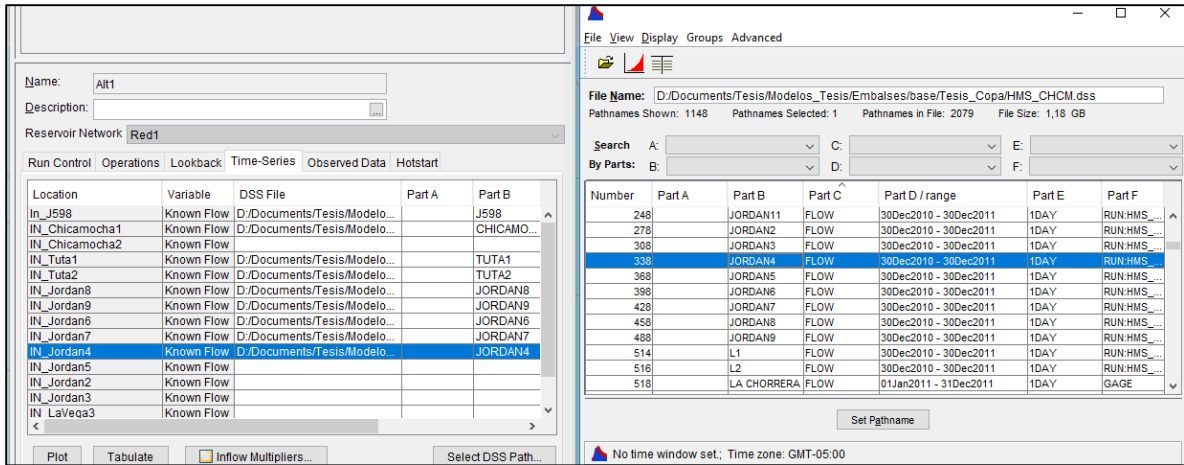


Figura 5-46. Alimentación de las series de tiempo a través de un archivo DSS

- **Parámetros de tránsito en tramos de la red:** se utilizaron los parámetros de tránsito calibrados para el modelo hidrológico (ver Tabla 5-12). La información se ingresó en los *reaches* del modelo de embales como se muestra en la Figura 5-47.

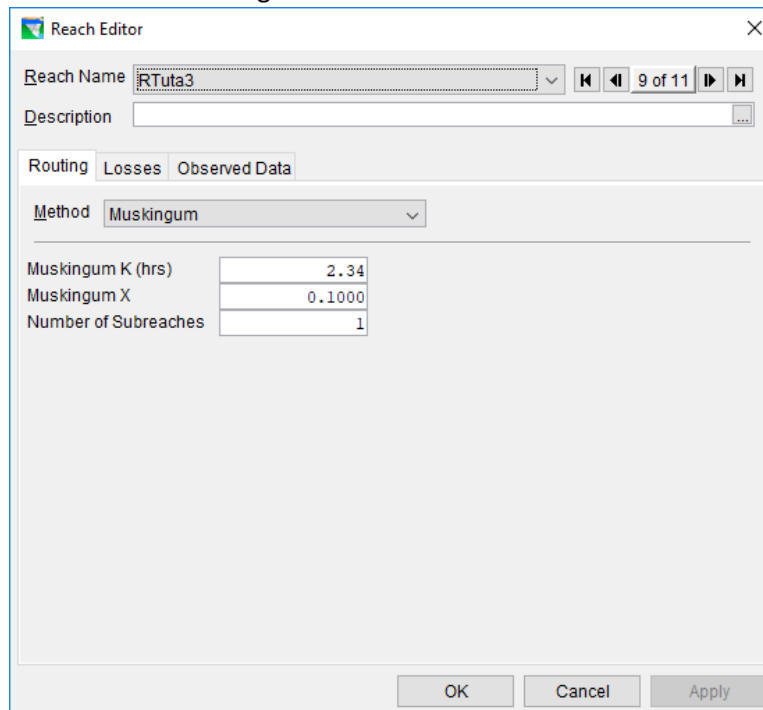


Figura 5-47. Asignación de parámetros del método de tránsito de crecientes

- **Curvas Elevación-Área-Almacenamiento:** se contó con esta información y se ingresó como se muestra en el numeral 5.5.3.4.
- **Niveles máximo y muerto del embalse:** se contó con esta información y se ingresó como se muestra en el numeral 5.5.3.5.
- **Curva guía para la operación del embalse:** se contó con esta información y se ingresó como se muestra en el numeral 5.5.3.5.

- *Reglas o restricciones del embalse:* se contó con esta información y se ingresó como se muestra en el numeral 5.5.3.6.

5.5.3.4 Caracterización física de los embalses

Para caracterizar la forma geométrica del embalse se ingresaron las curvas Elevación-Área-Almacenamiento en la pestaña de características físicas del embalse como se muestra en la Figura 5-48.

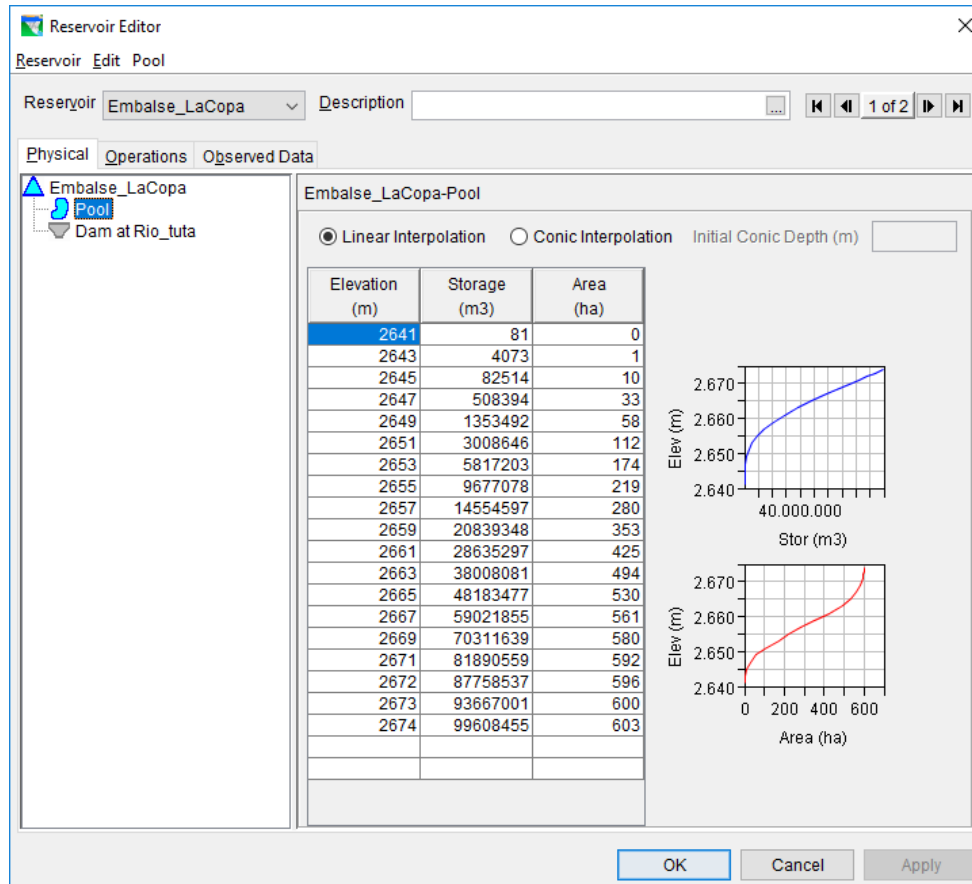


Figura 5-48. Asignación de la curva Elevación-Almacenamiento-Área del embalse

En cuanto a la capacidad de descarga de las estructuras como salidas controladas se cuenta con una única válvula de salida tipo Howell Bunger; la cual controla el caudal máximo de salida por debajo de la cota de vertedero, la información se ingresó como una tabla (elevación-Caudal) que fue calculada con la ecuación de un orificio teniendo en cuenta el diámetro de la válvula totalmente abierta.

Por su parte se cuenta con un vertedero a la altura de 2668 msnm el cual representa la salida no controlada, de manera que una vez se supere la cota de la cresta, la descarga máxima será la combinación de las descargas de la válvula y el vertedero simultáneamente. La información de la descarga no controlada se ingresó también como una tabla en función de la elevación del embalse.

La información de descargas suministrada al software se observa en la Figura 5-49.

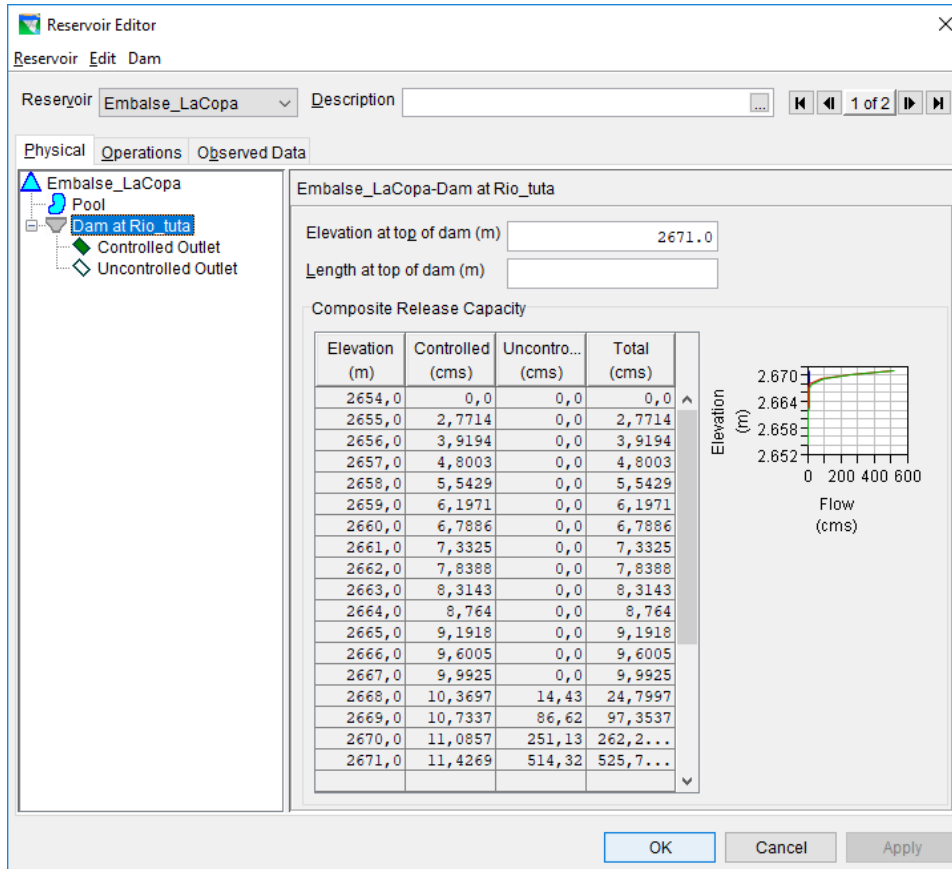


Figura 5-49. Resumen de las salidas (controladas y no controladas) en la presa del embalse

5.5.3.5 Definición de zonas de operación dentro del embalse

Como zonas de operación del embalse se mantuvieron las zonas creadas por defecto por el software: zona de control de inundaciones y zona de conservación. Los límites de estas zonas están definidos de la siguiente manera:

- Para la zona de control de inundaciones el límite superior coincide con la cota máxima del embalse y el límite inferior con la curva guía seleccionada.
- Para la zona de conservación el límite superior coincide con la curva guía seleccionada y el límite inferior con el nivel del embalse muerto.

Esta información se ingresó al software como se muestra en la Figura 5-50.

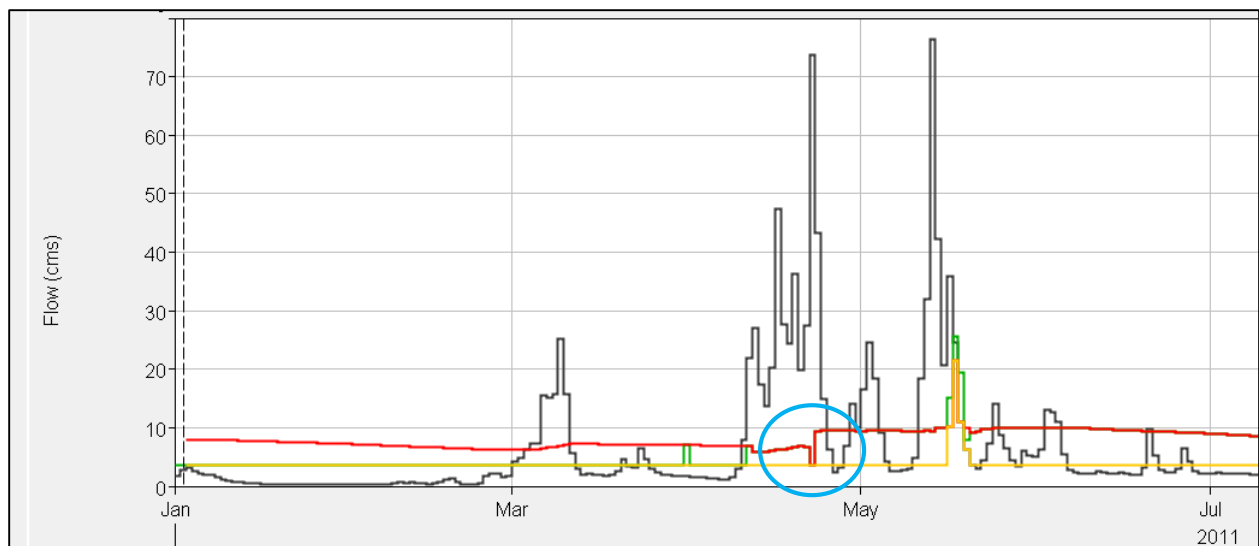


Figura 5-53. Cambio en la operación del embalse inducido por la nueva regla de operación

Esta disminución el caudal máximo permitido de descarga obedece a que en el punto seleccionado para la nueva regla de operación (J310) llegan los hidrogramas afluente de las cuencas Tuta 1 y Tuta 2, con magnitudes como se observa en la Figura 5-54. De modo que, al aplicar la regla de operación, el embalse reduce su descarga de manera que la suma de esta y de las descargas provenientes de las cuencas sea inferior a $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en el momento en que lleguen al punto J310.

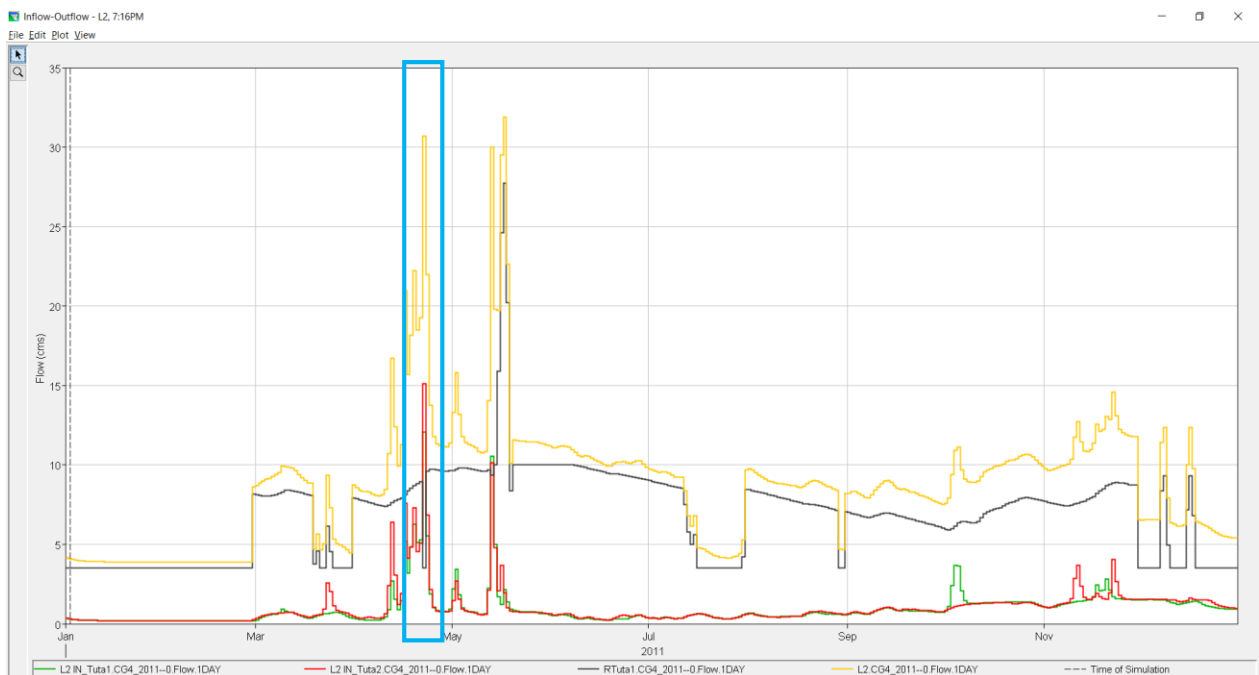


Figura 5-54. Hidrogramas de entradas y salida en un punto aguas abajo del embalse

Sin embargo, existen situaciones en las que esta regla no puede ser cumplida a cabalidad. Una de ellas es en la situación en la que la descarga de las dos cuencas aguas abajo del embalse, por si mismas, aporten más de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal al punto seleccionado, en este caso, aunque el embalse descargara $0 \text{ m}^3/\text{s}$ el

caudal sería igualmente mayor a 30 m³/s. El otro caso en el que la regla no puede ser cumplida en su totalidad es el presentado en la Figura 5-54 para este caso de estudio, en el cual el embalse reduce su descarga hasta un mínimo de 3.5 m³/s, esto se debe a que la regla se definió con una prioridad inferior a aquella que define el caudal mínimo que debe salir del embalse.

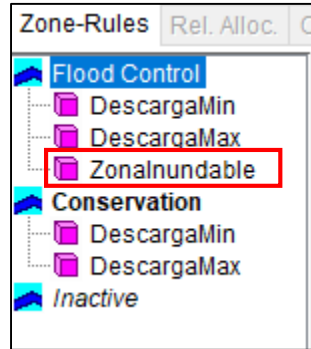


Figura 5-55. Prioridad entre las reglas de operación

En este caso, aunque el embalse presenta una disminución importante del caudal descargado, la sumatoria de los caudales transitados al punto J310, provenientes de los aportes de las cuencas y de la descarga mínima del embalse, supera el límite de 3.5 m³/s, esto podría modificarse si se incrementara la prioridad de la regla denominada “Zonalnundable” sobre la regla que rige la descarga mínima de embalse. La disminución de la descarga del embalse para cumplir la regla de operación de control de caudal aguas abajo se muestra en detalle en la Figura 5-56 y Figura 5-57.

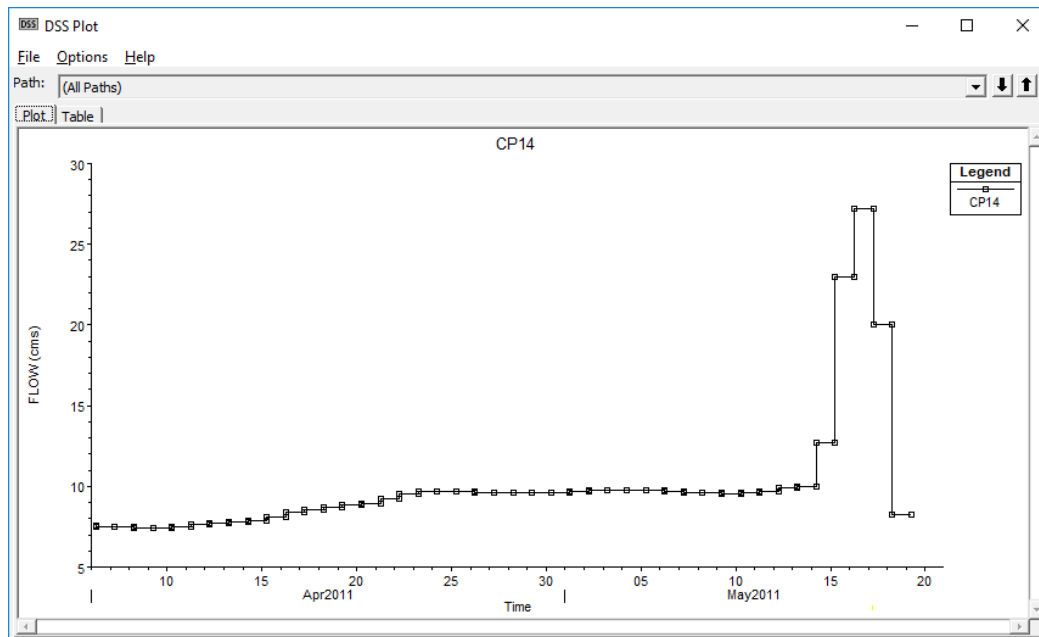


Figura 5-56. Descargas del embalse La Copa sin la regla de operación de control de caudal aguas abajo

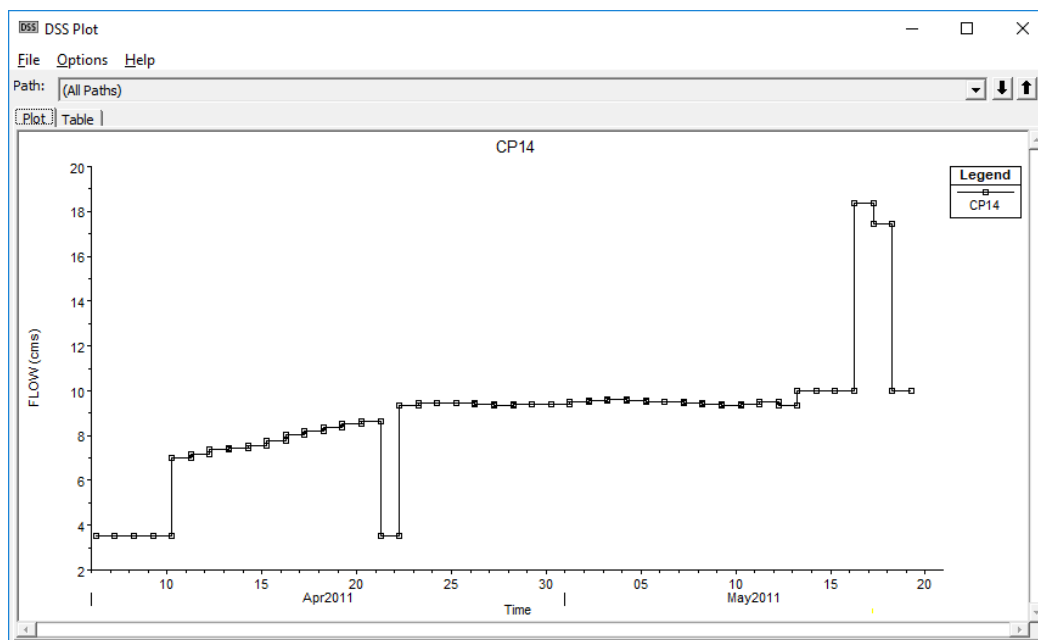


Figura 5-57. Descargas del embalse La Copa contemplando la regla de operación de control de caudal aguas abajo

5.5.3.6.1 Resumen de las reglas de operación

Contemplando lo anterior se utilizaron 4 reglas de operación en total, las dos reglas que se presentan en la parte izquierda de la Tabla 5-25, se utilizaron en la mayoría de las simulaciones; mientras que las dos restantes se utilizaron únicamente en la última corrida con el fin de optimizar las restricciones al flujo en un punto determinado (ver numeral 5.5.3.6, ver mancha inundación Figura 5-73).

Tabla 5-25. Resumen de reglas de operación

Reglas de salida del embalse		Reglas de control en un punto aguas abajo	
Caudal máximo de salida	10 m ³ /s	Caudal máximo en un punto determinado	30 m ³ /s
Caudal mínimo de salida	3.5 m ³ /s	Caudal mínimo en un punto determinado	3.5 m ³ /s

5.5.3.7 Corrida y análisis de resultados

Periodos secos y periodos húmedos

Para el análisis del sistema de gestión de embalses se generaron varios escenarios de análisis, con el objetivo de determinar aquella curva guía que permita una eficiente operación del embalse asegurando una buena operación en condiciones tanto mínimas como máximas; es decir, que para un periodo seco se conserve un volumen de agua almacenado que satisfaga el caudal mínimo aguas abajo y para un periodo húmedo un volumen disponible para almacenar el volumen de crecientes y así evitar posibles emergencias por desbordamientos.

Cada opción de curva guía es evaluada mediante la simulación de varias alternativas críticas, entre ellas se encuentran los periodos secos (1995) y húmedos (2011) identificados en los registros de series históricas, además de otros escenarios correspondientes a eventos críticos de series sintéticas generadas (ver ANEXO_822_SeriesSintéticas).

Las simulaciones se llevan a cabo haciendo uso de las curvas guía elaboradas en el numeral 5.5.1, definiéndolas como el límite superior de la zona de conservación del embalse en el software HEC-ResSim.

5.5.3.7.1 Análisis de Resultados de la operación del embalse con una curva guía dada

En los resultados que se pueden ver más adelante se pueden identificar una serie de figuras las cuales se componen básicamente de dos recuadros. El primer recuadro hace referencia al almacenamiento del embalse a lo largo del periodo modelado, en este se identifican cuatro gráficas (líneas) las cuales indican:

- Almacenamiento en el nivel de embalse muerto (Línea Verde),
- Almacenamiento del embalse a su nivel máximo (Línea Azul),
- Curva guía (Línea Roja)
- Comportamiento del almacenamiento a lo largo del año aplicando las reglas de operación (Línea Negra).

Por otro lado, el segundo recuadro hace referencia al caudal que entra y sale del embalse en el cual se identifican una serie de gráficas que corresponden a:

- Caudal máximo de salida permitido por las estructuras de descarga (Línea roja),
- Caudal mínimo de salida permitido (línea amarilla),
- Caudal que entra al embalse (línea negra) y finalmente,
- Caudal regulado que sale del embalse (línea verde).

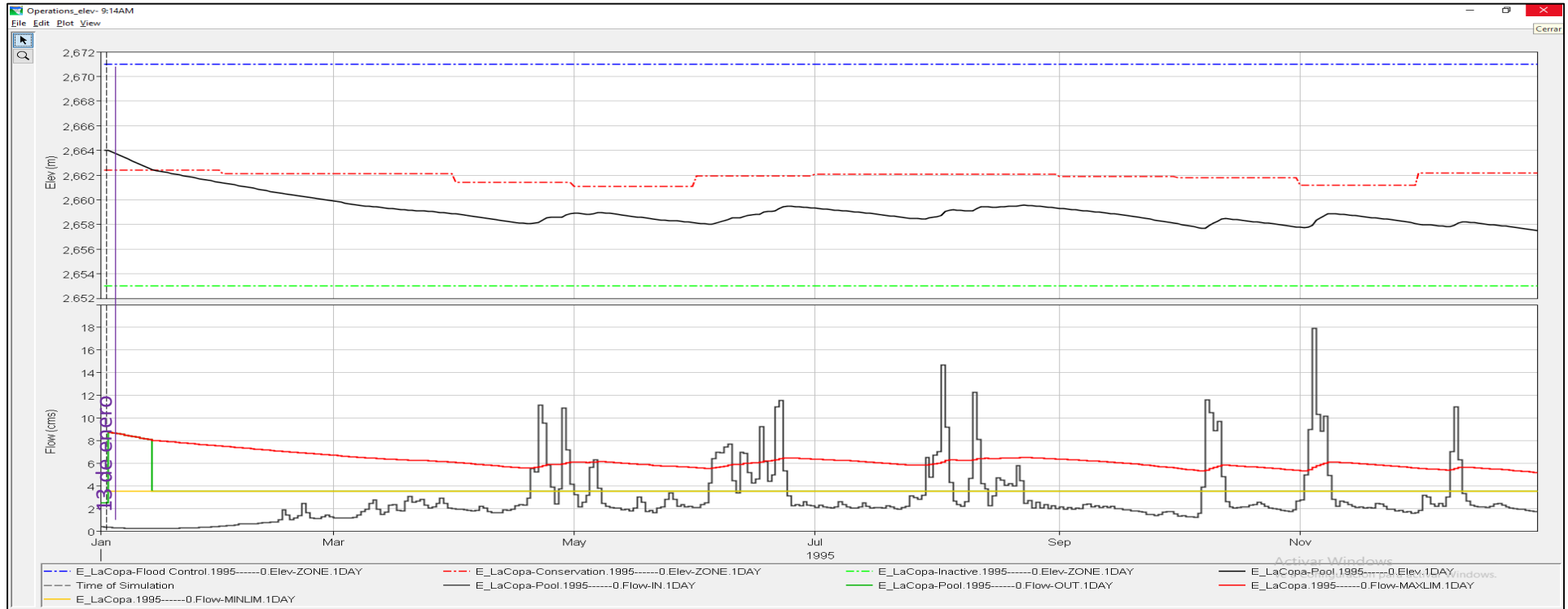
Antes de analizar individualmente los diferentes escenarios modelados, es importante que se recuerde la interpretación que se le deben dar a las gráficas o plots del sistema HEC-ResSim, para ello revisar lo expuesto al respecto en el numeral 4.5.2.7

Como se va a ver evidenciado en los resultados que se muestran a continuación, en el caso de estudio se cuenta con una válvula de salida tipo Howell Bunger; estas controlarán el caudal máximo de salida por debajo de la cota de vertedero. Así mismo, se cuenta con un vertedero a la altura de 2668 msnm el cual representa la salida no controlada, de manera que una vez se supere la cota de la cresta, la descarga máxima será la combinación de las descargas de la válvula y el vertedero simultáneamente.

En los perfiles de resultado que se muestran se cambió la visualización por medio de un *User Plot* con el fin conservar los colores de líneas que delimitan las zonas de operación y visualizar las elevaciones del embalse en un mismo gráfico.

5.5.3.7.2 Análisis de resultados de la operación del embalse – curva guía volúmenes de reserva/espera

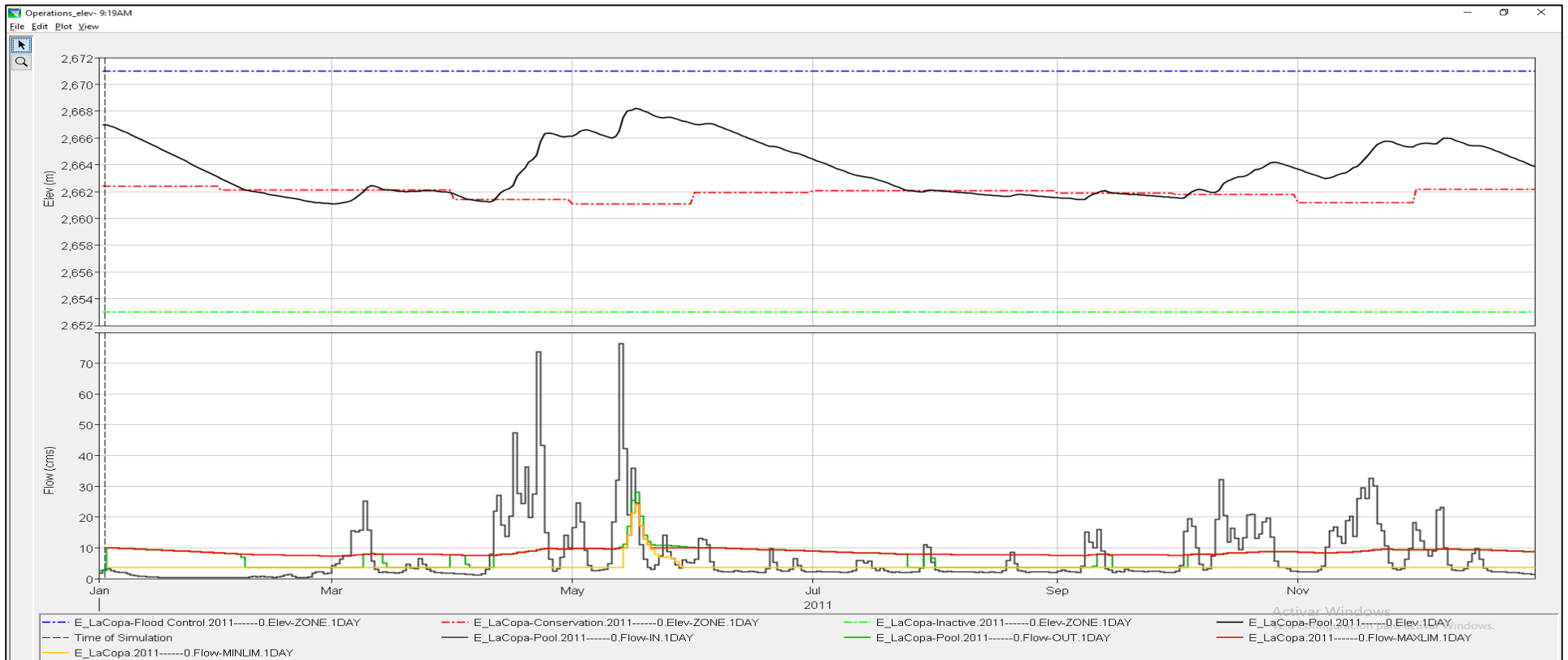
- Resultados de la simulación para el año seco de 1995



Para la modelación del año seco de 1995 la condición inicial establece el nivel a 2664 msnm. Al encontrarse en un nivel superior al indicado por la curva guía, el caudal regulado del embalse al inicio del año toma un valor igual al caudal máximo que puede ser descargado por las válvulas con la altura de agua disponible. Esta condición se mantiene en el tiempo hasta el día 13 de enero, a partir del cual el caudal regulado ya no es igual al caudal máximo, esto se debe a que el flujo de entrada al embalse (línea negra del *Plot* inferior) es muy bajo (inferior a los 2 m³/s), provocando que el nivel de almacenamiento decrezca hasta ubicarse por debajo de la curva guía, entrando en régimen de conservación. A partir de este punto la descarga regulada toma el valor de la descarga mínima (línea amarilla) debido a que las entradas de caudal son inferiores a la descarga mínima impidiendo que el embalse recupere su almacenamiento. Durante algunos periodos de tiempo se observan incrementos del caudal entrante al embalse, siendo estos insuficientes para generar un aumento considerable en el nivel de almacenamiento, por esta razón la operación del embalse desde el 13 de enero hasta finalizar el año mantiene la descarga mínima satisfaciendo de esta manera durante todo el tiempo de modelación tanto el valor del caudal ecológico como el valor del caudal de demanda.

Como resultado de la modelación para el escenario del año 1995 se tiene que en ningún momento se presenta volumen de exceso o déficit garantizando de esta manera una adecuada operación del embalse (i.e. $V_{exc} = V_{def} = 0 \text{ Mm}^3$).

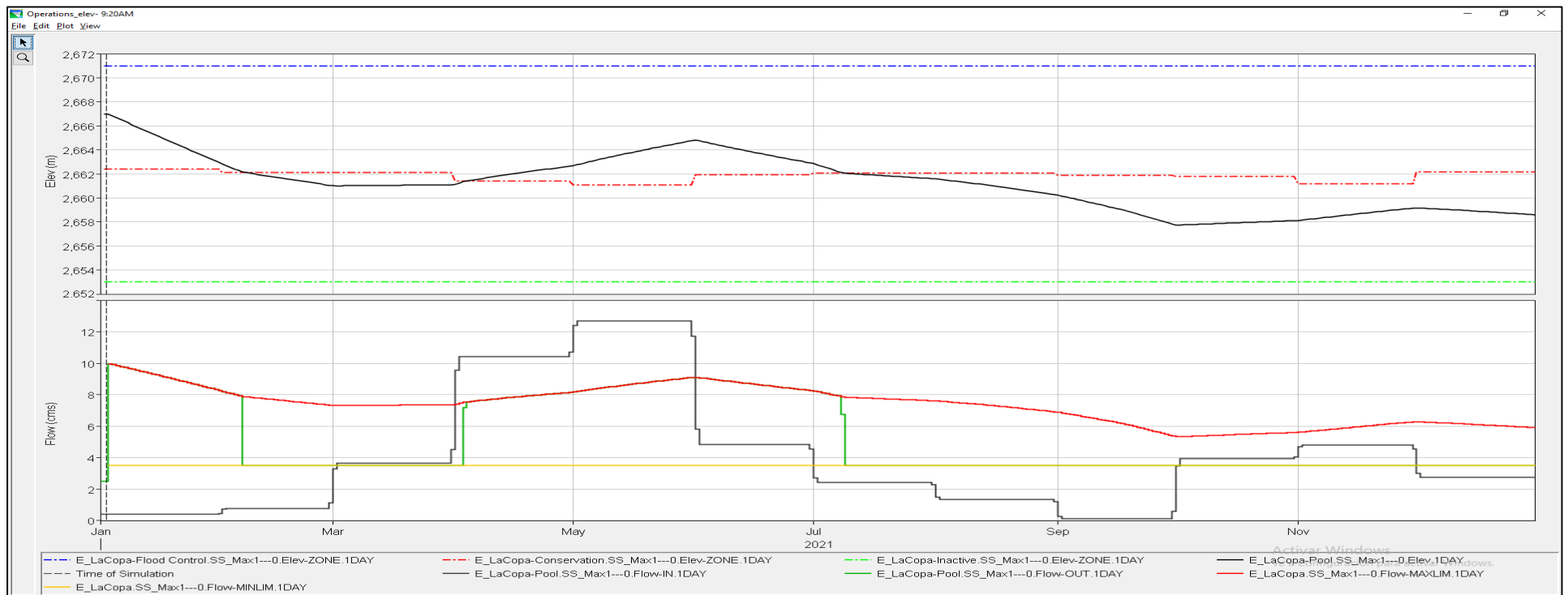
- Resultados de la simulación para el año húmedo de 2011



En la modelación del año húmedo de 2011 la condición inicial establece el nivel del embalse en 2667 msnm, de esta manera se observa que el caudal regulado inicial tiene un valor inicial igual a los 10 m³/s correspondientes al caudal máximo permitido de salida. La descarga regulada toma el valor de la descarga máxima hasta el día 06 de febrero ya que al presentarse un nivel del embalse superior al indicado por la curva guía, el embalse se encuentra en régimen de control de inundación. Posteriormente, el flujo que ha ingresado al embalse ha sido inferior a los 5 m³/s, provocando que el volumen de almacenamiento haya decrecido hasta entrar en régimen de conservación, adoptando la descarga mínima de acuerdo a la demanda. Un evento importante a destacar en la modelación ocurre en el mes de abril y mayo en donde se nota un aumento considerable en los caudales de entrada ya que en algunos momentos estos llegan a tener valores superiores a los 60 m³/s, esta situación provoca que el almacenamiento del embalse se incremente y la descarga por las estructuras se vea insuficiente para asegurar que el nivel se mantenga por debajo de la cota del vertedero, como consecuencia se tiene que este nivel sea sobrepasado en mayo, iniciando de esta manera una descarga no controlada por el vertedero durante 24 días con valores superiores a los 10 m³/s.

Para la modelación del año 2011 se presenta un volumen de exceso correspondiente a 4,14 Mm³

- Resultados de la simulación para el primer año de la serie sintética máxima (Periodo húmedo) SS MAX 1

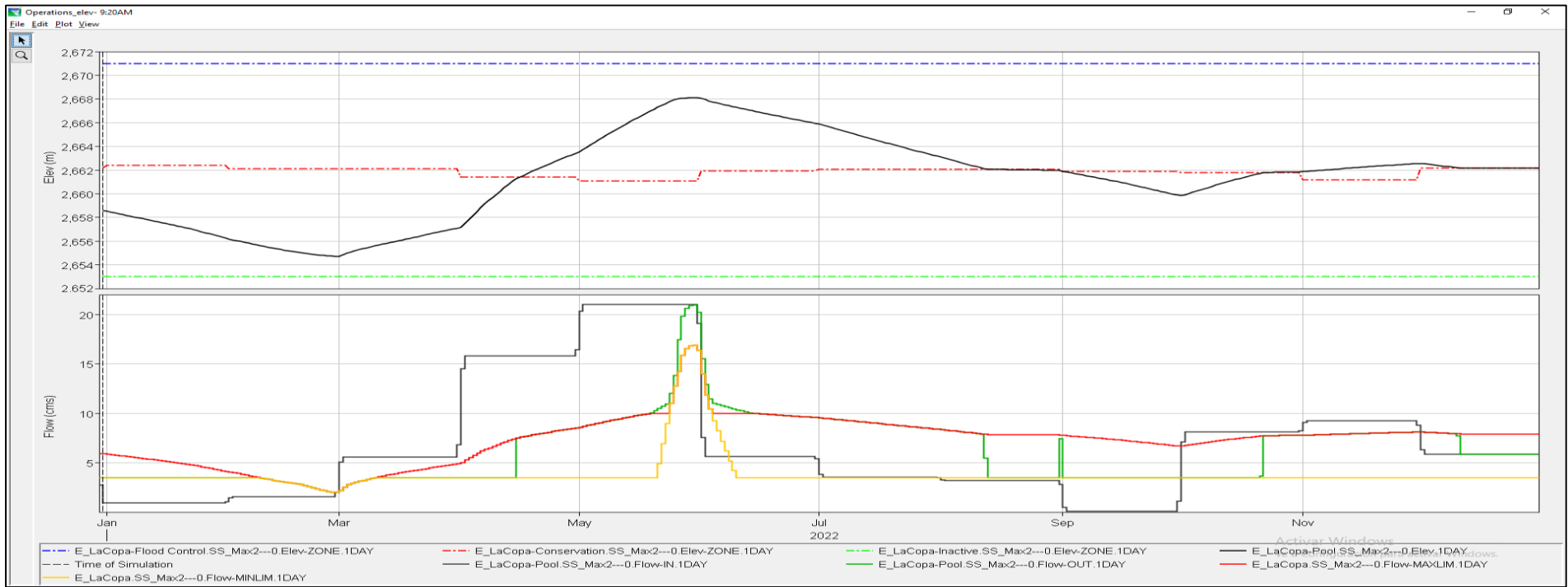


Como se mencionó al inicio del capítulo se llevaron a cabo dos modelaciones más para los escenarios críticos (periodos húmedos y periodos secos) a partir de series sintéticas las cuales contiene tres series cada una representando un año de dicho periodo.

Se inicia entonces con la modelación de un periodo húmedo con las mismas condiciones iniciales que el año 2011, se tiene un valor de caudal regulado que obedece al valor de descarga máxima permitida por el nivel del almacenamiento y la capacidad de las estructuras desde inicios de enero hasta los primeros días de febrero, luego el caudal de salida debe ser ajustado a un valor menor debido a la poca cantidad de caudal que ingresa al sistema tomando entonces valor del caudal mínimo. Debido a la dinámica entre la magnitud de caudal que entra y sale del sistema es posible evidenciar que el valor de la descarga a lo largo del año se mueve entre las dos franjas límites a garantizando en todo momento un caudal mayor a $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y menor a los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ permitidos. Al final de año se puede notar que existe una gran cantidad de volumen disponible para almacenamiento en caso de presentarse una creciente súbita en el año siguiente; sin embargo, el nivel no logró recuperar el indicado por la curva guía estando desprovisto para abastecer un año seco.

Al ser este periodo considerado como un periodo húmedo se entiende que la preocupación principal está en asegurar mediante la aplicación de la curva guía una descarga controlada máxima de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ para que no se provoquen emergencias aguas abajo. Se pudo identificar que ningún día del año se presentó una situación crítica ya que se descargaron valores inferiores a los máximos permitidos, es decir que no se obtuvieron volúmenes de exceso o déficit.

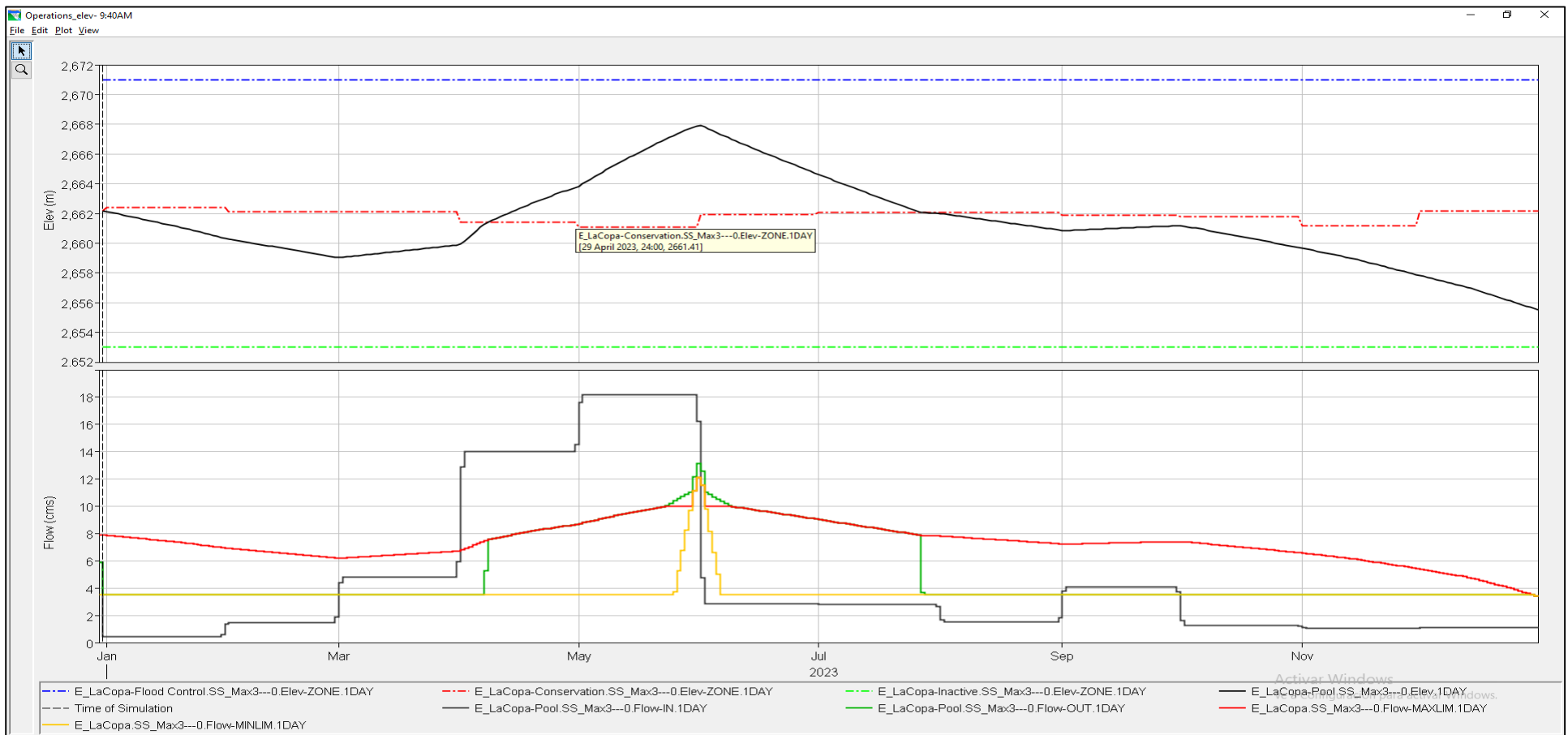
- Resultados de la simulación para el segundo año de la serie sintética máxima (Periodo húmedo) SS MAX 2



Para la modelación del año siguiente del periodo húmedo se inicia con las mismas condiciones finales del modelo SS MAX 1, se tiene un nivel de volumen de almacenamiento inicial en régimen de conservación que va disminuyendo ya que se sigue descargando el caudal mínimo y a su vez no ingresan al sistema afluencias considerables, esta situación hace que el volumen se encuentre muy cerca de los valores del embalse muerto provocando que en un periodo del año (8 de Febrero – 9 Marzo) el caudal que sale del embalse tome un valor inferior al caudal mínimo requerido aguas abajo (3.5m³/s) ya que el nivel de agua sobre las estructuras no es el suficiente para mantener esta condición. Esta situación varía drásticamente al iniciar el mes de marzo en donde empiezan a ingresar al sistema caudales importantes, esto provoca que el embalse entre en régimen de control de inundaciones y la descarga ahora sea la máxima a través de las estructuras hasta llegar al punto de que el nivel del embalse sobrepase el del vertedero y se inicie una descarga no controlada con caudales que en su punto máximo llegaron a los 20 m³/s. La situación con el tiempo se ve regulada y la descarga no vuelve hasta esos puntos críticos variando solamente entre el caudal mínimo y máximo en lo que resta del año, manteniéndose en el valor de la curva guía para la mayor parte del mes de diciembre.

Mediante los resultados se puede observar que es necesario llevar a cabo una serie de descargas no reguladas para amortiguar la magnitud de la descarga que ingresa al embalse provocando que salgan de este más de los 10m³/s requeridos para mantener un flujo aguas abajo que no genere situaciones de emergencia por desbordamientos. En total se presentó un volumen de exceso de 6,71 Mm³ y adicionalmente se presenta un fallo para garantizar el caudal mínimo con un volumen de déficit de 1,54 Mm³.

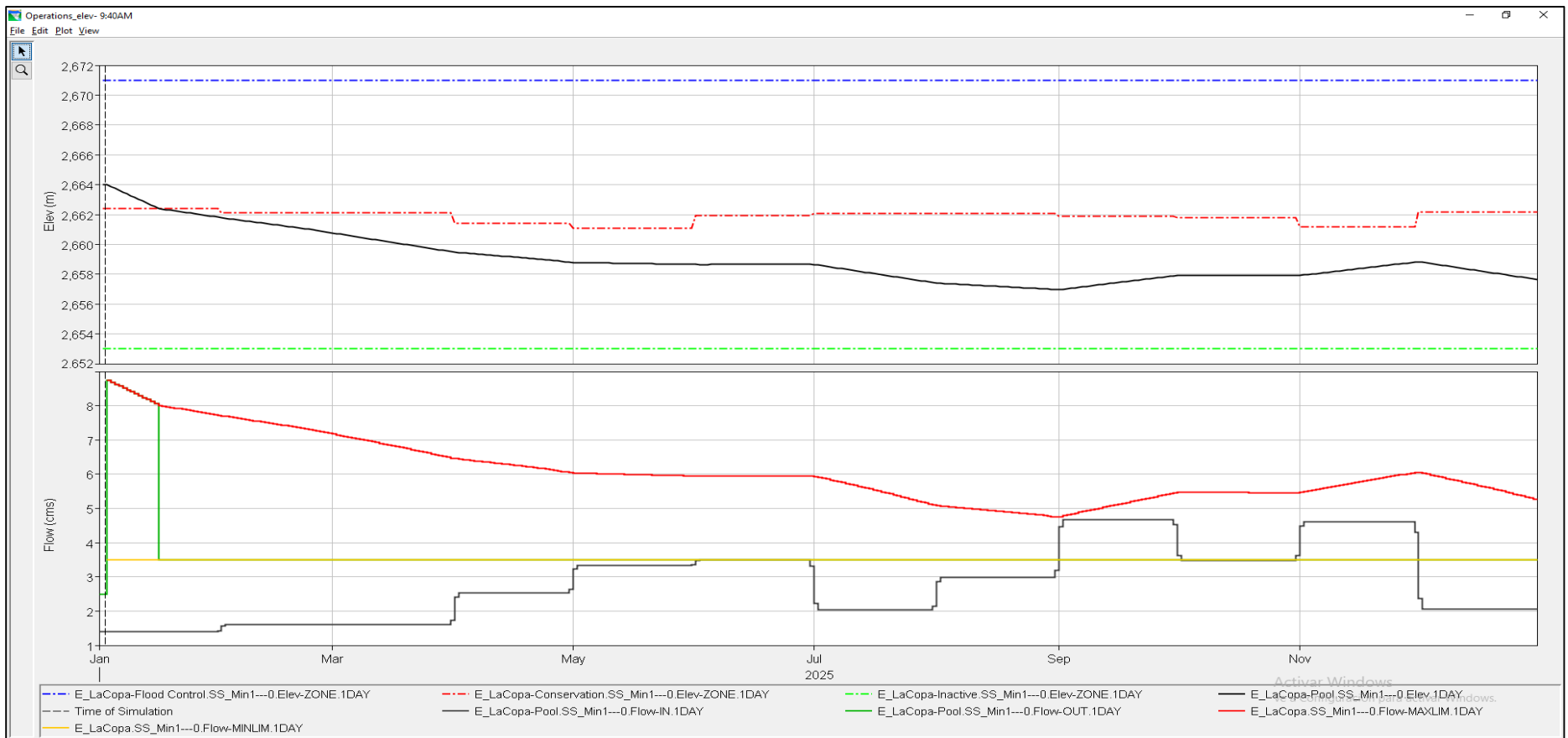
- Resultados de la simulación para el tercer año de la serie sintética máxima (Periodo húmedo) SS MAX 3



Finalmente, para la última parte de la modelación del periodo húmedo se inicia con un volumen en el embalse alrededor de los 35 millones de metros cúbicos el cual coincide con el valor de la curva guía en análisis, este volumen va disminuyendo debido a la poca afluencia de caudal, esta situación no llega a ser crítica ya que se alcanza a satisfacer el caudal mínimo aguas abajo. Esta condición se revierte nuevamente en marzo en donde inicia una temporada de incremento de caudal que entra al sistema obligando que el embalse descargue el caudal máximo por medio de sus estructuras hidráulicas. Se evidencia que en junio hay que hacer uso del vertedero para evacuar el exceso de agua, esta situación es regulada al poco tiempo volviendo el embalse a operar en condiciones normales variando el caudal de salida entre el caudal máximo y el caudal mínimo.

Para el tercer año de modelación se presentan una descarga no controlada por el vertedero presentando un volumen de exceso de 1,17 Mm3.

- Resultados de la simulación para el primer año de la serie sintética mínima (Periodo seco) SS MIN 1

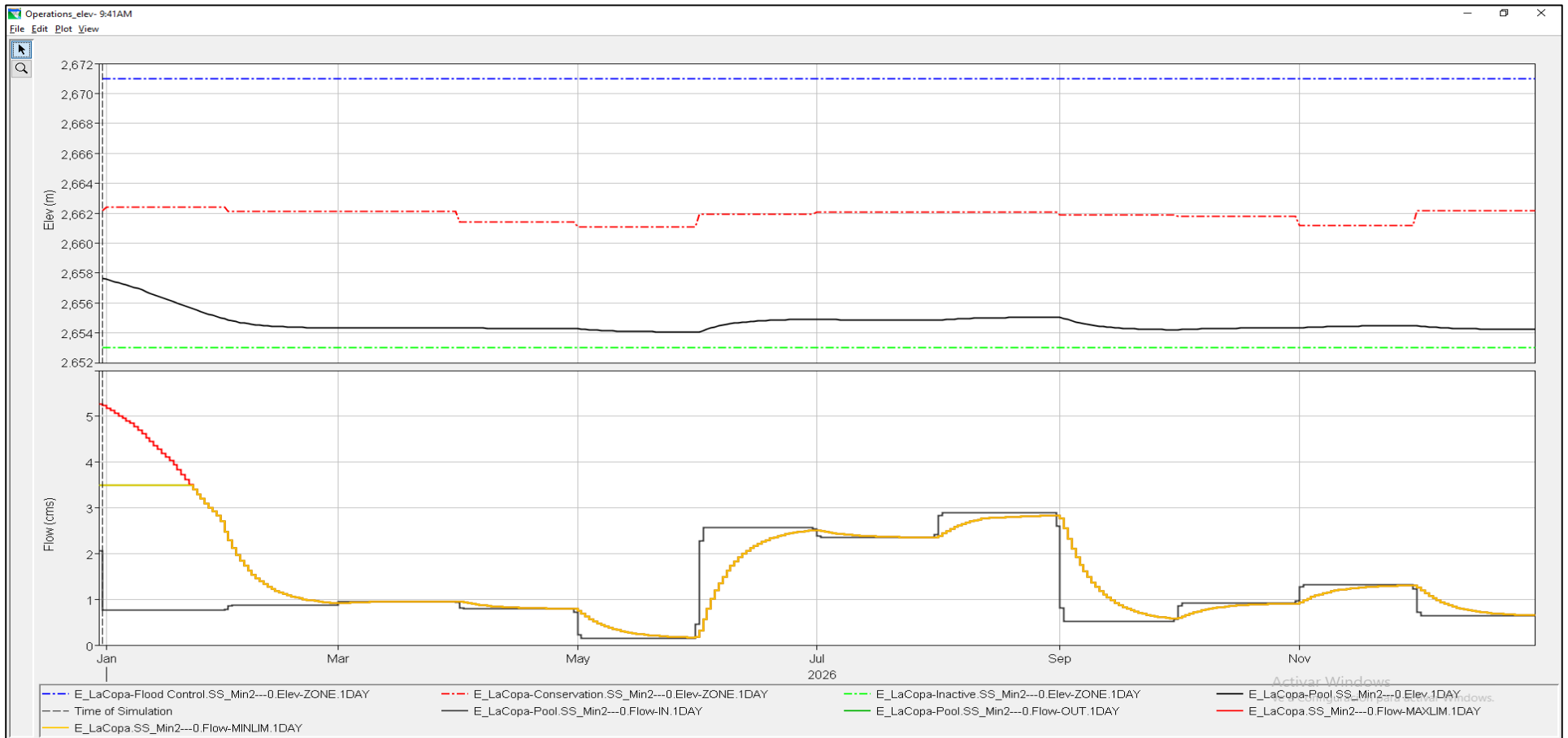


Con respecto a la simulación del evento seco generado a partir de las series sintéticas se inicia con una condición inicial en la cual el nivel de almacenamiento del embalse corresponde a un valor de 2664 m, por esta razón se tiene una respuesta similar a los modelos anteriores. El uso de las estructuras provoca el descenso del nivel del embalse hasta que éste entra en régimen de conservación tras atravesar el nivel definido por la curva guía.

De ese momento en adelante, los bajos caudales de afluencia al embalse provocan que, al satisfacer la demanda, no sea posible recuperar el volumen de agua necesario para alcanzar el nivel de la curva guía, por lo cual la operación del embalse se mantiene en régimen de conservación hasta el final del año.

Al ser este periodo considerado como un periodo seco se entiende que la preocupación principal está en asegurar mediante la aplicación de la curva guía una descarga controlada mínima de 3,5 m³/s con el objetivo de garantizar tanto el valor del caudal ecológico como las demandas que se presentan aguas abajo. Se pudo identificar que en ningún momento del año modelado se presentan situaciones críticas en las cuales se descarguen valores menores al mínimo.

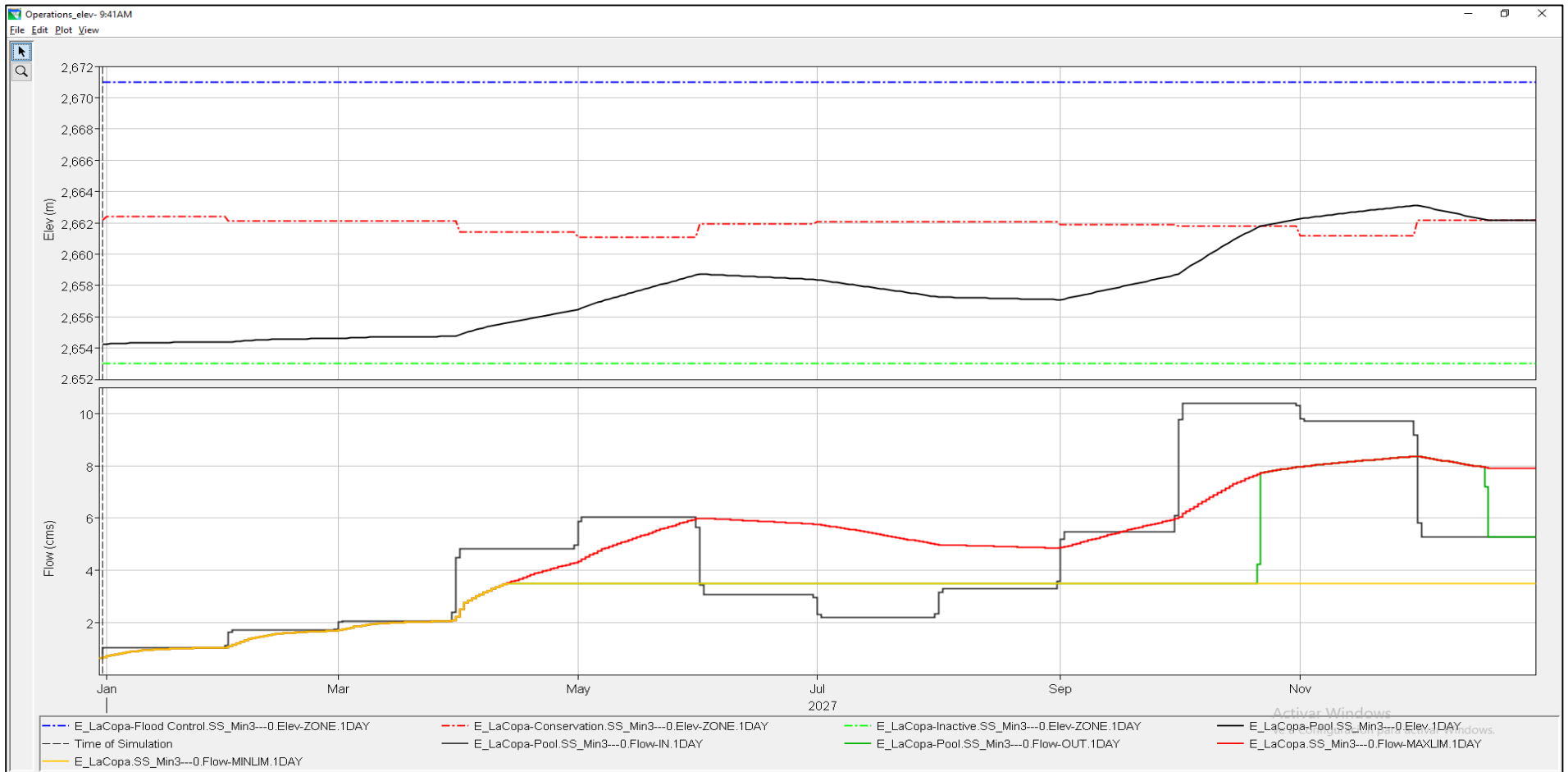
- Resultados de la simulación para el segundo año de la serie sintética mínima (Periodo seco).



Para el segundo año de modelación del evento seco se presentan situaciones críticas ya que los caudales que ingresan al sistema siguen siendo muy bajos durante gran parte del año y no se cuenta con un volumen almacenado disponible suficiente para mantener una descarga constante que satisfaga tanto las demandas aguas abajo como el valor del caudal ecológico. Como consecuencia, para mitad del mes de febrero la descarga regulada disminuye constantemente hasta el mes de junio en donde la descarga regulada llega a valores preocupantes de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$. El comportamiento del embalse se mantiene con la descarga máxima de las estructuras, la cual es inferior al caudal mínimo requerido, presentando desabastecimientos hasta el final del año.

Para el segundo año y la aplicación de la curva guía la operación del embalse se ve comprometida ya que presenta un volumen de déficit total de $62,77 \text{ Mm}^3$.

- Resultados de la simulación para el tercer año de la serie sintética mínima (Periodo seco).



Para el último año de este periodo de análisis las condiciones iniciales son críticas pues no es posible descargar el volumen de agua mínimo de 3,5 m³/s, esta situación se mantiene hasta mitad junio en donde gracias a los incrementos de caudales en esta temporada que ingresan al embalse crean las condiciones ideales para que el almacenamiento se vea incrementado y se pueda descargar del embalse los 3,5 m³/s necesarios para satisfacer tanto el valor del caudal ecológico como las demandas. Esta situación se mantiene a lo largo del año hasta llegar al mes de octubre en donde se hace necesario descargar el caudal máximo que permiten las estructuras; sin embargo, no se llega a realizar descargas mayores a 10 m³/s.

El volumen de déficit para este escenario corresponde a 15,93 Mm³

El resumen de los resultados de los volúmenes tanto de déficit como de exceso de la curva guía para los escenarios planteados se presenta la Tabla 5-26.

Tabla 5-26. Volúmenes de incumplimiento por exceso o déficit con la CG1 reserva/espera

Curva Guía 1 Reserva / Espera	Porcentajes de fallo según las descargas			
	Tipo de escenario	Vol. Exceso (Mm ³)	Vol. Déficit (Mm ³)	Vol. Fallo Total Ponderado (Mm ³)
Año 1995	Mín	0,00	0,00	0,00
Año 2011	Máx	4,14	0,00	2,48
Series sintéticas máximos 1	Máx	0,00	0,00	0,00
Series sintéticas máximos 2	Máx	6,71	1,54	4,64
Series sintéticas máximos 3	Máx	1,16	0,00	0,70
Series sintéticas mínimos 1	Mín	0,00	0,00	0,00
Series sintéticas mínimos 2	Mín	0,00	62,77	25,11
Series sintéticas mínimos 3	Mín	0,00	15,93	6,37

De acuerdo a los resultados obtenidos como gráficas de la operación, y como porcentajes de fallo para los ocho (8) escenarios planteados inicialmente, se pueden realizar las siguientes deducciones:

- La serie sintética de caudales máximos 1 (serie antecesora de la serie sintética con los caudales máximos mensuales (SS máximos 2)), no genera una condición crítica de inicio para la SS máximos 2; por el contrario, los caudales de la SS máx 1 generan una condición final de un nivel en el embalse de aproximadamente 2659 msnm, proporcionando un volumen de espera adicional para la serie sintética de máximos 2. Por esta razón, la evaluación de las curvas guía con el resto de metodologías, se realizará sin tener en cuenta la SS max 1 (añadida al final de la Tabla 5-26).
- En las series sintéticas de caudales mínimos 1 y 2, se observa que la simulación parte de un nivel inicial, y rápidamente el nivel del embalse se ubica por debajo de la curva guía en donde descarga el caudal mínimo hasta el final del año; esto sin cambiar de decisión de operación puesto que el embalse nunca se recupera. Esto implica que tanto SS min 1 como SS min 2 representan una condición bajo la cual el embalse siempre se encuentra en régimen de conservación; por lo anterior, de manera similar a las series sintéticas máximas, se trabajará únicamente con SS min 2 puesto que no requiere de un año precedente mínimo para representar una condición crítica (añadida al final de la Tabla 5-26).
- La condición de la serie sintética SS máx 2 (individual) genera condiciones de caudales máximos más críticas que la serie histórica del año 2011; sin embargo, esta serie se conserva con el fin de verificar la operación del embalse (a través del modelo hidráulico 2D) con la misma hidrología que se revisó la situación no regulada.
- La condición de la serie sintética SS min 2 (individual) genera condiciones de caudales mínimos más críticas que la serie histórica del año 1995, por lo anterior no se utilizará esta serie histórica para el análisis del resto de las curvas guía.

De las deducciones anteriores se conservaron los siguientes escenarios para el análisis y comparación de resultados de las otras metodologías de curvas guía:

Tabla 5-27. Escenarios conservados para el análisis y comparación de curvas guía

Tipo de escenario	Escenario
Máximos / inundaciones	Serie histórica 2011
Máximos / inundaciones	Serie sintética caudales máximos 2
Mínimos / estiaje	Serie sintética caudales mínimos 2

5.5.3.7.3 Justificación del factor de temporalidad de lluvia y Análisis de Resultados de la curva guía reserva/espera afectada por el mismo

- Consideración de la temporalidad de caudales de entrada durante el mes

Un análisis importante, que se puede realizar de manera adicional a partir de la simulación realizada para el año 2011 utilizando la metodología para curva guía de volúmenes de reserva y espera, es encontrar la razón de los grandes caudales de exceso liberados por medio del vertedero ubicado en la cota 2668 msnm en el mes de abril (2011) aun cuando se operó utilizando la curva guía (metodología volúmenes de reserva y espera).

Para analizar lo sucedido se tienen en cuenta los siguientes aspectos: volumen de las afluencias presentadas en el mes de abril de 2011, caudal de descarga máxima teórico y volumen descargado en el mes de abril 2011.

Como se observa en la Figura 5-58 (izquierda), hasta el día 11 de abril, el embalse se encuentra en su condición de equilibrio, es decir sobre el nivel indicado por la curva guía. Adicionalmente se puede observar (Figura 5-58, derecha) que hasta ese momento no se han generado entradas de caudal grandes el embalse, y que en lo que resta del mes entrará casi la totalidad del volumen de ese mes.

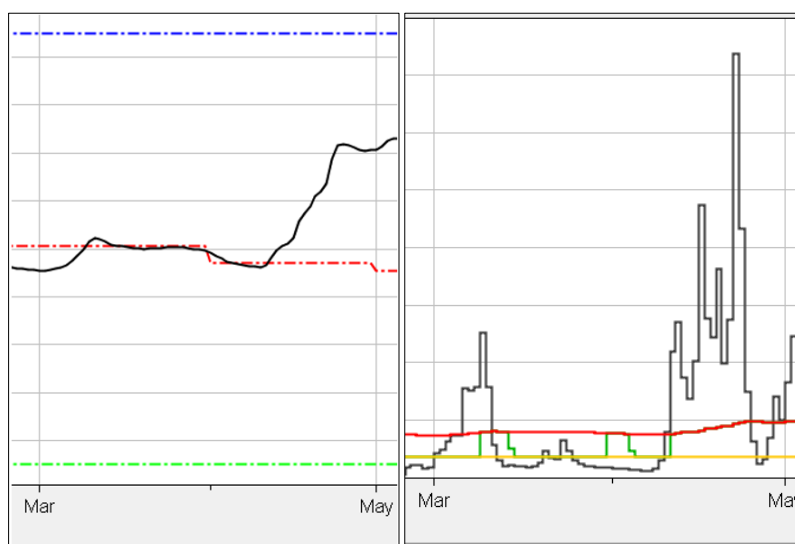


Figura 5-58. Detalle de la gráfica de operación del mes de abril de 2011 - HECResSim

La situación que genera una elevación inesperada del nivel del embalse en el mes de abril se explica con base en estas fechas, puesto que la operación genera una subutilización de la descarga máxima como se verá a través de las siguientes anotaciones.

- El valor del volumen total de aportes del mes de abril de 2011, de acuerdo a los resultados del modelo SMA para este año, es de 38.55 Mm³.
- Este volumen de entrada ocurrió en su mayor parte entre el 11 al 30 de abril.
- La capacidad de descarga máxima es de 10 m³/s para las válvulas con lámina de agua suficiente sobre las mismas; sin embargo, para la elevación de la curva guía el valor es ligeramente inferior a 10 m³/s. Esto es igual a 25.92 Mm³ para el mes de abril.
- La descarga realizada entre el 01 de abril y el 11 de abril no es la máxima, puesto que al estar en sobre la curva guía, el embalse no se encuentra en régimen de control de inundaciones en este periodo de tiempo.
- Por consiguiente, entre el 01 y el 11 de abril no se realizó la descarga potencial para la altura del embalse, puesto que, en la mayor parte de este periodo, el embalse se encuentra en régimen de conservación. Esto da lugar a un volumen de descarga potencial subutilizado.
- La descarga real realizada, obtenida a partir de la tabla *Release Decision Report* de HEC-ResSim, entre el 01 y el 11 de abril es de 4.85 Mm³.
- La descarga real realizada entre el 11 y el 30 de abril es de 14.69 Mm³.
- La descarga real realizada para todo el mes de abril es de 19.54 Mm³.
- El volumen de espera es de 38.14 Mm³ para abril y 37.12 Mm³ para mayo. Sin embargo, si en el mes de abril se utiliza todo el volumen de espera, el nivel del embalse al 30 de abril estará en el nivel del vertedero y no tendrá volumen de espera para el mes de mayo.
- El volumen de excesos almacenado en abril es igual a 38.55-19.54 Mm³ = 19.01 Mm³.
- Este volumen deja únicamente un volumen de 38.14-19.01 Mm³=19.13 Mm³.
- El volumen que dejó de aprovecharse de la descarga potencial es de 25.92-19.54=6.38 Mm³. Este se denomina volumen subutilizado.

El volumen subutilizado representa el 25% de la descarga potencial. De haberse generado esta descarga se habría podido evitar la descarga no controlada en el mes de mayo. Sin embargo, este volumen no se descargó a causa de la definición misma de la curva guía, por lo cual se puede definir un factor de amplificación en el momento de definir la curva guía del sistema. Este factor se desarrolla en el numeral 5.5.1.2.1.

- **Análisis de Resultados de la curva guía afectada por el factor de temporalidad**

2011

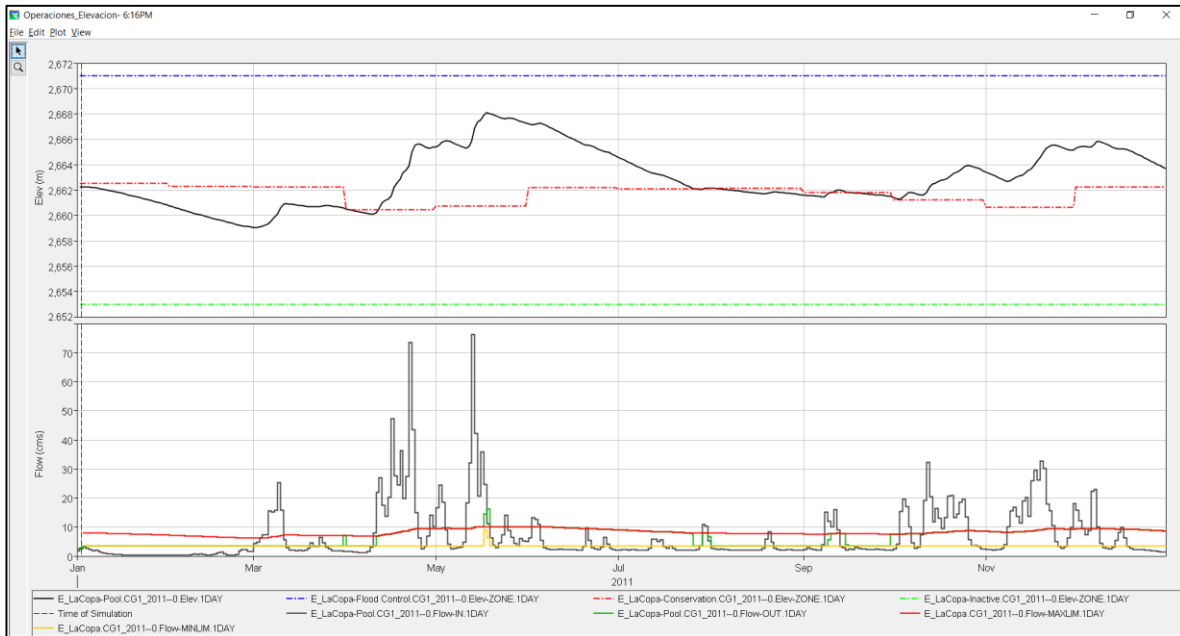


Figura 5-59. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario 2011

Los resultados de la modelación para las condiciones del año 2011 muestran que se parte desde un régimen de conservación el cual continúa hasta el 11 de abril, a partir de este punto se busca almacenar el volumen de agua entrante al sistema ya que los valores de los caudales de las cuencas aportantes aguas arriba empiezan a incrementar. Este comportamiento se mantiene básicamente en lo restante del año con algunas fluctuaciones menores entre conservación y control de inundaciones durante el periodo de agosto a octubre. Al ser este un año húmedo la modelación arroja que la operación del embalse durante todo el año tiene un volumen de exceso de 0.92Mm^3 y un volumen de déficit de 0.0Mm^3 .

SSMax2

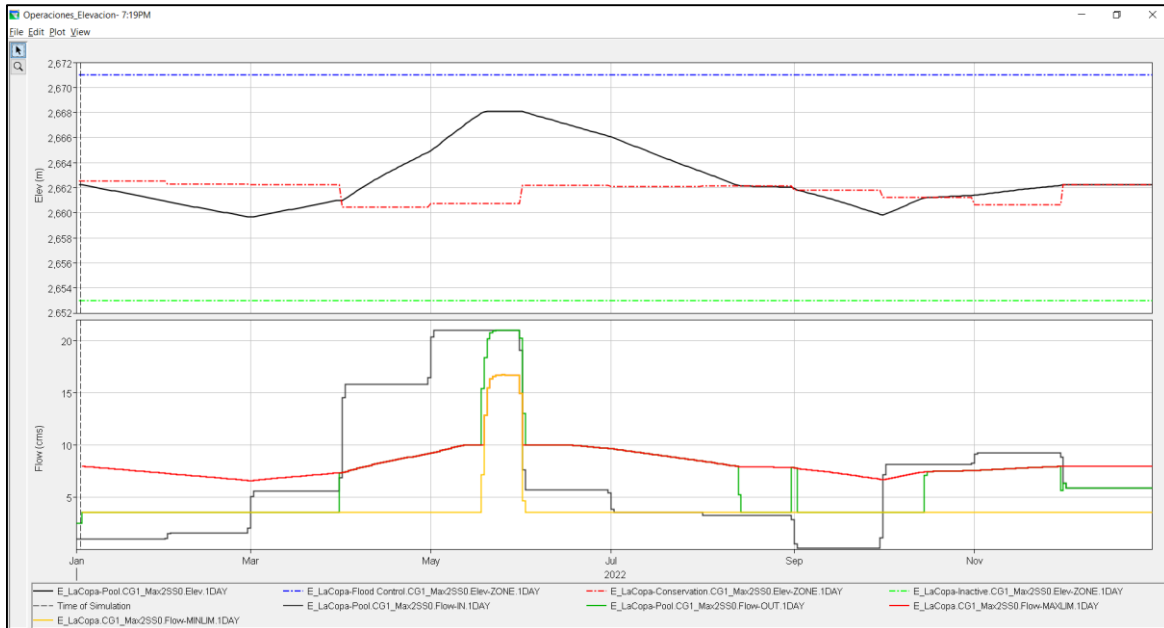


Figura 5-60. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario SSMax2

La modelación del este año húmedo inicia con una operación de conservación que va hasta abril. A partir de este punto la respuesta del embalse ahora tiene como objetivo el control de inundaciones, este cambio se debe a que los caudales que ingresa al sistema se hacen más altos esta situación se mantiene desde el mes de abril hasta agosto. Para este año se cuenta con un volumen de exceso total de 12.68 Mm³.

SSMin2

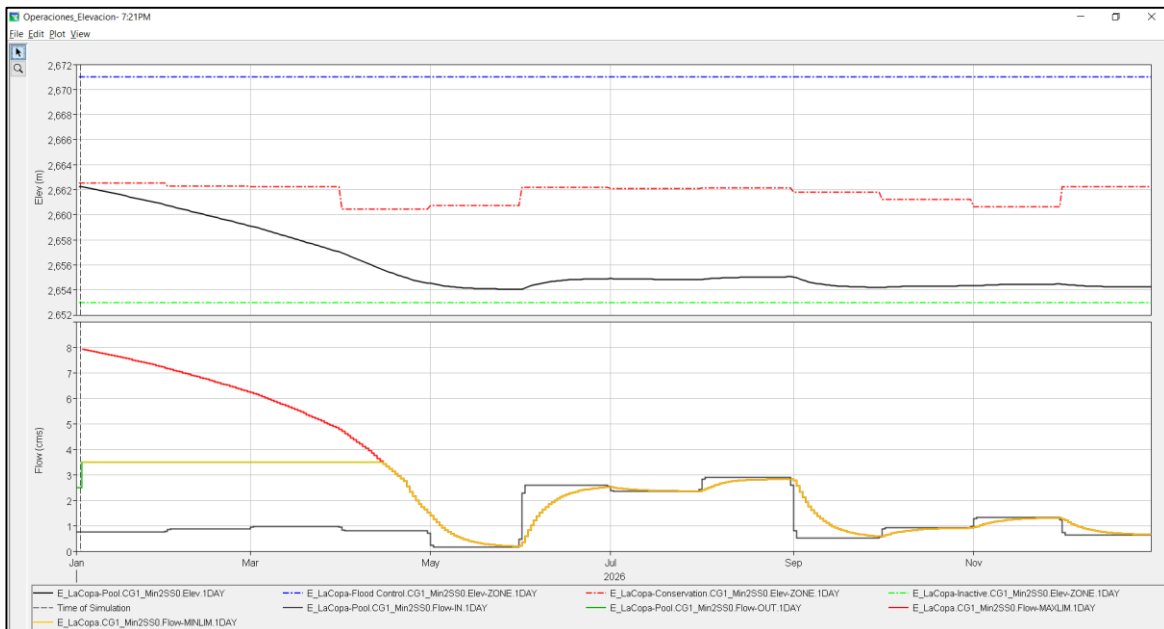


Figura 5-61. Resultados de simulación – CG1 reserva/espera con factor de temporalidad – escenario SSMin2

Debido a las condiciones iniciales de la modelación, el embalse responde de una manera adecuada para el análisis del periodo seco, hasta la segunda mitad de abril, mes en el cual el nivel de almacenamiento en el embalse no permite que sea descargado el caudal mínimo. Por este motivo a lo largo del año restante se presenta un volumen de déficit de 44.73 Mm³.

5.5.3.7.4 Análisis de Resultados de la curva guía generada con el aplicativo CEH-ECI 2011

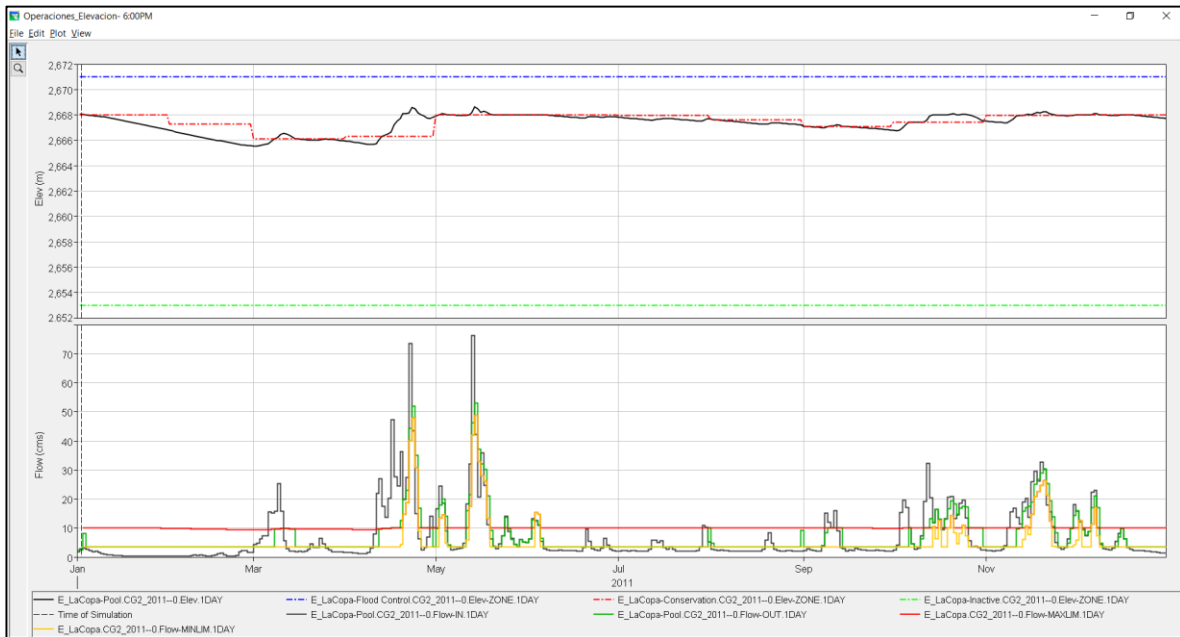


Figura 5-62. Gráfica de resultados – Escenario 2011 – CG2: CEH-ECI

La curva guía del embalse analizada para este periodo permite que el almacenamiento en un inicio sea de un valor alto teniendo como consecuencia que en el momento en cual los caudales provenientes de las cuencas aportantes aguas arriba lleguen al embalse, este no disponga del espacio necesario para almacenar este volumen y se tenga que hacer uso del vertedero para descargar. Para este año se obtiene un volumen de exceso de 49.82 Mm³.

SSMax2.

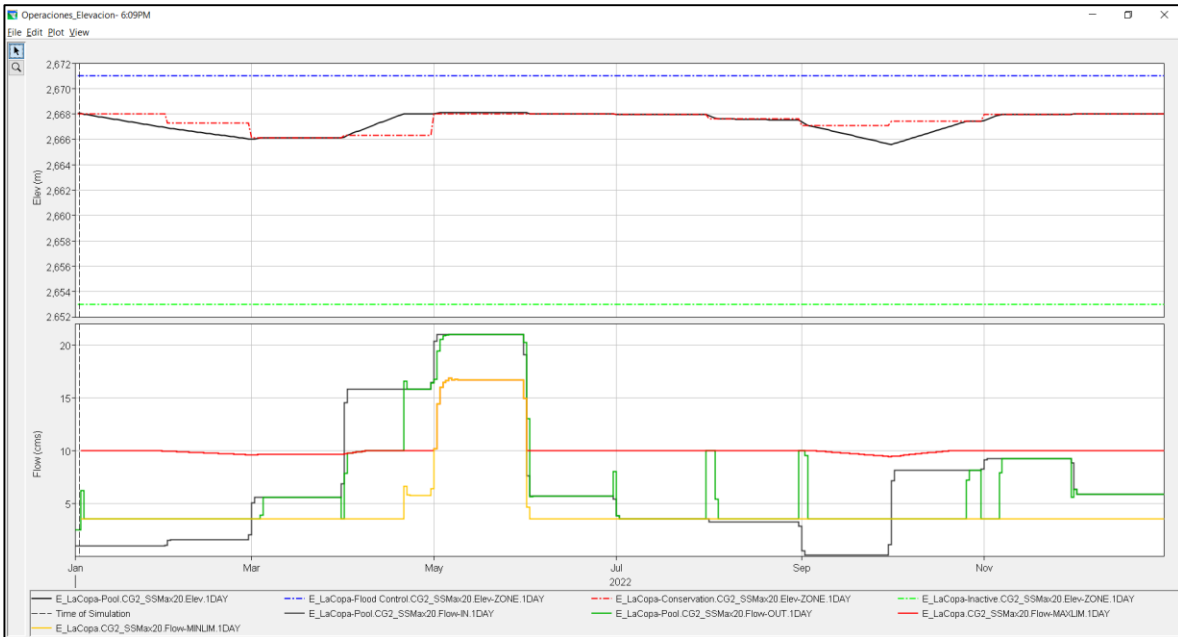


Figura 5-63. Gráfica de resultados – Escenario SSMax2 – CG2: CEH-ECI

Para el otro escenario de periodo húmedo se cuenta básicamente con las mismas condiciones mencionadas anteriormente, el almacenamiento se encuentra en un nivel elevado lo cual provoca que la capacidad del embalse se vea superada al llegar las crecientes. Por esta razón se tiene al finalizar el año un volumen total de excesos de 34.22 Mm³.

SSMin2.

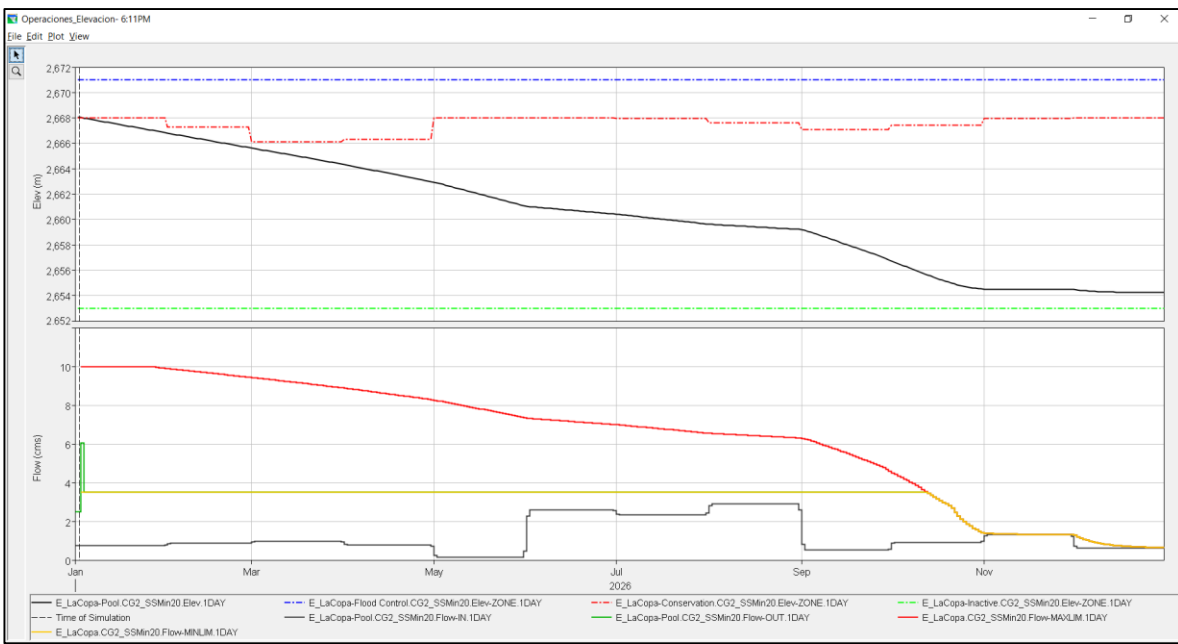


Figura 5-64. Gráfica de resultados – Escenario SSMin2 – CG2: CEH-ECI

Para el caso de análisis del periodo seco, las condiciones iniciales de almacenamiento ayudan a que a lo largo del año sea posible mantener una descarga correspondiente a la mínima (3.5m³/s), es decir que se opere en un régimen de conservación por todo el periodo de análisis. Una vez llega el mes de octubre, el volumen restante de almacenamiento no permite mantener el valor mínimo de descarga, por este motivo para los últimos meses se presenta un volumen de déficit correspondiente a 14.42 Mm³.

5.5.3.7.5 *Análisis de Resultados de la curva guía - métodos de optimización 2011.*

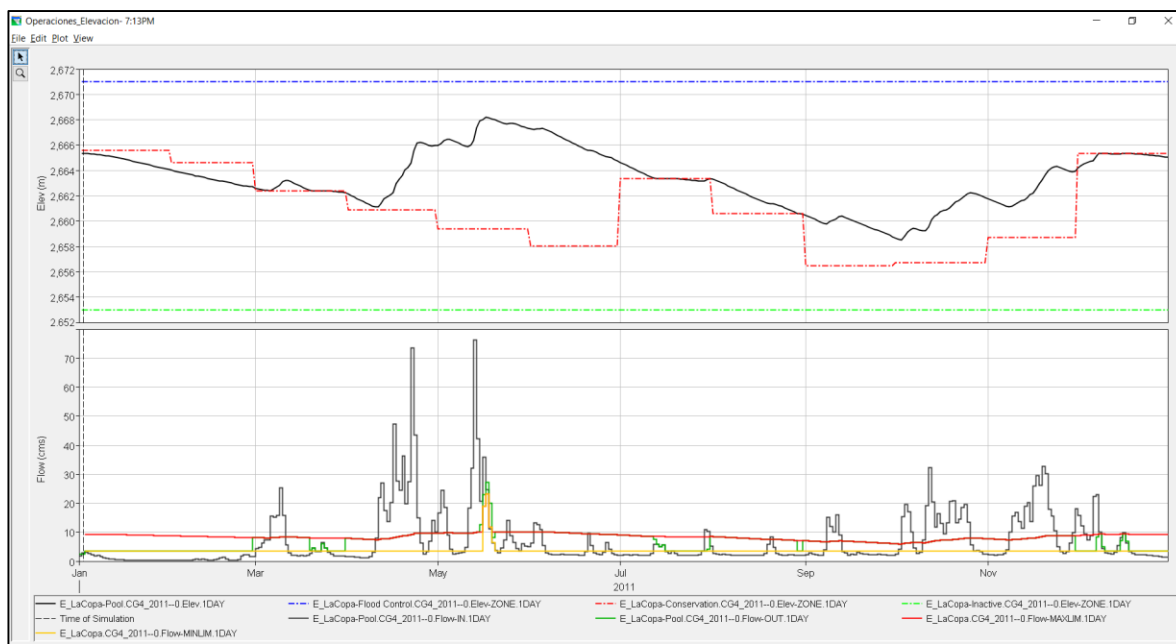


Figura 5-65. Gráfica de resultados – Escenario 2011 – CG4: Optimización

Mediante la aplicación de la curva guía, la operación del embalse inicia con un volumen alto de almacenamiento y en un régimen de conservación. En el mes de marzo esta condición varía como consecuencia de los incrementos significativos de caudal que empiezan a llegar al sistema. Por esta razón se busca que la operación del embalse tenga como objetivo el control de inundaciones, esta etapa de control se mantiene básicamente por el resto del año y a pesar que el embalse cuenta con un alto volumen disponible de almacenamiento este se ve insuficiente generando un volumen de exceso de 3.71 Mm³ para este periodo.

SSMax2

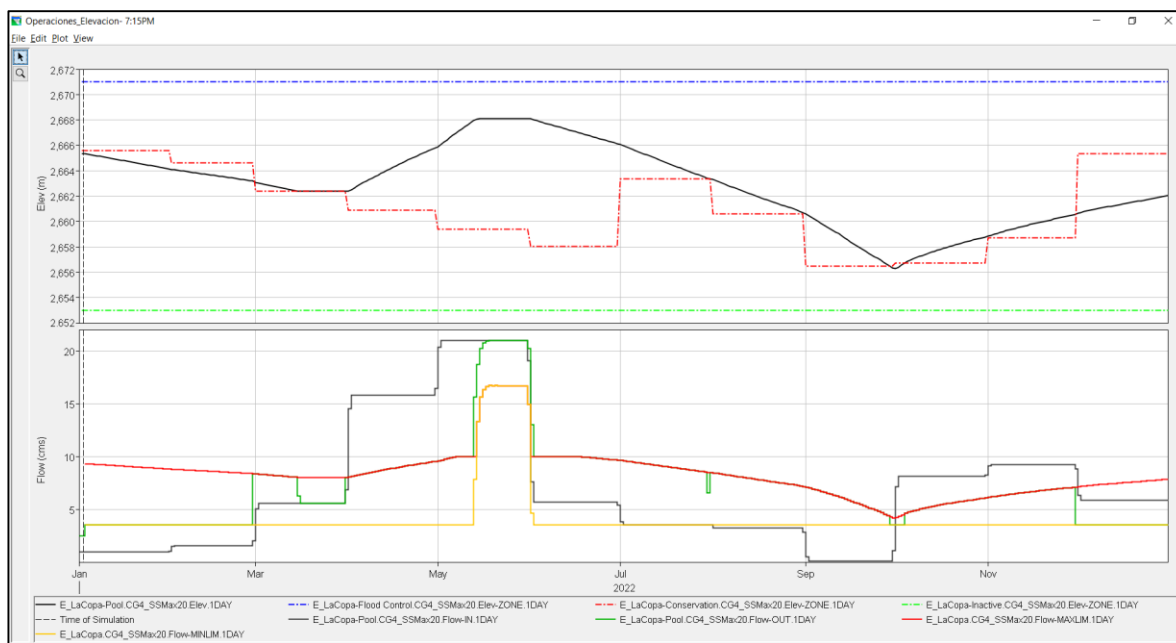


Figura 5-66. Gráfica de resultados – Escenario SSMaX2 – CG4: Optimización

Para el segundo escenario húmedo crítico se mantiene una respuesta similar del embalse a la obtenida en el año 2011. Se mantiene una operación de conservación al inicio del año hasta el mes de marzo, en este punto la respuesta cambia y se inicia el proceso de almacenamiento del volumen de agua que entra al embalse, pero la capacidad de este en el mes de mayo se ve superada generando que se tenga un volumen de exceso de 17.50 Mm³ a pesar de estar en un régimen de control de inundaciones a lo largo del año.

SSMin2

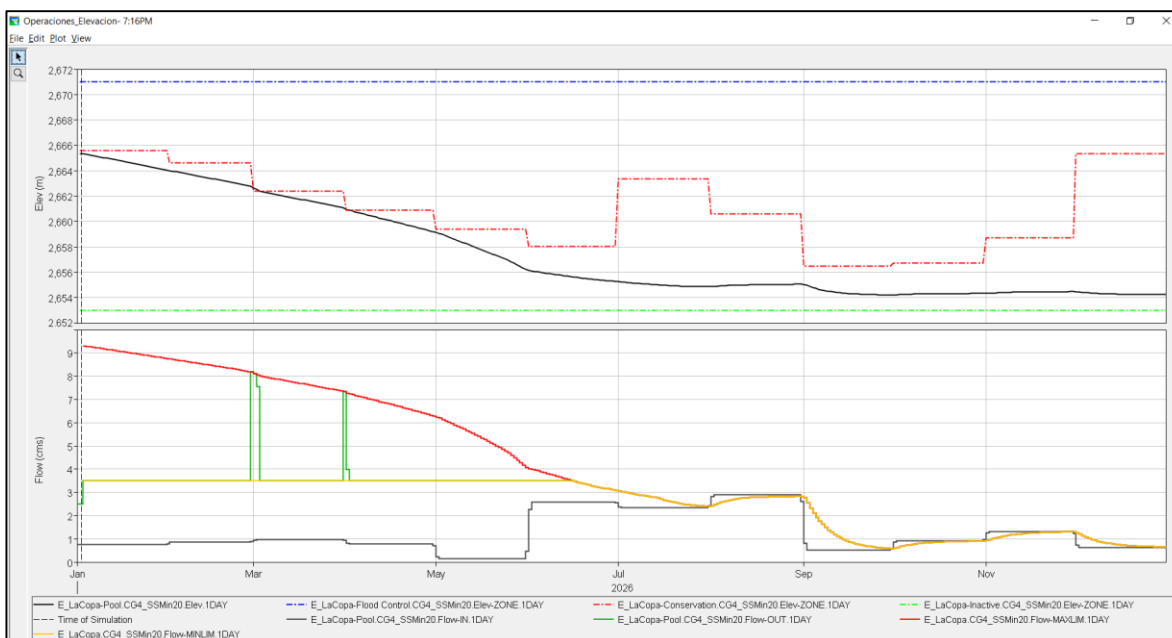


Figura 5-67. Gráfica de resultados – Escenario SSMIn2 – CG4: Optimización

Durante todo el periodo analizado se mantiene un régimen de operación del embalse de conservación ya que, al tratarse de un año seco, los caudales que entran al embalse no son suficientes para generar un cambio considerable en el comportamiento del mismo, de esta manera se garantiza una descarga del caudal mínimo hasta el mes de junio en donde ya se empieza a generar un déficit para satisfacer tanto el caudal ecológico como las demandas aguas abajo. Finalmente se tiene que para el año en análisis un volumen de déficit de 30.77 Mm³.

5.5.3.7.6 Resumen de resultados de las curvas guía simuladas en HEC-ResSim.

Se realizó una tabla que resume los resultados de todas las simulaciones realizadas con todas las curvas guía evaluadas. En las tablas resumen aparecen algunas simulaciones que no han sido mostradas en las gráficas del numeral inmediatamente anterior; estos resultados no se presentaron gráficamente puesto que no fueron trascendentales en las decisiones; sin embargo, se consignaron los resultados numéricos en las tablas con el fin de presentar todos los análisis realizados.

Factores Ponderados 0.6 y 0.4

Tabla 5-28. Resumen de resultados de simulación para curvas guía - factores de ponderación 0.6 y 0.4

Curva Guía 1 Reserva / Espera (Factor)	Porcentajes de fallo según las descargas – Factores ponderación 0.6 y 0.4				Vol. Total escenarios CG
	Tipo de escenario	Vol. Exceso	Vol. Déficit	Vol. Fallo Total Ponderado	
Año 2011	Máx	0.92	0.00	0.55	
Serie Sintética máxima 2	Max	12.68	0.00	7.61	
Serie Sintética mínima 2	Min	0.00	44.73	17.89	26.05
Curva Guía 2 CEH - ECI					
Año 2011	Max	49.82	0.00	29.89	

Porcentajes de fallo según las descargas – Factores ponderación 0.6 y 0.4					
Series sintéticas máximos 2	Max	34.22	0.00	20.53	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	14.42	5.77	56.19
Curva Guía 3 Montecarlo 2					
Año 2011	Max	5.53	0.00	3.32	
Series sintéticas máximos 2	Max	14.22	0.00	8.53	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	40.24	16.10	27.95
Curva Guía 4 Opt					
Año 2011	Max	3.71	0.00	2.23	
Series sintéticas máximos 2	Max	17.50	0.00	10.50	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	30.77	12.31	25.03
Curva Guía 5 Opt 2					
Año 2011	Max	9.19	0.00	5.52	
Series sintéticas máximos 2	Max	21.74	0.00	13.04	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	37.07	14.83	33.39

Factores Ponderados 0.5 y 0.5

Tabla 5-29. Resumen de resultados de simulación para curvas guía - factores de ponderación 0.5 y 0.5

Porcentajes de fallo según las descargas – Factores ponderación 0.5 y 0.5					
Curva Guía 1 Reserva / Espera (Factor)	Tipo de escenario	Vol. Exceso	Vol. Déficit	Vol. Fallo Total Ponderado	Vol. Total escenarios CG
Año 2011	Máx	0.92	0.00	0.46	
Serie Sintética máxima 2	Max	12.68	0.00	6.34	
Serie Sintética mínima 2	Min	0.00	44.73	22.36	29.16
Curva Guía 2 CEH - ECI					
Año 2011	Max	49.82	0.00	24.91	
Series sintéticas máximos 2	Max	34.22	0.00	17.11	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	14.42	7.21	49.23
Curva Guía 3 Montecarlo 2					
Año 2011	Max	5.53	0.00	2.77	
Series sintéticas máximos 2	Max	14.22	0.00	7.11	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	40.24	20.12	30.00
Curva Guía 4 Opt					
Año 2011	Max	3.71	0.00	1.86	
Series sintéticas máximos 2	Max	17.50	0.00	8.75	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	30.77	15.38	25.99
Curva Guía 5 Opt 2					
Año 2011	Max	9.19	0.00	4.60	
Series sintéticas máximos 2	Max	21.74	0.00	10.87	
Series sintéticas mínimos 2	Min	0.00	37.07	18.53	34.00

Como se puede observar en las tablas anteriores, en las columnas volumen de exceso y déficit se presentan los valores obtenidos para cada uno de los años o escenarios de simulación utilizando distintas curvas guía. Estos volúmenes se suman utilizando factores de ponderación para darle mayor importancia a las inundaciones, los desabastecimientos, o dando igual importancia a ambos objetivos. Aunque estos valores se presentan de manera individual para cada escenario, con el fin de estimar el comportamiento conjunto de una curva guía bajo distintos escenarios, se han sumado estos valores para conseguir un valor consignado en la última columna de las tablas.

Si se analizan únicamente los volúmenes de déficit, por ejemplo, se puede ver que la curva guía que mejor atiende este objetivo es la generada con el aplicativo CEH-ECI (“Curva Guía 2 CEH – ECI”). Por su parte, aquella curva guía que obtiene los mejores resultados en cuanto a volúmenes de exceso es la “Curva Guía 1 Reserva / Espera (Factor)”.

Sin embargo, cuando se analizan de manera conjunta los objetivos de abastecimiento y control de inundaciones, de acuerdo a las simulaciones realizadas en HEC-ResSim y con los escenarios planteados, la curva que tiene mejor desempeño para atender ambos propósitos es la “Curva Guía 4 Opt” generada a partir de métodos de optimización usando función objetivo.

5.5.3.7.7 Comparación de la efectividad de curvas guía con hidrologías Montecarlo

Como una verificación adicional a la realizada en el software HEC-ResSim, se simularon las curvas guía seleccionadas en la hoja programada en Excel con la cual se realizó el método de Montecarlo para encontrar la curva guía optimizada. El objetivo de este procedimiento fue encontrar los volúmenes de déficit y excesos generados a partir de la simulación de las 5000 hidrologías generadas para el método de Montecarlo, para cada una de las curvas guía analizadas.

Este análisis es importante puesto que el realizado con el software HEC-ResSim tiene la limitación de trabajar únicamente con una hidrología crítica para máximos y una para mínimos. Mientras que el por medio de este procedimiento, se evalúan 5000 posibles hidrologías entre las cuales se encuentran casos críticos como casos con periodos de recurrencia mucho más frecuentes. Los resultados de volumen de déficit y exceso acumulados para los 5000 escenarios se muestran en la Tabla 5-30.

Tabla 5-30. Resultados de simulación de 5000 hidrologías con las curvas guía analizadas

Curva Guía	Σ Vexceso	Σ Vdeficit	Σ Vexc-def Ponderados
Montecarlo 1	4610.38	4698.13	4645.48
Montecarlo 2	1836.41	7805.37	4223.99
Opt1	1495.19	26382.67	11450.19
opt2	4350.51	9303.17	6331.57
Opt3	976.69	20929.98	8958.01
CG Factor	1232.18	22279.78	9651.22
CEH-ECI	35964.18	282.85	21691.65

En cuanto al valor ponderado, es evidente que la curva guía que presenta el valor mínimo es “Montecarlo 2” puesto que ésta fue generada utilizando el mismo método con el que ahora se evalúa. Sin embargo, es posible ver que en cuanto a volúmenes de déficit la mejor curva guía es la generada por el software CEH-ECI, y para volúmenes de excesos aquella con mejores resultados es generada por medio de la optimización número 3 (ver numeral).

Aunque en la presente metodología se utilizarán los mejores resultados obtenidos a través de la simulación con intervalos de tiempo diario a través del software HEC-ResSim. Esta evaluación puede, de igual manera, representar un criterio para la selección de la curva guía del sistema.

5.5.3.8 Curvas guía seleccionadas para la regulación del 2011

De acuerdo al análisis de resultados llevado a cabo a lo largo del presente numeral y resumidos en la Tabla 5-28 y Tabla 5-29, se observa que la curva guía que mejor se comporta bajo los escenarios de años húmedos y secos simulados en HEC-ResSim es la curva guía denominada “Curva_Guía_4_Opt”, determinada por medio de la primera función objetivo para optimización evaluada en el numeral 5.5.1.3. Por consiguiente, es con esta curva que, de acuerdo al criterio del autor, debe operarse el embalse y debe evaluarse la condición regulada en el modelo de simulación hidráulica 2D. Sin embargo, debido a que la curva guía denominada “Curva Guía 1 reserva/espera (factor)” presenta los mejores resultados en cuanto a control de inundaciones, esta también se contemplará para la verificación con el modelo hidráulico 2D. Las curvas guía seleccionadas se presentan en la Tabla 5-31.

Tabla 5-31. Curvas guía seleccionadas para la verificación hidráulica

Curva Guía	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Curva Guía 4 Opt	2665.59	2664.61	2662.39	2660.88	2659.38	2658.01	2663.37	2660.6	2656.47	2656.73	2658.7	2665.33
Curva Guía 1 reserva/espera (factor)	2662.55	2662.27	2662.24	2660.46	2660.72	2662.21	2662.12	2662.14	2661.81	2661.21	2660.66	2662.25

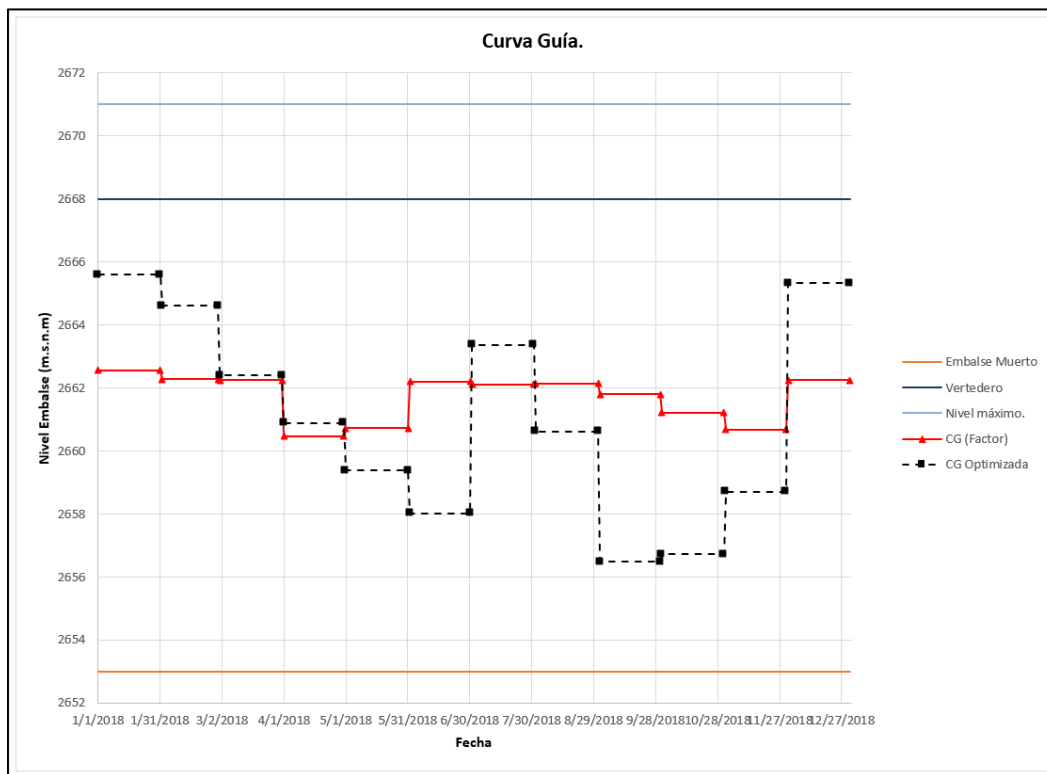


Figura 5-68. Gráfica de las curvas guía seleccionadas para la verificación hidráulica

5.6 VERIFICACIÓN EN EL MODELO HIDRÁULICO 2D

5.6.1 Verificación en el modelo hidráulico 2D

Como se mencionó previamente la verificación en el modelo hidráulico 2D consiste en transitar los hidrogramas generados a partir de la regulación de los cuerpos de agua utilizando la curva guía seleccionada. El modelo hidráulico utilizado para la verificación hidráulica es el mismo empleado en el numeral 5.3.1. El objetivo de la verificación hidráulica es confirmar las bondades de la curva guía y por consiguiente de la regulación conseguida a través de los embalses, en época de crecientes.

Se verificó la extensión de las manchas de inundación generadas por la modelación bidimensional.

Como se observó en la Figura 5-24 en el sector inmediatamente aguas debajo de La Copa sobre el río Tuta no se presentan fenómenos de desbordamiento aún en a condición no regulada; por su parte, el sector indicado en la Figura 5-27 se presentan problemas asociados a inundaciones de los terrenos adyacentes al cauce. En el numeral 5.3.1.1 se muestran varios instantes del mes en el que se consideraron críticos los desbordamientos, estos son los días 15 y 21 de abril.

Se realizó la simulación de la condición regulada utilizando los caudales de salida que se obtuvieron de la regulación en HEC-ResSim con las curvas guía 1 y 4 como se señala en el numeral 5.5.3.8. En la Figura 5-69 y Figura 5-70 se muestran los resultados de mancha de inundación sin regulación y con regulación de acuerdo a las curvas guías CG1 y CG4, en un instante de simulación del 15 de abril.

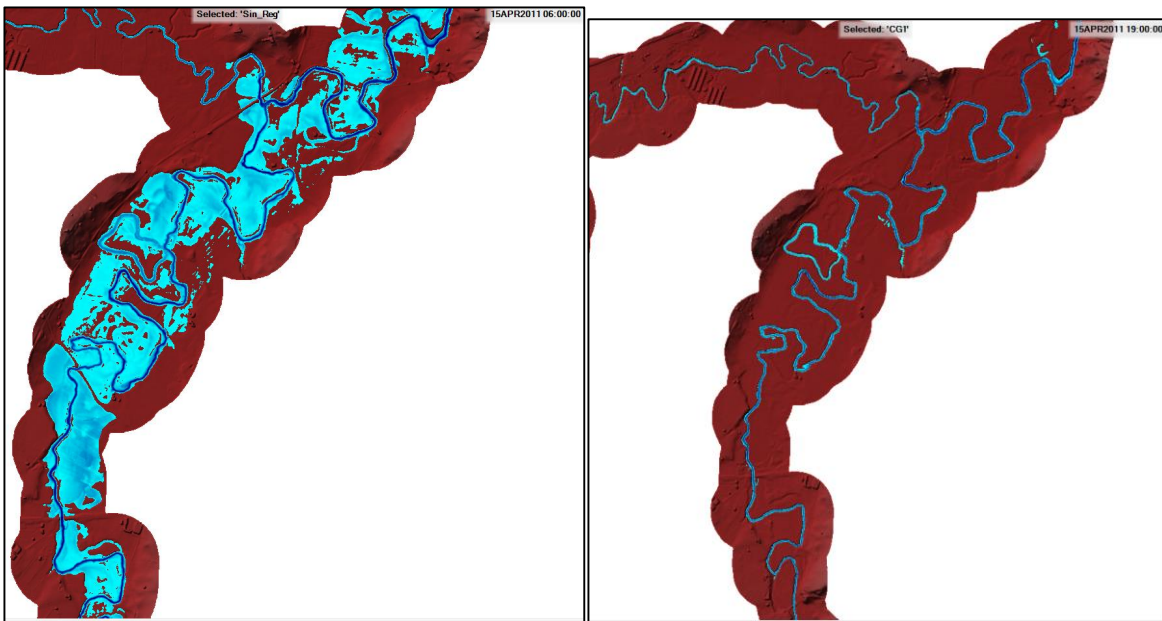


Figura 5-69. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 15 abril 2011

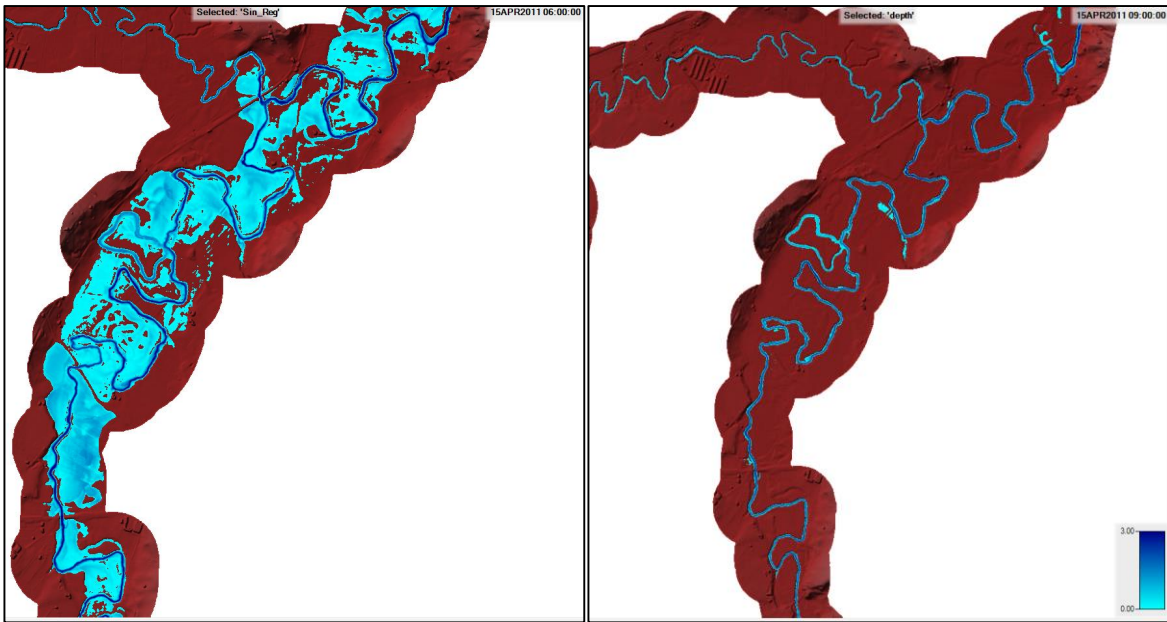


Figura 5-70. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG4 – 15 abril 2011

Como se puede observar en la Figura 5-69 y Figura 5-70, el cauce presenta una mejora notable, en la simulación del día 15 de abril, por medio de las descargas realizadas de manera controlada desde el embalse La Copa. Estas mejoras se consiguen de la misma manera con bien sea con la curva guía 4 o con la curva guía 1 (ver Tabla 5-31).

En la Figura 5-71 y Figura 5-69 y Figura 5-72 se muestran los resultados de mancha de inundación sin regulación y con regulación de acuerdo a las curvas guías CG1 y CG4, en un instante de simulación del 21 de abril.

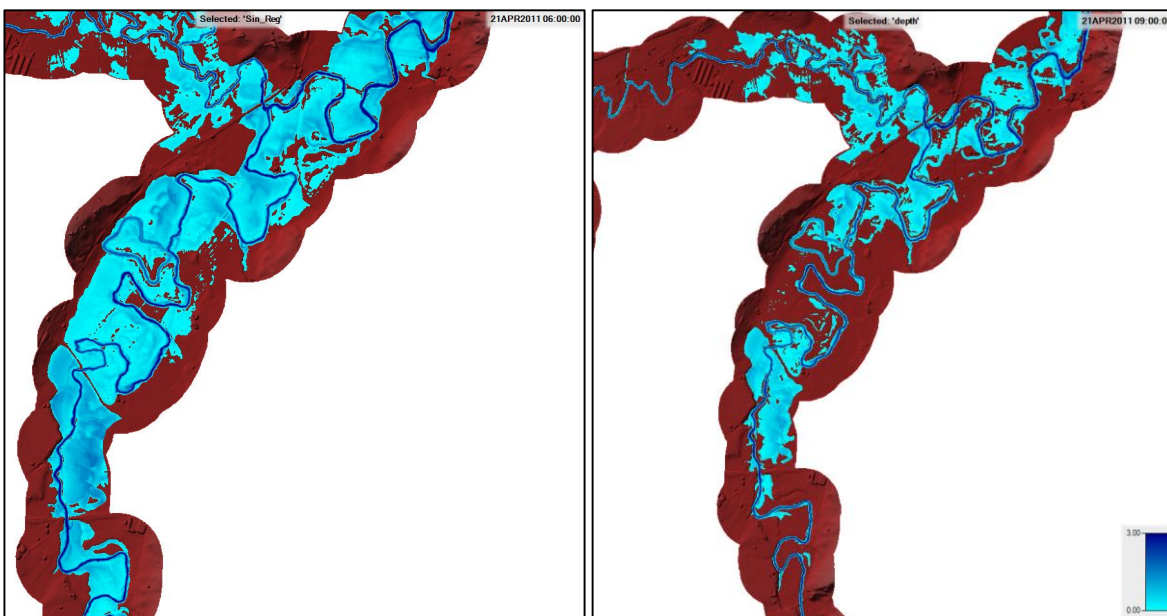


Figura 5-71. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG1 – 21 abril 2011

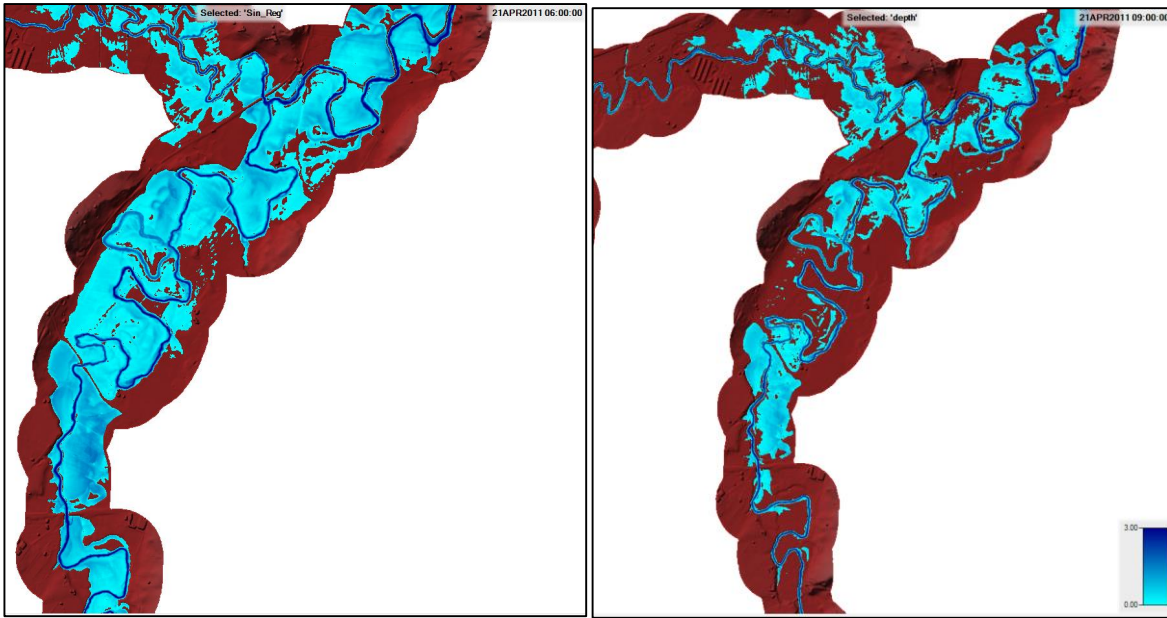


Figura 5-72. Comparación de manchas de inundación antes y después de la regulación – CG4 – 21 abril 2011

Como se puede observar, con el uso de ambas curvas guía se presenta una disminución en los desbordamientos causados por las crecientes. Sin embargo, estas disminuciones no son totalmente satisfactorias puesto que aún se presentan reboses de la cota de los jarillones.

Esta situación llevo a implementar una nueva regla de operación como se mostró al final del numeral 5.5.3.6.

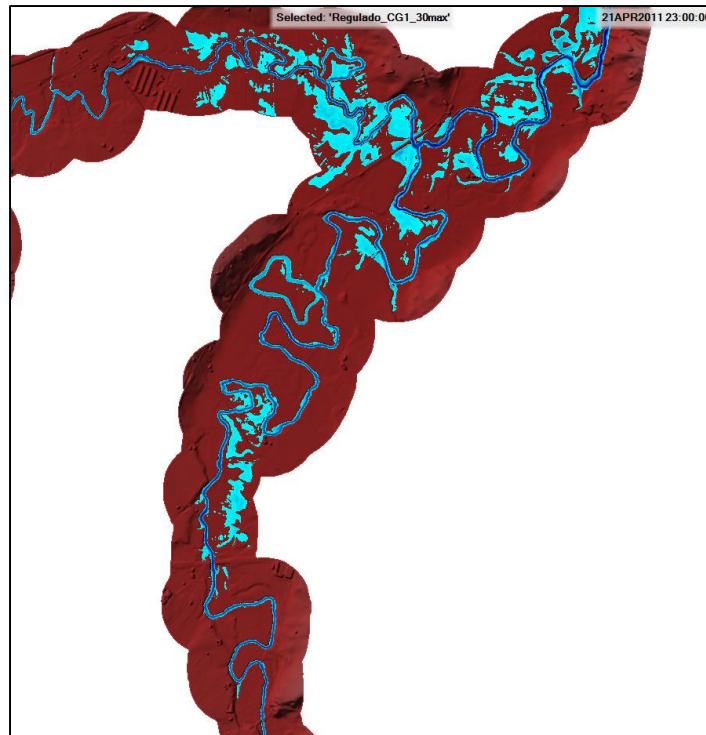


Figura 5-73. Mancha de inundación con la regla de operación de control aguas abajo – CG1 – Escenario 2011

En la Figura 5-73 se observa que los desbordamientos disminuyeron aún más con la aplicación de la nueva regla, sin embargo, debido a la regla de operación que define el caudal mínimo de salida del embalse de 3.5 m³/s no es posible mitigar este efecto en su totalidad. Hay que tener en cuenta que, para esta condición de operación este, junto con los hidrogramas del 13 de mayo son los únicos instantes en los cuales se genera una condición crítica para este sector, puesto que en el resto del periodo simulado (06 abril – 19 de mayo), no se presentan desbordamientos debido a la reducción en los caudales que brinda la operación del embalse.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES ANÁLISIS HIDROLÓGICO

- El objetivo de la modelación hidrológica de eventos en la guía es conocer la magnitud de los caudales pico que puedan presentarse en un evento extremo de lluvia que se presente de manera individual. Por su parte, las descargas tras la regulación de un embalse suelen ser prolongadas y no presentar variaciones abruptas, por lo cual los insumos para la modelación de embalses se realizan en periodos más largos (e.g. anuales) que los proporcionados por un modelo de eventos extremos. Sin embargo, el modelo lluvia-escorrentía de eventos extremos permite conocer cuál es el efecto que produce un evento intenso de lluvia a una corta escala de tiempo en términos de caudales pico y tiempos de arribo, en otras palabras, las capacidades de drenaje de las cuencas.
- El método que se seleccionó para el tránsito en los tramos del modelo hidrológico en el caso de estudio es el método de Muskingum. Los resultados de la calibración por medio del modelo hidráulico bidimensional (ver numeral 5.4) permitieron conocer los tiempos de desplazamiento (*Lag Times*) que se presentan en cada tramo. Sin embargo, las pérdidas de masa evidenciadas en el modelo hidráulico 2D debidas a los desbordamientos no se pudieron representar por medio del parámetro *X* de atenuación del modelo Muskingum. Por lo anterior, en casos posteriores se debe realizar una selección del modelo de tránsito de crecientes que permita representar los fenómenos propios del cauce en estudio.
- Aunque las pruebas de bondad de ajuste y sus resultados son confiables, es necesario que el ingeniero que analice los resultados imponga su criterio y experiencia para validar que los datos de la serie proyectada sean lógicos y consistentes, tanto en el rango en que existen registros en la serie histórica como en los rangos en que se extrapolan los datos de la serie para periodos de retorno muy altos o muy bajos. Esto es de vital importancia puesto que es posible, por ejemplo, que una serie de caudales proyectada con la distribución seleccionada mediante la prueba presente una correlación casi perfecta en el rango de registros de la serie histórica, pero para periodos de retorno muy altos presente valores poco reales o consistentes con las capacidades del cauce.
- El análisis realizado para encontrar la curva guía tiene como insumo las afluencias diarias que se presentan en el o los embalses a estudiar. Si se cuenta con series de caudales de buena calidad y con una cantidad suficiente de años de registro en la entrada del embalse, estos son usados para determinar los volúmenes de déficit y exceso multianuales. En caso de que los registros no se encuentren ubicados aguas arriba del embalse, es posible determinar las afluencias diarias a partir de un modelo de simulación continua. En este documento solo se proyectaron 6 años de registros (tres húmedos y tres secos); sin

embargo, este proceso se debe llevar a cabo para cada uno de los años de los que se tenga información.

- Para la generación de la curva guía, se requiere un amplio número de mediciones en la entrada del embalse con el fin de conocer ampliamente el patrón de caudales que se presentan como entrada al embalse. En el presente trabajo se utilizó el modelo SMA para producir la serie de caudales aguas arriba del embalse; sin embargo, es ideal que, en los sitios de proyectos de represamiento, se cuente con estaciones hidrométricas que permitan conocer el comportamiento de los caudales a la entrada del proyecto de embalse o del embalse existente.
- En caso de disponer de un buen número de series de tiempo que hayan registrado el comportamiento de los caudales de entrada al embalse de manera anual, es posible evaluar escenarios críticos, para periodos secos o húmedos, llevando a cabo análisis de frecuencia o construyendo series sintéticas que permitan estimar los caudales que se presentan para periodos de retorno más altos a las series de registros disponible.
- El método SMA inmerso en la simulación hidrológica de largo plazo permite generar caudales a partir de las propiedades de la cuenca y datos de lluvia. Esto permite que, a través del modelo SMA, se evalúen condiciones de lluvia proyectadas a un periodo de retorno; o bien, que se estimen los caudales en un punto a partir de mediciones en tiempo real de los impulsos de lluvia.

6.2 CONCLUSIONES ANÁLISIS HIDRÁULICO

- La modelación de las presas del vertedero se debe realizar en su preferencia con modelos 0D (ecuaciones de vertedero) que puedan ser objeto de calibración o con modelos 3D que permitan conocer de manera más acertada el comportamiento del flujo en situaciones de rebose sobre la cresta de las estructuras. Aunque la aproximación que se ha obtenido con el modelo 2D en este caso es una buena aproximación, existe una incertidumbre importante en la determinación y asignación del coeficiente de resistencia al flujo (n de Manning) con lo cual se pueden presentar variaciones importantes sobre el caudal estimado.
- Un modelo hidráulico bidimensional permite conocer el comportamiento del flujo una vez ha abandonado su cauce, puesto que a partir de este punto los procesos dejan de ser unidimensionales para tener componentes de velocidad importantes en la dirección principal del flujo y la dirección transversal al mismo. Esto es de gran importancia, puesto que uno de los fenómenos a evitar con la operación de los embalses son las inundaciones asociadas a desbordamientos en los cauces. De esta manera, el análisis mediante un modelo hidráulico 2D de las condiciones actual y regulada sobre los cauces es fundamental para conocer la magnitud del problema asociado a flujos máximos, y de los beneficios que pueden obtenerse a partir la optimización en la regulación.

6.3 CONCLUSIONES ANÁLISIS DE GESTIÓN DE EMBALSES

- Los avances realizados por trabajos de grado anteriores y por las referencias consultadas permiten determinar los valores de elevación que definen la curva guía de un sistema, atendiendo uno o varios objetivos particulares, con una escala mensual. Sin embargo, es frecuente que no se contemplen restricciones en la operación del embalse tales como las tasas máximas y mínimas de descarga, así como las variaciones en las tasas de descarga

necesarias en un instante dado, y que pueden no hacerse evidentes cuando se observa el problema con una escala de tiempo mensual.

Por medio del software HEC-ResSim y de la metodología propuesta en el presente documento es posible tener un número más amplio de variables con el fin de analizar la gestión de embalses teniendo en cuenta mayor cantidad de factores con el fin de representar la realidad de la manera más fiel, así mismo la simulación puede llevarse a cabo a nivel diario e incluso horario, brindando más herramientas de análisis en aras de mejorar la operación del sistema.

- Los objetivos de las metodologías consultadas en trabajos de grado previos y otros documentos incluyen el abastecimiento, control de inundaciones y generación de energía eléctrica principalmente (aunque en algunos trabajos se contemplan otras variables adicionales). En el caso de estudio se trabajó contemplando los objetivos de conservación (abastecimiento a un distrito de riego) y control de inundaciones únicamente; sin embargo, incluir otros objetivos en la operación del embalse se realiza de manera sencilla a través de restricciones adicionales o de variables externas en la simulación a través de HEC-ResSim. De la misma manera, la inclusión de estos objetivos en la determinación de la curva guía se puede contemplar a partir de la modificación de la función objetivo.
- El análisis para la determinación de curva guía que se realiza por medio de la ecuación propuesta en el trabajo de grado de Mónica Gallego debe realizarse con un periodo de registro amplio. Por lo anterior se deben utilizar todas las series históricas de caudal que se tengan disponibles; en caso de no tener información registrada de caudales aguas arriba del embalse, se deben generar suficientes series sintéticas de caudal. En el caso de estudio del presente documento se realizó el análisis utilizando únicamente seis series de caudales generadas a partir de la simulación hidrológica continua para distintos escenarios; a partir de estas series se generaron series sintéticas aleatorias para obtener un registro amplio de caudales y llevar a cabo la construcción de la curva guía.
- La determinación de curvas guía y el análisis de gestión de embalses es frecuentemente abordado con una escala temporal mensual. De acuerdo a los resultados encontrados, es posible notar la importancia que tienen los caudales altos o bajos que se presentan en periodos más cortos (semanas o inclusive días). Aun cuando se estime adecuadamente el caudal medio el mes, la operación a niveles diarios es crucial para determinar el buen funcionamiento de la curva guía y por consiguiente del embalse; esto se debe principalmente a que el patrón de caudales afluentes a un embalse no corresponde con la simplificación de una descarga mensual promedio.
- Cuando se realiza la estimación de los volúmenes necesarios a nivel mensual no se está teniendo en cuenta la distribución de las crecientes dentro del mes. Por esta razón se puede incurrir en subestimaciones del volumen requerido para almacenar crecientes muy intensas que pueden presentarse en los 10 o 15 días más lluviosos del mes.
- El método de volúmenes de espera y de reserva se cuantifica a partir de las afluencias históricas o de series sintéticas para cada mes de manera individual. Esto implica que el cálculo de un mes individual es indiferente de los cálculos de los meses adyacentes. Esto genera complicaciones en el desempeño de la curva guía, puesto que el método supone

que, para el inicio del mes, el nivel del embalse es capaz de alcanzar el nivel de la curva guía, lo cual no siempre sucede debido a las condiciones del mes precedente.

- De acuerdo a los resultados encontrados en el presente estudio, los métodos de optimización constituyen la mejor herramienta para la determinación de la curva guía de un sistema cuando se tienen en cuenta varios objetivos en la operación. Esto se debe a su versatilidad en cuanto a la formulación del método y la maximización de los beneficios buscados.
- La selección de la curva guía por medio de métodos de optimización es un campo muy amplio. En el presente documento se empleó un esquema tipo Montecarlo, y una optimización con un algoritmo genético a través de una función objetivo. Sin embargo, solo se utilizaron como variables de decisión los volúmenes de déficit y de excesos. Para casos de estudio ubicados en otros embalses individuales o en redes de embalses es posible emplear otros métodos de optimización, otras funciones objetivo e inclusive otras variables de decisión. Para esto existe una amplia bibliografía con ayuda de la cual se pueden construir otros métodos de optimización y conseguir resultados en función del tipo de embalse y las variables que en él intervienen.
- Como se pudo observar en la última alternativa analizada, en la cual se restringió el caudal máximo, que atraviesa un determinado punto de la red, a un valor máximo, existen restricciones que pueden hacerse efectivas únicamente cuando se conocen los caudales de entrada que se aproximan al embalse. Este tipo de reglas nos abren las puertas a mirar la operación de embalses como sistemas de alerta temprana. Como se puede ver en el caso de estudio, si se posee un modelo hidrológico de simulación continua (e.g. SMA) calibrado y constantemente alimentado, es posible conocer cuáles serán los aportes de caudal que se producirán a partir de las lluvias que se estén registrando constantemente en las estaciones cercanas. Utilizando estos resultados es posible operar los embalses a través de la manipulación de descargas que se ajusten a las hidrologías venideras.

6.4 CONCLUSIONES DE VERIFICACIÓN HIDRÁULICA

- La solución de las ecuaciones de *Saint-Venant* inmersa en la aplicación de un modelo hidráulico bidimensional, representa la mejor aproximación a la realidad entre los diferentes métodos de simulación hidráulica e hidrológica. Por esta razón, es fundamental que los resultados del modelo de gestión de embalses se verifiquen por medio del tránsito en un modelo hidráulico 2D. Esta revisión no solo permite ratificar las bondades de la regulación observadas en el modelo de gestión de embalses, sino que además permiten la observación de comportamientos hidráulicos locales que pueden contribuir a la optimización de la operación de los embalses. Esta situación tuvo lugar en el caso de estudio, en el cual se realizó un proceso iterativo entre la modelación de embalses y la hidráulica hasta conseguir el mejor resultado.

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- Akan, A. O. (2006). *Open Channel Hydraulics*. Butterworth-Heinemann.
- Almorox, J. (s.f.). *EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL SEGÚN THORNTHWAITE*. Obtenido de <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. G.P.O. ; For sale by the Books and Open-File Reports Section, U.S. Geological Survey,. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>
- Asensio, S. I. (2010). *CARACTERÍSTICAS DEL INFITRÓMETRO DE DOBLE ANILLO*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Béjar, M. V. (2006). *Hidrología Estadística*. Tecnológica de Costa Rica.
- BRACA, G. (2008). *Stage-discharge relationships in open channels: Practices and problems*. Rome, Italy: Grafiche Futura s.r.l.
- Cadavid, J. M., & Salazar, J. E. (2009). *Portal de Revistas UN*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/9557/11483>
- Cádiz, A. S. (2011). *OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA MEDIANTE MÉTODOS DE MONTECARLO*. Madrid, España.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGraw Hill.
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw Hill.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *MANUAL DEL AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO - PRUEBAS DE BOMBEO*. Coyoacán, México.
- CORPOBOYACA. (2006). *POMCA, PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA*. Tunja.
- Cuevas, W. V. (2008). *Topografía para Ingeniería*. La Serena.
- CVC - Universidad del Valle. (s.f.). Capítulo3, Optimización de la regla de operación. En C. A.-U. Valle, *Evaluación y optimización de la regla de operación*. Cali.
- Díaz Sierra, A. M., & Guevara, E. (2016). Modelación estocásticas de los caudales medios anuales de la cuenca del río Santa, Perú. *Revista INGENIERÍA UC*, 172-185.
- DNP-BID-Cepal. (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011*. Bogotá.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado E.S.P de Bogotá - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2008). *Modelo de evaluación de curvas de niveles de un embalse. Curvas guía para el embalse de Chuza*. Bogotá.

- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá EAB-ESP. (01 de 06 de 2018). *Lineamientos para trabajos Topográficos*. Bogotá, Colombia.
- HEC. (2016). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of engineers.
- HEC, U. A. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Public Release.
- Holberg, J. A. (2015). *DOWNWARD MODEL DEVELOPMENT OF THE SOIL MOISTURE ACCOUNTING LOSS METHOD IN HEC-HMS: REVELATIONS CONCERNING THE SOIL PROFILE*. West Lafayette, Indiana: Purdue University.
- IDEAM. (2015). *MONITOREO DE SUELOS Y COBERTURAS DE LA TIERRA*. Recuperado el 15 de Abril de 2018, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>
- IDEAM, IGAC y COORMAGDALENA. (2008). Metodología CORINE Land Cover adaptada para colombia Escala 1:100.000. Bogotá, D.C.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Invias*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file>
- K.D.W. Nandalal, J. J. (2007). *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs*. Cambridge University Press.
- Matera, L. C. (2002). *Topografía Plana*. Mérida: Taller de Publicaciones de Ingeniería, ULA.
- Matt Flemming, V. N. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING*, 175-183.
- Méndez, E. V. (2008). *Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica*. Dirección provincial de recursos hidráulicos, Guantánamo.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Moreno Cadavid, J., & Salazar, J. E. (2009). *Portal de Revistas UN*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/9557/11483>
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Ontiveros, J. S. (2003). *TOMOGRFÍA ELÉCTRICA*.
- Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe. (2006). *Guía Metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y del Caribe*.
- QGIS Development Team. (s.f.). *Documentación de QGIS*. Obtenido de https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html
- Ray K. Linsley, J. (1958). *Hydrology for Engineers*. New York: McGraw-Hill.

- Severiano Covarrubias, M. L., & Dominguez Mora, R. (Octubre de 2014). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/281626083_ESTIMACION_DE_FACTORES_DE_REDUCCION_AREAL_APLICACION_A_LOS_ESTADOS_DE_DURANGO_Y_TAMAULIPAS
- Sopó, G., Martínez, O., & Herreño, A. (Mayo de 2013). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15016/MetodologiaHidrotopografia.pdf/888de93d-67a5-4f3e-bc66-2302cff65806>
- Todd H. Bennett, J. C. (2000). *Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. ASCE Water Resources.
- U.S Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center.
- United State Department of Agriculture. (Julio de 2004). *Natural Resources Conservatio Services*. Obtenido de <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>
- United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual*.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS- User's Manual*.
- US Army Corps of Engineers. (2013). *HEC-ResSim Reservoir System Simulation - User's Manual*.
- Varas C, E. (1985). *Influencia del hietograma de una tormenta en la crecida resultante*.
- Vargas M, R., & Diaz-Granados O, M. (1998). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá.
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Guitérrez, A. (2011). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138>
- W. J. Rawls, D. L. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *TRANSACTIONS OF DE ASAE*, 1316-1320.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Pearson.
- World Meteorological Organization. (2006). *WMO*. Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4564
- Xuefeng Chu, A. D. (2009). Event and continuous modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.