

Maestría en Ingeniería Civil

Análisis de sedimentos en embalses por medio de los programas de modelado HEC-HMS 4.10 y HEC-RAS 6.3.1. Caso de estudio: Embalse Tona (Bucaramanga, Santander)

Paola Andrea Rivera Rangel

Bogotá, D.C., 11 de mayo de 2023



**Análisis de sedimentos en embalses por medio de los programas
de modelado HEC-HMS 4.10 y HEC-RAS 6.3.1. Caso de estudio:
Embalse Tona (Bucaramanga, Santander)**

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

MSc, Ph.D., Germán Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., 11 de mayo de 2023



La tesis de maestría titulada “Análisis de sedimentos en embalses por medio de los programas de modelado HEC-HMS 4.10 y HEC-RAS 6.3.1. Caso de estudio: Embalse Tona (Bucaramanga, Santander)”, presentada por Paola Andrea Rivera Rangel, 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

Ing. Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Ing. William Ricardo Aguilar Piña

Jurado

Ing. Germán Eduardo Acero Riveros

Bogotá, D.C., 11 de mayo de 2023

DEDICATORIA

A mis padres por su amor y entrega a lo largo de mi vida académica, ya que, sin su esfuerzo y dedicación, yo no hubiese podido llegar a donde me encuentro hoy.

A mis amigos Jean, César, Lucy y Andrea, quienes entendieron mis altos y bajos en este camino de la maestría y creyeron en mí aun cuando yo veía todo perdido.

A mi hermano y mi cuñada Angélica por ser mi soporte familiar estos años y ayudarme a sobrellevar aquellos días difíciles y encontrar paz en el segundo hogar que construimos.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Doctor Germán Santos Granados por su tiempo y dedicación en el desarrollo de esta tesis de maestría y permitirme aprender bajo su guía.

Al Ingeniero Andrés Almeyda Ortiz y el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga por su colaboración con la información base requerida para el desarrollo de este proyecto, el tiempo brindado para la solución de muchas inquietudes y por permitirme elaborar un estudio de tal magnitud con información detallada.

Al Ingeniero Juan José López Domínguez y demás cuerpo ingenieril de ZOFRE S.A.S por brindarme los tiempos necesarios para la culminación de mis estudios de posgrado.

RESUMEN

La problemática de pérdida de capacidad útil en embalses es un fenómeno mundialmente conocido que repercute directamente en la calidad de vida de los seres humanos al ser uno de sus objetivos el suministro de agua potable especialmente en épocas de estiaje. Dicha pérdida de capacidad útil se encuentra directamente relacionada con la carga de sedimentos a la entrada producto de procesos erosivos en la cuenca debidos a la precipitación y relacionados con la estructura del suelo.

En el proyecto de tesis aquí presentado se aborda el análisis hidrológico en la cuenca del río Tona que drena hacia el Embalse Tona (Bucaramanga, Santander) en el periodo 2018-2021 por medio del software HEC-HMS y un modelo de simulación continua que contempla la interceptación de la lluvia por la superficie vegetal y la superficie del suelo, las infiltraciones del suelo por medio del modelo de tanques SMA, el tránsito de crecientes y el modelo de flujo base. Posteriormente, aplicando modelos de erosión en subcuencas y de transporte de sedimentos en cauces, se obtiene la carga de sedimentos a la salida de la cuenca como insumo para el modelo hidráulico a desarrollar.

Finalmente, se desarrolla un modelo hidráulico en HEC-RAS con el fin de evaluar las zonas de deposición y erosión en el embalse, así como sus velocidades y niveles máximos ante el hidrograma de caudales a la entrada, presentando también escenarios futuros de deposición de sedimentos en el embalse ante similares condiciones a las modeladas, con el fin de con un a base fundamentada para estudiar medidas de control en trabajos posteriores.

Del presente estudio se concluye sobre la importancia de contar con información detallada de las subcuencas debido a la gran cantidad de parámetros que requieren los modelos hidrológicos de simulación continua y los modelos de erosión y transporte de sedimentos. Por otra parte, se realizar un proceso de calibración y validación tal que permite observar por medio del modelo hidráulico desarrollado la similitud en las zonas de deposición respecto a las batimetrías realizadas en el embalse, permitiendo evaluar posibles escenarios futuros de deposición de sedimentos en el cuerpo del embalse.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	JUSTIFICACIÓN.....	17
4	CASO DE ESTUDIO.....	20
4.1	LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES	20
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE.....	21
5	IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES Y DATOS DE ENTRADA A LOS MODELOS HEC-HMS Y HEC-RAS.....	23
5.1	INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA	23
5.1.1	Modelo digital del terreno (DEM)	23
5.1.2	Levantamientos batimétricos	24
5.2	COBERTURA DEL SUELO	25
5.3	SEDIMENTOS.....	27
5.4	VERTEDERO DE EXCESOS	29
6	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	32
6.1	DATOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROMÉTRICOS	32
6.1.1	Precipitación.....	32
6.1.2	Temperatura.....	33
6.1.3	Series de caudal.....	33
6.1.4	Espacialización de la lluvia	34
6.1.5	Complementación de datos faltantes.....	36
6.1.6	Tiempo de concentración.....	37
6.2	MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC-HMS	39
6.2.1	Escenarios de simulación	39
6.2.2	Elementos de simulación.....	40

6.2.3	Datos de series de tiempo	42
6.2.4	Parámetros del modelo hidrológico.....	45
6.2.5	Calibración de escenarios de simulación	58
6.2.6	Análisis de resultados por modelo	70
6.3	MODELACIÓN DE EROSIÓN DEL SUELO Y TRÁNSITO DE SEDIMENTOS EN HEC-HMS	74
6.3.1	Escenarios de simulación	75
6.3.2	Elementos de simulación.....	75
6.3.3	Parámetros del modelo general de sedimentos de la cuenca en HEC-HMS75	
6.3.4	Parámetros del modelo de erosión en subcuencas.....	77
6.3.5	Parámetros del modelo de transporte de sedimentos en cauces	81
6.3.6	Parámetros del modelo de retención de sedimentos en el embalse	83
6.3.7	Calibración de escenarios de simulación	84
6.3.8	Análisis de resultados por modelo	90
7	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	95
7.1	MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS 2D.....	95
7.1.1	Escenarios de simulación	95
7.1.2	Información de entrada para el modelo hidráulico.....	95
7.1.3	Análisis de resultados por modelo	98
8	ANÁLISIS DE LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS	106
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
11	ANEXOS.....	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1. Cálculo de erosión y sedimentación en el embalse a partir de batimetrías.....	25
Tabla 6-1. Estaciones de precipitación AMB e IDEAM	32
Tabla 6-2. Estaciones de temperatura IDEAM	33
Tabla 6-3. Estaciones con influencia directa sobre la cuenca en estudio según método de Polígonos de Thiessen	35
Tabla 6-4. Tiempos de concentración y Lag Time calculados por subcuenca	38
Tabla 6-5. Escenarios de simulación	39
Tabla 6-6. Áreas por subcuenca – Modelo HEC-HMS	40
Tabla 6-7. Características usadas por cauce para Muskingum-Cunge	41
Tabla 6-8. Pesos de estaciones por subcuencas aplicados en HEC-HMS.....	43
Tabla 6-9. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual según número de días del mes y la duración del brillo solar diario.	44
Tabla 6-10. Métodos de pérdidas disponibles en HEC-HMS 4.10.....	49
Tabla 6-11. Parámetros requeridos para el SMA en HEC-HMS 4.10	49
Tabla 6-12. Propiedades hidráulicas del suelo.....	50
Tabla 6-13. Valores típicos del coeficiente de recesión.....	53
Tabla 6-14. Métodos de almacenamiento por interceptación de la vegetación disponibles en HEC-HMS 4.10	53
Tabla 6-15. Valores de almacenamiento por interceptación de la vegetación	54
Tabla 6-16. Métodos de almacenamiento en la superficie del suelo disponibles en HEC-HMS 4.10.....	55
Tabla 6-17. Valores de almacenamiento en la superficie del suelo	55
Tabla 6-18. Métodos de transformación de precipitación en escorrentía directa disponibles en HEC-HMS 4.10	56
Tabla 6-19. Métodos de flujo base disponibles en HEC-HMS 4.10	57
Tabla 6-20. Métodos de tránsito de crecientes disponibles en HEC-HMS 4.10.....	58
Tabla 6-21. Parámetros de mayor sensibilidad según análisis de bibliografía.....	60
Tabla 6-22. Valores iniciales para los métodos Canopy, Surface y SMA en HEC-HMS 4.10	60
Tabla 6-23. Rangos de valores recomendados de acuerdo con los resultados del modelo	65

Tabla 6-24. Porcentaje de error en el volumen simulado (PEV)	70
Tabla 6-25. Características litológicas por subcuenca de interés	78
Tabla 6-26. Valores iniciales del Factor Topográfico (LS) - GIS	79
Tabla 6-27. Curva granulométrica del material de análisis propuesta	81
Tabla 6-28. Métodos de almacenamiento por interceptación de la vegetación disponibles en HEC-HMS 4.10	82
Tabla 6-29. Métodos de retención de sedimentos en reservorios disponibles en HEC-HMS 4.10	83
Tabla 6-30. Volúmenes de sedimentación y erosión para los levantamientos batimétricos llevados a cabo en el embalse Tona	84
Tabla 6-31. Comparación de volúmenes obtenidos por batimetría con volúmenes obtenidos por Modelo 1	86
Tabla 6-32. Balance de masa de sedimentos en el elemento “Reservoir” del Modelo 1... 87	87
Tabla 6-33. Comparación de volúmenes obtenidos por batimetría con volúmenes obtenidos por Modelo 2	88
Tabla 6-34. Balance de masa de sedimentos en el elemento “Reservoir” del Modelo 2... 89	89
Tabla 7-1. Curvas de clasificación granulométrica como condición de contorno del Modelo 1 (2018-2020)	97
Tabla 7-2. Curvas de clasificación granulométrica como condición de contorno del Modelo 2 (2020-2021)	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1. Localización embalse Tona - Bucaramanga	20
Figura 5-1. Modelo Digital de Elevaciones ALOS PALSAR.....	23
Figura 5-2. Grupo Hidrológicos en cuenca de análisis	26
Figura 5-3. Curvas granulométricas del material el lecho y suspensión para la Estación Cola del Embalse.....	27
Figura 5-4. Curvas granulométricas del material del lecho.....	28
Figura 5-5. Fotografías del lecho del río Tona.....	28
Figura 5-6. Curva granulométrica de material en suspensión propuesta.....	29
Figura 5-7. Configuración de la geometría del vertedero tipo Morning Glory.....	30
Figura 5-8. Comparación de curvas de gasto de vertedero tipo Morning Glory (prototipo AMB vs diseño INTEGRAL)	31
Figura 6-1. Serie de caudales medidos sobre el río Tona	34
Figura 6-2. Polígonos de Thiessen aplicados a la zona de estudio	36
Figura 6-3. Subcuencas generadas por la herramienta GIS de HEC-HMS	41
Figura 6-4. Curvas Área-Elevación-Volumen de las batimetrías realizadas en 2018 y 2020	42
Figura 6-5. Evapotranspiración Potencial corregida por el Método Thornthwaite para los años 2018 a 2021	45
Figura 6-6. Modelo conceptual de cinco capas como combinación de los parámetros Canopy-surface-SMA en HEC-HMS para simulación continua	46
Figura 6-7. Diagrama de flujo del modelo hidrológico desarrollado	48
Figura 6-8. Diagrama triangular para determinación de texturas en materiales tipo suelo	51
Figura 6-9. Elementos de un hidrograma y análisis de recesión	52
Figura 6-10. Mapa de cobertura del suelo con base en el Mapa de Cobertura Metodología Corine Land Cover del IDEAM.....	54
Figura 6-11. Mapa de pendientes obtenido a partir el DEM ALOS PALSAR	56
Figura 6-12. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados en el río Tona	61
Figura 6-13. Curva de duración de caudales para el Modelo 1	62
Figura 6-14. Correlación de caudales observados vs caudales simulados en HEC-HMS para Modelo 1.....	62

Figura 6-15. Comparación de caudales promedio simulados-observados por año para el Modelo 1.....	63
Figura 6-16. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 1.....	64
Figura 6-17. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados en el río Tona	66
Figura 6-18. Curva de duración de caudales para el Modelo 2	66
Figura 6-19. Correlación de caudales observados vs caudales simulados en HEC-HMS para Modelo 2.....	67
Figura 6-20. Comparación de caudales promedios observados y simulados para el Modelo 2	67
Figura 6-21. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 2.....	68
Figura 6-22. Gráfico de precipitaciones para el periodo de análisis del Modelo 2	68
Figura 6-23. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados (modificados) en el río Tona	69
Figura 6-24. Comparación de caudales promedios observados (modificados) y simulados para el Modelo 2.....	69
Figura 6-25. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 2 con caudales modificados	69
Figura 6-26. Nombres de los cauces identificados en la cuenca de análisis	71
Figura 6-27. Exceso de precipitación acumulado para el Modelo 1.....	72
Figura 6-28. Exceso de precipitación acumulado para el Modelo 2.....	73
Figura 6-29. Diagrama de flujo del modelo de erosión y sedimentos desarrollado.....	74
Figura 6-30. Comparación de curvas elevación-almacenamiento para el año 2020 (AMB vs HEC-HMS)	85
Figura 6-31. Volúmenes y niveles característicos del embalse Tona	85
Figura 6-32. Carga de sedimentos en el fondo del embalse total– Modelo 1	87
Figura 6-33. Comparación de curvas elevación-almacenamiento para el año 2021 (AMB vs HEC-HMS)	88
Figura 6-34. Carga de sedimentos en el fondo del embalse total – Modelo 2	89
Figura 6-35. Carga de sedimentos totales y por tipo de partícula en la entrada del embalse/ Comparación de carga total de sedimentos con caudales calibrados a la entrada del embalse – Modelo 1	91
Figura 6-36. Concentración de sedimentos por subcuenca analizada – Modelo 1	92

Figura 6-37. Carga de sedimentos totales y por tipo de partícula en la entrada del embalse/ Comparación de carga total de sedimentos con caudales calibrados a la entrada del embalse – Modelo 2 Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1	93
Figura 6-38. Concentración de sedimentos por subcuenca analizada – Modelo 2	94
Figura 7-1. Resultados del modelo de sedimentos en HEC-RAS – Modelo 1	100
Figura 7-2. Profundidad estimada de deposición de sedimentos en el fondo del embalse para un periodo de 10 años (izquierda) y para un periodo de 20 años (derecha) con base en la batimetría del año 2018 (Tamaño de celda 30x30m)	101
Figura 7-3. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2018-2020, 10 años y 20 años – Modelo 1	102
Figura 7-4. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2018-2020, 10 años y 20 años cerca al sitio de presa – Modelo 1	102
Figura 7-5. Resultados del modelo de sedimentos en HEC-RAS – Modelo 2 (Tamaño de celda 5x5m)	103
Figura 7-6. Profundidad estimada de deposición de sedimentos en el fondo del embalse para un periodo de 10 años (izquierda) y para un periodo de 20 años (derecha) con base en la batimetría del año 2020 (Tamaño de celda 30x30m)	104
Figura 7-7. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2020-2021, 10 años y 20 años – Modelo 2	105
Figura 7-8. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2020-2021, 10 años y 20 años cerca al sitio de presa – Modelo 2	105
Figura 8-1. Zonas de sedimentación y erosión en el embalse: comparativa 2018-2020.	107
Figura 8-2. Profundidades de zonas de deposición en el cuerpo del embalse: comparativa 2018-2020	107
Figura 8-3. Zonas de sedimentación y erosión en el embalse: comparativa 2020-2021.	109
Figura 8-4. Profundidades de zonas de deposición en el cuerpo del embalse: comparativa 2020-2021	109

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Registros de precipitación y temperatura IDEAM-AMB

Anexo 2. Mapas de Números de Curva

Anexo 3. Cálculo de tiempo de concentración en subcuencas

Anexo 4. Evapotranspiración Potencial Thornthwaite

Anexo 5. Polígonos de Thiessen aplicados a las estaciones requeridas

Anexo 6. Análisis batimétrico AMB

Anexo 7. Curvas de gradación granulométrica_HEC-HMS

Anexo 8. Resultados modelación HEC-RAS 2D

1 INTRODUCCIÓN

El documento aquí presentado consta de tres capítulos principales, en primer lugar se muestra desarrollo del modelo hidrológico en el cual se lleva a cabo la modelización de caudales en la cuenca que vierte al embalse Tona y la calibración de dichos caudales con las mediciones tomadas in situ; es segundo lugar, haciendo uso del modelo hidrológico previamente desarrollado, se incluyen las características correspondientes al terreno en la cuenca y se obtiene la carga de sedimentos a la salida, la cual es equivalente a la carga de entrada al embalse para el periodo de análisis, así mismo, se realiza el análisis de disminución de capacidad en el embalses sirviendo esto como proceso de calibración para el modelado de sedimentos, al ser comparado con los levantamientos batimétricos llevamos a cabo en el embalse en estudio; por último, se muestra el desarrollo de los modelos hidráulicos en los cuales se pueden observar las velocidades en el cuerpo del embalse y la distribución de sedimentos a partir de estas y los parámetros propios del modelo definidos.

Dichos análisis permiten identificar subcuencas con mayores tasas de escorrentía superficial y, por consiguiente, mayor aporte de sedimentos al embalse como indicativo para posteriores medidas de mitigación y control de volumen útil en este. Por otra parte, por medio del análisis de pérdida de capacidad útil en el reservorio llevado a cabo en la modelación hidrológica (HEC-HMS), es posible obtener indicadores que permitan estimar el impacto de la acumulación de sedimentos a largo plazo; por último, se presenta el análisis hidráulico llevado a cabo en HEC-RAS en el cual se puede observar la distribución de sedimentos en el cuerpo del embalse y resultados de estimaciones a 10 y 20 años a partir de los años modelados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el comportamiento de los sedimentos en el Embalse Tona (Bucaramanga, Santander) y su cuenta aferente por medio de los programas HEC-HMS 4.10 y HEC-RAS 6.3.1, con el fin de contar con una base fundamentada para estudiar medidas de control en trabajos posteriores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información requerida para los análisis y calibración de los modelos hidrológicos e hidráulicos a desarrollar.
- Realizar un modelo hidrológico de la cuenca del río Tona en HEC-HMS 4.10 con el fin de calibrar los caudales a la entrada del embalse a partir de los datos tomados en sitio.
- Elaborar un modelo de erosión del suelo y tránsito de sedimentos en la cuenca del río Tona con el fin de obtener la carga de sedimentos a la entrada del embalse Tona.
- Implementar un modelo hidráulico del Embalse del río Tona en HEC-RAS 6.3.1 a partir de los resultados obtenidos en los modelos desarrollados en HEC-HMS 4.10.
- Analizar los resultados obtenidos en los modelos desarrollados y generar conclusiones acerca de la producción de sedimentos en la cuenca y la localización de estos en el embalse para distintos eventos de simulación.

3 JUSTIFICACIÓN

Por un largo periodo de tiempo, los embalses han constituido una parte fundamental en el desarrollo de los recursos hídricos. Sus propósitos son variados y entre ellos podemos encontrar el control de sequías e inundaciones, suministro de agua, hidroenergía, uso del recurso para regadío, recarga de aguas subterráneas, propensión por la conservación de peces y vida silvestre, entre otros (Abderrezzak & Findikakis, 2018) (Cattanéo et al., 2020). Su construcción está enfocada en solucionar una problemática de determinada población. Sin embargo, su implementación puede resultar en efectos negativos tanto aguas abajo y aguas arriba de la presa, como en el propio embalse, que tendrán mayor o menor impacto de acuerdo con la gestión llevada a cabo.

Este trabajo se encuentra enfocado a evaluar el comportamiento de los sedimentos en los embalses en un caso de estudio a partir de la generación de dichos sedimentos en la cuenca aportante a lo largo del periodo de tiempo evaluado, por lo cual, corresponde al análisis enfocado en las actuaciones aguas arriba de la obra hidráulica y los impactos directamente en el embalse debido a la acumulación de dichos sedimentos en el vaso (Cattanéo et al., 2020)(WANG & HU, 2009).

Entre los impactos negativos de un embalse se encuentra el déficit en el manejo de sedimentos en la obra hidráulica debido a la implementación inadecuada de técnicas que permitan su control. Dicha problemática nace, principalmente, desde el punto de partida del proyecto al no considerarse el tratamiento y control de sedimentos como parte fundamental del embalse, especialmente debido a la concepción de que estos son un recurso agotable (Abderrezzak & Findikakis, 2018). Adicionalmente, se encuentra el efecto que han tenido distintos fenómenos en el aumento de sedimentos a nivel global: incremento de la población, cambio climático, cambios en la cobertura de los suelos por actividades económicas, entre otros (Syvitski et al., 2005). Si bien un embalse presenta como característica fundamental el atrapamiento de sedimentos debido a la interrupción en la continuidad del transporte del flujo, esta problemática puede abarcarse y mitigarse por medio de técnicas para su manejo.

Como se explicó anteriormente, uno de los impactos de los sedimentos se presenta en el embalse mismo, debido a que el atrapamiento de material de fondo y suspendido

conlleva, a medio o largo plazo, a la disminución de la vida útil de los embalses al reducir su capacidad de almacenamiento, lo que perjudica el objetivo para el cual fue construido (G. M. Kondolf, 1997). Por tal razón, dentro del alcance de la tesis está el análisis de sedimentos a partir de la cuencas y subcuencas que vierten al embalse del río Tona, considerando la reducción de este por medio de la carga de sedimentos que entra a él y la localización de sedimentos en el cuerpo del embalse, así como la estimación de escenario futuros.

El sistema actual de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Bucaramanga se basa en las captaciones a filo de agua del río Suratá, río Tona y río Frío. El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga tiene una capacidad para tratamiento de agua de 4.1 m³/s (ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A. ESP, 2017). El río Suratá por medio de bombeo alimenta la planta de tratamiento Bosconia con un caudal de 2000 l/s; el río Tona (cuena alta) alimenta por gravedad las plantas de tratamiento La Flora y Morrórico con caudales de 1000 l/s y 400 l/s respectivamente y el río Frío, también alimenta por gravedad la planta de tratamiento Floridablanca con un caudal de 700 l/s.

El embalse del río Tona se ha previsto con el objetivo de almacenar los caudales de exceso que se presentan en las épocas de invierno en el cauce del río Tona y posteriormente suplir las deficiencias de las captaciones del sistema, incrementando la confiabilidad en la provisión de agua potable, especialmente en épocas de sequía (caso fenómeno del niño del 2007) cuando las tomas a filo de agua presentan limitaciones para captar el agua requerida por el AMB. Dicho embalse cuenta con un volumen de almacenamiento de 18 millones de metros cúbicos, regulando un caudal de 1200 l/s, lo equivalente a tres meses de consumo de agua potable para el Área Metropolitana de Bucaramanga, así como un caudal continuo de 75 l/s para Lebrija que ha sufrido históricamente sequías periódicas por el agotamiento de su sistema propio (Comisión Regional de Competitividad de Santander, 2010).

La importancia de la preservación y manejo adecuado de los embalses en general radica, fundamentalmente, en la escasez del recurso hídrico a largo plazo, estimándose que para el año 2025, 1800 millones de personas vivirán en países o regiones con carencia absoluta de agua potable y dos terceras partes de la población mundial podrían hacerlo en condiciones de estrés hídrico. Así mismo, estudios de la OCDE prevén que para el año

2050 aumentará la demanda mundial de agua en un 55%, lo cual pone de manifiesto la importancia de los embalses para suministro de agua potable, enmarcándose en uno de los objetivos de desarrollo sostenible - ODS6 (SPANCOLD CNEGP, 2017).

Por otra parte, enmarcándose en la línea de investigación de la modelación física y numérica de los recursos hidráulicos, para el análisis de la sedimentación en embalses se hacen necesarias diferentes herramientas de modelación para entender y gestionar el comportamiento de los sistemas fluviales, incluso cuando los datos disponibles para calibración son escasos, ya que proveen una visión adicional del posible comportamiento de un sistema ante un evento crítico. Dichas modelaciones deben ser analizadas de la mano de eventos históricos significativos, la revisión de casos de estudio, experiencias previas y visitas en obra (Morris & Fan, 2009).

A partir de lo anteriormente expuesto y de la importancia del embalse del río Tona en la provisión de agua potable al Área Metropolitana de Bucaramanga y municipios aledaños como Lebrija, se considera necesario un análisis de sedimentos. Según los estudios Fase II y Fase III elaborados para su construcción se estimó que entrarían 90.371 m³ de sedimentos (arenas y gravas) al año (INTEGRAL, 2012b). Así mismo, este estudio abrirá las puertas a investigaciones futuras que complementen los análisis aquí desarrollados para el mismo embalse o que sirvan como guía para estudios de manejo de sedimentos en otros embalses del país.

4 CASO DE ESTUDIO

4.1 LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

La zona de estudio que ha sido seleccionada para el análisis de sedimentos en dos dimensiones corresponde al Embalse de Bucaramanga, propiedad de la Empresa de Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) y se encuentra localizado sobre el río Tona en Santander.

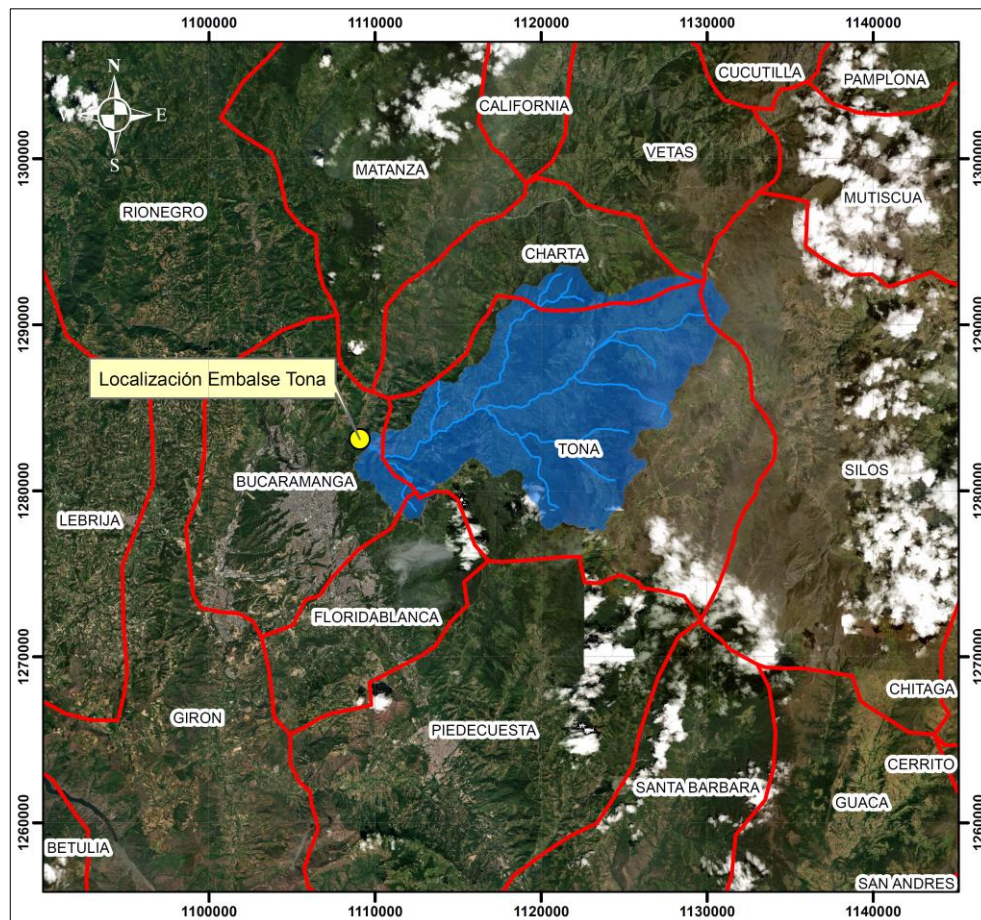


Figura 4-1. Localización embalse Tona - Bucaramanga
Fuente: Elaboración propia

Los estudios desarrollados para la construcción del Embalse constan de dos volúmenes que se describen a continuación:

Estudios y diseños FASE II para el proyecto de Regulación Embalse de Bucaramanga (2008):

En este estudio se encuentra el cálculo de caudales para el proyecto, la determinación del volumen útil de regulación de caudales en el embalse, análisis de altura por oleaje sobre la presa y el estimativo de sedimentos depositables en el embalse con base en datos de mediciones de sedimentos en suspensión. De esta manera, la información recopilada se señala a continuación:

- Cartografía del departamento de Santander adquirida del Instituto Agustín Codazzi (IGAC)

Diseños de detalle elaborados por INTEGRAL S.A para CONALVIAS S.A (2011):

En este estudio se consignan los caudales de diseño para el sistema de desviación y el vertedero en 400 m³/s y 1770 m³/s respectivamente. Dicho estudio tuvo como base el informe FASE II del proyecto de regulación elaborado por la firma Ponce de León y Asociados Ingenieros Consultores, con el fin de revisar, actualizar y complementar la información de la Fase I. Así mismo, la información recopilada correspondió a:

- Cartografía del departamento de Santander adquirida del Instituto Agustín Codazzi (IGAC) complementada con el modelo digital de elevaciones de la NASA (SRTM v3).

- Información de estaciones hidroclimatológicas localizadas en la zona del proyecto. Son una recopilación de estaciones del IDEAM y estaciones del AMB.

- Información de sedimentos. Recolección de los estudios FASE II, la cual partió de los registros diarios de concentración superficial de sedimentos en suspensión 2005-2006 y a una serie de aforos líquidos propuestos por INTEGRAL en dos estaciones del embalse.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE

El embalse de Bucaramanga se previó con el fin de regular un caudal de 1.10 m³/s del río Tona para el Acueducto de Bucaramanga. La presa consiste en un enrocado con cara de concreto de 103 metros de altura, 270 metros de longitud y su nivel de fundación se encuentra en la cota 785 m.s.n.m; La pendiente del talud aguas arriba es de 1.5H:1.0V y aguas abajo es de 1.4H:1.0V. El nivel mínimo de operación del embalse se definió en 841

m.s.n.m, el nivel máximo de operación en 885.8 m.s.n.m y el nivel de operación extraordinario en 888.3 m.s.n.m (INTEGRAL, 2011a).

5 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES Y DATOS DE ENTRADA A LOS MODELOS HEC-HMS Y HEC-RAS

5.1 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

A continuación, se describen las fuentes de las cuales se obtuvo la información topográfica requerida para la elaboración de los modelos hidrológicos, de erosión y sedimentación e hidráulicos descritos en el presente documento.

5.1.1 Modelo digital del terreno (DEM)

Con el fin de generar las subcuencas correspondientes a la cuenca del río Tona con punto de salida la presa del embalse en estudio, se requiere un modelo digital de elevaciones de amplia cobertura que abarque la longitud requerida para el estudio; de esta manera, por medio de la plataforma de la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) se descargó el DEM ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High Resolution con tamaño de celda 12.5x12.5m.

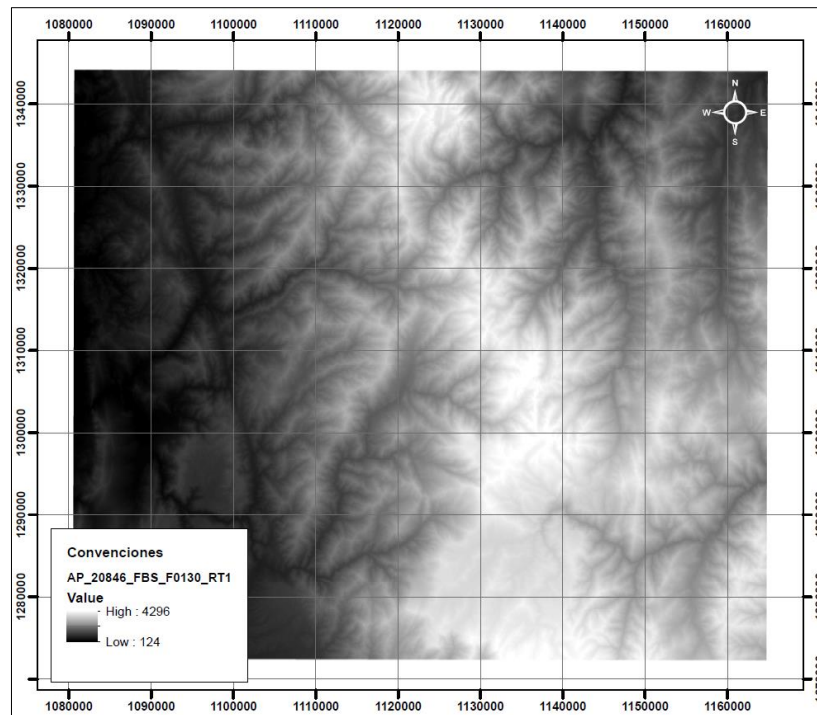


Figura 5-1. Modelo Digital de Elevaciones ALOS PALSAR
Fuente: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

5.1.2 Levantamientos batimétricos

Con el objetivo de determinar el cambio en la capacidad del embalse y cuantificar el nivel de sedimentos en este, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) ha contratado una serie de levantamientos batimétricos a la empresa BATIMETRÍA S.A.S, cuyos entregables consistieron en los volúmenes de erosión y sedimentación y los Modelos Digitales del Terreno (MDT) generados a partir de la nube de puntos multihaz y el levantamiento RTK (Real Time Kinematic) – convencional.

De esta manera, los levantamientos topográficos de los cuales se tiene registro corresponden a las siguientes fechas:

- Levantamiento topográfico 2018: el levantamiento topográfico fue realizado el 11 de julio de 2018 y, de acuerdo con el informe presentado por Batimetría S.A.S (BATIMETRÍA, 2019), respecto a una batimetría realizada en el año 2017, se presentaron 0.25 hm³ de sedimentación y 0.17 hm³ de erosión; así mismo, en el sector cola del embalse realizaron el cálculo de volúmenes de sedimentación y erosión, encontrando 0.06 hm³ y 0.005 hm³ respectivamente. De esta manera, se observa que los volúmenes de sedimentación son superiores a los volúmenes de erosión, evidenciándose la pérdida de volumen útil en el embalse para los análisis realizados por el embalse.

- Levantamiento topográfico 2020: el levantamiento topográfico fue realizado en 21 de enero de 2020 y en el informe presentado por Batimetría S.A.S (BATIMETRÍA, 2020) realizan la comparativa de volúmenes de sedimentación y erosión en los distintos periodos en los cuales cuentan con información batimétrica. De esta manera, en la Tabla 5-1 se observa para el periodo 2018-2020 que los volúmenes de sedimentación son superiores a los volúmenes de erosión, evidenciándose la pérdida de volumen útil en el embalse.

- Levantamiento topográfico 2021: el levantamiento topográfico fue realizado en 21 de enero de 2020 y en el informe presentado por Batimetría S.A.S (BATIMETRÍA S.A.S, 2021) realizan la comparativa de volúmenes de sedimentación y erosión en los distintos periodos en los cuales cuentan con información batimétrica. De esta manera, en la Tabla 5-1 se observa para el periodo 2020-2021 que los volúmenes de sedimentación son

superiores a los volúmenes de erosión, evidenciándose la pérdida de volumen útil en el embalse, de igual forma que en el informe anterior. Los mapas comparativos de levantamientos batimétricos se encuentran en el Anexo 6.

Tabla 5-1. Cálculo de erosión y sedimentación en el embalse a partir de batimetrías

Cálculo de erosión y sedimentación		
Periodos	Erosión m ³	Sedimentación m ³
2015 - 2017	296268.89	1071742.66
2017 - 2018	168043.32	254086.84
2018 - 2020	149585.46	227795.64
2015 - 2020	407423.08	387283.58
2020 - 2021	34735.47	412554.82

Fuente: (BATIMETRÍA S.A.S, 2021)

5.2 COBERTURA DEL SUELO

La cobertura del suelo en la cuenca obtenida para el Embalse de Bucaramanga se estudió a partir de la información geográfica consignada en distintas bases de datos nacionales y, a partir de su procesamiento en ArcGIS y la relación de capas, se obtuvo el mapa de Número de Curva del modelo de estimar la escorrentía superficial para la cuenca, el cual es un insumo para los modelos posteriores.

La información usada para tal fin se describe a continuación y fue descargada de los datos abiertos de la sección Agrología del GEOPORTAL del IGAC (IGAC, 2021).

- SANTANDER_SUELOS_VF: mapa de suelos del departamento Santander a escala 1:100.000, el cual contiene información correspondiente al uso del suelo, características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, así como su taxonomía y distribución.

- AG_100K_VOCACION_USO_2017: mapa de clasificación de las tierras por su vocación de uso a escala 1:100.000, cuyo objetivo es determinar el uso más apropiado que puede soportar cada uno de los suelos en Colombia.

De esta manera, a partir de lo consignado en la Metodología SCS (TR-55) (United States Department of Agriculture, 1986), se asignaron los valores del Número de Curva de acuerdo con las características por zona en la cuenca y siguiendo el procedimiento descrito en “*Herramientas Computacionales para Análisis Hidrológico e Hidráulico*” (R.HydroTools, 2021).

Una vez se obtuvo el valor del número de curva para la condición antecedente de humedad normal (CNII), se calcularon los valores correspondientes a las condiciones de humedad antecedente seca (CNI) y húmeda (CNIII) por medio de las siguientes ecuaciones (Chow et al., 2000):

$$CNI = \frac{4.2 * CNII}{10 - 0.058 * CNII} \qquad CNIII = \frac{23 * CNII}{10 + 0.13 * CNII}$$

En la Figura 5-2 se pueden observar los grupos hidrológicos obtenidos para la cuenca en estudio y en el Anexo 2 se encuentran los mapas correspondientes a los valores de número de curva de acuerdo con cada una de las condiciones antecedentes de humedad previamente definidas.

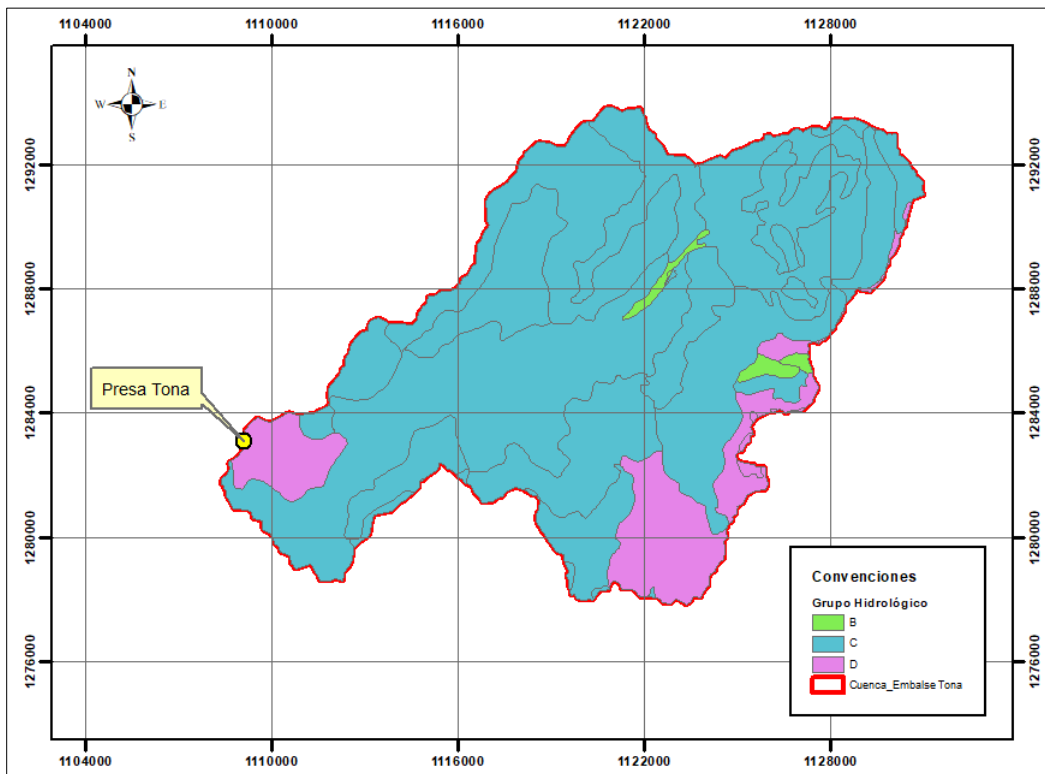


Figura 5-2. Grupo Hidrológicos en cuenca de análisis
Fuente: Elaboración propia

5.3 SEDIMENTOS

Se obtuvo información para los sedimentos en suspensión y para los de fondo. La empresa encargada de la elaboración de los estudios Fase III, INTEGRAL S.A, realizó una serie de aforos sólidos en dos sitios estratégicos; uno aguas arriba de la presa (cola del embalse) y uno aguas abajo de la presa (Puente Tona). De estos aforos se obtuvieron muestras tanto de material en suspensión, como de material del lecho (Figura 5-3).

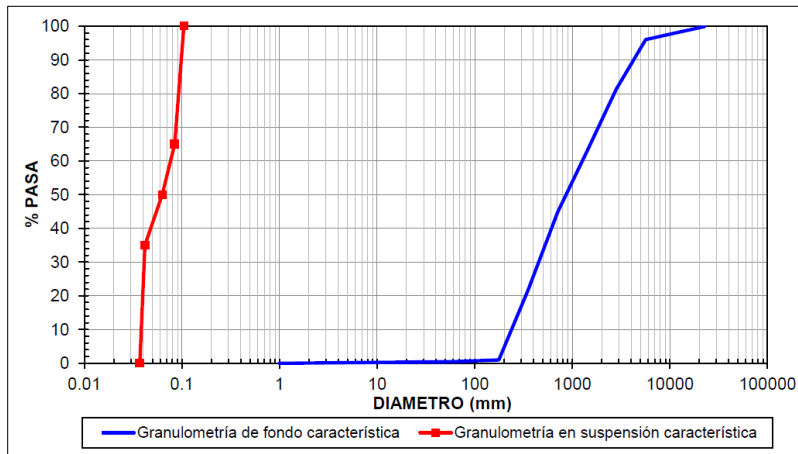


Figura 5-3. Curvas granulométricas del material el lecho y suspensión para la Estación Cola del Embalse
Fuente: (INTEGRAL, 2012b)

Por otra parte, de los estudios Fase II se tiene información de las curvas granulométricas del material del lecho obtenidas por medio de barras puntuales localizadas sobre el eje proyectado de la presa y a 300 y 500 metros aguas arriba del mismo (Figura 5-4). Sin embargo, como se puede observar en la Figura 5-5, el material del lecho del río Tona se compone por materiales de tamaño grande (bolos) que no coinciden con los diámetros de dichas curvas granulométricas, según la cual, los tamaños no superan los 100 mm (gravas).

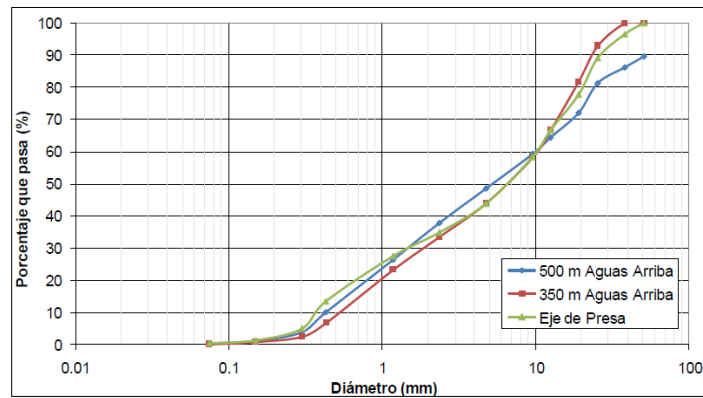


Figura 5-4. Curvas granulométricas del material del lecho
Fuente: (INTEGRAL, 2012b)



Figura 5-5. Fotografías del lecho del río Tona
Fuente: (INTEGRAL, 2012b)

En cuanto al material en suspensión, con base en el estudio Fase II se esperaba contar con limos y arcillas, contrario a lo que se observa en la Figura 5-3, según la cual el material de menor tamaño son arenas. De esta manera, INTEGRAL S.A, con base en los consignado en el estudio Fase II, reconstruye las curvas granulométricas considerando la presencia de arenas (68%), limos (20%) y arcillas (12%), como se muestra en la Figura 5-6.

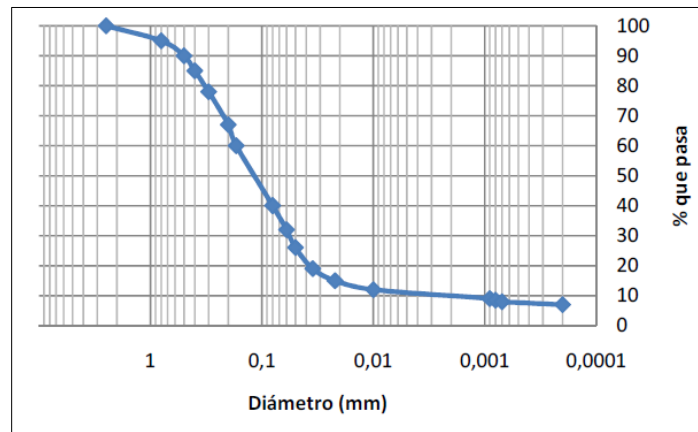


Figura 5-6. Curva granulométrica de material en suspensión propuesta
Fuente: (INTEGRAL, 2011b)

5.4 VERTEDERO DE EXCESOS

El vertedero de excesos consiste en un vertedero tipo Morning Glory de concreto convencional y está conformado por las siguientes obras: azud circular de 10 metros de radio, pozo vertical de 25 metros de profundidad y radio variable y un túnel de 317 metros de longitud (INTEGRAL, 2012c). Respecto a los criterios de diseño, se consideró un caudal de 1500 m³/s consignado en la revisión de peritazgo realizada a los diseños del embalse (Salas, 2011), así mismo, al no ser un vertedero de compuertas la cresta del azud debe encontrarse en el nivel máximo normal del embalse (885.80 m.s.n.m) y el nivel máximo que alcanzará el agua sobre el vertedero corresponde con el nivel de la cresta del muro del parapeto (891.60 m.s.n.m) (INTEGRAL, 2012c).

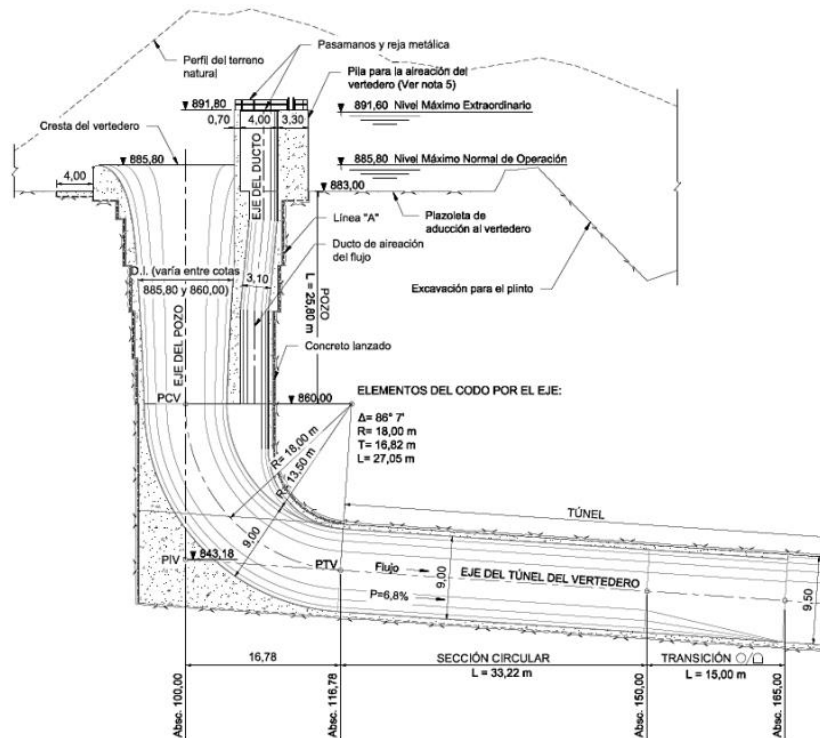


Figura 5-7. Configuración de la geometría del vertedero tipo Morning Glory
Fuente: (INTEGRAL, 2012d)

Considerando la complejidad, el riesgo potencial y la inversión del Embalse de Bucaramanga, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en conjunto con INTEGRAL, La Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Industrial de Santander (INTEGRAL, 2011b), construyó un modelo físico a escala geométrica 1:50, el cual incluye todos los componentes del embalse; de esta manera, con la finalidad de conocer la capacidad hidráulica real del aliviadero de la presa se construyó la curva de calibración del vertedero Morning Glory y se comparó con la curva de diseño consignada en los volúmenes de INTEGRAL para el estudio Fase III (INTEGRAL, 2012d).

Para las modelaciones realizadas en la presente tesis se consideró la curva de calibración del vertedero tipo Morning Glory, considerando que los valores de descarga no varían considerablemente con los consignados en la curva de gasto de diseño desarrollada por INTEGRAL.

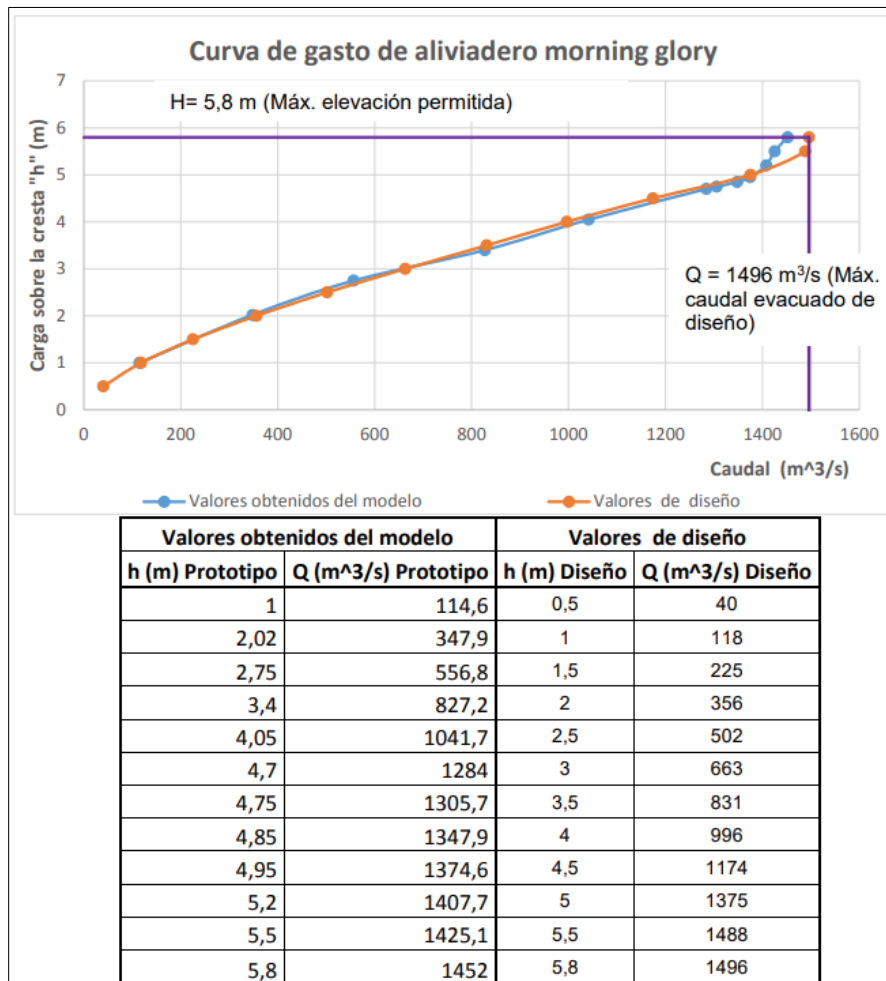


Figura 5-8. Comparación de curvas de gasto de vertedero tipo Morning Glory (prototipo AMB vs diseño INTEGRAL)

Fuente: (Almeyda, 2014)

6 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

6.1 DATOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROMÉTRICOS

6.1.1 Precipitación

La información correspondiente a los datos de precipitación se obtuvo por medio del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Tabla 6-1). La información solicitada correspondió a la precipitación diaria y posteriormente, de acuerdo con la cuenca de análisis, se filtró la información necesaria.

Tabla 6-1. Estaciones de precipitación AMB e IDEAM

Estación	Cod_Estación	Longitud	Latitud	Altura
Aeropuerto Palonegro	ST_23195502	-73.185	7.121	1189
Arboledas	ST_16020050	-72.800	7.644	925
Berlín	ST_37015020	-72.869	7.187	3214
Bucaramanga IDEAM	ST_23190830	-73.118	7.128	125
Cachiri-Aut	ST_23195200	-72.991	7.474	1850
Cacota	ST_37010030	-72.644	7.270	2645
Caldera La	ST_16020110	-72.718	7.317	2875
Cucutilla	ST_16020080	-72.773	7.534	1280
Floresta La	ST_23190590	-73.124	7.090	925
Fuente La	ST_24050100	-73.280	6.707	815
Galvicia La	ST_23190400	-73.057	7.124	1779
Iser Pamplona	ST_16015020	-72.645	7.373	2340
Laguna La	ST_23190260	-73.214	7.080	150
Llano De Palmas	ST_23190350	-73.195	7.240	778
Matajira	ST_23190340	-73.065	7.213	996
Mesa La	ST_24060050	-73.093	6.759	1460
Naranjo El	ST_23190440	-73.300	7.205	825
Palmas	ST_23190380	-73.218	7.211	855
Picacho El	ST_23190300	-72.966	7.110	3310
Piedecuesta Granja	ST_23190700	-73.068	6.993	10
Playón El	ST_23190140	-73.201	7.465	500
Portachuelo	ST_23190360	-73.165	7.328	800
Rincon Los	ST_37010080	-72.713	7.198	2650
Tona-Aut	ST_23190130	-72.971	7.196	1910
Tope El	ST_24030330	-72.932	6.940	250
Vetas-El Pozo	ST_23190450	-72.878	7.309	3220

Estación	Cod_Estación	Longitud	Latitud	Altura
Vivero Surata-Aut	ST_23195090	-72.988	7.366	1725
Zapatoca	ST_24055030	-73.283	6.793	1810
El Brasil	AMB_1	-73.063	7.075	1662
El Gualilo	AMB_2	-73.050	7.083	1249
El Pajal	AMB_3	-72.596	7.083	2196
Huerta Grande	AMB_4	-72.594	7.164	1650
La Granja	AMB_5	-73.032	7.154	1200
La Lora	AMB_6	-72.585	7.244	2250
Martin Gil	AMB_8	-72.595	7.135	2000
Miraflores	AMB_9	-73.011	7.205	2422
Povedas	AMB_10	-72.562	7.204	2000

Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Temperatura

La información correspondiente a las temperaturas diarias máximas y mínimas se obtuvieron de las estaciones del IDEAM mostradas en la Tabla 6-2. Esta información fue posteriormente procesada de acuerdo con la pertinencia de su uso en cuanto a la cuenca de análisis y su localización.

Tabla 6-2. Estaciones de temperatura IDEAM

Estación	Cod_Estación	Longitud	Latitud	Altura
Aeropuerto Palonegro	ST_23195502	-73.185	7.121	1189
Berlín	ST_37015020	-72.869	7.187	3214
Cachiri-Aut	ST_23195200	-72.991	7.474	1850
Iser Pamplona	ST_16015020	-72.645	7.373	2340
Vivero Surata-Aut	ST_23195090	-72.988	7.366	1725
Zapatoca	ST_24055030	-73.283	6.793	1810

Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Series de caudal

La información correspondiente a las series de caudal diarios medidos sobre el río Tona fue provista por parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) considerando la sumatoria de caudales en determinados puntos del río. La serie mostrada en la Figura 6-1 corresponde a los caudales que ingresan al embalse y con los cuales la entidad realiza los análisis requeridos para su monitoreo.

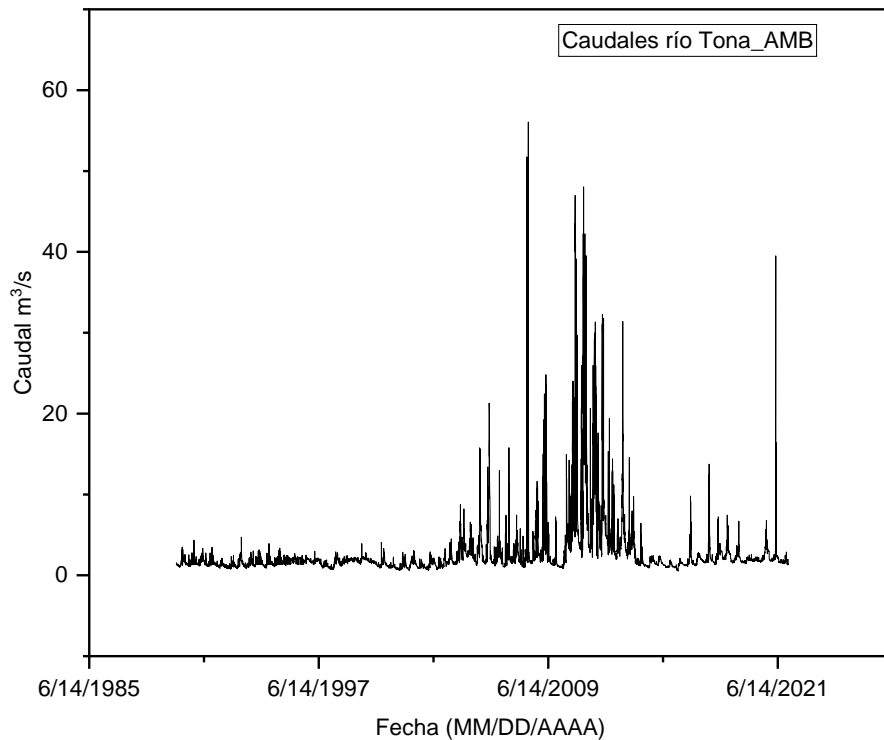


Figura 6-1. Serie de caudales medidos sobre el río Tona
Fuente: AMB

6.1.4 Espacialización de la lluvia

Para el cálculo de la precipitación media en cuencas de gran tamaño con varias estaciones con registros de precipitación, se disponen de tres métodos comúnmente usados y consignados en la literatura (Chow et al., 2000)(Aparicio Mijares, 1989)(Monsalve, 1995):

- Método aritmético

Consiste en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada una de las estaciones usadas en el análisis, siendo este método el más simple para determinar la lluvia promedio sobre un área, considerando que brinda resultados satisfactorios si los pluviómetros se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones individuales no varían de manera considerable de la media (Chow et al., 2000).

- Método de Polígonos de Thiessen

Este método se utiliza en aquellos casos donde no se tenga una distribución uniforme de las estaciones pluviométricas y consiste en atribuir un factor de peso proporcional al área de influencia de cada estación. La delimitación de los polígonos se logra uniendo los puntos que correspondan a la localización de las estaciones por medio de líneas rectas y sobre estas líneas rectas se trazan mediatrices formando los polígonos (Monsalve, 1995).

- Método de Isoyetas

En este método se usan curvas de igual precipitación a partir de las precipitaciones registradas en cada estación pluviométrica y posteriormente se calcula la precipitación media considerando el área entre isoyetas y la altura de precipitación promedio entre estas. Dichas isoyetas pueden construirse por medio de Sistemas de Información Geográfica que cuenten con métodos de interpolación tales como lo son el inverso de la distancia (IDW), Kriging, Vecino Natural y Spline.

Se seleccionó el método de los Polígonos de Thiessen para la espacialización de la lluvia, considerando que las estaciones a considerar no se encuentran uniformemente distribuidas en el área de la cuenca en estudio. Se observa que nueve estaciones tienen influencia directa sobre la cuenca del Embalse Tona (Figura 6-2), las cuales serán posteriormente analizadas de acuerdo con la cantidad de datos faltantes e información disponible en cada caso para las modelaciones a ejecutarse. Dichos Polígonos de Thiessen se obtuvieron por medio de las herramientas de análisis disponibles en ArcGIS.

Tabla 6-3. Estaciones con influencia directa sobre la cuenca en estudio según método de Polígonos de Thiessen

Estación	Cod_Estación	Longitud	Latitud	Altura
Berlín	ST_37015020	-72.869	7.187	3214
Bucaramanga IDEAM	ST_23190830	-73.118	7.128	125
Galvicia La	ST_23190400	-73.057	7.124	1779
La Granja	AMB_5	-73.032	7.154	1200
Matajira	ST_23190340	-73.065	7.213	996
Miraflores	AMB_9	-73.011	7.205	2422
Picacho El	ST_23190300	-72.966	7.110	3310
Tona-Aut	ST_23190130	-72.971	7.196	1910
Vetas-El Pozo	ST_23190450	-72.878	7.309	3220

Fuente: Elaboración propia

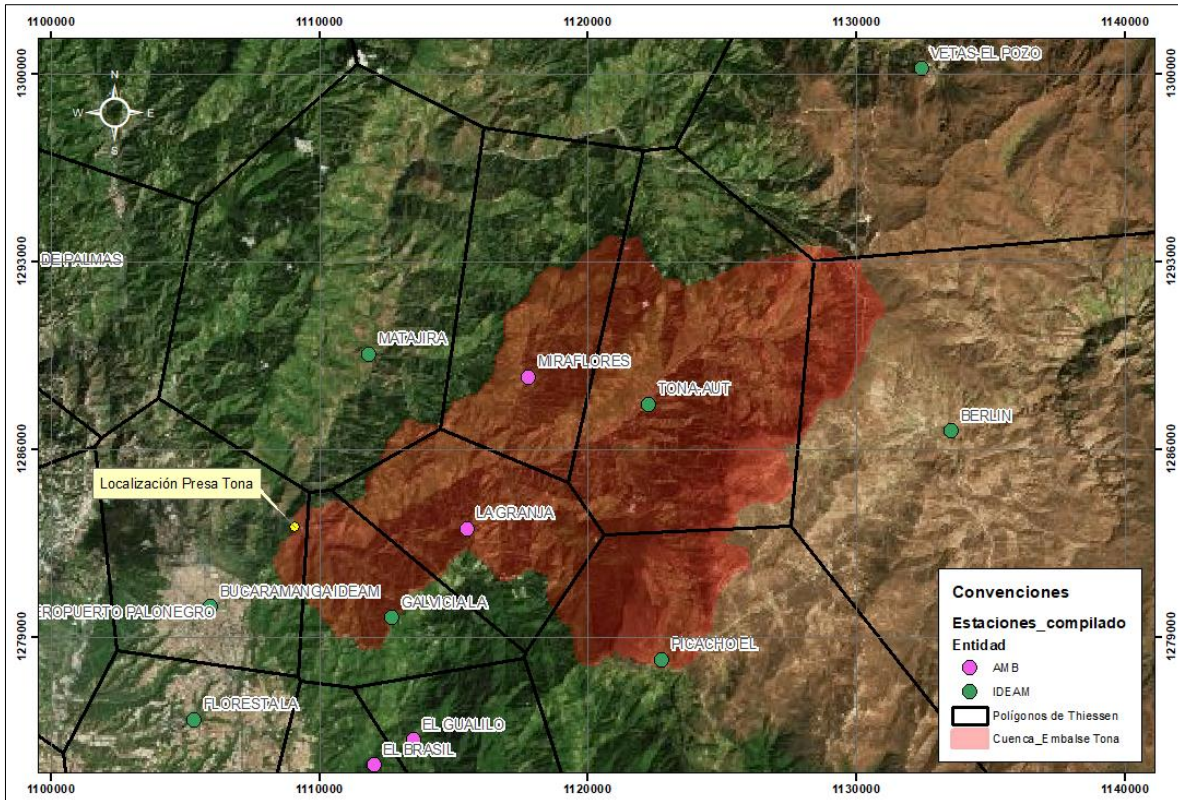


Figura 6-2. Polígonos de Thiessen aplicados a la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia

6.1.5 Complementación de datos faltantes

Debido a que las estaciones con registros de precipitación y temperatura presentan datos faltantes debido a diversos factores como lo son la negligencia del operador o la ausencia del aparato durante determinado tiempo, por lo cual, se hace necesario la complementación de estos en el periodo requerido. De esta manera, de acuerdo con lo consignado en la literatura (Aparicio Mijares, 1989)(Monsalve, 1995), se proponen las siguientes metodologías que consisten en el relleno de datos faltantes a partir de estaciones vecinas y la verificación de homogeneidad entre las estaciones usadas.

- Razones promedio

Por medio de la siguiente ecuación se puede obtener la precipitación faltante a partir de estaciones vecinas que cuenten con información en el periodo de interés.

$$h_{px} = \frac{1}{n} \left[\frac{P_x}{P_1} * h_{p1} + \frac{P_x}{P_2} * h_{p2} + \dots + \frac{P_x}{P_n} * h_{pn} \right]$$

Donde:

h_{pi}: altura de precipitación registrada en la estación auxiliar i

h_{px}: altura de precipitación faltante en la estación en estudio

P_i: precipitación media anual en la estación auxiliar i

P_x: precipitación media anual en la estación en estudio

n: número de estaciones auxiliares

- Análisis de dobles masas

Con el fin de verificar la homogeneidad de los datos en una estación pluviométrica, así como las anomalías que se hayan presentado en la toma de datos, por ejemplo, cambio de ubicación de la estación y cambio en las condiciones del aparato registrador, se construyen curvas dobles acumulativas en las cuales se relacionen los totales anuales acumulados de una estación y la media acumulada anual de las estaciones vecinas consideradas homogéneas. Así, se buscan identificar los cambios en la pendiente de la línea para las correspondientes correcciones, presentándose la no existencia de homogeneidad.

6.1.6 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración corresponde al tiempo para el cual toda la cuenca está contribuyendo al punto de salida, es decir, es el tiempo de flujo desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de esta (Chow et al., 2000). Las ecuaciones usadas para el cálculo de los tiempos de concentración se encuentran en el Anexo 3 (Vélez & Botero, 2010) (INVIAS, 2009) y los resultados obtenidos se consignan en la Tabla 6-4.

Teniendo en cuenta las diferencias considerables entre los valores que se obtienen para cada una de las ecuaciones previamente mencionadas, debido a que estas son estimadas para cuencas con características específicas, se hace necesario usar el valor promedio eliminando los valores extremos.

Para esto, se parte de la premisa de que hay una probabilidad del 68% de que el tiempo de concentración se encuentre entre la media menos la desviación estándar y la

media más la desviación estándar, se aplicó esto para delimitar los tiempos de concentración que se promediarían para el cálculo del tiempo de concentración por subcuenca.

Tabla 6-4. Tiempos de concentración y Lag Time calculados por subcuenca

Subcuenca	Tc prom, hr	Lag Time	
		hr	min
1	2.62	1.57	94.16
2	2.03	1.22	73.12
3	0.57	0.34	20.69
4	1.40	0.84	50.47
5	1.05	0.63	37.89
6	2.75	1.65	99.00
7	0.64	0.39	23.11
8	2.31	1.39	83.18
9	0.88	0.53	31.73

Fuente: Elaboración propia

6.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN HEC-HMS

La erosión de la superficie del suelo es un fenómeno natural que ocurre al presentarse la interacción entre el flujo de agua por precipitación y escorrentía con la superficie del terreno y su composición. Una vez erosionado el suelo, dichas partículas serán transportadas por cuerpos de agua hacia los tramos más bajos de la cuenca, depositándose en aquellas zonas donde las velocidades y pendientes son mejores; en el caso de los embalses, estos permiten la acumulación de la mayor parte del sedimento que ingresa (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Considerando el análisis que se desea desarrollar, el cual consiste en la obtención de carga de sedimentos a la salida de la cuenca para el periodo de análisis según los levantamientos batimétricos, se hace necesario el uso de un programa de cómputo tal como HEC-HMS, el cual incorpora el cálculo de concentración de sedimentos por subcuenca, la reducción de capacidad en los embalses por la sedimentación y la carga de sedimentos que entra a dicho embalse debida a su correspondiente cuenca. En dicho análisis se hace uso de los modelos de hidrograma unitario, flujo base, tránsito de crecientes, interceptación de lluvia por medio de la superficie del suelo y la vegetación y pérdida de precipitación por infiltración como el Soil Moisture Accounting.

6.2.1 Escenarios de simulación

Las modelaciones por realizar son consecuentes con las fechas de levantamientos batimétricos realizados en el embalse, con el fin de calibrar la acumulación de sedimentos en este una vez se haya realizado la modelación hidrológica. De esta manera, se plantearon dos modelos:

Tabla 6-5. Escenarios de simulación

Modelo	Fecha inicio	Fecha finalización
Modelo 1 – Calibración	11/Julio/2018	21/Enero/2020
Modelo 2 – Validación	21/Enero/2020	28/Junio/2021

Fuente: Elaboración propia

Los modelos se definieron de tal manera que la calibración será realizada para el primer periodo de tiempo y los parámetros obtenidos en este se validarán por medio del segundo modelo. De esta manera, se definieron modelos de simulación continua, ya que no consiste en un evento de lluvia en particular sino en los caudales presentados a lo largo

de los periodos establecidos. Para este tipo de modelación se requiere la implementación de métodos de evapotranspiración, interceptación de lluvia por la superficie del terreno y la vegetación y la recarga por acuíferos.

6.2.2 Elementos de simulación

Los elementos presentes en la simulación fueron obtenidos por medio de la herramienta GIS incorporada en HEC-HMS, en la cual, a partir de un archivo de terreno *.tif* descargado de las fuentes mencionadas en 5.1.1. El software genera rasters de relleno de sumideros (sinks), direcciones y acumulaciones de flujo a partir de un área mínima de cuenca definida, generando las cuencas correspondientes tomando un punto de cierre designado, que en el presente trabajo es la localización de la presa del embalse Tona.

6.2.2.1 Subcuencas

El área definida para la creación de subcuencas es de 10 km². Al considerar los cauces principales identificados en la cuenca del río Tona y del embalse, se obtuvieron un total de 9 subcuencas con las áreas mostradas en la Tabla 6-6. El área total de drenaje hacia la presa del embalse Tona es de 193.54 km².

Tabla 6-6. Áreas por subcuenca – Modelo HEC-HMS

Modelo	Área, km ²
Subbasin-1	30.351
Subbasin-2	49.991
Subbasin-3	0.3948
Subbasin-4	7.8506
Subbasin-5	22.523
Subbasin-6	34.538
Subbasin-7	12.055
Subbasin-8	20.287
Subbasin-9	15.554

Fuente: Elaboración propia

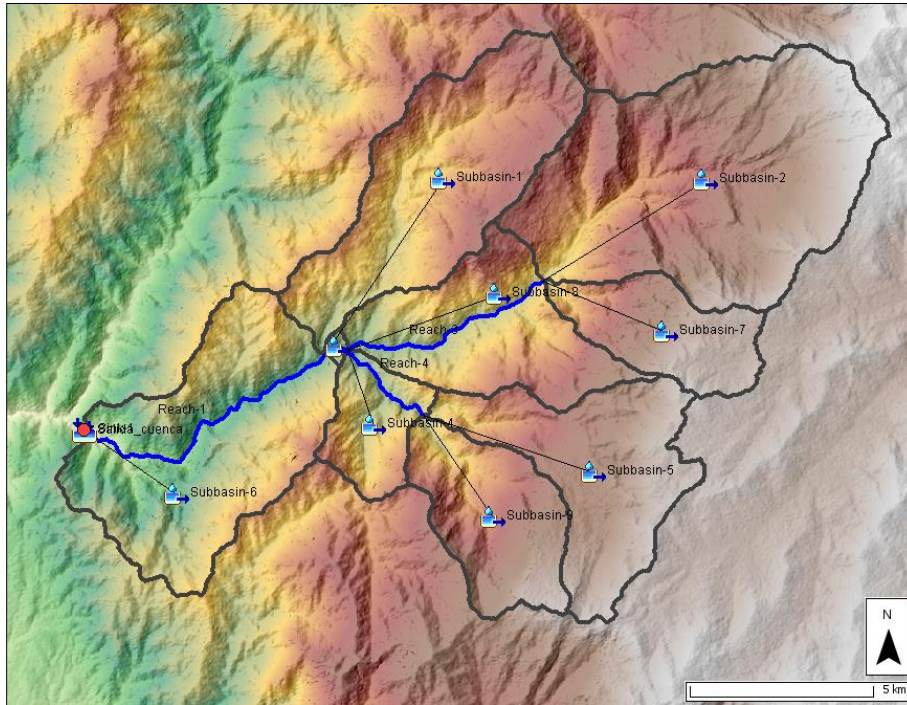


Figura 6-3. Subcuencas generadas por la herramienta GIS de HEC-HMS
Fuente: Elaboración propia

6.2.2.2 Cauces

Los cauces identificados por la herramienta GIS corresponden a cuatro tramos, cuyas características requeridas para el tránsito de crecientes se obtuvieron por medio de AutoCAD CIVIL 3D, a partir de un análisis de secciones transversales y pendientes del perfil longitudinal. Así mismo, el método implementado para el tránsito de crecientes corresponde a Muskingum-Cunge y en la Tabla 6-7 se muestra la información ingresada al software.

Tabla 6-7. Características usadas por cauce para Muskingum-Cunge

Cauces	Longitud, km	Pendiente, m/m	Manning	Ancho, m	Pendiente lateral, xH:1V
Reach-1	9278.88	0.19381	0.04	70	2
Reach-2	697.63	0.23681	0.04	70	2
Reach-3	6843.96	0.16905	0.04	70	2
Reach-4	3250.07	0.16905	0.04	70	1.5

Fuente: Elaboración propia

6.2.2.3 Reservoirio-Embalse

De acuerdo con lo consignado en 5.1.2, el presente estudio se elaboró a partir de tres batimetrías; de estas, se tomó como información de calibración las curvas Elevación-Área provistas por Batimetría S.A.S para los años 2021 y 2021, de acuerdo con los escenarios de simulación explicados en 6.2.1.

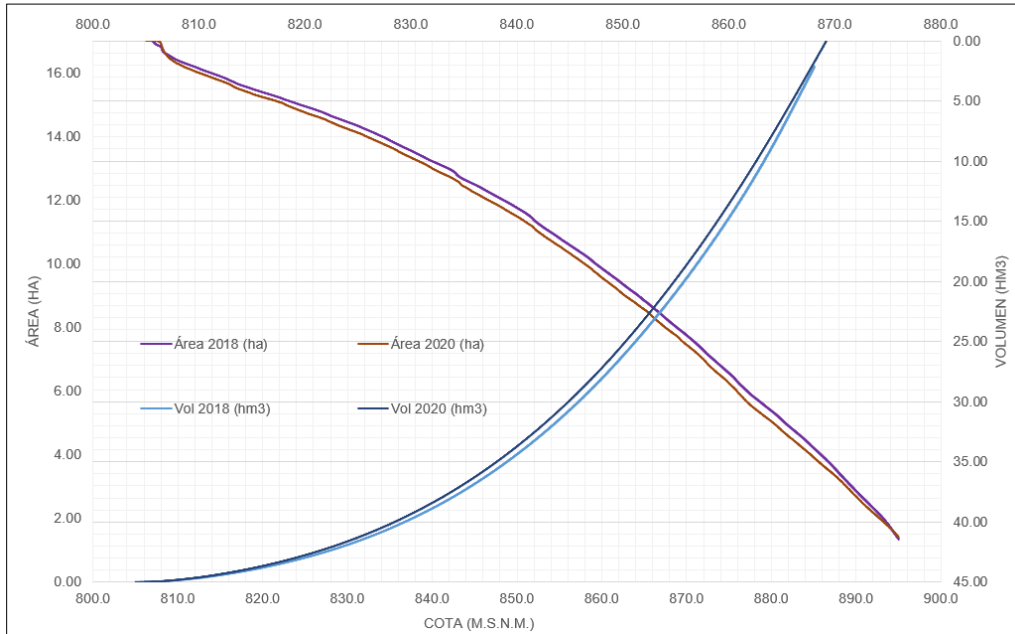


Figura 6-4. Curvas Área-Elevación-Volumen de las batimetrías realizadas en 2018 y 2020
Fuente: Tomado y adaptado de (BATIMETRÍA S.A.S, 2021)

6.2.3 Datos de series de tiempo

6.2.3.1 Precipitación

De acuerdo con lo indicado en la Tabla 6-3 y los polígonos de Thiessen mostrados en la Figura 6-2, se identificaron nueve estaciones con influencia directa sobre la cuenca de interés, sin embargo, algunas de estas se descartan debido a la cantidad de datos faltantes para cada periodo de simulación (Tabla 6-5). En la Tabla 6-8 se muestran los pesos de cada estación por subcuenca, los cuales se asignan en HEC-HMS a partir de la herramienta *Gage Weights* (valores ponderados de precipitación) en el componente de precipitación del modelo meteorológico.

En el Anexo 5 se muestran los mapas correspondientes a los polígonos de Thiessen aplicados a cada modelo y de los cuales se obtuvieron los pesos por estación, así como los datos de precipitación correspondientes a las estaciones seleccionadas y recopilados del IDEAM y del AMB en el Anexo 1.

Tabla 6-8. Pesos de estaciones por subcuencas aplicados en HEC-HMS

	Modelo 1 2018_2020		Modelo 2 2020_2021	
	Estación	Peso (%)	Estación	Peso (%)
Subcuenca 1	La Granja	3.39%	La Granja	3.39%
	Matajira	0.04%	Matajira	0.04%
	Miraflores	96.56%	Miraflores	96.56%
Subcuenca 2	Berlin	53.70%	Berlin	53.70%
	Miraflores	46.30%	Miraflores	46.30%
Subcuenca 3	La Granja	100.00%	La Granja	100.00%
Subcuenca 4	La Granja	100.00%	La Granja	100.00%
Subcuenca 5	La Granja	13.05%	La Granja	13.05%
	Miraflores	0.46%	Miraflores	0.46%
	Picacho El	86.48%	Picacho El	86.48%
Subcuenca 6	Bucaramanga IDEAM	5.81%	Galvicia La	51.94%
	Galvicia La	46.13%	La Granja	44.45%
	La Granja	44.45%	Matajira	3.61%
	Matajira	3.61%		
Subcuenca 7	Berlin	27.97%	Berlin	27.97%
	Miraflores	49.62%	Miraflores	49.62%
	Picacho El	22.40%	Picacho El	22.40%
Subcuenca 8	La Granja	14.68%	La Granja	14.68%
	Miraflores	77.59%	Miraflores	77.59%
	Picacho El	7.72%	Picacho El	7.72%
Subcuenca 9	La Granja	29.75%	La Granja	29.75%
	Picacho El	70.25%	Picacho El	70.25%

Fuente: Elaboración propia

6.2.3.2 Evapotranspiración Potencial

Para una simulación hidrológica a largo plazo se debe considerar la evapotranspiración con el fin de brindarle al modelo una medida de pérdida de agua por evaporación y transpiración de las plantas para cada mes simulado. Se usó el Método de Thornthwaite, en el cual se calcula el uso consuntivo mensual como una función de las temperaturas medias mensuales y la cantidad de horas de sol por día (Aparicio Mijares, 1989) (Monsalve, 1995) a partir de la siguiente ecuación:

$$E_j = 1.6 K_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

Donde:

E_j : evapotranspiración potencial mensual del mes j , cm

T_j : temperatura media mensual del mes j , °C

I, a : constantes

K_a : constante que depende de la latitud y el mes del año

La constante I corresponde al índice de eficiencia de temperatura y se calcula de la siguiente manera:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

Donde “ j ” corresponde al número del mes. La constante a se calcula de la siguiente manera:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

Por último, el valor de K_a se obtuvo de la Tabla 6-9.

Tabla 6-9. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual según número de días del mes y la duración del brillo solar diario.

Latitud, grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Fuente: tomado y adaptado de (Aparicio Mijares, 1989)

De acuerdo con lo indicado en el numeral 6.1.2, para la zona del proyecto únicamente se cuenta con los datos de temperatura correspondientes a la estación Berlín, por lo cual, la evapotranspiración se calculó para los años 2018, 2019, 2020 y 2021 con los registros de

información de dicha estación; los valores obtenidos se muestran en la Figura 6-5 y las tablas a detalle se encuentran en el Anexo 4.

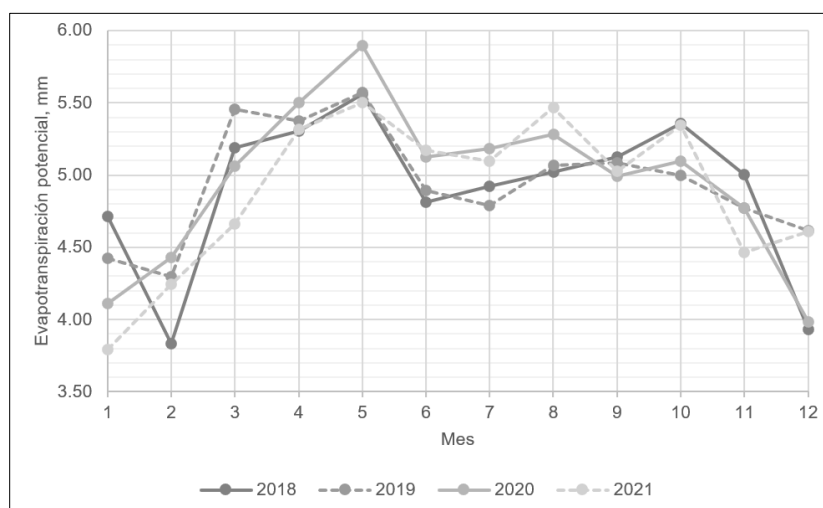


Figura 6-5. Evapotranspiración Potencial corregida por el Método Thornthwaite para los años 2018 a 2021
Fuente: Elaboración propia

6.2.4 Parámetros del modelo hidrológico

Con el fin de calcular los caudales aportados por la cuenca del río Tonal al embalse en estudio durante el periodo de modelación, se implementó un modelo de simulación continua que consta de cinco capas, las cuales se ilustran en la Figura 6-6 y consisten en un proceso que inicia con la interceptación de la lluvia en la vegetación, posteriormente, el agua pasa a la superficie del terreno donde parte de esta queda retenida en las depresiones que allí existan; una vez el agua proveniente de la precipitación queda retenida en las depresiones del suelo, comienza su proceso de infiltración a las capas que lo componen (upper/tensión zone, GW1 y GW2) y, eventualmente, el flujo que no llega a los cauces identificados por escorrentía superficial, puede llegar a través de flujo base proveniente de las capas GW1 y GW2 o continúa percolándose a las capas más inferiores del suelo y convertirse en recarga de acuíferos. (Chea & Oeurng, 2017; US Army Corps of Engineers, 2021).

El proceso explicado anteriormente tiene su inicio en la precipitación, a partir de esta, se comienza a llenar el almacenamiento indicado para la vegetación y la precipitación que

supera dicho almacenamiento pasa a la superficie del terreno, la cual se almacenará en las depresiones que existan, de acuerdo con su porcentaje de ocupación, siendo lo excedente transportado como escorrentía superficial hacia los cauces identificados en el modelo. Posteriormente, se da inicio al proceso de infiltración hacia la capa más superficial del suelo (upper zone/tensión zone) e inicia inmediatamente se presente acumulación de lluvia en la superficie del terreno. Dicha infiltración depende de la tasa máxima de infiltración, el almacenamiento actual del suelo y el almacenamiento disponible en las depresiones que en él se tienen. A partir de este punto, comienza el proceso de percolación hacia los dos niveles de agua subterránea identificados en el modelo como GW1 y GW2, el cual dependerá de la tasa de percolación indicada para cada capa, así como su almacenamiento (US Army Corps of Engineers, 2021a).

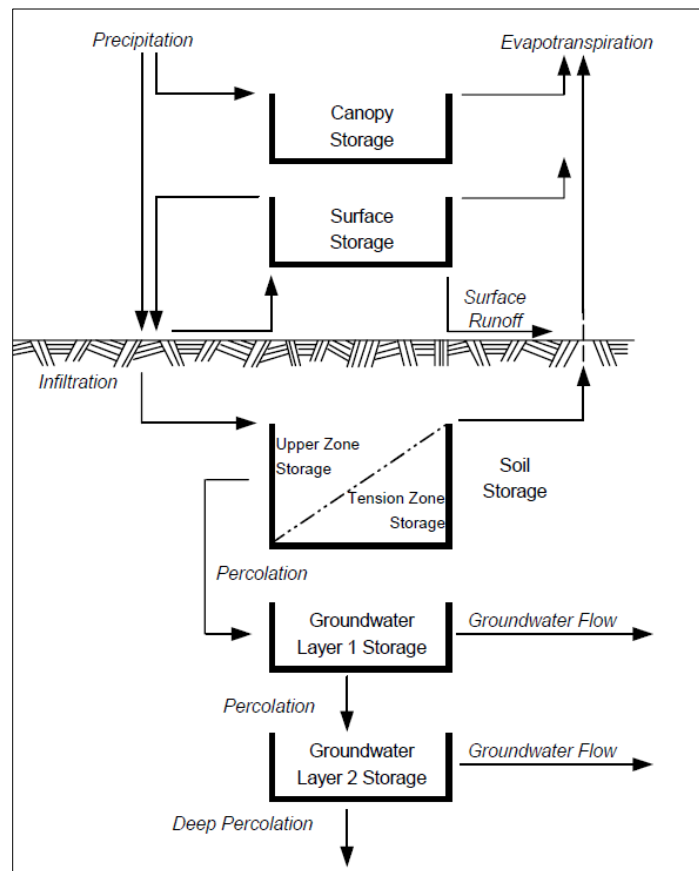


Figura 6-6. Modelo conceptual de cinco capas como combinación de los parámetros Canopy-surface-SMA en HEC-HMS para simulación continua
Fuente: (Bennett & Peters, 2000)

La evapotranspiración será efectiva para el agua retenida en la vegetación (*canopy*) y para la zona superior de la capa correspondiente al suelo (*upper zone*) a la tasa máxima de evapotranspiración indicada. En la zona de tensión del suelo, la evapotranspiración dependerá del método de absorción seleccionado para el *canopy* y definirá el límite de agua que puede evapotranspirarse en la capa completa del suelo. Cabe aclarar que la evapotranspiración se hará efectiva en el orden mencionado, es decir, primero se centra en el agua acumulada en la vegetación y, posteriormente, a partir de la evapotranspiración restante, pasa a efectuarse en los demás componentes del sistema (US Army Corps of Engineers, 2021a).

En la Figura 6-7 se ilustran los componentes y parámetros considerados para el desarrollo del modelo hidrológico y la metodología seguida; de esta manera, en la rama de componentes se ingresó la información que se indica en cada casilla, la cual se ha explicado a detalle en capítulos anteriores del presente documento, tales como precipitaciones, evapotranspiración potencial, caudales observados y funciones de área-elevación/elevación-descarga. Por otra parte, se definieron los parámetros correspondientes a cada una de las capas del modelo *canopy-surface-SMA* explicado previamente, los métodos para el cálculo de la escorrentía superficial y subsuperficial y para el tránsito del flujo en los cauces identificados en el modelo.

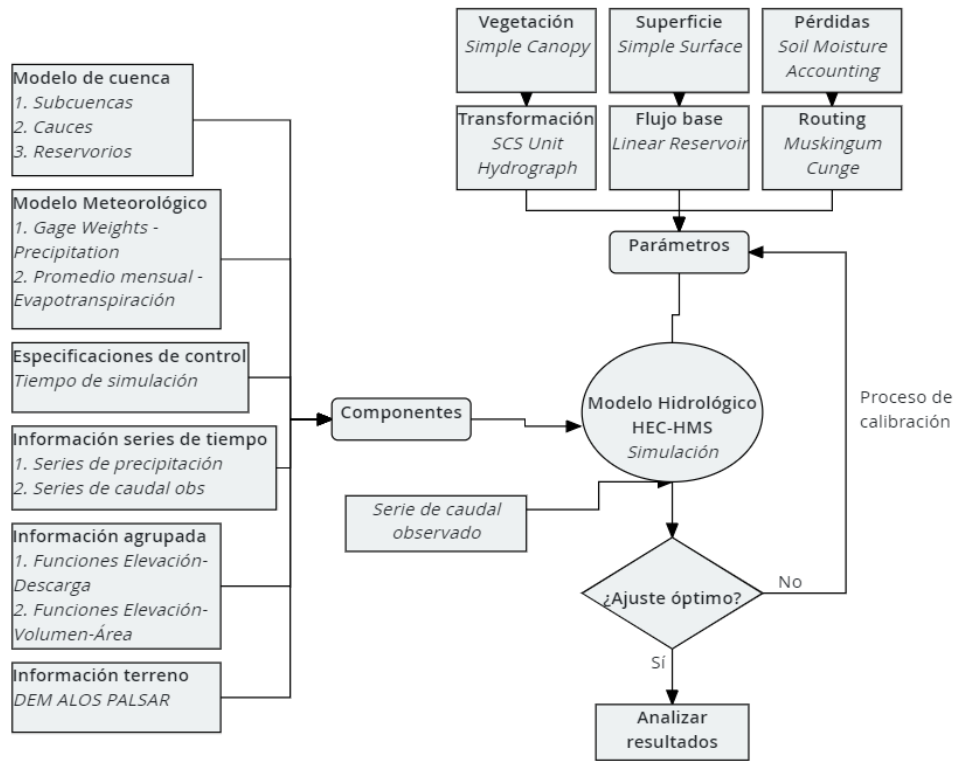


Figura 6-7. Diagrama de flujo del modelo hidrológico desarrollado
Fuente: Elaboración propia

A partir de este diagrama de flujo, se definen a continuación los valores considerados en cada uno de los parámetros previo al proceso de calibración y los limitantes que se consideraron para la elección de cada uno de estos:

- **Modelo SMA para pérdidas en simulación continua:** con el fin de calcular la infiltración en la cuenca, es necesario hacer uso de un método de pérdidas (*Loss Method*), cuya elección depende del tipo de simulación que se esté desarrollando, ya sea un evento puntual o una simulación continua. Como se mencionó en el numeral 6.2.1, en este caso de estudio se aplican las metodologías de simulación continua con base en los periodos de análisis seleccionados a partir de las fechas en las cuales se tiene información de levantamientos batimétricos.

Para simulaciones continuas aplican los métodos *deficit and constant*, *gridded deficit and constant*, *gridded soil moisture accounting*, *layered Green and Ampt* y *soil moisture accounting*. Se selecciona este último teniendo en cuenta su aplicabilidad en distintos

proyectos consignados en la bibliografía (Holberg, 2015)(Samady, 2017)(Fleming & Neary, 2004)(Chu & Steinman, 2009)(Singh & Jain, 2015)(Roy et al., 2013). Los ejemplos consignados en el manual del software seleccionan el algoritmo SMA para el cálculo de pérdidas en el modelo hidrológico y, posteriormente, llevan a cabo el modelo de erosión y sedimentación en la cuenca y sus cauces (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Tabla 6-10. *Métodos de pérdidas disponibles en HEC-HMS 4.10*

Loss methods
Deficit and Constant
Exponential Loss
Green and Ampt
Gridded Deficit Constant
Gridded Green Ampt
Gridded SCS Curve Number
Gridded Soil Moisture Accounting
Initial and Constant
Layered Green and Ampt
SCS Curve Number
Smith Parlange
Soil Moisture Accounting

Fuente: Elaboración propia

El método SMA cuenta con catorce parámetros que buscan caracterizar el paso del flujo a través de las capas del suelo definidas y su tránsito hacia los cauces identificados en el modelo por medio del flujo base. Dichos parámetros y la selección de sus valores se definen a continuación:

Tabla 6-11. *Parámetros requeridos para el SMA en HEC-HMS 4.10*

SMA
Soil (%)
Groundwater 1 (%)
Groundwater 2 (%)
Max Infiltration (mm/hr)
Impervious (%)
Soil Storage (mm)
Tensión Storage (mm)
Soil Percolation (mm/hr)
GW1 Storage (hr)
GW1 Percolation (mm/hr)
GW1 Coefficient (hr)
GW2 Storage (hr)
GW2 Percolation (mm/hr)
GW2 Coefficient (hr)

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de almacenamiento iniciales (%): corresponde al porcentaje de ocupación inicial que se tiene en determinada capa/ítem, entendiéndose esto como el volumen ocupado al inicio de la modelación debido a eventos de precipitación previos. Dicho porcentaje es requerido para el suelo, los niveles GW1 y GW2 y la proporción de impermeabilidad en la cuenca.

Tasa de infiltración máxima (mm/hr): establece la tasa máxima de infiltración del flujo al pasar de la capa superficial del terreno a la capa superior del suelo. Dicho valor se seleccionó considerando la suposición ampliamente usada respecto a que un valor aproximado para el límite inferior de la tasa máxima de infiltración puede ser la conductividad hidráulica saturada (Fleming & Neary, 2004).

Tabla 6-12. Propiedades hidráulicas del suelo

Soil texture	K_s (cm/h)	ϕ (%)	θ_r (%)	ψ_b (cm)	b
Sand	21.0	43.7	2.0	-7.26	1.44
Loamy sand	6.11	43.7	3.5	-8.69	1.81
Sandy loam	2.59	45.3	4.1	-14.66	2.65
Loam	1.32	46.3	2.7	-11.15	3.97
Silt loam	0.68	50.1	1.5	-20.76	4.27
Sandy clay loam	0.43	39.8	6.8	-28.08	3.13
Clay loam	0.23	46.4	7.5	-25.89	4.13
Silty clay loam	0.15	47.1	4.0	-32.56	5.65
Sandy clay	0.12	43.0	10.9	-29.17	4.48
Silty clay	0.09	47.9	5.6	-34.19	6.67
Clay	0.06	47.5	9.0	-37.30	6.06

Fuente: Tomado de (Pan et al., 2012) y adaptado de (Rawls et al., 1982)

La textura del suelo se selecciona con base en los grupos hidrológicos obtenidos en la Figura 5-2 y la clasificación de texturas de suelo a partir de dichos grupos observada en el diagrama de la Figura 6-8. De esta manera, la mayor parte de la cuenca se encuentra clasificada dentro del grupo hidrológico C, cuyas texturas de suelo varían entre arcillo arenosas, franco arcillosas y franco arcillo limosas; así, los valores de K_s varían de 1.20 mm/hr a 2.30 mm/hr, tomando como límite inferior para el modelo un valor de 2.30 mm/hr.

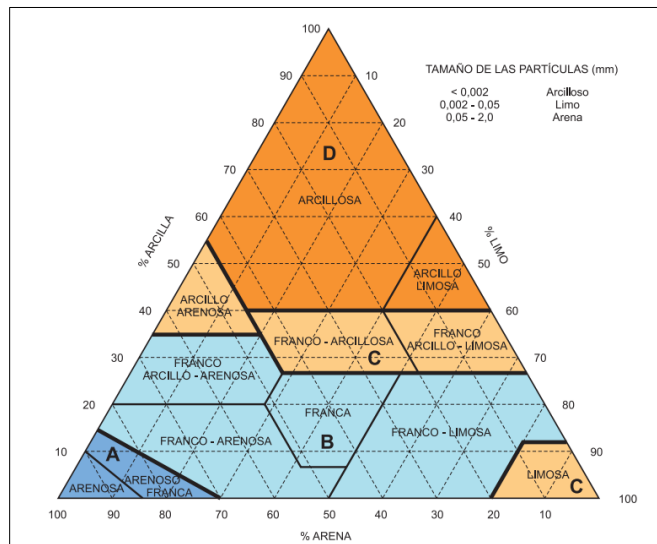


Figura 6-8. Diagrama triangular para determinación de texturas en materiales tipo suelo
Fuente: (Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras, 2019)

Almacenamiento del suelo (mm): de acuerdo con la bibliografía revisada (Fleming & Neary, 2004), la profundidad máxima del perfil del suelo, en este caso asociada al almacenamiento del suelo, puede relacionarse con la profundidad de las raíces previstas de acuerdo con la vegetación; de esta manera, para suelos templados y tropicales se considera una profundidad máxima de uno a dos metros y para suelos bien drenados se considera una profundidad máxima de tres a cinco metros. De acuerdo con la localización del caso de estudio, se seleccionó como límite superior de almacenamiento de suelo un intervalo de uno a dos metros.

Almacenamiento en la zona de tensión del suelo (mm): corresponde a la cantidad de agua que se almacenará en la capa superior del suelo y solo se elimina por evapotranspiración, es decir, el flujo de agua pasará de la capa superior del suelo al nivel GW1 solo si el almacenamiento actual del suelo excede el almacenamiento en la zona de tensión. Este parámetro se toma inicialmente como una quinta parte del valor correspondiente al almacenamiento del suelo, según se encontró en la literatura y se calibra posteriormente.

Tasa de percolación (mm/hr): establece la tasa de percolación desde el almacenamiento en el suelo hacia la capa GW1. De acuerdo con el informe de Geología de INTEGRAL (INTEGRAL, 2012a), en los pozos desarrollados para el proyecto se encontraron arcillas

en las capas más superficiales del suelo, por lo cual, se toma como valor inicial para el modelo 0.60 mm/hr y posteriormente será calibrado.

Coeficiente de almacenamiento en las capas GW1 y GW2 (hr): Los hidrogramas están compuestos por tres partes que son la zona de concentración, la zona pico y la zona de recesión; esta última corresponde al tramo C-D y representa la extracción del agua almacenada en la cuenca durante las etapas anteriores del hidrograma, la cual se presenta como almacenamiento en la superficie, almacenamiento subsuperficial (interflow) y almacenamiento subterráneo (baseflow).

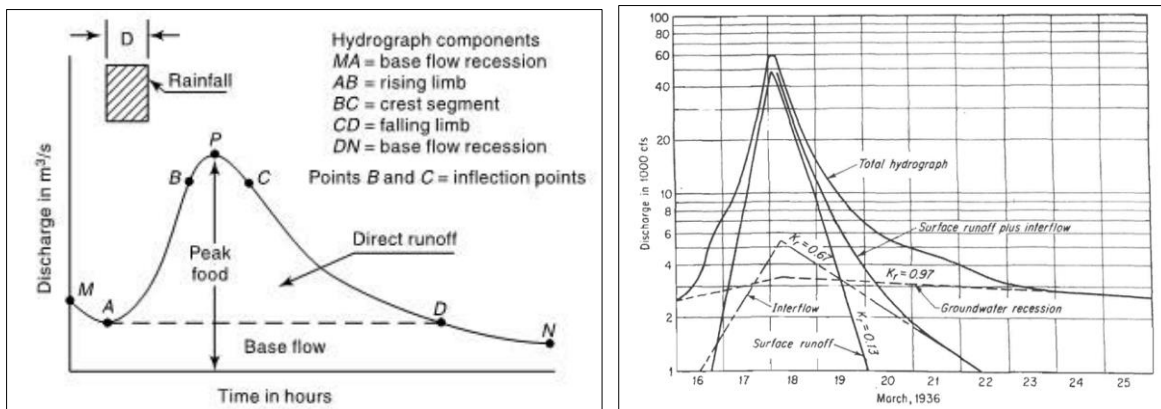


Figura 6-9. Elementos de un hidrograma y análisis de recesión
Fuente: (Subramanya, 2008)

La zona de recesión de puede expresar de la siguiente manera (Fleming & Neary, 2004):

$$Q_t = Q_0 K_r^t$$

Donde Q_t es el caudal en determinado tiempo t , Q_0 es la descarga en el tiempo cero y K_r es la constante de recesión. Al integrar esta ecuación con respecto al tiempo se obtiene la ecuación mostrada a continuación, en la cual S_t representa el volumen de almacenamiento en un tiempo t . Esta es la relación almacenamiento-salida de flujo para un reservorio lineal, donde el almacenamiento S_t es igual a el flujo de salida Q_t multiplicado por un coeficiente de almacenamiento, de esta manera, el coeficiente de almacenamiento se obtiene como $-1/\ln(K_r)$.

$$S_t = \frac{Q_t}{\ln(K_r)}$$

De acuerdo con Subramanya (2008), la constante de recesión K_t tiene tres componentes considerando los tres tipos de almacenamiento que se tiene, donde K_{rs} es la constante de recesión para el almacenamiento superficial, K_{ri} es la constante de recesión para el almacenamiento subsuperficial (interflow) y K_{rb} es la constante de recesión para el flujo base. En la se muestran los valores típicamente usados de acuerdo con la zona de almacenamiento analizada.

$$K_r = K_{rs} \cdot K_{ri} \cdot K_{rb}$$

Tabla 6-13. Valores típicos del coeficiente de recesión

Recession Constant	Range Values
Surface Storage (Krs)	0.05-0.20
Interflow (Kri)	0.50-0.85
Baseflow (Krb)	0.85-0.99

Fuente: (Subramanya, 2008)

De esta manera, se definieron los límites superiores e inferiores de los coeficientes de almacenamiento correspondientes a las capas GW1 y GW2 y, a partir de estos, se realizó el proceso de calibración.

- **Almacenamiento por interceptación de la vegetación (Canopy Storage):** como se mencionó previamente, este parámetro indica la presencia de vegetación en el área de la cuenca y su función consiste en ser un punto de interceptación medio entre la lluvia y la superficie del suelo, con lo cual, se reduce la cantidad de precipitación que llega a este y que, eventualmente, se infiltrará, percolará y se convertirá en flujo base.

Se seleccionó como método *Simple Canopy* debido a que los datos que solicita se pueden obtener de bibliografía, tales como el almacenamiento de precipitación máximo debido a la vegetación y datos como el porcentaje de almacenamiento en la vegetación que se encuentra ocupado al inicio de la modelación debido a eventos de precipitación previos.

Tabla 6-14. Métodos de almacenamiento por interceptación de la vegetación disponibles en HEC-HMS 4.10

Canopy Methods
Dynamic Canopy
Gridded Simple Canopy
Simple Canopy

Fuente: Elaboración propia

Los valores considerados para esta se basan en el tipo de vegetación predominante en la cuenca o subcuencas de acuerdo con la bibliografía revisada (Holberg, 2015). Para el caso de estudio se seleccionó un valor de 2.032 ya que, como se observa en la Figura 6-10, la cuenca del embalse está conformada en su mayoría por una mezcla de pastos y zonas de bosques; por otra parte, se seleccionó una ocupación inicial del almacenamiento del 5% correspondiente a eventos de precipitación previos.

Tabla 6-15. Valores de almacenamiento por interceptación de la vegetación

Type of Vegetation	Canopy Interception (mm)
General Vegetation	1.270
Grasses and Deciduous Trees	2.032
Trees and Coniferous Trees	2.540

Fuente: (Holberg, 2015)

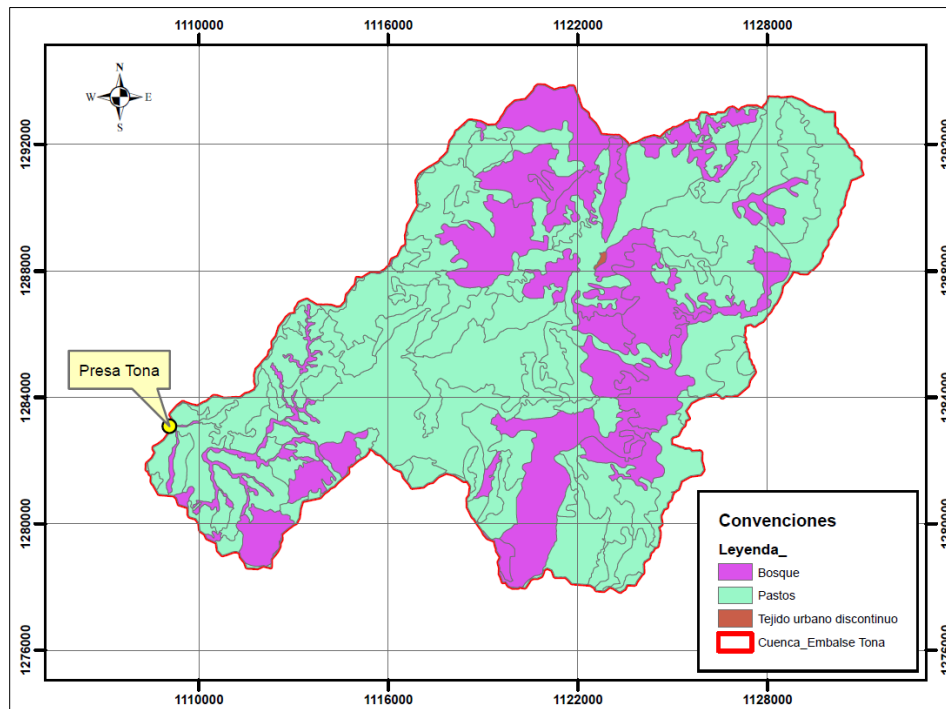


Figura 6-10. Mapa de cobertura del suelo con base en el Mapa de Cobertura Metodología Corine Land Cover del IDEAM

Fuente: Elaboración propia

- Almacenamiento en la superficie del suelo (Surface Storage):** la selección del valor correspondiente a dicho parámetro fue hecha a partir de datos encontrados en la bibliografía (Fleming & Neary, 2004), el cual consiste en representar la cantidad de agua que se acumula en la superficie del terreno debido a las depresiones que en él se presenten, es decir, es un parámetro altamente vinculado a la pendiente del terreno y las

intervenciones antrópicas que haya sufrido. Se seleccionó *Simple Surface* de los métodos disponibles que requiere el porcentaje de ocupación de la capacidad de almacenamiento debido a eventos de precipitación previos y el valor de la capacidad de almacenamiento seleccionada de la bibliografía.

Tabla 6-16. Métodos de almacenamiento en la superficie del suelo disponibles en HEC-HMS 4.10

Canopy Methods
Gridded Simple Surface
Simple Surface

Fuente: Elaboración propia

Como se indicó previamente, el valor seleccionado se basa en la pendiente del terreno y el nivel de intervención antrópica que este tenga. Para el caso de estudio se seleccionó un valor de 1.02 correspondiente a superficies empinadas y pendientes superiores a 30%, lo cual se corrobora en el mapa de pendientes elaborado para la zona del proyecto por medio del software ArcGIS (Figura 6-11).

Tabla 6-17. Valores de almacenamiento en la superficie del suelo

Description	Slope (%)	Surface storage (mm)
Paved impervious areas	NA	3.2–6.4
Steep, smooth slopes	>30	1.0
Moderate to gentle slopes	5–30	12.7–6.4
Flat, furrowed land	0–5	50.8

Fuente: (Fleming & Neary, 2004)

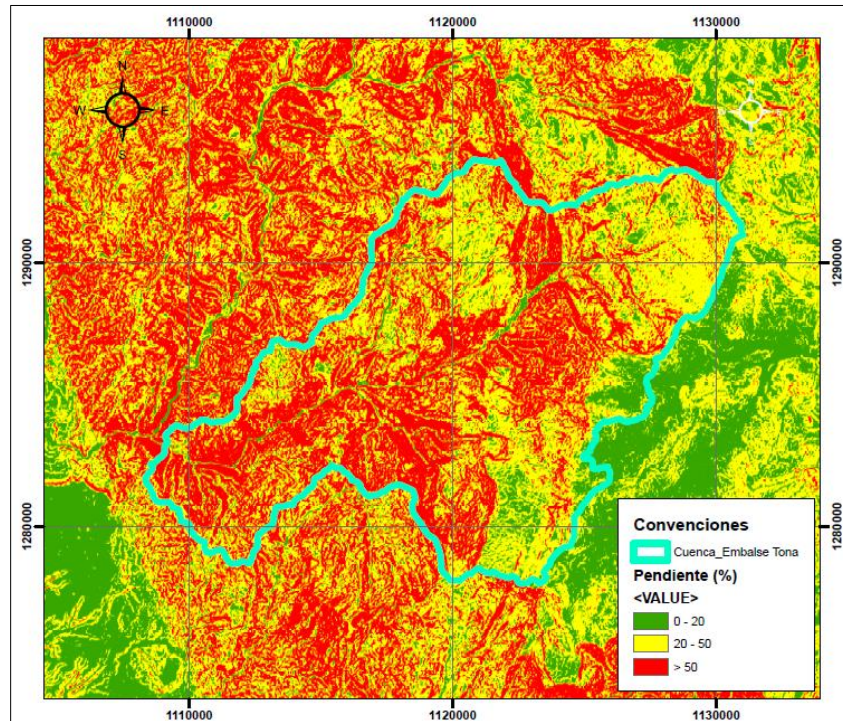


Figura 6-11. Mapa de pendientes obtenido a partir el DEM ALOS PALSAR
 Fuente: Elaboración propia

- Transformación de precipitación en escorrentía directa:** el objetivo de este parámetro consiste en transformar la precipitación efectiva en escorrentía directa, para lo cual, HEC-HMS propone nueve métodos (Tabla 6-18); en el presente caso de estudio, se seleccionó el *SCS Unit Hydrograph* para el cual se requiere únicamente el valor del tiempo de retardo (Lag Time) que corresponde al 60% del tiempo de concentración (US Army Corps of Engineers, 2021a). En el numeral 6.1.6 se calcularon los tiempos de concentración por diez métodos distintos, se eliminaron los valores atípicos y así se promedió el valor del tiempo de concentración para cada subcuenca, de esta manera, se obtuvo el valor del LagTime requerido por el software. Dichos valores se encuentran en el Anexo 3.

Tabla 6-18. Métodos de transformación de precipitación en escorrentía directa disponibles en HEC-HMS 4.10

Transform methods
Clark Unit Hydrograph
Kinematic Wave
2D Diffusion Wave
ModClark
Snyder Unit Hydrograph

Transform methods
SCS Unit Hydrograph
User-Specified S-Graph
User-Specified Unit Hydrograph

Fuente: Elaboración propia

De manera general, el Hidrograma Adimensional SCS corresponde a un hidrograma sintético que permite relacionar el caudal con respecto al caudal pico y el tiempo con respecto al tiempo pico, el cual está dado por:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R \quad T = 0.133T_c$$

Donde T_p corresponde al tiempo pico, T_R corresponde al tiempo de rezago ($0.60T_c$), T corresponde a la duración de la precipitación efectiva y T_c corresponde al tiempo de concentración; así mismo, el caudal pico es calculado como:

$$Q_p = \frac{0.208A}{T_p}$$

Donde Q_p corresponde al caudal pico en m^3/s , A corresponde al área de la cuenca en km^2 y T_p corresponde al tiempo al pico del hidrograma en horas (Chow et al., 2000; INVIAS, 2009).

- **Método de flujo base (Baseflow):** corresponde a los cálculos efectuados para el transporte del flujo subsuperficial y consta de cinco métodos disponibles, de los cuales, con base en lo consignado en el manual del software, se seleccionó *Linear Reservoir* debido a que dicho método usado en conjunto con el método de pérdidas SMA permite que el agua se mueva lateralmente desde las capas GW1 y GW2, volviéndose flujo base (US Army Corps of Engineers, 2021a). Dentro de sus características se encuentra que aplica el principio de conservación de masa y la infiltración y percolación calculada por el SMA es conectada como flujo de entrada a los reservorios lineales que se proponen en dicho método de flujo base.

Tabla 6-19. *Métodos de flujo base disponibles en HEC-HMS 4.10*

Baseflow methods
Bounded Recession
Constant Monthly
Linear Reservoir
Nonlinear Boussinesq
Recession

Fuente: Elaboración propia

Debido a que este método debe ser consistente con el método seleccionado en el cálculo de pérdidas, el número de reservorios debe ser igual al número de capas de agua subsuperficial o subterránea. Los datos requeridos por el método corresponden al flujo inicial, el cual se designó en 0.20 m³/s con base en los caudales observados; los coeficientes de almacenamiento para cada capa de flujo subsuperficial, los cuales se tomaron con el mismo valor seleccionado para el SMA correspondiente al tiempo de recesión; por último, el número de divisiones que se tendrán por reservorio, lo que se traduce en la atenuación presentada en este, así, inicialmente se tomó un valor de uno. Los parámetros se ajustan en el proceso de calibración

- **Método para el tránsito de crecientes:** con el fin de calcular el tránsito de crecientes se seleccionó el método Muskingum-Cunge de los ocho métodos disponibles en el software y los datos usados para este se encuentran consignados en la Tabla 6-7 del numeral 6.2.2.

Tabla 6-20. Métodos de tránsito de crecientes disponibles en HEC-HMS 4.10

Routing methods
Kinematic Wave
Lag
Lag & K
Modified Puls
Muskingum
Muskingum-Cunge
Normal Depth
Staddle Stagger

Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Calibración de escenarios de simulación

Teniendo en cuenta los escenarios de simulación consignados en el numeral 6.2.1, los resultados del periodo comprendido entre los años 2018 y 2020 fueron seleccionados para calibración y posteriormente se validarían con la simulación comprendida entre los años 2020 y 2021.

Con el fin de realizar la calibración de la información obtenida por el software HEC-HMS con las lecturas de caudal en el río Tona mostradas en la Figura 6-1, se revisaron los métodos consignados directamente en el software, encontrándose que es posible calibrar por grupos de elementos para un parámetro específico, es decir, para todas las

subcuencas al tiempo se puede calibrar el parámetro de máxima infiltración del método de pérdidas SMA, indicándose un factor multiplicativo para los valores de iteración máximos y mínimos de acuerdo con el valor previamente ingresado para dicho parámetro en la ventana de datos del modelo.

Por otra parte, al definir el método de búsqueda se puede seleccionar entre tres métodos disponibles que son *Simplex*, *Univariate* y *Differential Evolution*, este último fue agregado al software en su versión 4.9 y es considerado más robusto que los otros dos métodos debido a que su enfoque no es determinístico y es más probable que dicho método encuentre un conjunto de parámetros óptimos debido al mayor número de conjuntos de parámetros (muestras de población-*population*) (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Con base en los ejemplos consignados en el manual del software, se seleccionaron como funciones objetivo *Nash Sutcliffe (maximization)*, *Peak-Weighted Root Mean Square Error (minimization)* y *Sum of Squared Residuals (minimization)*. De manera general, a continuación, se brinda una breve explicación de cada una de estas funciones objetivo:

Nash-Sutcliffe Normalizado: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) corresponde a una medida que compara la varianza de los residuos modelados con la varianza de los flujos observado, su valor varía de 0 a 1 siendo 1 la predicción perfecta, 0.5 indica que el uso de la media de los flujos observados es un predictor tan bueno de la serie temporal observada como lo es la serie temporal modelada y 0 indica que no hay información sobre la serie temporal observada en la modelada (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Peak-Weighted RMSE: corresponde a una modificación del RMSE que da más peso a los errores que corresponden a los flujos observados más grandes, es decir, se multiplica cada residual (diferencia entre los valores simulados y los observados para un paso de tiempo) por un peso que aumenta proporcionalmente a la magnitud del flujo observado para ese paso de tiempo (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Sum of Squared Residuals: calcula el modelo residual para cada paso de tiempo, los eleva al cuadrado y luego realiza la sumatoria, sin incluir pesos para ningún residual. En simulaciones continuas o largo plazo, dicha función objetivo tiende a poner mayor énfasis en los periodos de caudal bajo o de flujo base (US Army Corps of Engineers, 2021a).

De acuerdo con la bibliografía revisada, los parámetros de mayor sensibilidad en un modelo de simulación continua con método de pérdidas SMA se consignan en la Tabla 6-21, por lo cual, a partir de estos parámetros se realizó la optimización por medio de HEC-RAS, la cual fue complementada con optimización manual.

Tabla 6-21. Parámetros de mayor sensibilidad según análisis de bibliografía

Parámetro (mayor a menor sensibilidad)	Bibliografía
Soil Storage Tension Storage Soil Percolation Max Infiltration GW Parameters	(Samady, 2017) (Fleming & Neary, 2004) (Singh & Jain, 2015) (Roy et al., 2013) (Bashar & Zaki, 2005)

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-22 se encuentran los valores iniciales y con los cuales se dio inicio al proceso de calibración. Con el fin de simplificar dicho procedimiento y considerando el tamaño de la cuenca, se optó por realizar la calibración de parámetros para la totalidad de las subcuencas, es decir, no se tienen valores específicos para cada una de estas.

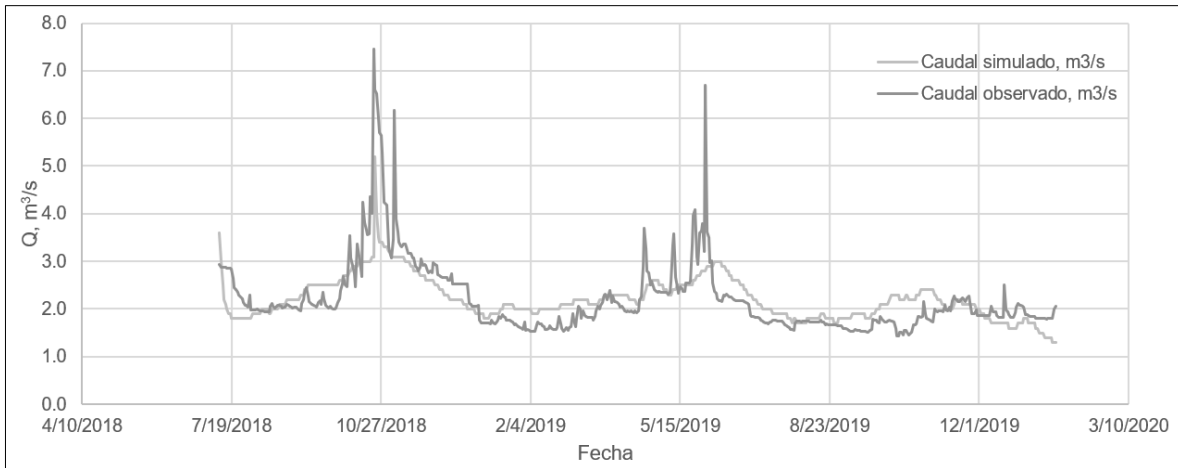
Tabla 6-22. Valores iniciales para los métodos Canopy, Surface y SMA en HEC-HMS 4.10

Método	Parámetro	Valor	Calibración
Canopy	Max Storage (mm)	2.032	
Surface	Max Storage (mm)	1.020	
SMA	Soil (%)	5	
	Groundwater 1 (%)	5	
	Groundwater 2 (%)	5	
	Max Infiltration (mm/hr)	2.30	✓
	Impervious (%)	0	
	Soil Storage (mm)	1000	✓
	Tensión Storage (mm)	200	✓
	Soil Percolation (mm/hr)	0.60	✓
	GW1 Storage (hr)	30	✓
	GW1 Percolation (mm/hr)	5.50	✓
	GW1 Coefficient (hr)	34.65	✓
	GW2 Storage (hr)	250	✓
	GW2 Percolation (mm/hr)	0.5	✓
Baseflow	GW2 Coefficient (hr)	250	✓
	GW1 Coefficient (hr)	34.65	✓
	GW1 Reservoirs	1	✓
	GW1 Coefficient (hr)	250	✓
	GW1 Reservoirs	1	✓

Fuente: Elaboración propia

Como se indica en el numeral 6.2.1, el proceso de calibración fue realizado para el modelo correspondiente al periodo de tiempo 2018-2020, para el cual, se obtuvieron los

caudales mostrados en la Figura 6-12, en la cual se comparan con los valores de caudal observados en el río Tona.



*Figura 6-12. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados en el río Tona
Fuente: Elaboración propia*

Así mismo, se generó la curva de duración de caudales, la cual corresponde a una curva de frecuencia acumulada que representa el porcentaje de tiempo que un determinado valor de caudal es igualado o excedido durante el periodo de análisis, encontrándose gran similitud entre el 30% y 100% del tiempo para los caudales observados y los caudales simulados por HEC-HMS, considerándose esto un ajuste óptimo. Por otra parte, de acuerdo con la gráfica de correlación entre caudales, se tienen ciertos valores de caudal observado superiores a su correspondiente valor de caudal simulado, lo cual disminuye la pendiente de la recta, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.55.

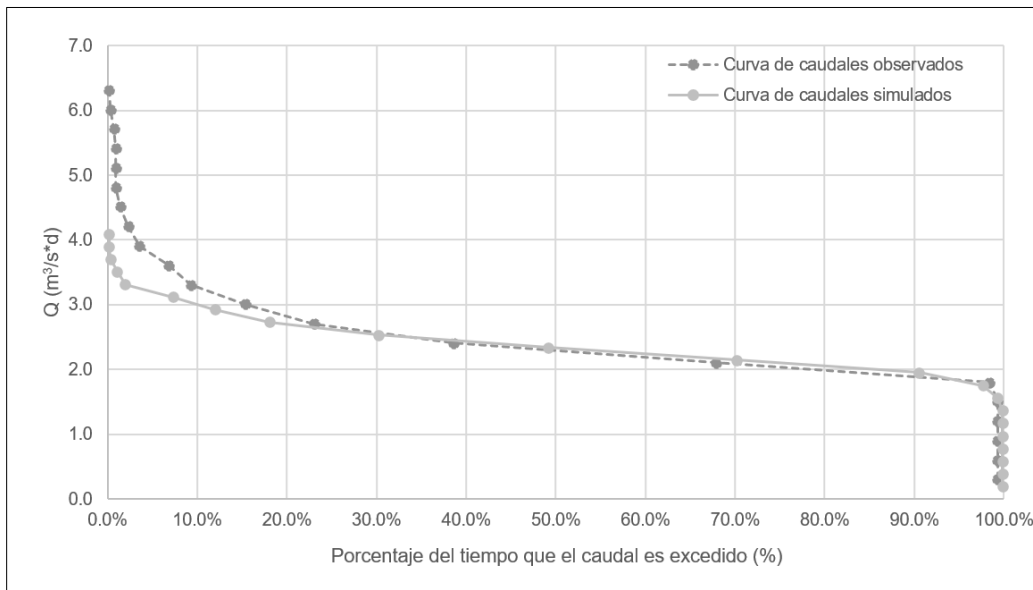


Figura 6-13. Curva de duración de caudales para el Modelo 1
Fuente: Elaboración propia

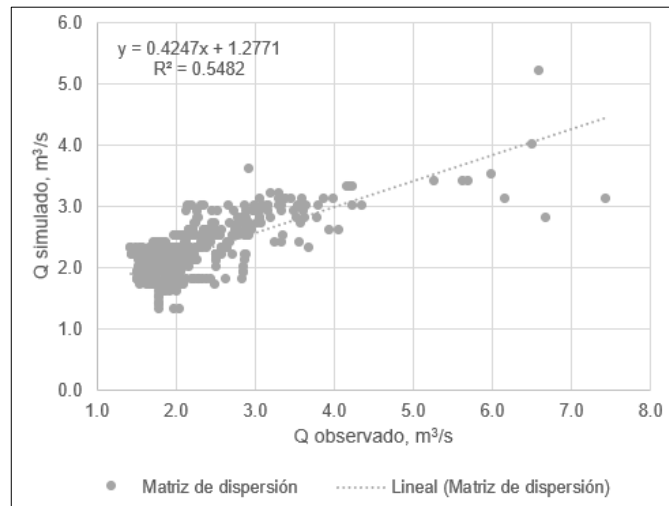


Figura 6-14. Correlación de caudales observados vs caudales simulados en HEC-HMS para Modelo 1
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-15 se observa la comparación de caudales promedio obtenidos por medio de la simulación en HEC-HMS y los observados, presentándose diferencias absolutas que varían del 8% al 17%, corroborándose que el procedimiento de calibración permitió la obtención de valores cercanos a la realidad.

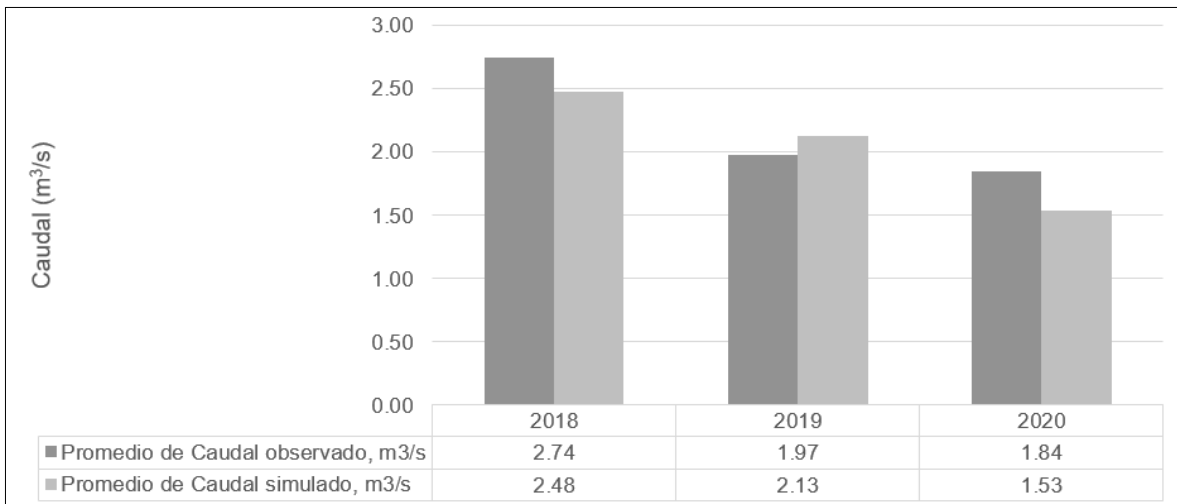


Figura 6-15. Comparación de caudales promedio simulados-observados por año para el Modelo 1
Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, el software HEC-HMS cuenta con variables estadísticas que permiten relacionar los caudales simulados con los observados y cuyos resultados se tomaron directamente de allí para el análisis de la información. Los estadísticos de evaluación adimensionales analizados corresponden a la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la desviación estándar del error cuadrático medio (RMSE Stdev) y se profundiza sobre cada uno de ellos a continuación:

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos e indica qué tanto la información simulada versus la información observada se ajusta a una línea 1:1 (Nash & Sutcliffe, 1970). Los valores de NSE positivos indican niveles aceptables de simulación, mientras que los valores negativos indican que la media de los valores observados es un mejor predictor que los valores simulados, es decir, una simulación inaceptable (Moriassi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2 \right]}$$

Porcentaje de sesgo (PBIAS): este estadístico mide la tendencia promedio que tienen los valores simulados a ser más grandes o pequeños que los valores observados. Su valor

óptimo es cero, indicando los valores mayores a cero una subestimación del sesgo y los valores menores a cero una sobreestimación del sesgo (Gupta et al., 1999).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

Desviación Estándar del Error Cuadrático Medio (RMSE Stdev): estandariza el estadístico RMSE usando las desviaciones estándar de los datos observados. Su valor óptimo es cero, ya que indica un error cuadrático medio de cero o variación residual, es decir, entre más bajo sea RMSE, más bajo será el valor de RSR y, por lo tanto, mejor será el resultado de la simulación (Moriassi et al., 2007).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}$$

En la Figura 6-16 se observan los valores de los estadísticos previamente mencionados para el punto de análisis y comparación de caudales en el Modelo 1, el cual ha sido designado con el nombre de *Junction-1* y se encuentra aguas abajo del último tramo de río antes del embalse y aguas arriba de dicho reservorio.

Project: EmbalseTona_2018-2020 Simulation Run: Run 1				
Start of Run: 11jul.2018, 00:00		Basin Model: Basin 1		
End of Run: 21ene.2020, 00:00		Meteorologic Model: Met 1		
Compute Time:24ene.2023, 23:44:52		Control Specifications:Control 1		
Show Computation Points: Computation Points		Sorting: Hydrologic		
Computation Point	RMSE Stdev	Nash Sutcliffe	Percent Bias	R ²
Junction-1	0.7	0.523	0.34	0.55

Figura 6-16. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 1
Fuente: HEC-HMS 4.10

De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Moriassi et al (2007) y basado en recomendaciones publicadas previamente, una combinación entre estadísticos como los mencionados previamente (NSE, PBIAS y RSR), hidrogramas y curvas de probabilidad de

excedencia (curvas de duración de caudal) deben ser usadas para la evaluación de un modelo. De esta manera, en la tabla Tabla 6-23 se consignan los rangos de valores para cada parámetro y su clasificación de satisfacción en cuanto a los resultados del modelo y su ajuste a los caudales observados.

Tabla 6-23. Rangos de valores recomendados de acuerdo con los resultados del modelo

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$\text{PBIAS} < \pm 15$	$\text{PBIAS} < \pm 25$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 30$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS} < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{PBIAS} < \pm 55$	$\pm 40 \leq \text{PBIAS} < \pm 70$
Unsatisfactory	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	$\text{PBIAS} \geq \pm 55$	$\text{PBIAS} \geq \pm 70$

Fuente: (Moriasi et al., 2007)

A partir de dichos rangos, se observa que el modelo de calibración se encuentra dentro del rango satisfactorio para los estadísticos NSE y RSR; sin embargo, para el estadístico PBIAS se encuentra en la clasificación de insatisfactorio al superar el 25% del sesgo. Por otra parte, para el coeficiente de correlación (R^2) se consideran como aceptables los valores superiores a 0.50, como es el caso del presente modelo evaluado. De esta manera, se considera que la calibración del periodo 2018-2020 presenta un buen ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados, siendo dicho modelo un buen predictor para las condiciones de la cuenca y una base confiable para el desarrollo del posterior modelo de sedimentos y erosión en HEC-HMS.

6.2.5.1 Validación de resultados por medio del Modelo 2

Con el fin de realizar la validación de los resultados obtenidos en el proceso de calibración previamente descrito, se ingresaron los valores requeridos al Modelo 2 (numeral 6.2.1). En la Figura 6-17 se observa una diferencia notable de entre los caudales observados y los caudales simulados para los días 4, 5, 6, 7, 20 y 21 de mayo del 2021, mientras que en los demás valores registrados se observa un comportamiento similar.

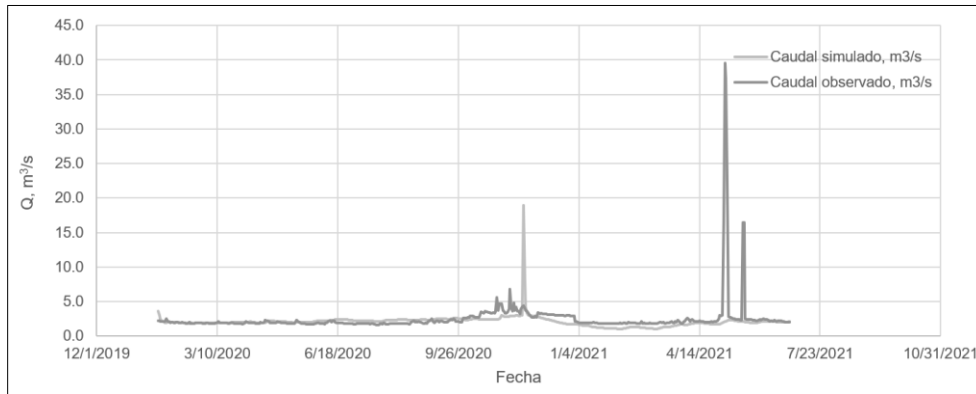


Figura 6-17. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados en el río Tona
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la curva de duración de caudales para el Modelo 2 se observa que estas no se ajustan entre sí, lo cual se corrobora al obtenerse un coeficiente de correlación de 0.009 (Figura 6-19 y Figura 6-21).

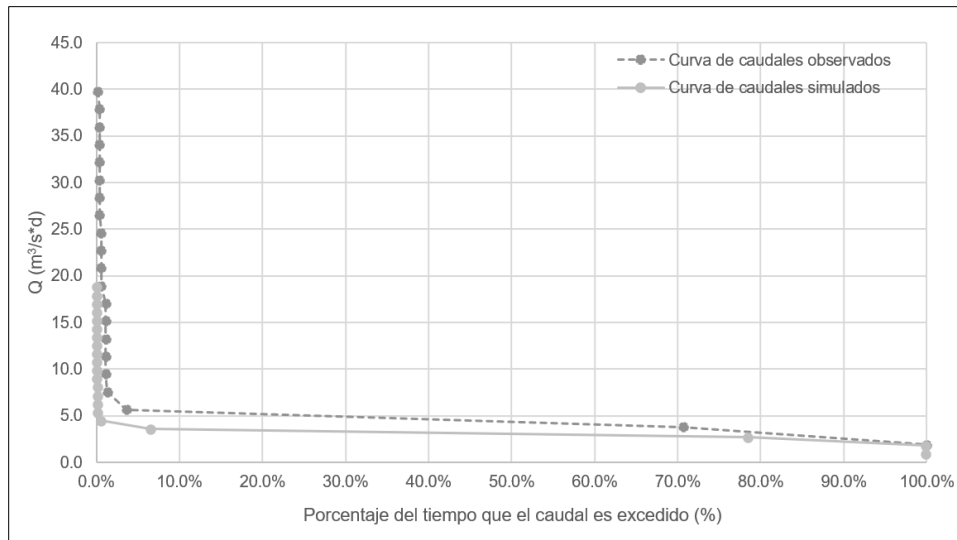


Figura 6-18. Curva de duración de caudales para el Modelo 2
Fuente: Elaboración propia

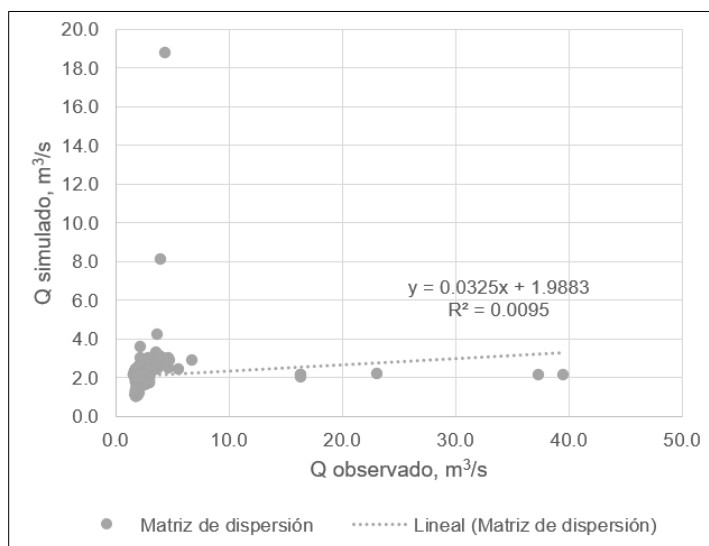


Figura 6-19. Correlación de caudales observados vs caudales simulados en HEC-HMS para Modelo 2
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la comparación de caudales, se corrobora que la mayor diferencia de promedio de caudales se encuentra para el año 2021, siendo este el año donde se están presentando valores atípicos, mucho más altos que los registros analizados en el presente estudio. Así mismo, los valores estadísticos calculados por el software no se encuentran dentro de los rangos favorables o satisfactorios encontrados en la literatura.

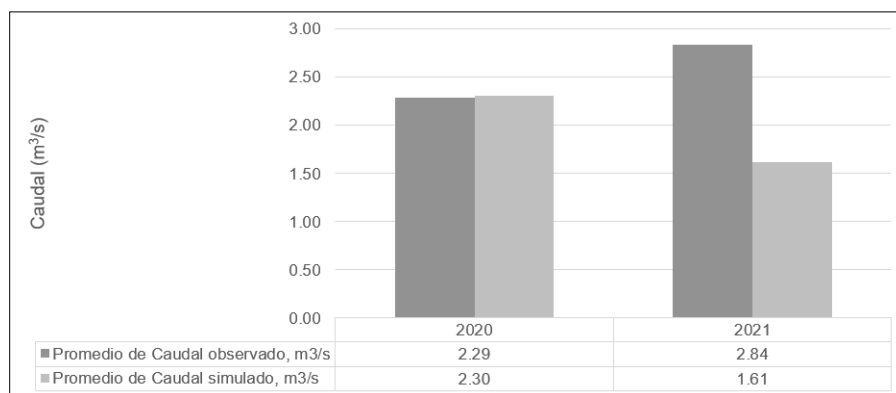


Figura 6-20. Comparación de caudales promedios observados y simulados para el Modelo 2
Fuente: Elaboración propia

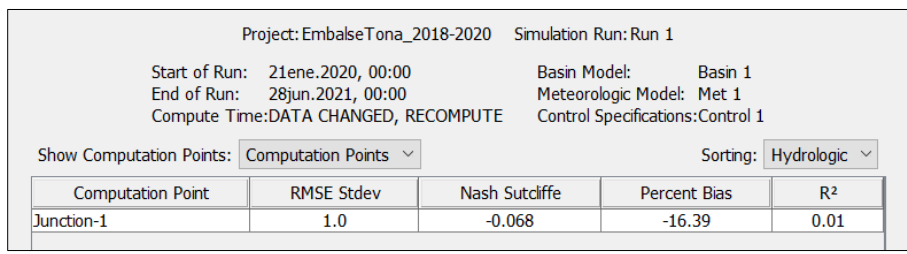


Figura 6-21. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 2
 Fuente: HEC-HMS 4.10

Debido al poco ajuste presentado en el modelo de validación se procede a intervenir el registro de caudales observados en el río Tona, previendo que estos tengan valores tan altos debido a errores humanos o que correspondan a una fuente alterna al ciclo hidrológico propiamente modelado en el software, esto último, debido a que no se observan periodos de altas precipitaciones previos a los días de interés de acuerdo con los datos ingresados a la modelación (Figura 6-22). De esta manera, se procedió a modificar los valores de caudal observados en los días 4, 5, 6, 7, 20 y 21 de mayo de 2021 por el valor promedio de los 3 días anteriores y posteriores.

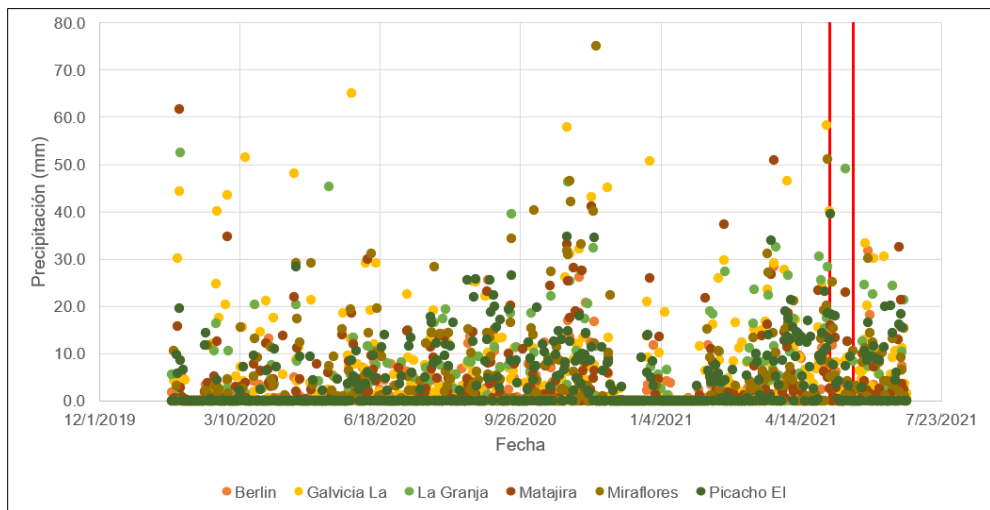


Figura 6-22. Gráfico de precipitaciones para el periodo de análisis del Modelo 2
 Fuente: Elaboración propia

A partir de dicha actualización de los datos, se obtuvo un mejor ajuste entre los caudales simulados y los caudales observados (Figura 6-23), logrando un coeficiente de correlación de 0.17 y un porcentaje de sesgo igual a -6.82 que clasificaría el resultado de la modelación como “muy bueno” (Tabla 6-23); sin embargo, el signo obtenido para la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) indica que para el periodo 2020-2021, la media de los

caudales observados es un mejor predictor que el modelo desarrollado. Como se puede observar, los estadísticos arrojan interpretaciones ambiguas, pero se considera que el modelo se ajusta de manera aceptable a los caudales observados, reduciéndose la diferencia de caudales promedio para el año 2021 (Figura 6-24).

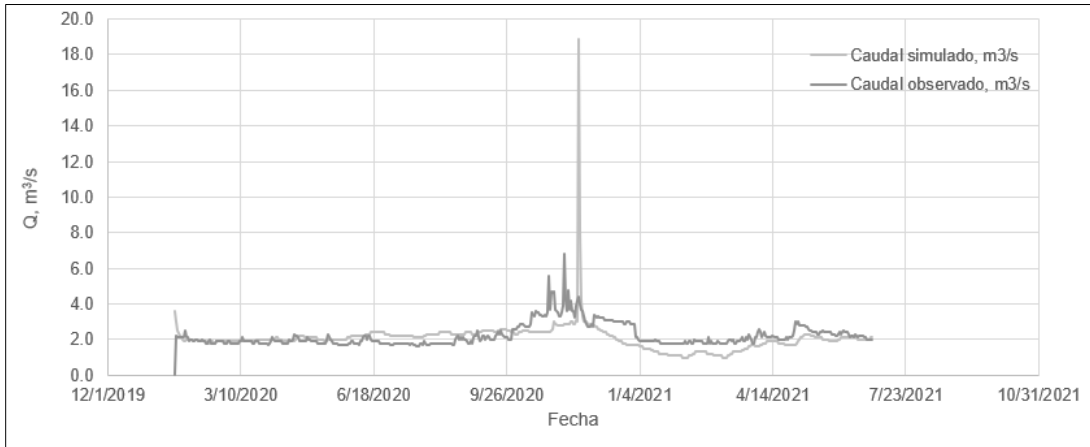


Figura 6-23. Comparación de caudales simulados en HEC-HMS y observados (modificados) en el río Tona
Fuente: Elaboración propia

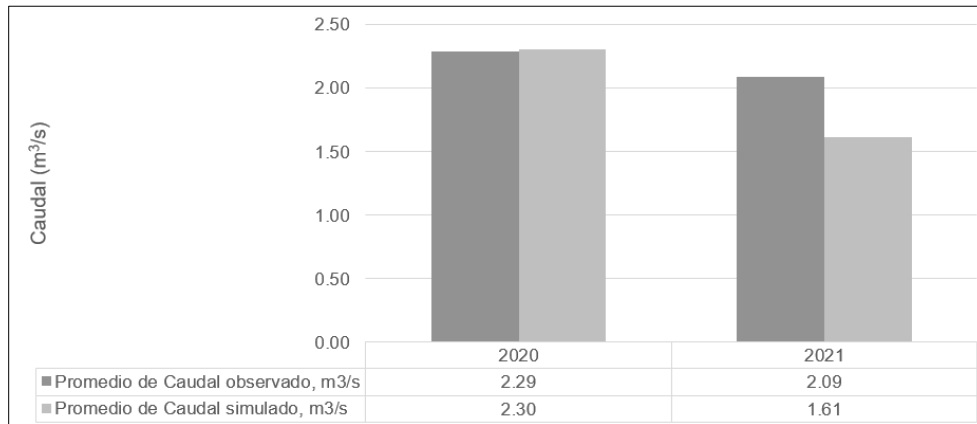


Figura 6-24. Comparación de caudales promedios observados (modificados) y simulados para el Modelo 2
Fuente: Elaboración propia

Project: EmbalseTona_2020-2021 Simulation Run: 2020-2021_1

Start of Run: 21ene.2020, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 28jun.2021, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 06abr.2023, 11:20:07 Control Specifications: Control 1

Show Computation Points: Computation Points Sorting: Hydrologic

Computation Point	RMSE Stdev	Nash Sutcliffe	Percent Bias	R ²
Junction-1	1.4	-0.961	-6.82	0.17

Figura 6-25. Resultados de la calibración realizada para el Modelo 2 con caudales modificados
Fuente: Elaboración propia

Por último, partiendo de la dificultad para coincidir en los caudales picos simulados respecto a los observados, se realizó la comparación de volúmenes a partir del *PEV* (*porcentaje de error en el volumen simulado*), dichos valores se obtuvieron de las modelaciones desarrolladas en HEC-HMS; de esta manera, se obtuvieron los porcentajes de error mostrados en la Tabla 6-24, los cuales se encuentran dentro de los resultados clasificados como "muy buenos" en el estudio realizado por Singh & Jain (2015).

Tabla 6-24. Porcentaje de error en el volumen simulado (PEV)

Modelo	Vol. Observado, mm	Vol. Simulado, mm	PEV, %
Modelo 1 – Calibración	548.97	552.44	0.63
Modelo 2 - Validación	517.75	483.64	6.59

Fuente: Elaboración propia

A partir de los distintos análisis llevados a cabo en el presente numeral, se concluye que la calibración desarrollada cuenta con resultados satisfactorios considerando la cantidad de variables involucradas en un simulación continua y la complejidad en la obtención de las variables base para el inicio del proceso iterativo; así mismo, también se encuentran valores atípicos dentro de los caudales observados, lo cual dificulta que los parámetros calibrados puedan ser validados en su totalidad en un periodo distinto.

6.2.6 Análisis de resultados por modelo

Una vez se realizó el proceso de calibración y validación, se procedió al análisis de los resultados obtenidos en el modelo por subcuenca y cauce. En la Figura 6-26, se observan los nombres de los cauces identificados en la zona del proyecto, con el fin de tener claridad sobre el área de interés en cuanto a procesos erosivos generados por la escorrentía superficial en cada subcuenca.

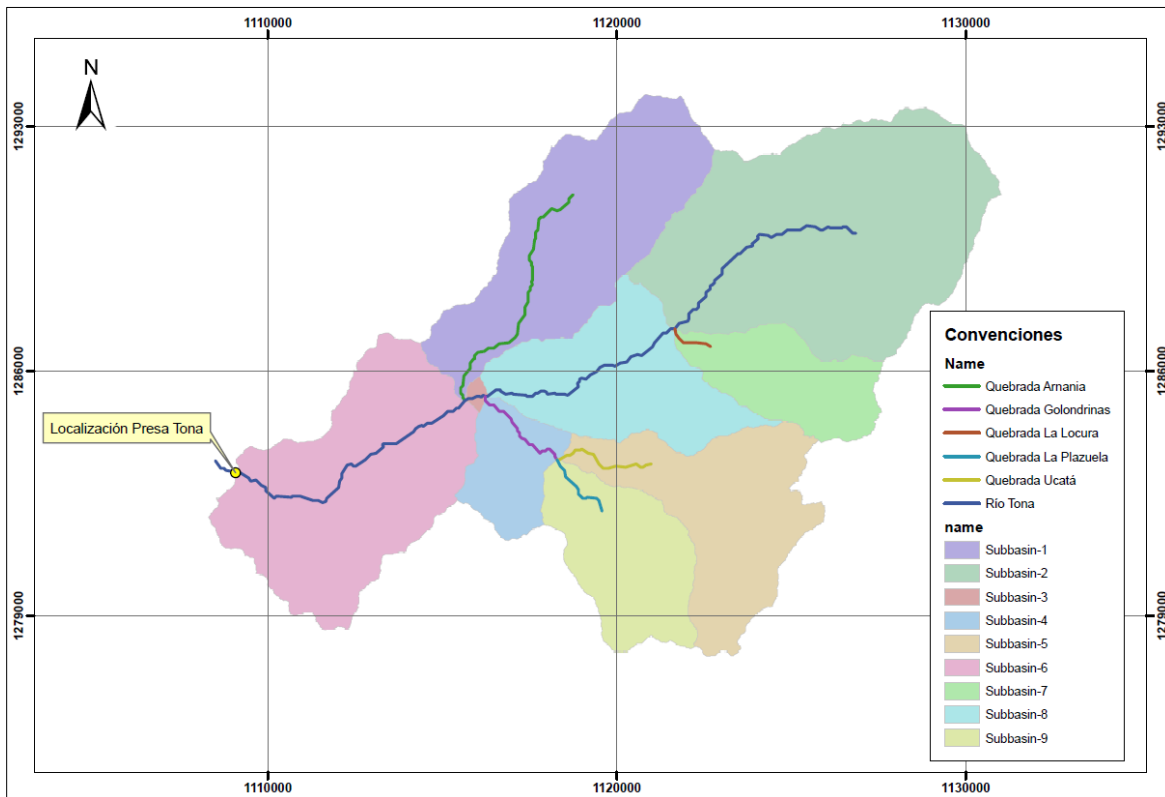


Figura 6-26. Nombres de los cauces identificados en la cuenca de análisis
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, los resultados se desglosan a continuación para los dos escenarios de simulación llevados a cabo (numeral 6.2.1):

6.2.6.1 Modelo 1 – Calibración (2018-2020)

En la Figura 6-27 se observan los valores de exceso de precipitación obtenidos para las subcuencas del modelo, es decir, únicamente en dos subcuencas se están presentando escorrentía superficial y son las subcuencas 1 y 8; la primera corresponde a la cuenca del afluente Quebrada Armania y la segunda corresponde al tramo intermedio del río Tona identificado por el software y nombrado como *Reach-3*. Estos resultados se pudieron corroborar con los datos extraídos del software para estas subcuencas, obteniendo caudales picos entre 0.05 m³/s y 2.00 m³/s.

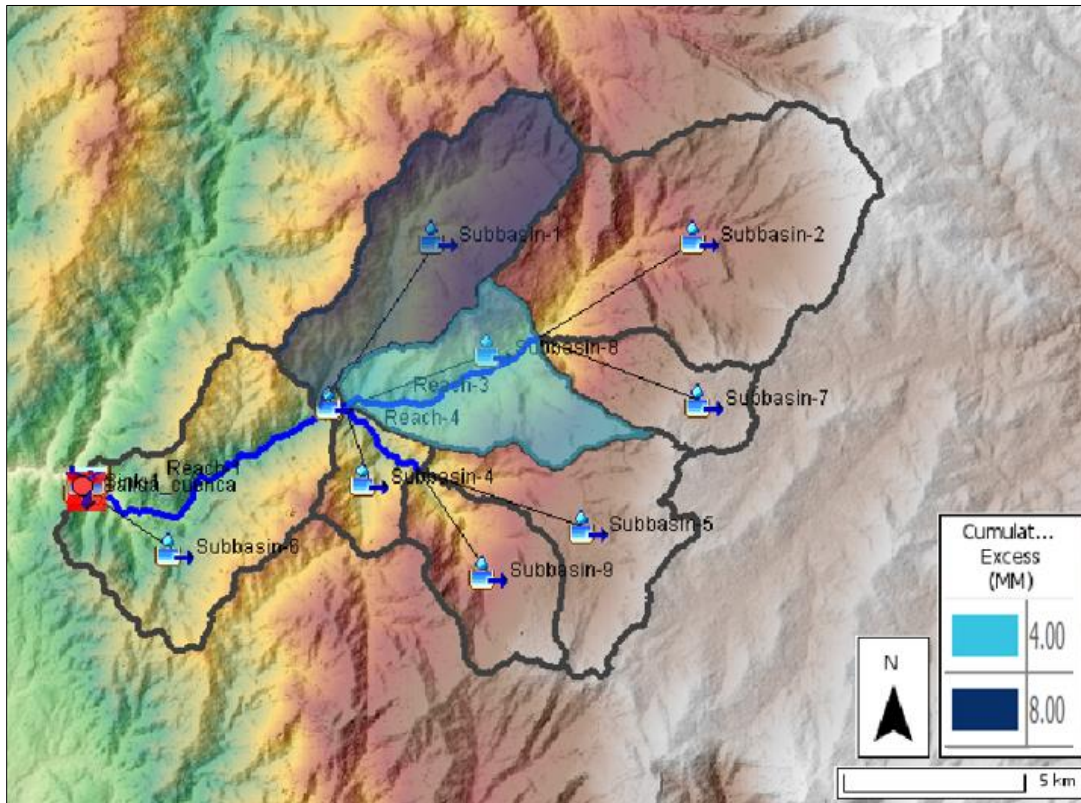


Figura 6-27. Exceso de precipitación acumulado para el Modelo 1
Fuente: HEC-HMS

6.2.6.2 Modelo 2 – Validación (2020-2021)

De igual manera que con el Modelo 1, para el Modelo 2 se analizaron las subcuencas que presentaran exceso de precipitación y, por consiguiente, escorrentía directa para el cálculo de erosión. En la Figura 6-28 se observa que las subcuencas que presentan aporte por escorrentía directa al río Tona son las subcuencas 1, 8 y 7, las cuales corresponden a los cuerpos de agua Quebrada Arnania, zona media del río Tona y Quebrada La Locura respectivamente. Debido a la escala presentada, no es apreciable que la subcuenca 5 también se encuentra contribuyendo en escorrentía superficial por exceso de precipitación a un valor de 0.03 mm.

Los caudales de escorrentía directa obtenidos para estas varían entre 0.005 m³/s y 11.0 m³/s.

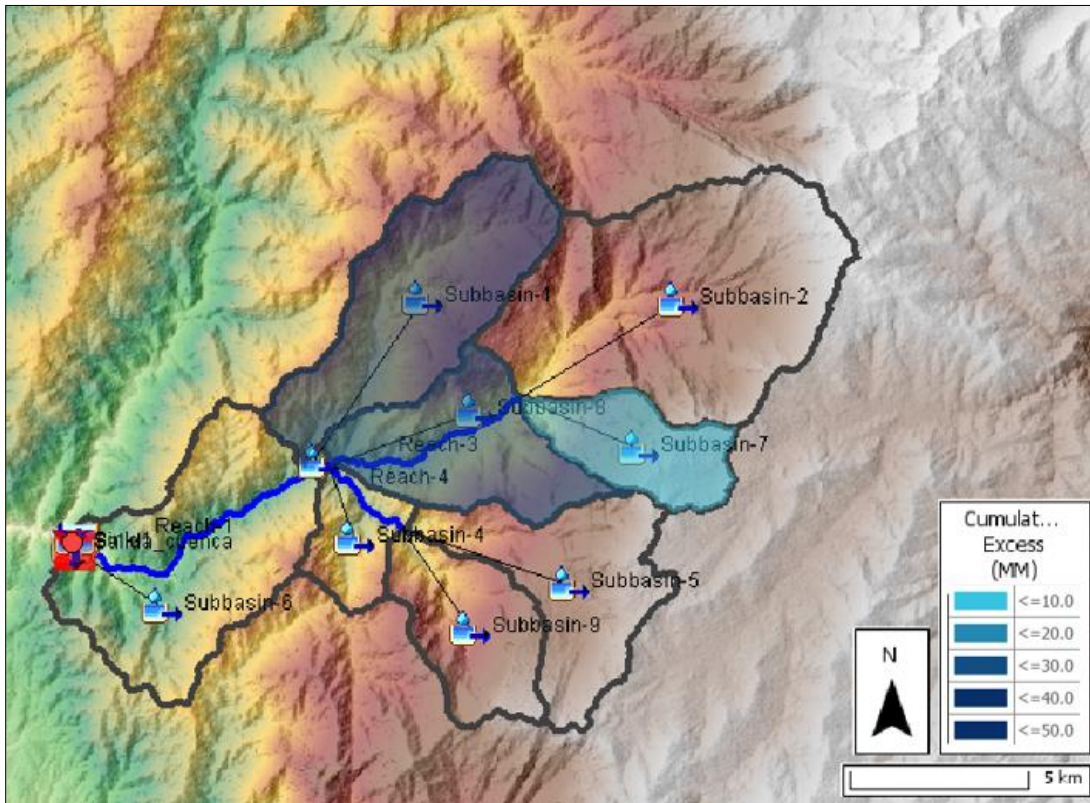


Figura 6-28. Exceso de precipitación acumulada para el Modelo 2
Fuente: HEC-HMS

A partir de los resultados obtenidos en los modelos estudiados, se concluye lo siguiente:

- Únicamente las subcuencas mencionadas previamente para cada modelo como aquellas que presentan un aporte de escorrentía superficial al punto de salida de la cuenca general serán analizadas por métodos erosivos para cuencas, tales como el USLE Modificado.

- El análisis de sedimentos a realizar en los posteriores numerales se basará en el método erosivo para las cuencas con aporte de escorrentía superficial (USLE Modificado) y el método de transporte de sedimentos en los tramos de cauce identificados por los modelos en cada escenario.

■ Partiendo de la definición de un hidrograma y los elementos que lo componen (numeral 6.2.4), se corrobora lo observado de acuerdo con la forma del hidrograma de caudales observados en el río Tona, es decir, la recarga del cauce se debe principalmente a recarga por flujo base.

6.3 MODELACIÓN DE EROSIÓN DEL SUELO Y TRÁNSITO DE SEDIMENTOS EN HEC-HMS

Con el fin de calcular el rendimiento de sedimentos a la salida de la cuenca del río Tona y como entrada al reservorio, se simuló por medio de HEC-HMS la erosión del suelo en las cuencas, el tránsito de sedimentos en la red de cauces identificados en el modelo y el atrapamiento de dichos sedimentos en el embalse a partir de los caudales de entrada obtenidos para los modelos de calibración y validación del numeral 6.2 y las curvas de elevación-área del embalse obtenidas como insumo de las batimetrías realizadas por AMB (numerales 5.1.2 y 6.2.2.3).

En la Figura 6-29 se observan los componentes integrados en el modelo de erosión y sedimentación de HEC-HMS y, a continuación, se describe el método seleccionado para cada uno de los elementos previamente mencionados:

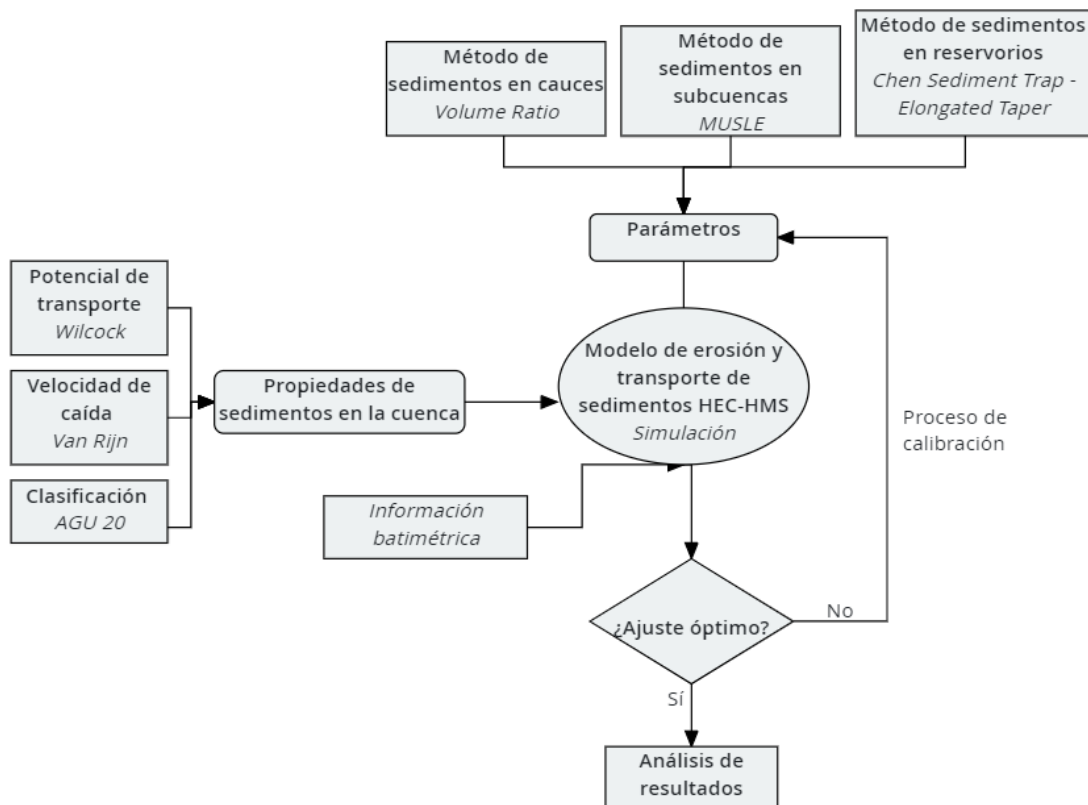


Figura 6-29. Diagrama de flujo del modelo de erosión y sedimentos desarrollado
Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación considerados para el modelo de erosión del suelo y transporte de sedimentos en HEC-RAS corresponden a los mismos escenarios del modelo hidrológico (numeral 6.2.1), ya que los caudales obtenidos por calibración previamente son usados como insumo para la obtención de la carga de sedimentos a la entrada del reservorio y en el cuerpo de este.

6.3.2 Elementos de simulación

Como se indicó previamente, los dos modelos de erosión y sedimentación en HEC-HMS son una continuación de los modelos de calibración y validación previamente ejecutados en el modelo hidrológico, cumpliendo igual función, es decir, el *Modelo 1* (2018-2020) corresponderá a un proceso de calibración y el *Modelo 2* (2020-2021) corresponderá a un modelo de validación de los parámetros previamente seleccionados y calibrados.

A partir del modelo hidrológico, los elementos de simulación se mantendrán con igual nombre e iguales características, sin embargo, no todos entran a hacer parte del modelado o se involucran en los análisis desarrollados. De esta manera, en el caso de las subcuencas se tiene que únicamente se asignarán métodos de erosión del suelo a las subcuencas 1 y 8 para el *Modelo 1-Calibración* y a las subcuencas 1, 7 y 8 para el *Modelo 2-Validación* debido a que son las únicas que presentaron escorrentía superficial como resultado del modelo hidrológico y su caudal es mayor al umbral de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ definido para el modelo.

En cuanto a los cauces identificados, no habrá excepciones y en todos se realizará el cálculo de erosión y transporte de sedimentos con los parámetros indicados en el numeral 6.3.5. Por último, en el reservorio se hará uso de la metodología indicada en el numeral 6.3.6 para el cálculo de retención de sedimentos en el cuerpo del embalse y el correspondiente cambio en las curvas de elevación-almacenamiento.

6.3.3 Parámetros del modelo general de sedimentos de la cuenca en HEC-HMS

Los parámetros que deben ser tenidos en cuenta en los modelos de erosión y transporte de sedimentos en cuencas incluyen los específicos para subcuencas, cauces y reservorios. Es necesario indicar parámetros y valores base que aplicarán a todos los elementos que se encuentren dentro de la cuenca: la ecuación a usarse para el cálculo

del potencial de transporte, la densidad relativa del sedimento, las densidades por tipo de sedimento, la ecuación a usarse para la velocidad de caída y la escala granulométrica para la visualización de resultados. La selección de dichos parámetros se explica a continuación:

Potencial de transporte: corresponde a la ecuación que se usará en HEC-HMS para el cálculo de la capacidad que tienen los cauces identificados para transportar los sedimentos no cohesivos. La selección de dicha ecuación se basó en el proceso de calibración y se corroboró por medio de la bibliografía disponible. Las ecuaciones que presentaban resultados con menor incertidumbre correspondían a las ecuaciones de Wilcock y Meyer-Peter Muller, las cuales se encuentran relacionadas en la bibliografía. Su uso está principalmente relacionado a granulometrías con presencia de arenas y gravas (Muller, 1948)(Wilcock et al., 2003).

Densidad relativa y densidades de los sedimentos: el valor correspondiente a la densidad relativa del suelo se encuentra dado por defecto en el software como 2.65 (US Army Corps of Engineers, 2021a), el cual fue corroborado en los informes elaborados por INTEGRAL (INTEGRAL, 2011b). En cuanto a las densidades secas para los distintos tamaños de sedimentos se consideraron los valores por defecto sugeridos en el software, ya que no se cuenta con la información requerida para realizar el cálculo particular.

Velocidad de caída: el valor dado a este parámetro se aplicará tanto para los cauces como para el reservorio debido al cálculo que se hará para la reducción del volumen del embalse y corresponde al tiempo que toma un sedimento en asentarse y depositarse en el fondo del cauce o reservorio. Para el presente caso de estudio, se seleccionó la ecuación de *Van Rijn*.

Escala de granulometría: hace referencia a la clasificación de sedimentos en la cual se quieren obtener los resultados, así, se tiene la clasificación básica de arcillas-limo-arenas-gravas o la clasificación *AGU 20*, la cual va desde arcillas (*clay*) hasta grandes cantos rodados (*LB*). Debido a la entrada de datos requerida durante el modelo hidráulico a realizar en HEC-RAS, se usa la clasificación *AGU 20*.

6.3.4 Parámetros del modelo de erosión en subcuencas

En cuanto a la erosión del suelo, se seleccionó el método MUSLE (Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Modificada) debido a que este permite calcular la erosión en la superficie del terreno a partir de un único evento de lluvia. El método MUSLE parte el previamente conocido método USLE reemplazando el factor de energía de la lluvia por un factor de energía de la escorrentía superficial (Williams, 1975), considerando así el nivel de infiltración que se tenga en eventos de precipitación/simulación continua; así, en aquellos modelos donde en los cuales se tenga altos niveles de infiltración, se tendrá baja escorrentía superficial y, por lo tanto, poca erosión de la superficie de la cuenca (US Army Corps of Engineers, 2021a).

La ecuación por medio de la cual el método MUSLE calcula el rendimiento de sedimentos a la salida de una cuenca se muestra a continuación, así como la selección de los parámetros seleccionados para el presente caso de estudio:

$$Sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \times q_{peak})^{0.56} \times K \times LS \times C \times P$$

Donde *Sed* es la carga de sedimentos (tons), Q_{surf} es el volumen de escorrentía superficial en (m^3), q_{peak} es la tasa máxima de escorrentía (m^3/s), *K* es el factor de erosionabilidad del suelo, *LS* es el factor topográfico, *C* es el factor de cobertura del suelo y *P* es el factor de práctica. Por otra parte, HEC-HMS requiere tres parámetros extras para la definición del modelo de erosión; todos los parámetros requeridos se explican a continuación:

Factor de erosionabilidad (*K*): corresponde a la resistencia que tiene un suelo a erosionarse y depende de las propiedades del suelo tales como su textura y estructura, los cuales son determinantes de su firmeza y capacidad de infiltración. El factor de erosionabilidad varía en una escala de 0 a 1, siendo 0 los suelos con menor susceptibilidad a la erosión y 1 los suelos más susceptibles a la erosión (Gwapedza et al., 2018). De acuerdo con el manual del software HEC-HMS, se toman valores de 0.05 para arenas arcillosas no consolidadas y valores de 0.75 para suelos franco limosos y arcillosos (US Army Corps of Engineers, 2021a).

Tabla 6-25. Características litológicas por subcuenca de interés

Subcuenca	Litología	Características
Subbasin-1	Areniscas, conglomerados y lutitas calcáreas	Texturas franco arenosa, franco arcillo arenosa, arcillosa y arcillo arenosa.
	Granodioritas, cuarzomonzonitas, caraneis, granitos y ceniza volcánica	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa
Subbasin-7	Areniscas y calizas	Texturas franco arenosa, franca, arcillosa y franco arcillosa
	Areniscas, conglomerados y lutitas calcáreas	texturas franco arenosa, arenosa franca, franca, arcillosa y franco arcillosa
	Areniscas, limolitas, lutitas, granodiorita, cuarzomonzonita, riolita, esquistos y neis	texturas franca, franco arcillosa, arenosa franca
	Calizas, lutitas y cenizas volcánicas alteradas	texturas franco arcillo arenosa, arcillosa, franco arenosa
	Cuarzomonzonita y neis	texturas franco arcillo arenosa, franco arcillosa, arenosa y franco arenosa
	Filítas, materiales aluviales gruesos y finos	texturas franco arcillosa, franco arcillo limosa, franco arenosa, franco arcillo arenosa
	Granodioritas, cuarzomonzonitas, caraneis, granitos y ceniza volcánica	texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa
Subbasin-8	Areniscas, conglomerados y lutitas calcáreas	Texturas franco arenosa, franco arcillo arenosa, arcillosa y arcillo arenosa
	Areniscas, limolitas, lutitas, granodiorita, cuarzomonzonita, riolita, esquistos y neis	Texturas franca, franco arcillosa
	Filítas, materiales aluviales gruesos y finos	Texturas franco arcillosa, franco arcillo limosa, Textura franco arenosa, franco arcillo arenosa
	Granodioritas, cuarzomonzonitas, caraneis, granitos y ceniza volcánica	Texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa, franco arcillosa, arcillosa

Fuente: tomado y adaptado de SANTANDER_SUELOS_VF (IGAC)

A partir de lo consignado en el mapa Agrológico del IGAC correspondiente al departamento de Santander (Tabla 6-25), se seleccionaron valores de 0.40 para las tres subcuencas de interés, de acuerdo con lo cual la litología de las subcuencas en análisis cuenta con variedad de características que abarcan los extremos de la clasificación previamente mencionados.

Factor topográfico (LS): corresponde a la susceptibilidad de erosión debido a la longitud y a la pendiente del tramo de análisis, entendiéndose que entre mayor sea la pendiente, mayor será la erosión presentada. Se tienen valores típicos de 0.1 para pendientes bajas y tramos cortos y de 10 para pendientes altas y tramos largos.

De acuerdo con lo consignado en la bibliografía (Gwapedza et al., 2018) (Jain & Das, 2010), a partir del Modelo Digital de Elevaciones descargado de la base de datos de la NASA (numeral 5.1.1) y el mapa de pendientes generado en el presente proyecto (Figura 6-11) es posible generar un raster correspondiente al factor LS por medio de la ecuación mostrada a continuación y de la herramienta *raster calculator* de ArcGIS:

$$LS = \left(\frac{FA \cdot \text{cellsize}}{22.13} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\sin(\alpha)0.01745}{0.0896} \right)^{1.3}$$

Donde, FA corresponde al valor del raster *flow accumulation*, α es la pendiente en grados de la celda y *cell size* corresponde a la resolución del DEM usado.

A partir del análisis GIS realizado, se encontró que la cuenca en su mayoría se encuentra entre los rangos LS de 0.00 a 0.46 en una proporción de 95.3%, para los rangos LS entre 0.45 a 2.45 se encuentra en una proporción de 4.45% y, por último, para los rangos LS entre 2.45 a >10 en una proporción de 0.25%. En la Tabla 6-26 se muestran los valores calculados por subcuenca para el Factor Topográfico de acuerdo con el análisis desarrollado en ArcGIS a través de la herramienta *raster calculator*.

Tabla 6-26. Valores iniciales del Factor Topográfico (LS) - GIS

Subcuenca	Factor FS - GIS		
	Máximo	Promedio	Desv Estándar
Subbasin-1	11.034	0.140	0.195
Subbasin-7	7.235	0.139	0.301
Subbasin-8	12.423	0.178	0.253

Fuente: Elaboración propia

Factor de cobertura del suelo (C): corresponde a la extensión de la cobertura vegetal en la cuenca de análisis, la cual protege a la superficie del suelo de los procesos erosivos. Dicho factor varía de 0 a 1 teóricamente y entre más alto sea el valor, menor cobertura vegetal tiene la cuenca y más vulnerable será a la erosión. De acuerdo con la bibliografía (US Army Corps of Engineers, 2021a) se toman valores de 0.0001 para cuencas con suelos forestales o arbóreos con gran interceptación de precipitación por cobertura vegetal (*canopy*); valores intermedios de 0.1 para suelos altamente cubiertos de vegetación y valores de 1.0 para suelos totalmente desnudos.

Para este factor se consideró el mapa de cobertura del suelo del IDEAM (Figura 6-10), en el cual predomina la cobertura de pastos, por lo cual, se toma un valor de 0.50 para las cuencas de interés.

Factor de práctica (P): se relaciona con el efecto que tienen determinadas prácticas de conservación del suelo en la susceptibilidad a la erosión. Dichas prácticas corresponden a cultivo en franjas, terrazas o contorno, entre otros. (US Army Corps of Engineers, 2021a). Sus valores varían entre 0 y 1, siendo 0 lo correspondiente a suelos con mayor capacidad

de resistencia a la erosión, indicando buenas prácticas y erosión baja y 1 suelos con menor capacidad de resistencia a la erosión (Gwapedza et al., 2018). Debido a que no se cuenta con información al respecto, se tomó un valor de 1.0 para el modelo.

Umbral: corresponde al caudal mínimo de escorrentía en la cuenca para el cual comenzará a producirse erosión. Teniendo en cuenta las limitaciones del software, el valor mínimo que puede ser asignado para este parámetro es de 0.01 m³/s, por lo cual, este fue el valor seleccionado. Considerando el caudal de escorrentía obtenido en la etapa de modelación y calibración hidrológica, implica que únicamente en la subcuenca 5 del modelo 2 (validación) no se generarán procesos erosivos y las demás cuencas con caudales de escorrentía superficial (1, 7 y 8) por encima del umbral, sí presentarán carga de sedimentos.

Exponente: corresponde a un factor que permite distribuir la carga de sedimentos en el sedígrafo. Para valores bajos, la forma del sedígrafo se achatará respecto a la del hidrograma y para valores altos, la forma del sedígrafo se alargará respecto a la del hidrograma. Dicho factor forma parte del proceso de calibración y a partir de los resultados obtenidos se inició con un valor intermedio de 0.50.

Curva de gradación: describe la distribución de la carga de sedimentos en clases/tamaño de partícula. Dicha curva se ha tomado de la información provista por el AMB y consignada en el numeral 5.3 y en la Tabla 6-27, en la cual se observan que predominan los tamaños de la clasificación de arenas con una composición mayor al 50%.

Tabla 6-27. Curva granulométrica del material de análisis propuesta

% de cada material	Diámetro (mm)	% que pasa
arena(68%)	2,5	100
	0,8	95
	0,5	90
	0,4	85
	0,3	78
	0,2	67
	0,17	60
	0,08	40
limo(20%)	0,06	32
	0,05	26
	0,035	19
	0,022	15
arcilla(12%)	0,01	12
	0,0009	9
	0,0008	8
	0,0007	8
	0,0002	7

Fuente: (INTEGRAL, 2011b)

Aunque la clasificación dada por INTEGRAL a la curva granulométrica no contempla gravas en la tabla anterior, la clasificación de la AGU, contenida en los software HEC-HMS y HEC-RAS considera gravas muy finas (VFG) a partir de un diámetro de 2.00mm, es decir, la granulometría ingresada al software contiene también un respectivo porcentaje de gravas considerando que se tienen diámetros de hasta 2.50mm (US Army Corps of Engineers, 2021b).

6.3.5 Parámetros del modelo de transporte de sedimentos en cauces

El arrastre de sedimentos en un cauce está directamente relacionado con la capacidad del flujo de mover suelo erosionado; así, si el cauce es capaz de transportar más sedimento del que se encuentra suspendido en el flujo, erosionará el fondo de dicho cauce produciendo mayor arrastre de sedimentos, por el contrario, si la capacidad de transporte del flujo no es suficiente para el movimiento de los sedimentos presentes en él, estos se asentarán y depositarán en la cama del cauce (US Army Corps of Engineers, 2021a). Dicha capacidad de transporte de sedimentos en el cauce es calculada a partir de la ecuación de potencial de transporte descrita en el numeral 6.3.3.

En cuanto a los procesos erosivos presentados en el cauce, el software supone la cama de este como una división de dos capas; la capa superior representa la capa superficial

que actúa directamente con el flujo y responde rápidamente a cambios en el caudal y la capa inferior representa el sustrato inmediatamente inferior del cauce y se encuentra involucrado en modelaciones continuas, como corresponde el presente proyecto.

A continuación, se describen los parámetros seleccionados para el cálculo del transporte de sedimentos en los cauces:

Método de sedimentos: se selecciona *volume ratio* como método para el análisis de sedimentos en cauces, considerando que relaciona el transporte de sedimentos con el flujo de caudal obtenido del modelo hidrológico de manera proporcional, es decir, la proporción de sedimentos que salen del cauce se asume igual a la proporción de caudal de salida calculado para determinado intervalo de tiempo, lo cual indica que el transporte de todos los tamaños de sedimentos son calculados bajo la misma tasa, sin embargo, la erosión y la deposición son calculados para cada tipo de sedimento por aparte.

Tabla 6-28. Métodos de almacenamiento por interceptación de la vegetación disponibles en HEC-HMS 4.10

Sediment methods
Fisher's Dispersion
Linear Reservoir
Uniform Equilibrium
Volume Ratio

Fuente: *Elaboración propia*

Ancho de los cauces: en el método seleccionado, se requiere el ancho típico del cauce y es usado para calcular el volumen de las capas superior e inferior de la cama del cauce. Dicho ancho se toma de los parámetros seleccionados para el método de tránsito de crecientes *Muskingum-Cunge* (Tabla 6-7).

Profundidad de la capa a erosionarse: este parámetro corresponde a la profundidad total de la cama del cauce que puede erosionarse ante largos periodos de simulación (US Army Corps of Engineers, 2021a). Se inicia con un valor estimativo de 0.10m.

Capa activa: el valor asignado a la capa activa es usado para calcular el espesor de la capa superior del suelo a erosionarse, la cual es calculada en cada intervalo de tiempo como d_{90} multiplicada por el valor de la capa activa (US Army Corps of Engineers, 2021a). En la simulación realizada se inicia el proceso de calibración con un valor de 1.00.

6.3.6 Parámetros del modelo de retención de sedimentos en el embalse

Debido a la retención de flujo en los embalses, se presenta la retención de sedimentos que se asentarán en el fondo del embalse de acuerdo con el tiempo, la forma de la partícula y su densidad. Las partículas de mayor tamaño se asentarán más rápido que las partículas de menor tamaño (US Army Corps of Engineers, 2021a). Dicha acumulación de sedimentos en el fondo del embalse cambia su geometría, generando pérdida de volumen útil. En el actual numeral se presentan los parámetros seleccionados para el cálculo de la reducción del volumen del embalse Tona de acuerdo con la cantidad de sedimentos que se acumulan en el periodo modelado y los caudales calibrados.

Método de análisis de sedimentos: el software cuenta con cinco métodos para el cálculo de sedimentos en el embalse, de los cuales se ha seleccionado *Chen Sediment Trap* debido a que permite el cálculo de retención de sedimentos en el reservorio, así como la salida de sedimentos en suspensión por las descargas realizadas a través del vertedero de excesos tipo Morning Glory (numeral 5.4).

Tabla 6-29. Métodos de retención de sedimentos en reservorios disponibles en HEC-HMS 4.10

Sediment methods
Brune Sediment Trap
Chen Sediment Trap
Complete Sediment Trap
Specified Sediment
Zero Sediment Trap

Fuente: Elaboración propia

Temperatura: debido a que no se cuentan con registros de temperatura, se selecciona el valor promedio que viene establecido por defecto en el software, el cual es de 12.8 °C.

Forma de deposición de sedimentos: de acuerdo con la bibliografía consultada, la deposición de los sedimentos en el volumen del embalse se puede presentar por medio de dos formas: elongada y en forma V; la primera corresponde a una deposición alargada especialmente para granulometrías que contienen principalmente arenas y gravas y la segunda corresponde a una deposición en la cual predominan limos y arcillas en la granulometría (Pak, 2020)

6.3.7 Calibración de escenarios de simulación

Análisis de volúmenes en batimetrías del AMB: de acuerdo con lo consignado en el numeral 5.1.2 del presente documento, se recibió por parte del AMB la información correspondiente a los levantamientos topográficos de los años 2018, 2020 y 2021 con sus correspondientes modelos digitales del terreno el formato *.tif*, a partir de estos, se realizó el análisis de volúmenes de sedimentación y erosión entre los años 2018-2020 y 2020-2021, con el fin de compararlos con el total del cambio de volumen en el fondo del reservorio registrado en HEC-HMS. Dicho análisis fue realizado por medio de la herramienta *Cut Fill* de ArcGIS, la cual permite el cálculo de volúmenes entre dos superficies.

En la Tabla 6-30 se observan los volúmenes en metros cúbicos obtenidos para cada par de modelos digitales de elevación analizados y los mapas correspondientes se encuentran en la Figura 8-1 y Figura 8-3.

Tabla 6-30. Volúmenes de sedimentación y erosión para los levantamientos batimétricos llevados a cabo en el embalse Tona

Modelo	Año	Sedimentación (Gain), m ³	Erosión (Loss), m ³	Diferencia, m ³
Modelo 1 – Calibración	2018 - 2020	237276.286	149128.660	88147.62586
Modelo 2 - Validación	2020 - 2021	410641.934	35174.0492	375467.8843

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados – Modelo 1: partiendo de los escenarios de simulación ejecutados a lo largo del presente proyecto, la calibración fue realizada para los años 2018-2020 a partir de los parámetros previamente seleccionados para cada elemento involucrado en el modelo de erosión y de transporte de sedimentos. De esta manera, por medio del software HEC-DSSVue se obtuvo la curva Elevación-Almacenamiento para la fecha 20-enero-2020, es decir, un día previo a la finalización de la simulación y a la ejecución de la batimetría correspondiente al año 2020 (numeral 5.1.2).

En la Figura 6-30 se observa la curva obtenida por medio del software HEC-HMS y se compara con la curva obtenida del levantamiento batimétrico del 2020 (AMB), encontrándose discrepancias hacia cotas mayores, pero observando un comportamiento similar al presentado en el sitio.

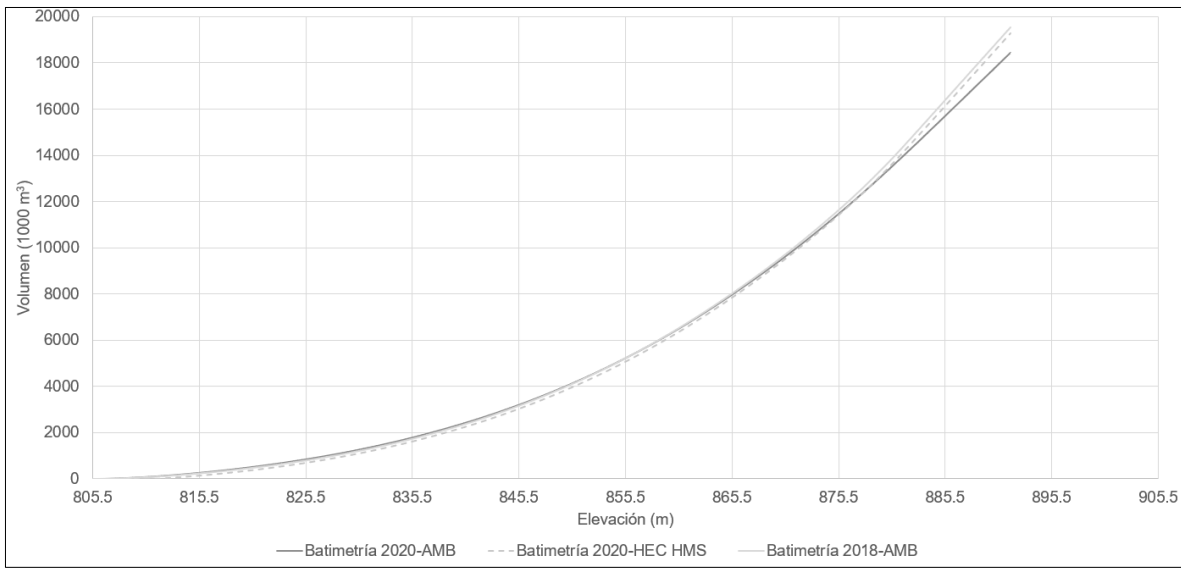


Figura 6-30. Comparación de curvas elevación-almacenamiento para el año 2020 (AMB vs HEC-HMS)
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la comparación de volúmenes, estos se obtuvieron para los distintos niveles de interés en el embalse, de acuerdo con los informes del AMB; dichos niveles de interés corresponden al nivel mínimo físico, nivel mínimo técnico, nivel máximo físico y nivel máximo capturado (Figura 6-31) y los errores de volumen en estos se encuentran consignados en la Tabla 6-31.

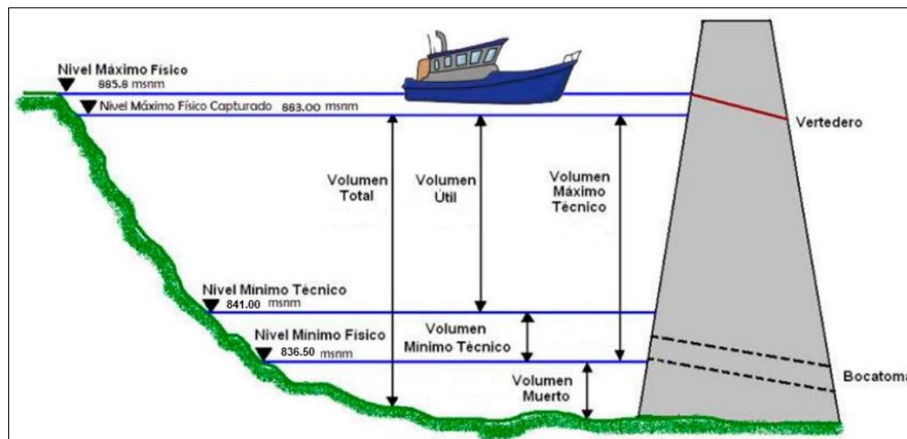


Figura 6-31. Volúmenes y niveles característicos del embalse Tona
Fuente: tomado y adaptado de (BATIMETRÍA, 2020)

De acuerdo con lo observado en la Tabla 6-31, en ninguna de las comparaciones realizadas se observan porcentajes de error superiores al 10%, lo cual indica que la

incertidumbre del *Modelo 1* es baja, ajustándose a lo obtenido en las batimetrías realizadas para el mismo periodo de tiempo.

Tabla 6-31. Comparación de volúmenes obtenidos por batimetría con volúmenes obtenidos por *Modelo 1*

		Año 2018 AMB	Año 2020 AMB	Año 2020 HMS		
Nivel mínimo físico	m	836.5	836.5	836.5		
Nivel mínimo técnico	m	841.0	841.0	841.0		
Nivel máximo físico	m	885.8	885.8	885.8		
Nivel máx capturado	m	883.0	883.0	883.0		
					% error 2020	
Volumen 836.5 m	1000 m ³	1854.94	1909.62	1753.00	8.20%	
Volumen 841.0 m	1000 m ³	2451.02	2503.58	2345.00	6.33%	
Volumen 883.0 m	1000 m ³	15109.91	14611.65	14920.00	-2.11%	
					Pérdida vol 2018- 2020 AMB	Pérdida vol 2018-2020 HMS
Volumen muerto	1000 m ³	1854.94	1909.62	1753.00	-2.95%	5.50%
Volumen mínimo técnico	1000 m ³	596.08	593.95	592.00	0.36%	0.68%
Volumen útil	1000 m ³	12658.89	12108.07	12575.00	4.35%	0.66%
Volumen máximo técnico	1000 m ³	13254.97	12702.02	13167.00	4.17%	0.66%
Volumen total	1000 m ³	15109.91	14611.65	14920.00	3.30%	1.26%

Fuente: *Elaboración propia*

Respecto al cambio en los volúmenes de fondo del embalse, por medio de los resultados del modelo de calibración se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 6-32 en toneladas, los cuales indican que se tendría un cambio total de volumen en el fondo del embalse de 232369.1 toneladas. Considerando el valor del peso específico característico del sedimento seleccionado en el numeral 6.3.3 (2.65 Ton/m³), se obtuvo un volumen total de 87686.45 m³. Dicho valor corresponde a un 99.47% del volumen obtenido en los análisis batimétricos desarrollados por medio de ArcGIS (Tabla 6-30); considerando la porosidad del sedimento y el porcentaje de error obtenido, se consideran aceptables los resultados y la comparación entre lo simulación y lo medido.

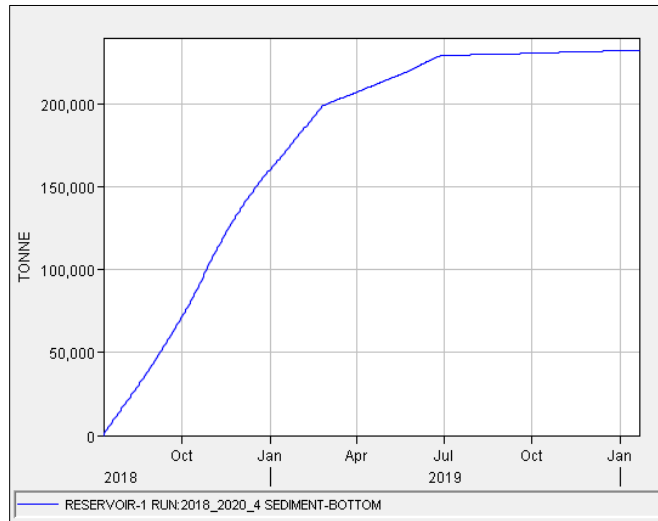


Figura 6-32. Carga de sedimentos en el fondo del embalse total– Modelo 1
Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

Tabla 6-32. Balance de masa de sedimentos en el elemento “Reservoir” del Modelo 1

AGU 20	Tipo partícula	Carga sedimento (t)
CS	Course Sand	14466
CM	Coarse Silt	36728
FS	Fine Sand	51321
FM	Fine Silt	3977.2
MS	Medium Sand	40999
MM	Medium Silt	7975.8
VCS	Very Course Sand	7358.6
VFG	Very Fine Gravel	2368.8
VFS	Very Fine Sand	45258
VFM	Very Fine Silt	1668.7
CS	Course Sand	14466

Fuente: Tomado y adaptado de HEC-HMS 4.10

6.3.7.1 Validación de resultados por medio del Modelo 2

Partiendo de los resultados favorables obtenidos en el *Modelo 1-Calibración* con los parámetros seleccionados, se procede a validar los resultados por medio del *Modelo 2* correspondiente al periodo de simulación 2020-2021, a partir de lo cual se obtiene la curva de elevación-almacenamiento mostrada en la Figura 6-33 para el día 27 de junio del 2021 (un día antes del levantamiento batimétrico del año 2021 por parte del AMB). La diferencia presentada gráficamente entre la batimetría para el año 2021 del AMB y la curva elevación-almacenamiento obtenida en HEC-HMS es muy baja, evidenciándose un correcto ajuste entre lo simulado y lo medido.

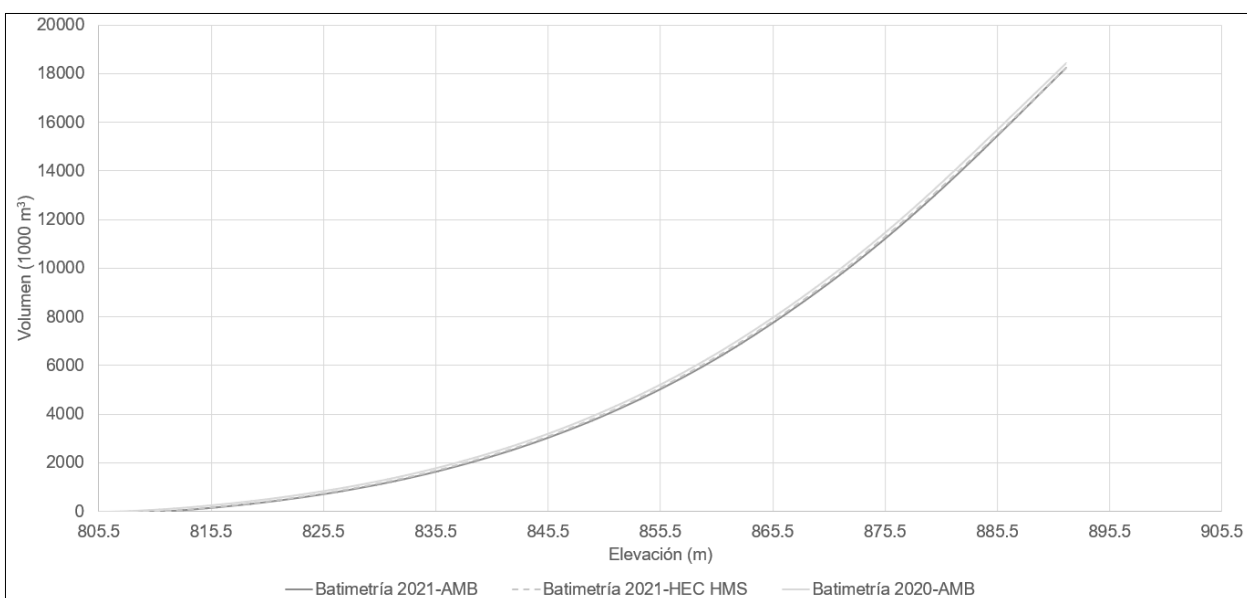


Figura 6-33. Comparación de curvas elevación-almacenamiento para el año 2021 (AMB vs HEC-HMS)
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-33 se muestran los porcentajes de error para cada uno de los niveles de interés en el embalse respecto a la batimetría del 2020 realizada por el AMB y a los volúmenes obtenidos de la curva elevación-almacenamiento en HEC-HMS; así mismo se calculan por porcentajes de pérdida de volumen en cada caso. Como se puede observar, en ninguna de las comparaciones realizadas el porcentaje de error supera el 10%, por lo cual, se considera que el *Modelo 2* se ajusta a la realidad para el periodo 2020-2021.

Tabla 6-33. Comparación de volúmenes obtenidos por batimetría con volúmenes obtenidos por Modelo 2

		Año 2018 AMB	Año 2020 AMB	Año 2020 HMS		
Nivel mínimo físico	m	836.5	836.5	836.5		
Nivel mínimo técnico	m	841.0	841.0	841.0		
Nivel máximo físico	m	885.8	885.8	885.8		
Nivel máx capturado	m	883.0	883.0	883.0		
					% error	
					2020	
Volumen 836.5 m	1000 m ³	1909.62	1762.11	1800.00	-2.15%	
Volumen 841.0 m	1000 m ³	2503.58	2347.32	2390.00	-1.82%	
Volumen 883.0 m	1000 m ³	14611.65	14328.95	14408.00	-0.55%	
					Pérdida	Pérdida vol
					vol 2018-	2018-2020
					2020 AMB	HMS
Volumen muerto	1000 m ³	1909.62	1762.11	1800.00	7.72%	5.74%
Volumen mínimo técnico	1000 m ³	593.95	585.21	590.00	1.47%	0.67%
Volumen útil	1000 m ³	12108.07	11981.63	12018.00	1.04%	0.74%
Volumen máximo técnico	1000 m ³	12702.02	12566.84	12608.00	1.06%	0.74%
Volumen total	1000 m ³	14611.65	14328.95	14408.00	1.93%	1.39%

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los cambios obtenidos en los volúmenes de fondo en el embalse por tipo de partícula, considerando el peso específico del sedimento, se calcula una carga total de 94085.13 m³, lo que corresponde únicamente al 25.05% de la diferencia registrada en los levantamientos batimétricos del AMB (Tabla 6-30); sin embargo, no se consideran los efectos producidos por la porosidad y el ajuste y comparación por volúmenes realizado previamente, garantizan una incertidumbre baja para el *Modelo 2*.

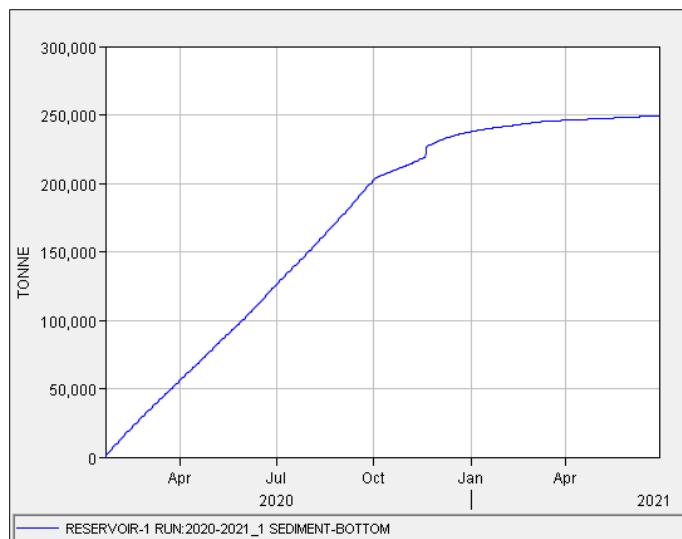


Figura 6-34. Carga de sedimentos en el fondo del embalse total – Modelo 2
Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

Tabla 6-34. Balance de masa de sedimentos en el elemento “Reservoir” del Modelo 2

AGU 20	Tipo partícula	Carga sedimento (t)
Clay	Course Sand	21098
CS	Coarse Silt	15608
CM	Fine Sand	39629
FS	Fine Silt	55373
FM	Medium Sand	4104.6
MS	Medium Silt	44237
MM	Very Course Sand	8234.1
VCS	Very Fine Gravel	7939.7
VFG	Very Fine Sand	2555.9
VFS	Very Fine Silt	48832
VFM	Course Sand	1714.3

Fuente: Tomado y adaptado de HEC-HMS 4.10

6.3.8 Análisis de resultados por modelo

De acuerdo con lo indicado en el numeral 6.2.5 respecto al nodo de análisis y calibración de la información, correspondiente al elemento del modelo llamado *Junction-1*, el cual se encuentra aguas abajo del último tramo de río antes del embalse y aguas arriba de dicho reservorio. La información obtenida en dicho elemento es de mucho interés, ya que corresponde a la carga de sedimentos que se ingresará al modelo hidráulico en HEC-RAS para la simulación de los procesos de sedimentación y erosión en el cuerpo del embalse.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el modelo de erosión y sedimentación para los dos escenarios de simulación considerados:

6.3.8.1 Modelo 1 - Calibración (2018-2020)

En la Figura 6-35 se pueden observar los resultados obtenidos para el elemento *Junction-1* correspondiente a la carga de sedimentos que entra al embalse, la cual se usada como información de entrada para el modelo hidráulico en HEC-RAS. El sedígrafo mantiene un comportamiento similar al hidrograma de caudales registrados en el río Tona, evidenciando la relación planteada en el método *Volume Ratio* según el cual, los sedimentos producidos por el cauce tendrán de la misma proporción que los caudales que salen de este.

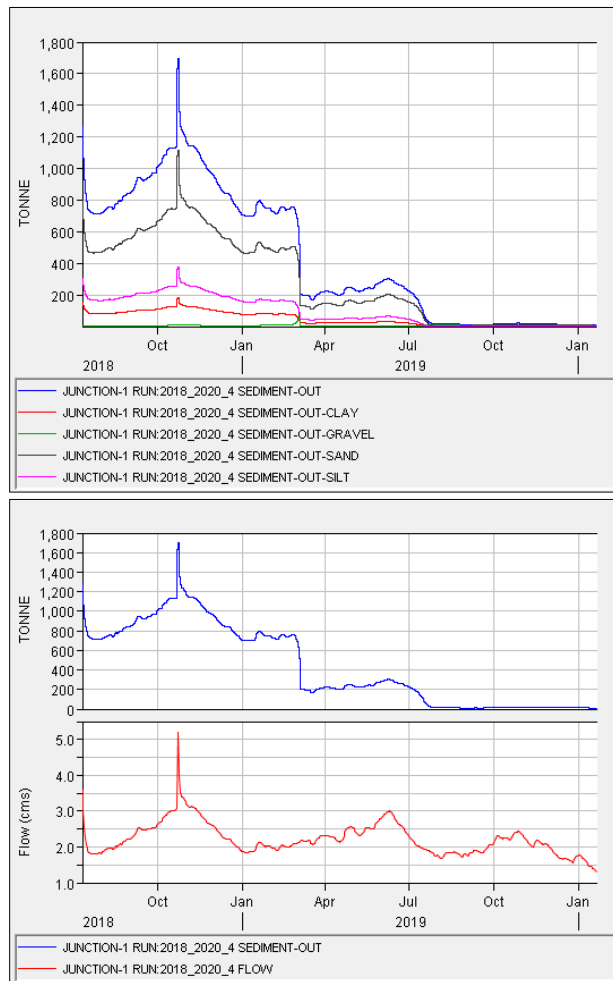


Figura 6-35. Carga de sedimentos totales y por tipo de partícula en la entrada del embalse/ Comparación de carga total de sedimentos con caudales calibrados a la entrada del embalse – Modelo 1
Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

Por otra parte, la concentración de sedimentos presentada en las subcuencas es mayor para el elemento *Subbasin-1* que para el elemento *Subbasin-8*, lo cual es consecuente con el caudal de escorrentía superficial obtenido en el modelo hidrológico, ya que para el elemento *Subbasin-1* se obtuvo un caudal de 2.00 m³/s y para el elemento *Subbasin-8* se obtuvo un caudal de 0.03 m³/s. Las subcuencas a las que hacen referencias dichos elementos son las correspondientes a la Quebrada Arnanía y la zona media del río Tona, respectivamente.

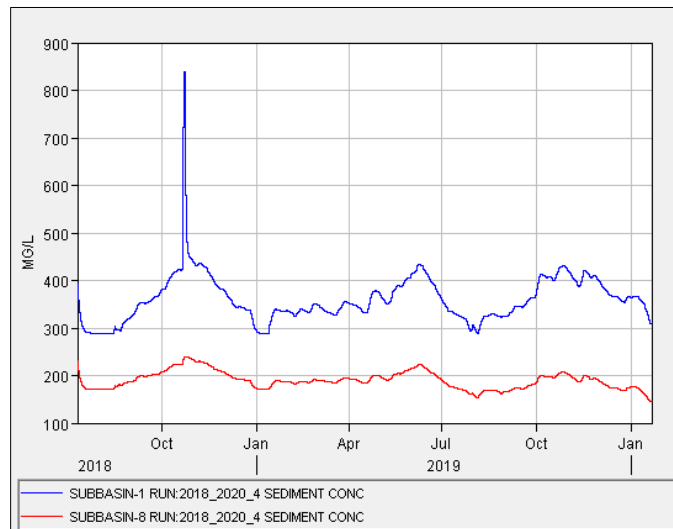


Figura 6-36. Concentración de sedimentos por subcuena analizada – Modelo 1
Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

6.3.8.2 Modelo 2 – Validación (2020-2021)

En cuanto al *Modelo 2 – Validación* el análisis desarrollado se muestra de manera similar al abordado para el *Modelo 1*; de esta manera, se destaca la similitud en el comportamiento del sedígrafo obtenido en el elemento *Junction-1* y del hidrograma de caudales en el río Tona obtenido del modelo hidrológico previamente ejecutado.

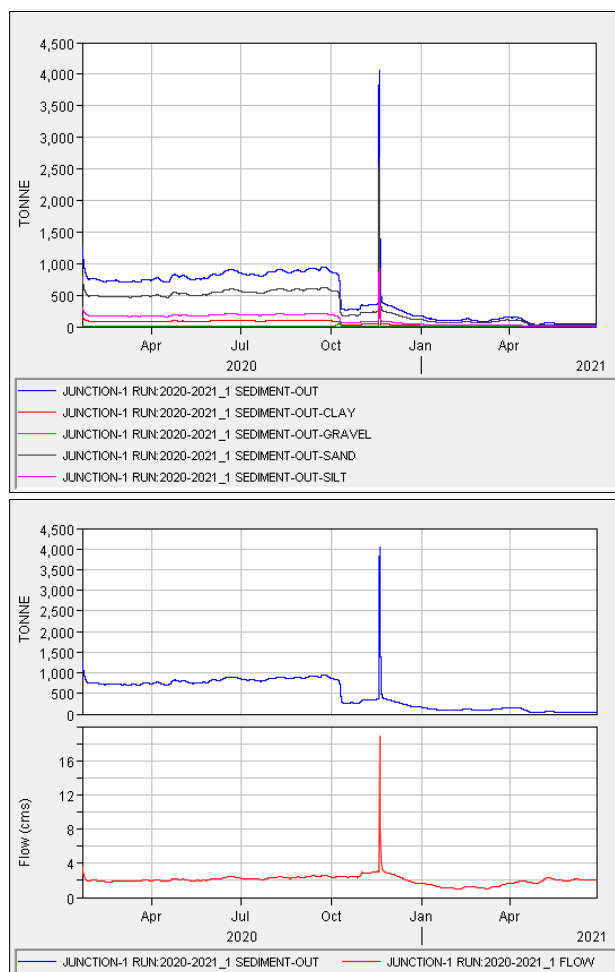


Figura 6-37. Carga de sedimentos totales y por tipo de partícula en la entrada del embalse/ Comparación de carga total de sedimentos con caudales calibrados a la entrada del embalse – Modelo 2
Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

Como se observa en la Figura 6-38, se presenta una mayor concentración en el elemento *Subbasin-1* que en el elemento *Subbasin-8*, y, así mismo, este es mayor al del elemento *Subbasin-7*. Esto es consecuente con los caudales de escorrentía superficial obtenidos del modelo hidrológico, según los cuales, para *Subbasin-1* (Quebrada Arnania) se obtuvo un caudal de 11.25 m³/s, para *Subbasin-8* (zona media del río Tona) se obtuvo un caudal de 4.92 m³/s y para *Subbasin-7* (Quebrada La Locura) se obtuvo un caudal de 0.05 m³/s.

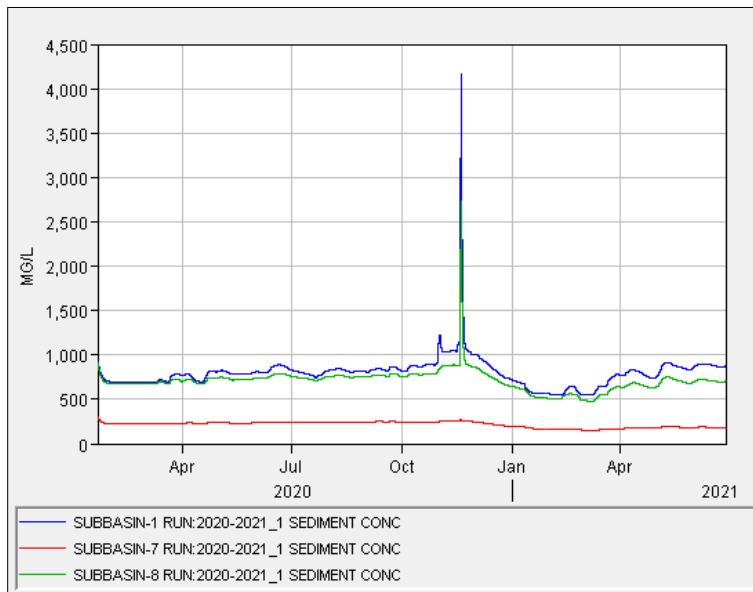


Figura 6-38. Concentración de sedimentos por subcuenca analizada – Modelo 2
 Fuente: HEC-DSSVue 2.0.1

7 ANÁLISIS HIDRÁULICO

Una vez se obtuvo la carga de sedimentos a la entrada del embalse como sedígrafo (Figura 6-35 y Figura 6-37) para cada uno de los escenarios de simulación, se procede a evaluar dicha carga de sedimentos en el cuerpo del embalse con el fin de analizar velocidades y zonas de mayor concentración de sedimentos. Para dicha evaluación se ha seleccionado el software HEC-RAS considerando el avance que ha presentado en los últimos años en esta área de aplicación, permitiendo incluso la modelización de sedimentos en dos dimensiones por medio de celdas en el área de interés.

7.1 MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS 2D

A continuación, se presentan las variables requeridas para la ejecución de los modelos hidráulicos en HEC-RAS. Con el fin de realizar una comparativa de resultados ante las características que contiene cada modelo, se han desarrollado modelaciones bidimensionales en el cuerpo del embalse Tona.

7.1.1 Escenarios de simulación

Los mismos escenarios desarrollados previamente en el modelo hidrológico y de sedimentos de HEC-HMS mostrados en el numeral 6.2.1, se consideran en el modelo hidráulico, es decir, los correspondientes a las fechas de los levantamientos batimétricos llevados a cabo por AMB.

7.1.2 Información de entrada para el modelo hidráulico

Como se indicó anteriormente, se realizaron dos modelos para cada escenario, unidimensional y bidimensional, de esta manera, los parámetros que se describen en el presente numeral corresponden a la información de entrada general que se requiere.

- Modelo digital de elevaciones: considerando que se requiere modelar el vaso del embalse, se toman los DEM recibidos por parte del AMB correspondientes a los levantamientos batimétricos realizados en los años de análisis (numeral 5.1.2).

- Coefficiente de Manning: debido a la que la zona de análisis corresponde únicamente al vaso del embalse y que las modelaciones no inician con este sin lámina de agua sino con

una elevación establecida por los levantamientos batimétricos de 883 m.s.n.m, se toma el valor de 0.035 con base en los estudios previos llevados a cabo en la zona de interés (INTEGRAL, 2012b).

- Curva granulométrica: con el fin de realizar el modelo hidráulico de sedimentos es necesario definir la granulometría de fondo del embalse y la carga de sedimentos a la entrada de este como una serie de tiempo; de esta manera, para la granulometría de fondo del embalse se tomó la consignada en la Figura 5-6, la cual fue previamente seleccionada como granulometría de fondo para el análisis hidrológico desarrollado en HEC-HMS por medio del método de erosión de subcuencas MUSLE (numeral 6.3.4).

En cuanto a la carga de sedimentos como serie de tiempo ingresada al modelo, se generan curvas granulométricas por determinada carga de sedimentos en las cuales se indican los porcentajes por cada tipo de grano. Dicho análisis fue desarrollado para los resultados de *Sediment-Out* (Figura 6-35 y Figura 6-37) obtenidos en el elemento *junction-1* de los modelos de calibración y validación desarrollados en HEC-HMS (numeral 6.2.1) y se encuentran en el Anexo 7.

De acuerdo con la carga de sedimentos por día obtenida en el modelo hidrológico, se ha seleccionado 10 toneladas como valor inferior y 4000 toneladas como valor superior. El valor de correlación entre la carga total y la carga por cada tipo de partícula es en todos los casos superior a 0.80 y las proporciones requeridas como condición de contorno para la modelación hidráulica de sedimentos se muestran en la Tabla 7-1 para el modelo de calibración (2018-2020) y en la Tabla 7-2 para el modelo de validación (2020-2021). Por otra parte, en ambos modelos únicamente se encuentran presentes los tipos de grano nombrados en la Tabla 6-32 y en la Tabla 6-34.

Tabla 7-1. Curvas de clasificación granulométrica como condición de contorno del Modelo 1 (2018-2020)

Carga total (t/día)	10	110	210	310	410	510	610	710	810	910	1010	1110	1210	1310	1410	1510	1610	1710
CLAY	5.1%	10.5%	10.7%	10.8%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%
VFM	0.4%	0.8%	0.8%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
FM	1.2%	2.0%	2.0%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%
MM	2.6%	4.1%	4.1%	4.1%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%
CM	11.4%	14.9%	15.1%	15.1%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%
VFS	14.6%	18.4%	18.6%	18.7%	18.7%	18.7%	18.7%	18.7%	18.7%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%
FS	20.5%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%
MS	21.2%	17.2%	17.1%	17.0%	17.0%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%
CS	10.2%	6.3%	6.1%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%
VCS	7.4%	3.3%	3.2%	3.1%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%
VFG	5.4%	1.3%	1.1%	1.0%	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-2. Curvas de clasificación granulométrica como condición de contorno del Modelo 2 (2020-2021)

Carga total (t/día)	10	110	210	310	410	510	610	710	810	910	1010	1110	1210	1310	1410	1510	1610	1710
CLAY	5.5%	10.5%	10.7%	10.8%	10.8%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%	10.9%
VFM	0.5%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
FM	0.7%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%
MM	2.3%	4.0%	4.1%	4.1%	4.1%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%
CM	11.4%	14.9%	15.1%	15.1%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%
VFS	21.6%	19.0%	18.9%	18.9%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%	18.8%
FS	19.9%	21.1%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%	21.2%
MS	19.7%	17.1%	17.0%	17.0%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%	16.9%
CS	8.7%	6.2%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%
VCS	6.0%	3.2%	3.1%	3.1%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%	3.0%
VFG	4.2%	1.2%	1.1%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%

Carga total (t/día)	2000	3000	4000
CLAY	10.9%	10.9%	10.9%
VFM	0.9%	0.9%	0.9%
FM	2.1%	2.1%	2.1%
MM	4.2%	4.2%	4.2%
CM	15.2%	15.2%	15.2%
VFS	18.8%	18.8%	18.8%
FS	21.2%	21.2%	21.2%
MS	16.9%	16.9%	16.9%
CS	5.9%	5.9%	5.9%
VCS	3.0%	3.0%	3.0%
VFG	0.9%	0.9%	0.9%

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, hasta un valor de carga total diaria de 210 toneladas los porcentajes por tamaño de grano varían; posterior a este, las proporciones se mantienen constantes hasta la carga máxima, mostrando una distribución igual sin importar la carga total de entrada al embalse.

- Vertedero de excesos: debido a que el embalse cuenta con un vertedero tipo Morning Glory, para el modelo en HEC-RAS se utiliza la curva de calibración consignada en la Figura 5-8, la cual fue previamente aplicada en el modelo hidrológico de HEC-HMS. De esta manera, se designa para los modelos unidimensional y bidimensional una estructura lineal con la altura de la presa (891.80 m.s.n.m) y una compuerta con curvas de descarga definidas por el usuario, así, la curva de descarga definida corresponde con la curva de calibración indicada previamente.

- Configuración de parámetros para el modelo hidráulico de sedimentos: con el fin de modelar la carga de sedimentos de entrada en el cuerpo del embalse, además de la información correspondiente a las curvas de clasificación granulométrica mostradas en este numeral y la curva granulométrica de fondo, se requiere también ajustar los parámetros de modelación contenidos dentro de la ventana de entrada de datos de sedimentos. En primera instancia, para las fórmulas correspondientes a la función de transporte y velocidad de caída se usaron las mismas implementadas en el modelo hidrológico de HEC-HMS, partiendo de que se trata del mismo modelo, es decir, se aplicaron *Wilcock* y *Van Rijn* respectivamente.

Por otra parte, la ventana de sedimentos en HEC-RAS cuenta con componentes que permiten acelerar los tiempos de simulación y consideran fenómenos tales como la velocidad de la partícula respecto al caudal de entrada al sistema, la longitud de adaptación y el factor de aceleración morfológica. De estos, los dos últimos representan gran sensibilidad en los resultados obtenidos de acuerdo con los valores dados en cada caso, por lo cual, para el parámetro de longitud de adaptación se selecciona una longitud tal que fuese aproximadamente 6 veces el ancho del cauce promedio; en cuanto al factor de aceleración morfológica, se asignan valores de 1.0, 5.0 y 10.0 para el cambio en el fondo del embalse correspondiente al periodo modelo (*Modelo 1*), a un periodo de 10 años y a un periodo de 20 años respectivamente; para el *Modelo 2* se asignan valores de 1.0, 10.0 y 20.0 para los mismos escenarios mencionados previamente.

7.1.3 Análisis de resultados por modelo

Con el fin de realizar un análisis de los caudales que ingresan al embalse para los periodos de tiempo y escenarios de simulación considerados, obteniendo velocidades en el cuerpo del embalse como indicativo para la distribución de sedimentos, así como la modelización de las cargas de sedimentos obtenidas en HEC-HMS, se ejecutan los modelos de HEC-RAS con los parámetros de entrada mencionados en el numeral anterior, obteniéndose los resultados que se desglosan a lo largo del presente capítulo.

En primera instancia, se lleva a cabo la modelación de caudales incluyendo la presa con la curva de calibración correspondiente al vertedero de excesos; una vez dicho modelo

presente resultados adecuados y coherentes, se procede a la modelación del componente de sedimentos.

7.1.3.1 Modelo 1 – Periodo 2018/2020

Como se indicó previamente, en primera instancia se lleva a cabo el modelo de entrada de caudales, para el cual se obtuvo una lámina estable en el embalse de 885.84 m.s.n.m una vez se alcanza la cota base para la cual inicia el funcionamiento del vertedero de excesos tipo Morning Glory por medio de la curva de calibración ingresada. En el Anexo 8 se muestran los resultados obtenidos a lo largo del eje del río base, observándose valores de velocidad muy bajos que alcanzan máximo de 0.033 m/s a la entrada del embalse y de 0.005 m/s en el cuerpo de este.

Por otra parte, para la modelación de sedimentos y con el fin de observar el cambio en el fondo del embalse para el periodo modelado se asignó un factor de aceleración morfológica de 1.00, obteniéndose los resultados de zonas de sedimentación o deposición mostrados en la Figura 7-1; comparando los resultados obtenidos con las zonas de deposición bajo la misma clasificación en la Figura 8-2, correspondientes a la comparación de levantamientos batimétricos de los años 2018 y 2020, se observan grandes similitudes en cuanto a la distribución de los sedimentos en el cuerpo del embalse y las alturas de estos en dichas ubicaciones, notándose correspondencia de colores en ambas imágenes, lo cual indica un ajuste adecuado entre lo observado y lo modelado.

Las principales diferencias observadas en esta comparativa se encuentran a la entrada del embalse y esto es debido a que, al encontrarse muy cercano a la condición de contorno, la carga de sedimento se acumula en la primera zona de transición, estabilizándose posteriormente en el cuerpo del embalse.

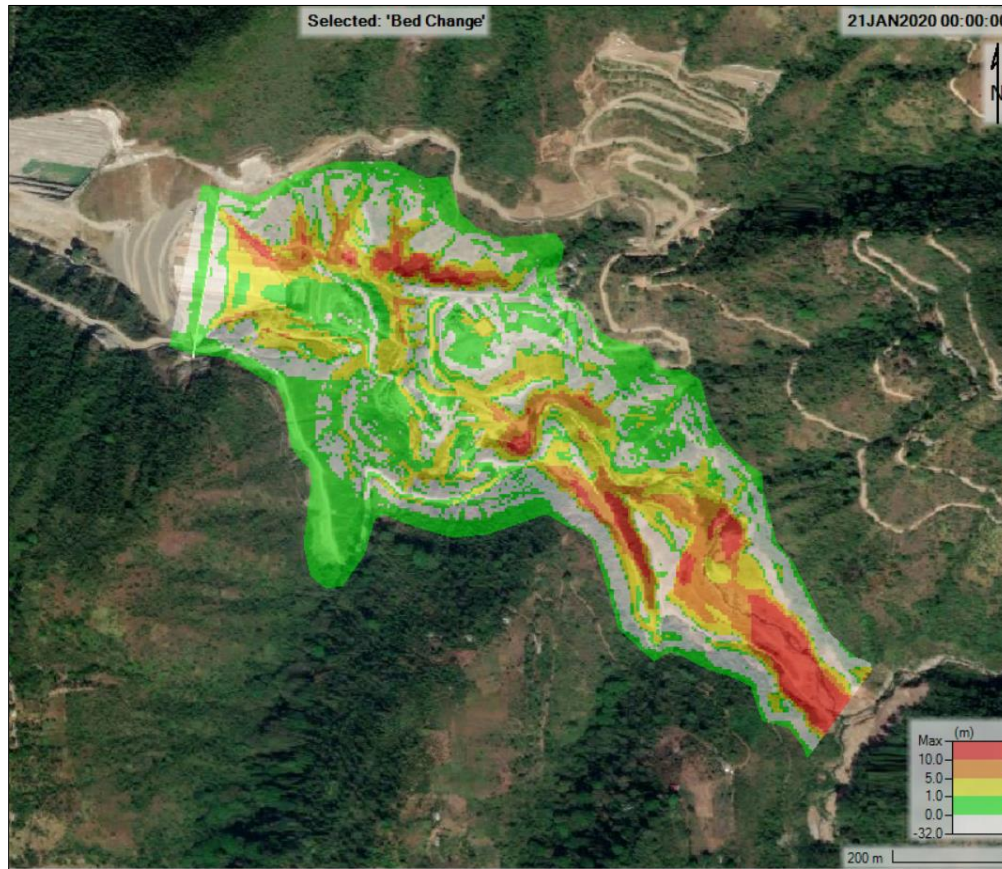


Figura 7-1. Resultados del modelo de sedimentos en HEC-RAS – Modelo 1
Fuente: HEC-RAS 6.3.1 (Tamaño de celda 5x5m)

Tomando en consideración que por medio del factor de aceleración morfológica es posible observar los cambios en el fondo del embalse para periodos mayores a los usados en la modelación, se llevaron a cabo dos modelaciones para factores de 5.0 y 10.0, lo que sería equivalente a observar un estimativo de cambio de fondo para 10 años y 20 años de modelación respectivamente. A partir de esto, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 7-2, en los cuales se obtienen profundidades máximas de deposición de 31 metros y 32 metros para los 10 años y 20 años de simulación respectivamente, sin embargo, estos valores se obtienen principalmente a la entrada del embalse (Figura 7-3) donde previamente se ha concluido que los resultados no son fiables al encontrarse muy cercano a la ubicación de la condición de contorno.

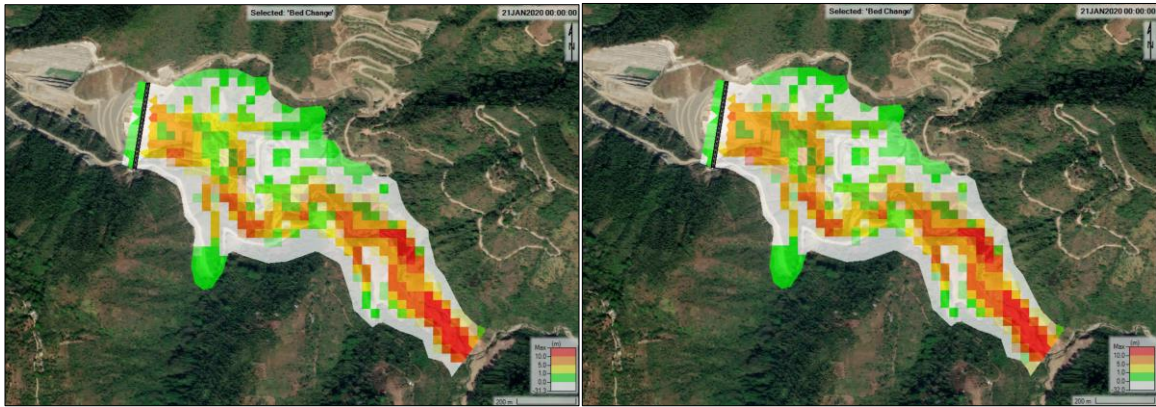


Figura 7-2. Profundidad estimada de deposición de sedimentos en el fondo del embalse para un periodo de 10 años (izquierda) y para un periodo de 20 años (derecha) con base en la batimetría del año 2018 (Tamaño de celda 30x30m)

Fuente: HEC-RAS 6.0.3

Por otra parte, en la Figura 7-3 se observa la profundidad de deposición como cambio en el fondo del embalse para los distintos escenarios simulados, es decir, 2018-2020, 10 años y 20 años. En esta gráfica la abscisa cero corresponde a la entrada del embalse y la abscisa 1600 se encuentra pocos metros aguas arriba de la localización de la presa.

Como se puede observar, las profundidades de deposición para 10 años y 20 años llegan a ser hasta el doble de las registradas y calibradas para el periodo 2018-2020, así mismo, las mayores profundidades de acumulación de sedimentos se encuentran hacia la zona media y especialmente hacia la zona baja del embalse, es decir, cercano a la localización de la presa. En la Figura 7-4 se muestra el perfil de profundidades de deposición en una sección transversal al eje del cauce base localizada en la zona baja de interés, observándose que una clara diferencia entre los 10 y 20 años, presentando mayor acumulación de sedimentos en esta zona.

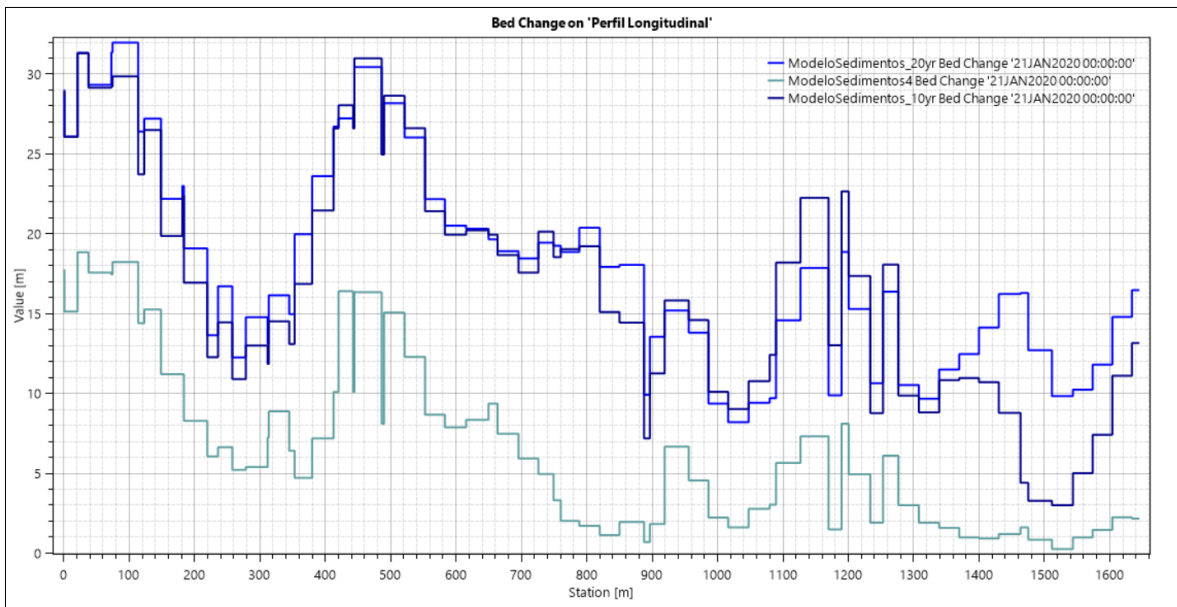


Figura 7-3. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2018-2020, 10 años y 20 años – Modelo 1
Fuente: HEC-RAS 6.0.3

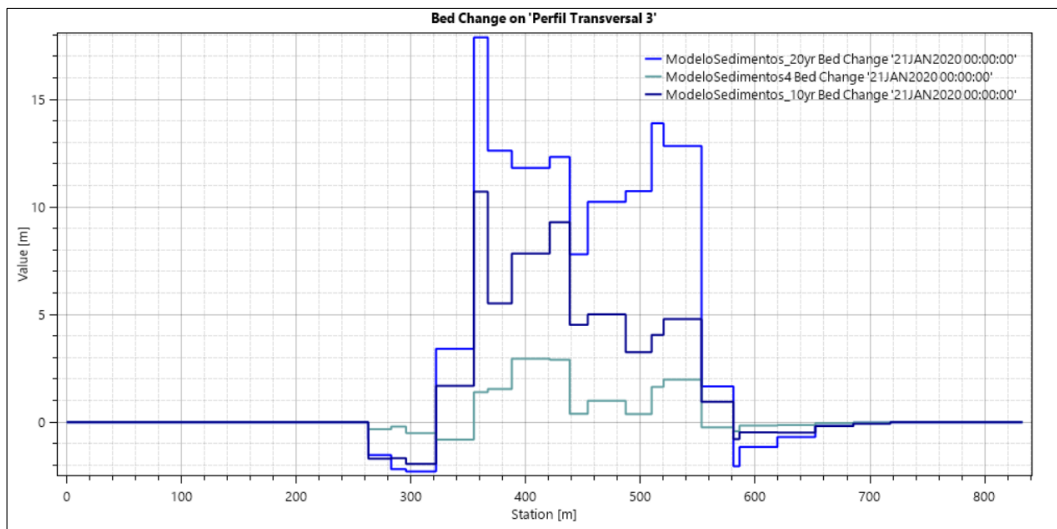


Figura 7-4. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2018-2020, 10 años y 20 años cerca al sitio de presa – Modelo 1
Fuente: HEC-RAS 6.0.3

7.1.3.2 Modelo 2 – Periodo 2020/2021

En cuanto al *Modelo 2*, referido en capítulos anteriores como el modelo de validación, se usa la longitud de adaptación con la cual se estabilizó el modelo de calibración; así mismo, en primera instancia se lleva a cabo la modelación correspondiente a la entrada

de caudales con el fin de obtener un modelo adecuado, de esta manera, la cota máxima a la cual se estabiliza el embalse una vez comienza a trabajar el vertedero Morning glory es de 885.96 m.s.n.m y la gráfica correspondiente sobre el eje del cauce base se encuentra en el Anexo 8.

Posteriormente, se realiza el modelo que incluye la carga de sedimentos a la salida de la cuenca que vierte al embalse calculada por medio de la modelación en HEC-HMS, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 7-5 para el periodo 2020-2021. De acuerdo con esto, se observa mayor área de zonas de deposición de sedimentos, especialmente hacia el costado derecho del embalse, lo cual es congruente y muy similar al comportamiento observado en la Figura 8-4, correspondiente al cambio en el fondo del embalse entre los años 2020 y 2021 a partir de los levantamientos batimétricos llevados a cabo por el AMB.

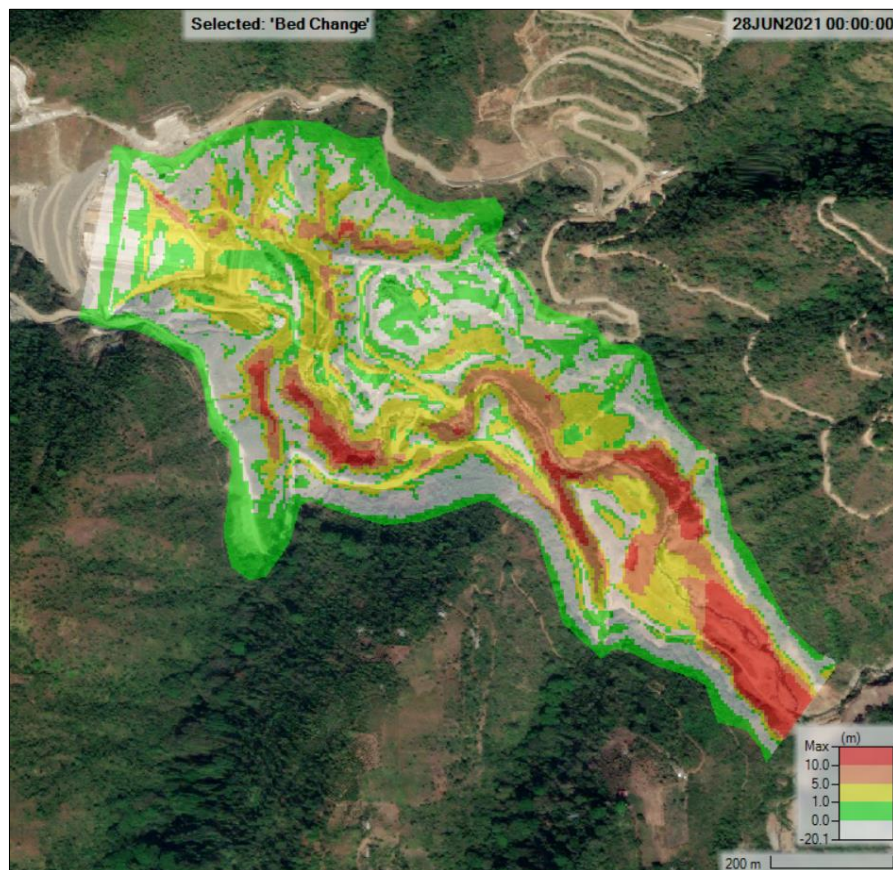


Figura 7-5. Resultados del modelo de sedimentos en HEC-RAS – Modelo 2 (Tamaño de celda 5x5m)
Fuente: HEC-RAS 6.3.1

De igual forma que con el análisis llevado a cabo en el *Modelo 1*, se procede a evaluar el estimativo de cambio en el fondo del embalse para un periodo de 10 años y de 20 años, seleccionando factores morfológicos de 10.0 y 20.0 respectivamente, de acuerdo con el rango del periodo de modelación inicial. En la Figura 7-6 se observan los resultados obtenidos en cada caso, evidenciándose que el estimativo de deposición para las condiciones de hidrograma y carga de sedimentos consideradas en el *Modelo 2* generan mayores profundidades de sedimentos a lo largo de la zona de interés, llegando a tener mayor cantidad de área con profundidades de deposición mayores a 10 metros, comparado con el *Modelo 1* (Figura 7-2).

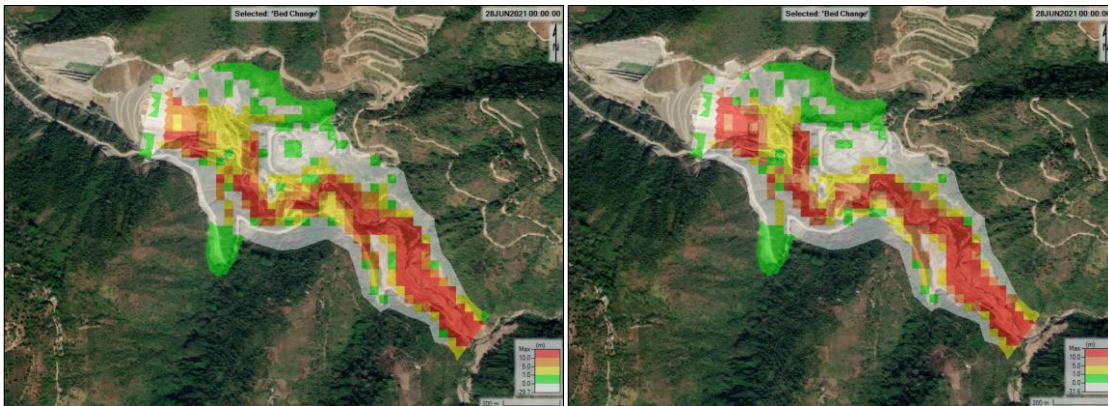


Figura 7-6. Profundidad estimada de deposición de sedimentos en el fondo del embalse para un periodo de 10 años (izquierda) y para un periodo de 20 años (derecha) con base en la batimetría del año 2020 (Tamaño de celda 30x30m)

Fuente: HEC-RAS 6.0.3

Por otra parte, en la se observa el cambio en profundidades de deposición para los escenarios modelados considerándose un patrón similar al observado para el *Modelo 1* (Figura 7-3), sin embargo, en la zona baja del embalse no se presenta mayor diferencia por año

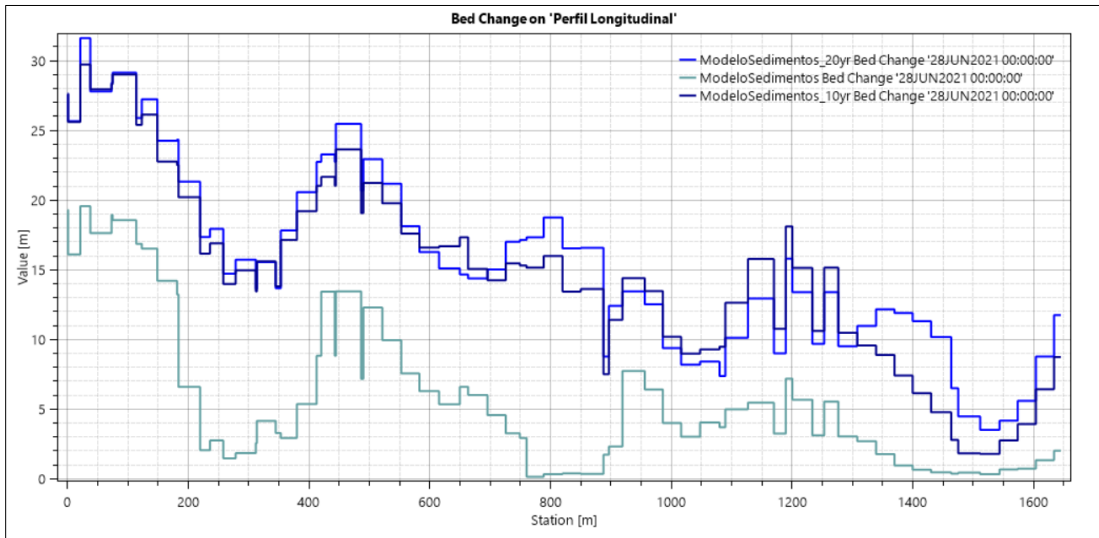


Figura 7-7. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2020-2021, 10 años y 20 años – Modelo 2
Fuente: HEC-RAS 6.0.3

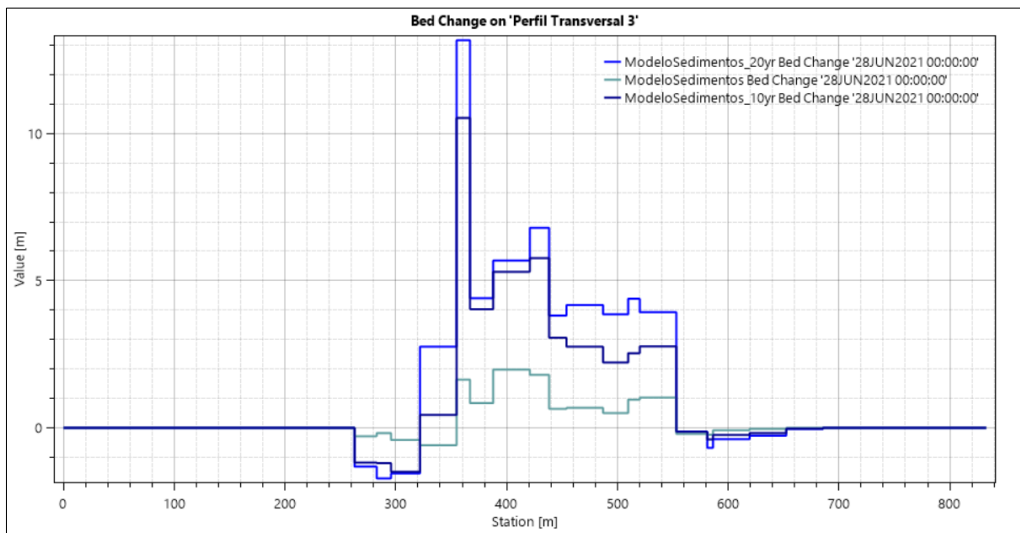


Figura 7-8. Cambio en el fondo del embalse para los escenarios 2020-2021, 10 años y 20 años cerca al sitio de presa – Modelo 2
Fuente: HEC-RAS 6.0.3

8 ANÁLISIS DE LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS

De acuerdo con los levantamientos batimétricos llevados a cabo por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (numeral 5.1.2), en la Figura 8-1 y en la Figura 8-2 se presentan las zonas de erosión y sedimentación para la comparativa de levantamientos correspondientes a los años 2018 y 2020, equivalentes al *Modelo 1* desarrollado y se destacan, dentro de las zonas de sedimentación, aquellas en la que se presentan mayores profundidades.

De acuerdo con lo observado en la Figura 8-1, las áreas de deposición (*Net Gain*) superan las áreas de erosión (*Net Loss*), como se indica en la Tabla 6-30. De esta manera, se observa que las mayores profundidades de sedimentación se presentan en la cola del embalse, alcanzando hasta cinco metros de deposición de sedimentos y en zonas específicas a la entrada del cuerpo del embalse se alcanzan a tener zonas con profundidades de sedimentos de hasta 15 metros (Figura 8-2).

De manera general, se puede concluir que los sedimentos de entrada al embalse constan de presencia considerable de partículas de gran tamaño, tales como gravas y gravillas, razón por la cual se presenta acumulación de estos principalmente en la cola; sin embargo, se puede observar también una distribución uniforme de sedimentos en el cuerpo del embalse, incluyendo su parte más baja, lo cual indica la presencia de partículas finas cuyo trayecto se realiza a partir de las corrientes de densidad o turbidez que se presentan por la entrada de caudales y la dirección del flujo (Gracia Sánchez, 1996).

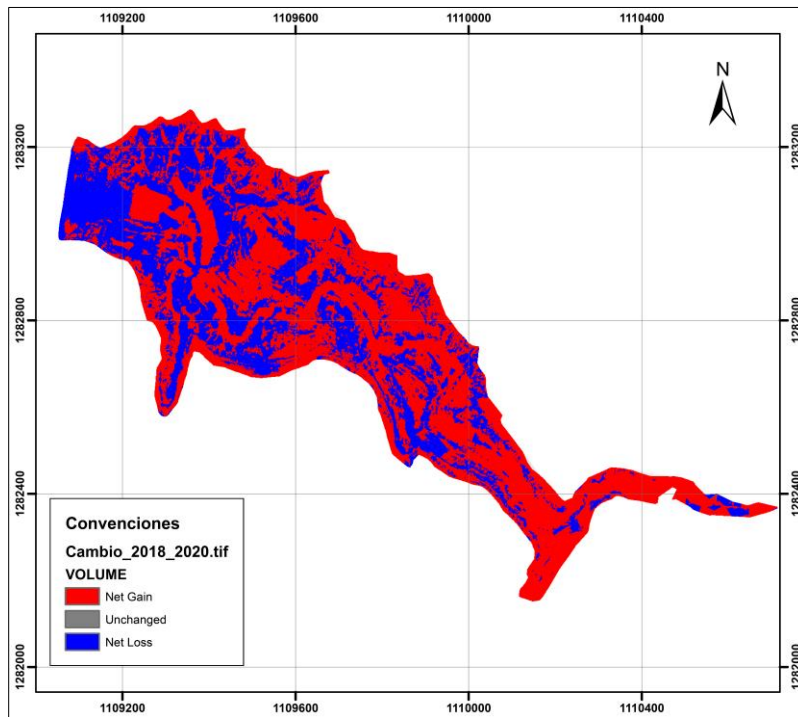


Figura 8-1. Zonas de sedimentación y erosión en el embalse: comparativa 2018-2020
Fuente: Elaboración propia

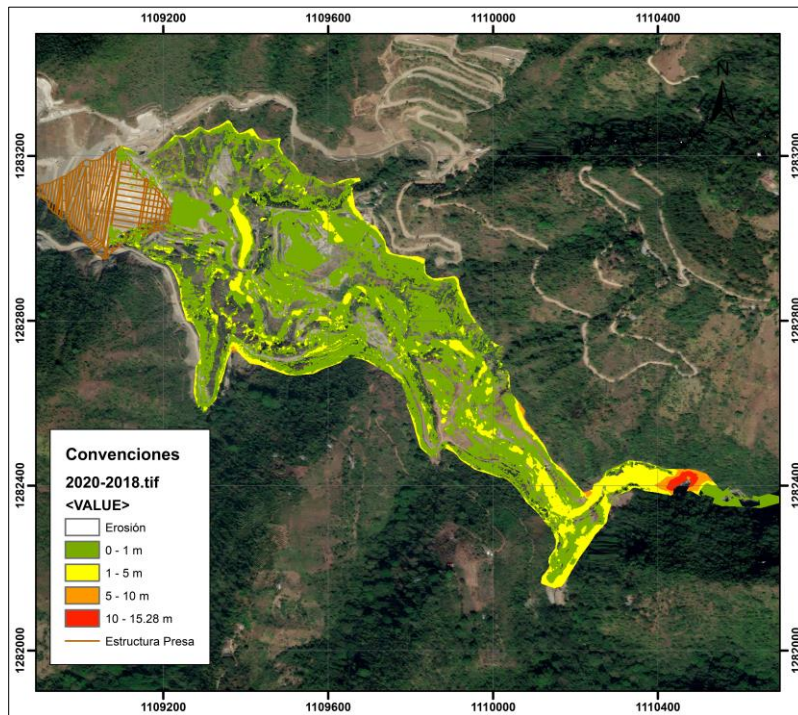


Figura 8-2. Profundidades de zonas de deposición en el cuerpo del embalse: comparativa 2018-2020
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en cuanto al comparativo 2020-2021 que corresponde al *Modelo 2* de validación elaborado, se observa en la Figura 8-3 que las áreas de deposición (*Net Gain*) son considerablemente superiores a las observadas para el periodo 2018-2020, lo cual se corrobora con los volúmenes registrados en la Tabla 6-30, teniéndose un volumen de sedimentación 73.0% mayor para el periodo 2020-2021 en comparación con el periodo 2018-2020 y un volumen de erosión 23.0% menor para el mismo periodo de tiempo.

En la Figura 8-4 se observan las profundidades en las zonas de deposición de sedimentos evidenciándose un comportamiento distinto al del periodo 2018-2020, esto en cuanto a la localización de las zonas de mayor deposición, ya que en este caso se presenta mayor acumulación de sedimentos en la zona baja del cuerpo del embalse, cerca de la estructura de presa y menor acumulación en la zona de la cola. Dicho comportamiento puede estar en gran medida influenciado por cambios en la distribución de sedimentos a la entrada, debido a que la acumulación de estos en la parte baja del embalse supone el ingreso de grandes cantidades de partículas por medio de corrientes de turbidez, es decir, partículas de grano fino.

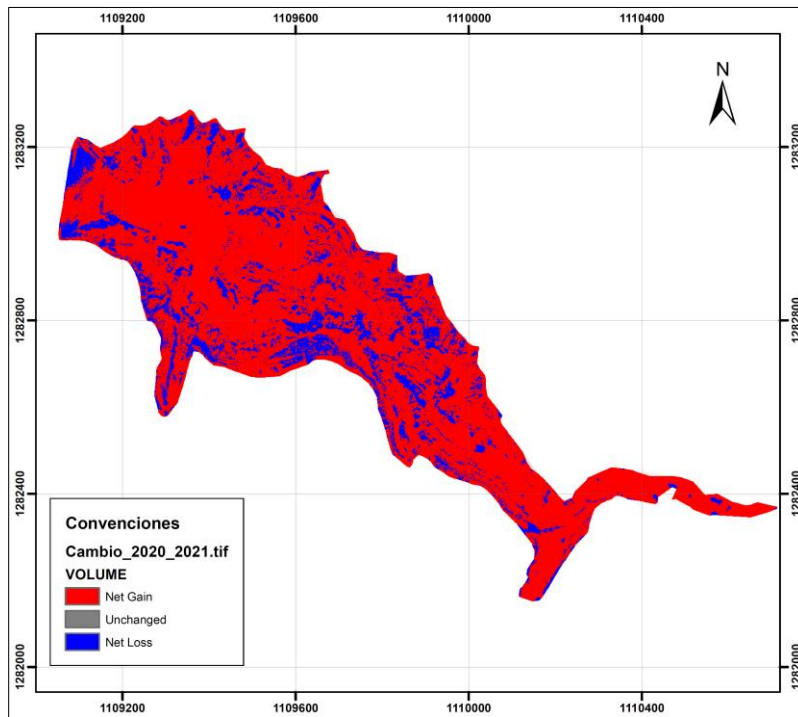


Figura 8-3. Zonas de sedimentación y erosión en el embalse: comparativa 2020-2021
Fuente: Elaboración propia

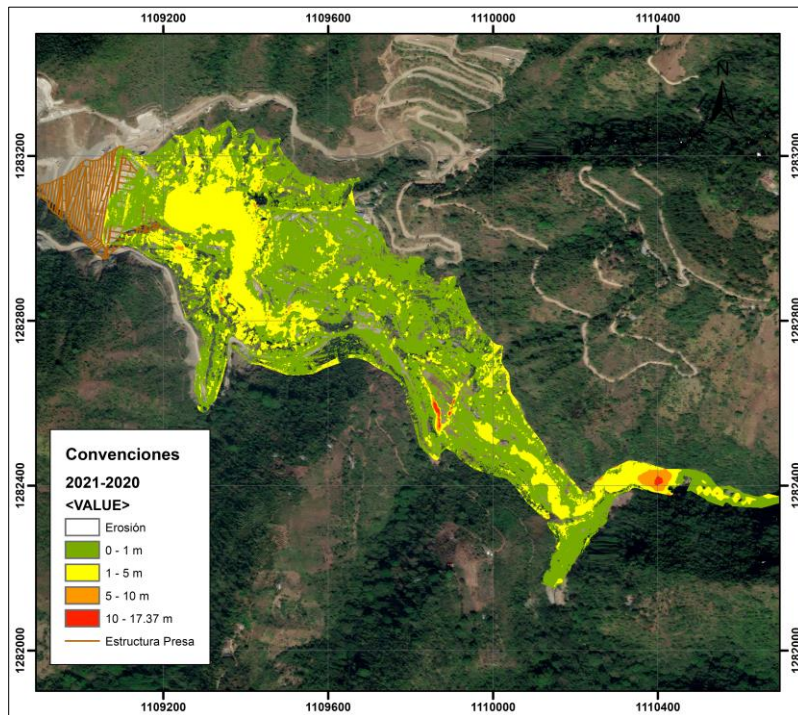


Figura 8-4. Profundidades de zonas de deposición en el cuerpo del embalse: comparativa 2020-2021
Fuente: Elaboración propia

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La recopilación de la información se hizo a partir de las bases de datos públicas tales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para la obtención de información meteorológica, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para los mapas de usos del suelo y clasificación de tierras por vocación y EarthData Search-NASA para los modelos digitales de elevación; sin embargo, la información con mayor nivel de detalle fue obtenida por parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), lo cual fue clave para el desarrollo del presente trabajo y permitió la elaboración de los análisis que aquí se presentan. Debido a esto último, de toda la información recibida se destaca que la correspondiente a las curvas granulométricas para el desarrollo del modelo de sedimentos se encuentra limitada a las muestras tomadas previo a la ejecución del embalse, es decir, no se contó con información reciente al respecto, quedando como recomendación para futuros análisis evaluar la posibilidad y viabilidad en la toma de muestras para granulometrías en el cauce principal, sus afluentes y la superficie del terreno por el cual discurrirá el flujo de escorrentía, con el fin de caracterizar la conformación del suelo por subcuencas.

- Considerando los levantamientos batimétricos realizados por el AMB y los años en que fueron llevados a cabo, se requirió la implementación de un modelo hidrológico de simulación continua en el software HEC-HMS, por medio del cual se obtuviesen los caudales a la salida de la cuenca que vierte al embalse Tona teniendo como parámetros de entrada el modelo de elevaciones del terreno, la información pluviométrica para el periodo de tiempo entre batimetrías y los valores de evapotranspiración mensual por subcuenca. Para esto, se implementó en las subcuencas un modelo de pérdidas que lleva por nombre SMA (Soil Moisture Accounting), el cual permite trabajar con un esquema constitutivo de cinco capas que representan el tránsito de la lluvia desde su interceptación en las hojas de la vegetación hasta su percolación a las capas más profundas del suelo permitiendo la recarga por flujo base a los cauces naturales. Debido a la complejidad del sistema, este modelo requiere gran cantidad de parámetros, los cuales se obtuvieron de fuentes propias como los mapas de suelo, pero en su mayoría se obtuvieron de literatura. Estos últimos representan alta incertidumbre para los resultados del modelo hidrológico

debido a que en Colombia no se encontraron suficientes estudios que contengan información de campo al respecto, ya que, en general, se basan de tablas estandarizadas de estudios externos al país. De esta manera, en la calibración del modelo hidrológico se podría lograr un mejor ajuste al contar con datos característicos por subcuencas a partir de información tomada directamente de campo.

- De acuerdo con la información proporcionada por AMB correspondiente a los caudales medidos sobre el río Tona, fue posible llevar a cabo la calibración de los datos. De esta manera, se definió la información correspondiente a los años 2018-2020 como la seleccionada para calibrar la cuenca y el embalse y la información del año 2020-2021 se seleccionó para validar los modelos previamente calibrados. Dicha calibración fue desarrollada con base en cuatro parámetros estadísticos que fueron NSE, PBIAS, RMSE Stdev y R^2 , para los cuales se obtuvieron valores de 0.70, 0.52, 0.34 y 0.55 respectivamente, siendo el parámetro estadístico PBIAS el único que no se encontró dentro del rango satisfactorio de resultados, por lo cual, se consideraron los resultados obtenidos como un ajuste adecuado. En cuanto al modelo de validación, el ajuste entre los caudales observados y los caudales simulados obtuvo valores satisfactorios únicamente para el estadístico PBIAS.

- Teniendo en cuenta que, a partir de los parámetros estadísticos, no es posible clasificar los resultados de la calibración y validación como adecuados en su totalidad, se realizó un análisis por medio de las curvas de duración de caudal, las cuales consisten en graficar los caudales tanto simulados como observados contra el porcentaje de tiempo que estos son excedidos. De acuerdo con lo obtenido, las gráficas se asemejan considerablemente en su forma, indicando que la proporción de caudales presentados en determinados periodos de tiempos se asemeja entre lo observado y lo simulado; así mismo, se promediaron los valores de caudal obtenidos anualmente en el modelo de calibración y de validación, obteniendo diferencias entre los rangos de 0.60% y 20.0%, considerándose con esto que la calibración del modelo se realizó bajo parámetros que permiten representar de manera adecuada y ajustada las condiciones reales de la cuenca al obtenerse baja diferencia entre los hidrogramas de salida modelados y los datos de caudales tomados en el sitio.

- A partir de los modelos hidrológicos llevados a cabo en HEC-HMS, se obtuvo para el periodo 2018-2020 que las subcuencas con aporte de escorrentía superficial fueron las correspondientes a la Quebrada Arnania y la cuenca media del río Tona con caudales que varían entre 0.03 m³/s y 2.00 m³/s; en cuanto al modelo del periodo 2020-2021, las subcuencas con escorrentía superficial fueron las correspondientes a las Quebradas La Locura y Arnania y la cuenca media del río Tona, con caudales que varían entre 0.05 m³/s. De esta manera, se obtuvo que no todas las subcuencas que conforman la cuenca del río Tona presentan caudales de escorrentía superficial, siendo de gran peso el caudal de entrada al río a través del flujo base debido a los procesos de infiltración y percolación considerados en el modelo SMA (Soil Moisture Accounting). Dichos resultados deberán corroborarse a partir del uso de información más detallada en los modelos hidrológicos o por medio de visitas de campo.

- Con el fin de obtener la carga de sedimentos a la salida de la cuenca a partir de la composición granulométrica del suelo y los flujos de escorrentía superficial, se seleccionaron los métodos correspondientes a la producción de sedimentos en las subcuencas (MUSLE) y el transporte y arrastre de este en los cauces identificados (Volume Ratio). De esta manera, considerando la carga de sedimentos de entrada al embalse y aplicando el método "Reservoir Capacity Method" fue posible observar las curvas de Elevación-Almacenamiento para el último día de modelado en cada escenario y esta pudo compararse con las curvas recibidas de los levantamientos batimétricos llevados a cabo en 2020 y 2021, encontrándose una diferencia máxima de 8.20% entre los volúmenes calculados para los distintos niveles de interés, tomándose con esto como válidos los resultados del modelo de sedimentos de HEC-HMS para la cuenca de estudio.

- La modelación hidráulica permitió observar la distribución de sedimentos en el cuerpo del embalse a partir del sedígrafo de entrada y el hidrograma obtenido de la calibración realizada previamente, identificándose las zonas de mayor concentración de sedimentos y comparándose estas con lo obtenido de las batimetrías realizadas presentando comportamiento similar en cuando a la localización de sedimentos por rango de profundidades de deposición. A partir de esto, se ejecutaron estimaciones de profundidades de acumulación de sedimentos para escenarios posibles a 10 y 20 años

con base en la información de entrada de los años 2018 y 2020, obteniendo la identificación de aquellas zonas donde se prevé mayor acumulación de estos.

- De acuerdo con lo observado en los modelos hidráulicos, se presentan profundidades de deposición de sedimentos altas en la entrada del embalse, esto debido a que la localización de la condición de contorno correspondiente a la entrada de caudales y carga de sedimentos permite la acumulación de estos en la primera zona de transición, estabilizándose posteriormente en el cuerpo del embalse. Por lo cual, se recomienda para futuras batimetrías considerar el levantamiento topográfico hasta 300 metros aguas arriba de la entrada del embalse, con el fin de lograr un mejor tránsito y estabilización de condiciones de entrada al modelo, así como una mejor estimación de volúmenes de erosión y deposición en el cuerpo del embalse.

- El estudio aquí elaborado permite un análisis de sedimentos tanto en la cuenca del río Tona que vierte al embalse, como al cuerpo del embalse mismo, identificando las subcuencas que representan mayores niveles de escorrentía superficial y, por consiguiente, mayor aportación de sedimentos al embalse con el fin de que se puedan evaluar, en otros estudios, las actuaciones a realizar para su mitigación; por otra parte, fue posible identificar la proporción en volúmenes de sedimentos generados por la cuenca caracterizando la carga en los flujos de entrada y, a partir de la modelación hidráulica, fue posible estimar para escenarios futuros las profundidades de deposición que se podrían presentar a partir de un factor de aceleración morfológica presente en HEC-RAS, permitiendo identificar aquellas zonas que tendrían mayor afectación a partir de la dinámica fluvial calibrada con las batimetrías realizadas por el AMB.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda la instalación de al menos una estación climatológica más en la cuenca del río Tona, cuya altura contraste la altura a la cual se encuentra localizada la estación *Berlín* que supera los 3000 m.s.n.m, esto con el fin de poder generar relaciones temperatura-altitud y poder obtener valores de temperaturas mínimas y máximas discretizadas por subcuenca, con lo cual, los valores de evapotranspiración utilizados en el modelo hidrológico no serían iguales en toda el área,

generando resultados que se adecuen más a las condiciones reales de la subcuenca y permitan complementar el proceso de calibración realizado.

- Si bien se contó con mediciones de caudal de entrada al embalse a través del río Tona, la calibración de la cuenca en su totalidad se basó en un solo punto de análisis localizado en la cola del embalse, por lo cual, el contar con estaciones de medición de caudal en determinados puntos a lo largo del río Tona, especialmente en aquellos que correspondan a las principales Quebradas afluentes, permitiría analizar el tránsito de crecientes y realizar la calibración particularizada para cada uno de dichos nodos, permitiendo identificar diferencia de parámetros correspondientes a los métodos aplicados en el modelo hidrológico como el caso del SMA.

- Los modelos aquí elaborados y los análisis llevados a cabo corresponden a un trabajo académico que permite el estudio de los sedimentos en el embalse Tona a partir de modelos hidrológicos a largo plazo y modelos hidráulicos de simulación bidimensional, los cuales constituyen una sólida fuente de información para analizar los sedimentos presentes en el embalse y evaluar los métodos de extracción de estos en futuros eventos o, a partir de los eventos ya calibrados y validados en este estudio. Es importante destacar que, en ambos casos, se observaron buenos ajustes evaluados por distintos parámetros, lo que confirma la validez y eficacia de los modelos propuestos; por lo tanto, se sugiere continuar con la implementación y desarrollo de estos en futuras investigaciones en el embalse Tona. Por otra parte, se recomienda la futura y continua alimentación de los modelos a partir de información base más detallada sugerida en incisos anteriores, con el fin de verificar los parámetros asignados para los modelos de calibración y validación desarrollados.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeyda, A. (2014). *Simulación a escala reducida del Embalse de Bucaramanga* [Tesis de Maestría]. CNEGP SPANCOLD.
- Aparicio Mijares, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Primera Ed). Editorial LIMUSA.
- Bashar, K. E., & Zaki, A. F. (2005). SMA Based Continuous Hydrologic Simulation of the Blue Nile. *International Conference of UNESCO Flanders FUST FRIEND/NILE Project*, 1–10.
- BATIMETRÍA. (2019). *Informe de levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Bucaramanga 2018*. 1–64.
- BATIMETRÍA. (2020). *Informe de levantamiento topográfico y batimétrico del embalse 2020*. 1–35.
- BATIMETRÍA S.A.S. (2021). *Informe de levantamiento topográfico y batimétrico del embalse 2021*. 1–31.
- Bennett, T. H., & Peters, J. C. (2000). Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *ASCE Water Resources*.
- Chea, S., & Oeurng, C. (2017). Flow simulation in an ungauged catchment of Tonle Sap Lake Basin in Cambodia: Application of the HEC-HMS model. *Water Utility Journal*, 17(February), 3–17.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2000). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 119–124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2009\)135:1\(119\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2009)135:1(119))

- Fleming, M., & Neary, V. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 175–183. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2004\)9:3\(175\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2004)9:3(175))
- Gracia Sánchez, J. (1996). Sedimentación en embalses. In *Manual de Ingeniería de Ríos* (p. 54).
- Gupta, Vijai, H., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). *Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration*. 135–143.
- Gwapedza, D., Slaughter, A., Hughes, D., & Mantel, S. (2018). Regionalising MUSLE factors for application to a data-scarce catchment. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 377(2015), 19–24. <https://doi.org/10.5194/piahs-377-19-2018>
- Holberg, J. (2015). Downward model development of the soil moisture accounting loss method in HEC-HMS: Revelations concerning the soil profile. *Purdue University*. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/501
- IGAC. (2021). *Datos Abiertos - GEOPORTAL*. <https://geoportal.igac.gov.co/>
- INTEGRAL. (2011a). *Memorando Técnico 06 - Presa*. 99.
- INTEGRAL. (2011b). *Memorando Técnico 11 - Modelo Hidráulico*. 85.
- INTEGRAL. (2012a). *Memorando Técnico 02 – Geología, Geotecnia, Sísmica y Fuente de Materiales*. 175.
- INTEGRAL. (2012b). *Memorando Técnico 03 - Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse*. 75.
- INTEGRAL. (2012c). *Memorando Técnico 09 - Vertedero*. 71.
- INTEGRAL. (2012d). *Memorias de cálculo - Vertedero*. 117.
- INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. 0–10.
- Jain, M. K., & Das, D. (2010). Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and remote sensing. *Water*

Resources Management, 24(10), 2091–2112. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9540-0>

Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras. (2019). *NORMA 5.2-IC de la Instrucción de carreteras*.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería* (Primera Ed). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. 50(3), 885–900.

Muller, P.-M. (1948). Formulas for Bed-Load Transport. *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1002/esp.3715>

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models - Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(1970), 282–290.

Pak, Jay. (2020). *Case Study: Reservoir Volume Reduction Analyses for Tuttle Creek, Kanopolis and Perry Reservoirs*.

Pan, F., McKane, R. B., & Stieglitz, M. (2012). Identification of optimal soil hydraulic functions and parameters for predicting soil moisture. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 723–737. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.674642>

Rawls, W. J., Brakensiek, C. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions - American Society of Agricultural Engineers*, 25(5), 1316–1318. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>

R.HydroTools. (2021). *Herramientas Computacionales para Análisis Hidrológico e Hidráulico*. <https://github.com/rcfdtools>

Roy, D., Begam, S., Ghosh, S., & Jana, S. (2013). Calibration and validation of HEC-HMS model for a river basin in eastern India. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(1), 40–56.

- Salas, J. D. (2011). *Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga (Río Tona)*. 2.
- Samady, M. K. (2017). Continuous Hydrologic Modeling for Analyzing the Effects of Drought on the Lower Colorado Texas. *Michigan Technological University*, 70.
- Singh, W. R., & Jain, M. K. (2015). Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 4(4), 398–408. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0404011>
- Subramanya, K. (2008). *Engineering hydrology. Third Edn.*
- United States Department of Agriculture. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. *Soil Conservation, Technical Release 55 (TR-55)*, 164. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology+for+Small+watersheds#1>
- US Army Corps of Engineers. (2021a). *HEC-HMS User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.10>
- US Army Corps of Engineers. (2021b). *HEC-RAS 1D Sediment Transport*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rassed1d>
- Vélez, J., & Botero, A. (2010). Estimacion Del Tiempo Concentracion Y De Rezago En La Cuenca Experimental Urbana De La Quebrada San Luis , Manizales. *Dyna*, 165, 58–71. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640>
- Wilcock, P. R., Asce, M., & Crowe, J. C. (2003). *Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment*. *Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment*. 9429(February 2015). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129)
- Williams, J. R. (1975). Sediment-Yield Prediction with Universal Equation using Run-Off Energy Factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources* (pp. 244–252). https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=E5AXX-DuLB8C&oi=fnd&pg=PA244&ots=ZIWs0P5Xyc&sig=0GjX3Bxj59qlqPzs7VG15EWif8Y&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

11 ANEXOS