

**ESTIMACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN EN UN EMBALSE USANDO EL
MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS**

PRESENTADO POR

CAMILA ANDREA ADARME OREJUELA

ID: 000257433

JÉSSICA TERESA RAMÍREZ VILLARREAL

ID: 000241094

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

**ESTIMACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN EN UN EMBALSE USANDO EL
MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS**

CAMILA ANDREA ADARME OREJUELA

ID: 000257433

JÉSSICA TERESA RAMÍREZ VILLARREAL

ID: 000241094

DIRECTORA ACADÉMICA

Ph D. SANDRA ROCÍO VILLAMIZAR AMAYA

Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

PÁGINA DE FIRMAS

Firma Presidente del Jurado

Firma Jurado N°1

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Agosto de 2018

DEDICATORIA

A mis papás Martha Orejuela Borrero y Luis Adarme Ramírez por su amor y esfuerzo incondicional, por motivarme a ser cada día una mejor persona, por mostrarme el valor de las cosas para aprender a valorarlas, por apoyarme en cada decisión y por enseñarme que todo lo que una vez se sueña, se puede lograr.

A mi hermano Julian Adarme Orejuela por estar siempre para mí apoyándome y cuidándome en cada ciclo de vida, por ser un gran ejemplo de vida y por enseñarme que las personas se pueden superar y salir adelante.

A mí querida abuela Rosmira Borrero por mantener su fe intacta y creer en mí, por ser tan amorosa y estar pendiente de mí en todo momento.

Camila Andrea Adarme Orejuela

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, por ser mi fortaleza a lo largo de estos años.

A mi madre Lucila Villarreal Rojas.

Por ser mi apoyo incondicional, por ser mi motivación día tras día, por sus consejos y ejemplos que me han guiado para formarme como persona y especialmente por su compañía y gran amor.

A mi padre Mauricio Ramírez Guevara.

Por ser mi motor y mi fortaleza para salir a delante día a día, por haber confiado en mí y en mi futuro, por ser mi ejemplo de superación y principalmente por su apoyo y amor incondicional.

A mi hermano Andrés Mauricio Ramírez Villarreal.

Por ser mi compañía, mi mejor amigo, por su apoyo y mi gran motivación.

A Ferney Garcia Neira.

Por estar a mi lado a lo largo de todo este proyecto, por sus conocimientos y su gran aporte para la culminación de esta meta.

Jessica Teresa Ramírez Villarreal.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestra guía a lo largo de la vida y por permitirnos culminar esta importante etapa académica.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga por la información compartida sin la cual no hubiese sido posible realizar el estudio.

A la Ingeniera PhD. Sandra Rocío Villamizar Amaya por hacernos partícipe de este gran reto, por todos los conocimientos otorgados, por la paciencia, entrega y calma brindada, por ser una docente y persona idónea.

Al Ingeniero PhD. Sergio Manuel Pineda Vargas por el apoyo y los conocimientos compartidos durante el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. Propiedades y clasificación de sedimentos	4
3.2. Transporte de sedimentos.....	6
3.3. Información general de la modelación numérica unidimensional de la sedimentación en un embalse	7
4. DATOS IMPORTANTES DEL SITIO DE ESTUDIO.....	14
4.1. Caracterización del embalse.....	14
4.2. Sedimentos	15
4.3. Geología de la zona del embalse.....	16
4.4. Topografía.....	16
4.4.1. Levantamiento topográfico del área del embalse:	16
4.4.2. Secciones transversales paralelas a la presa.	17
5. METODOLOGÍA.....	18
5.1. Ingreso de la geometría del embalse a HEC-RAS	19
5.2. Modelamiento hidráulico.....	26
5.2.1. Flujo permanente.....	26
5.2.2. Flujo no permanente.	27
5.2.3. Flujo cuasi permanente.....	28

5.3. Modelamiento hidráulico de transporte de sedimentos	31
5.3.1. Sedimentos	31
5.3.2. Introducción de datos al software.....	33
5.3.3. Condiciones de borde para sedimentos (Boundary Conditions).....	36
5.3.4. Selección de la ecuación de función de transporte	37
5.4. Escenarios de sedimentación para el embalse	38
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
6.1. Resultados de la modelación de flujo no permanente.....	42
6.2. Análisis de sedimentación para escenarios base.	47
6.3. Análisis de sedimentación para escenarios futuros.....	51
6.3.1. RCP 4.5 (Escenarios futuros 1, 2, y 3).....	51
6.3.2. RCP 8.5 (Escenarios futuros 4, 5, y 6).....	57
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Vista en Planta del área aferente al embalse de Bucaramanga.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. Curva de Duración de Caudal para la estación Puente Tona.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3. Caracterización de los sedimentos para la cuenca del río Tona.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4. Vista en Planta del Levantamiento Topográfico del área del embalse de Bucaramanga.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5. Muestra de Secciones Transversales para la parte alta, media y baja del proyecto.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6. Secciones Transversales para casos simplificados.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Eje Creado en HEC-RAS.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8. Perfiles longitudinales para la modelación de flujo permanente, casos I y II.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9. Secciones transversales usadas para la modelación hidráulica y de sedimentos del proyecto.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10. Muestra de los datos medidos para el ingreso de información geométrica a HEC-RAS.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11. Ejemplo de Ingreso de Sección transversal N°. 9 junto con sus propiedades.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Condiciones de frontera para la modelación de flujo no permanente.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13. Gradación del lecho introducida a HEC - RAS.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14. Sección transversal 57 con resultados de la modelación de sedimentos</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15. Datos de la sección transversal 57 para las etapas inicial y final de la modelación.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16. Modelo del embalse en HEC-RAS.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 17. Máximo nivel del flujo para la sección 1.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 18. Máximo nivel del flujo para la sección 33.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Máximo nivel del flujo para la sección 67.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 1.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 21. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 33.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 67.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Perfil longitudinal para flujo no permanente (1989-2002).</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Tabla de resultados para la sección 1.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Sección 33 Tabla de resultados para la sección 33.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Tabla de resultados para la sección 67.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 27. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 1.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 1.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 3.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 3.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 2.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 2.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 33. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 1.</i>	<i>52</i>

<i>Figura 34. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 35. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 3.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 36. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 1.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 37. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 2.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 38. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 3.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 39. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 1.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 40. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 2.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 41. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 2.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 42. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 4.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 43. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 44. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 6.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 45. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 4.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 46. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 47. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 48. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 4.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 49. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 5.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 50. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 6.</i>	<i>62</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tablas de cotas y distancias para secciones transversales de los casos simplificados.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Rangos de Incrementos Computacionales.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Distribución Granulométrica de los sedimentos para entrada de datos a HEC-RAS.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4. Curva Granulométrica ejemplo HEC-RAS.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 5. Escenarios modelados para el embalse.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6. Volumen total de sedimentos para escenarios futuros 1, 2 y 3.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 7. Volumen total de sedimentos para escenarios futuros 4, 5 y 6.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 8. Porcentaje de reducción de la capacidad volumétrica del embalse por efectos de sedimentación</i>	<i>63</i>

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTIMACIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN EN UN EMBALSE USANDO EL MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS

AUTOR(ES): CAMILA ANDREA ADARME OREJUELA
JESSICA TERESA RAMIREZ VILLARREAL

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. SANDRA ROCÌO VILLAMIZAR AMAYA PhD

RESUMEN

La modelación hidráulica y de transporte de sedimentos puede ser usada para evaluar la vida útil de un embalse y, por consiguiente, apoyar las actividades de planificación del manejo de su cuenca aferente con el propósito de optimizar la operatividad de este. Este documento muestra el trabajo desarrollado en el marco de la modelación hidráulica y de sedimentos del embalse de Bucaramanga (cuenca del río Tona) usando un modelo unidimensional con la herramienta HEC-RAS 5.0.3. El modelo se estructuró a partir de 67 secciones transversales que representan la geometría del área embalsada. La modelación se realizó para escenarios presentes y futuros de caudal y sedimentos en condiciones de flujo cuasi-permanente. Los resultados de la modelación permitieron obtener estimativos de la reducción potencial de la capacidad volumétrica del embalse. Adicionalmente, en el marco del trabajo realizado, se desarrolló un manual que se espera sirva a nuevos usuarios de la herramienta a reducir su curva de aprendizaje. El modelo y sus resultados se podrían beneficiar a futuro por datos de campo que permitan mejorar la parametrización de este y su calibración.

PALABRAS CLAVE:

HEC-RAS, modelación hidráulica, transporte de sedimentos, escenarios.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ESTIMATION OF A RESERVOIR'S SEDIMENTATION USING THE HEC-RAS HYDRAULIC MODEL

AUTHOR(S): CAMILA ANDREA ADARME OREJUELA
JESSICA TERESA RAMIREZ VILLARREAL

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. SANDRA ROCÍO VILLAMIZAR AMAYA PhD

ABSTRACT

Hydraulic and sediment transport modelling can be used to evaluate the lifespan of a reservoir, and its results may be used to support the planification and management practices of its afferent basin in order to optimize its operation. This document shows the work developed in the framework of the hydraulic and sediment modeling of the Bucaramanga reservoir (Tona river basin) using a one-dimensional model with the tool HEC-RAS 5.0.3. The model was structured from 67 cross sections that represent the geometry of the impounded area. The modeling effort was performed for present and future discharge and sediment scenarios under quasi-permanent flow conditions. The results allowed to obtain estimates of the potential reduction of the volumetric capacity of the reservoir. Additionally, a user manual was developed which is expected to help new users of the software to reduce their learning curve. The model and its results could benefit in the future by field data that would improve the model's parameterization and its calibration.

KEYWORDS:

HEC-RAS, hydraulic modelling, sediment transport, scenarios

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de embalses en Colombia ha sido de gran importancia para suplir necesidades de suministro de agua y generación eléctrica. En el caso del departamento de Santander, en los últimos años se finalizó la construcción del embalse de Sogamoso, diseñado para la generación de energía, y el embalse de Bucaramanga, con la función de suministrar agua potable a sectores del área metropolitana de Bucaramanga. Es importante tener en cuenta que la sedimentación en embalses puede reducir significativamente la vida útil de los mismos ya que ésta depende de la cantidad de sedimentos que se retienen (volumen muerto). Varias herramientas computacionales permiten llevar a cabo la modelación de transporte de sedimentos en cuerpos de agua. Para el caso de los embalses, estas herramientas permiten analizar el comportamiento de los sedimentos en un lapso de tiempo determinado, lo que conlleva a obtener resultados sobre su pérdida de capacidad por acumulación de sedimentos (reducción del volumen útil), lo cual infiere directamente en la factibilidad técnica y económica del proyecto [1].

Se entiende como sedimentos a aquellas partículas principalmente provenientes de las rocas y el suelo, que son transportados por las corrientes de agua y por los vientos para finalmente depositarse sobre los cauces [2]. Los sedimentos que llegan a un embalse dependen de diversos factores (hidrológicos, climáticos, operativos y geológicos) de las cuencas aferentes. Adicionalmente, elementos como la geometría, la existencia de estratificación térmica, y las tipologías especiales de embalse, entre otros, tienen un impacto directo de mayor o menor grado en el proceso de sedimentación [3].

Este documento se ocupa particularmente del análisis de los procesos de sedimentación en el embalse del río Tona (Embalse de Bucaramanga) basado en datos provistos por los manejadores del recurso hídrico y usando la herramienta de modelación HEC – RAS 5.0.3 (HEC-RAS). La herramienta permite realizar cálculos unidimensionales de enrutamiento hidráulico y de sedimentos en cuerpos de agua. Este análisis nos permite determinar la cantidad de sedimentos almacenados en el embalse y, por tanto, obtener estimativos de la vida útil del mismo tanto para condiciones presentes como escenarios futuros de uso del suelo y climatología de la cuenca aferente. En nuestro caso, los resultados obtenidos pueden servir como soporte a los manejadores del recurso para la toma de decisiones sobre

prácticas de manejo del uso del suelo en la cuenca aferente a la luz de las posibles consecuencias que se puedan evidenciar por la modelación hidráulica y de sedimentos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Estimar la sedimentación producida en el embalse de Bucaramanga, mediante una modelación hidráulica del transporte de los sedimentos que entran al mismo, como consecuencia de diferentes escenarios de uso del suelo y climatología en su cuenca aferente.

2.2. Objetivos específicos

- Implementar un modelo hidráulico para el embalse de Bucaramanga, mediante el uso del software HEC-RAS.
- Incorporar la modelación del transporte de sedimentos para el embalse utilizando datos de entrada de caudal, concentración de sedimentos y geometría.
- Determinar los volúmenes de sedimentos acumulados en el embalse para escenarios de flujo de agua determinados por diferentes tipos de uso del suelo y climatología en la cuenca aferente.

3. MARCO TEÓRICO

La modelación hidráulica con herramientas computacionales (para nuestro caso, el software HEC-RAS) requiere una fundamentación teórica que permita al usuario tomar decisiones sobre los diferentes procesos y/o metodologías para obtener resultados apropiados de acuerdo con el problema que se estudia. El flujo, que se refiere al estudio del movimiento de un fluido puede ser, por criterio de tiempo, permanente o transitorio (no permanente), y por criterio de espacio, uniforme o no uniforme (variado) [4]. El flujo permanente se refiere a aquel donde las propiedades de este se mantienen constantes en el tiempo, aunque estas pueden no serlo en el espacio. En el flujo transitorio o no permanente hay cambios en las características del flujo a lo largo del tiempo en el cual se realiza el análisis. El flujo uniforme se da en canales rectos, con pendiente suave y sección transversal constante y, finalmente, el flujo variado se da cuando la profundidad hidráulica cambia a lo largo del tramo en estudio. Esta última categoría se puede clasificar como rápidamente variado (cambio de profundidad abrupto en distancias cortas) o gradualmente variado. Este flujo a su vez, por criterio de tiempo, puede ser permanente o no permanente [5].

La variabilidad temporal del flujo en cuerpos hídricos, tanto estacional como interanualmente, resulta en escasez de agua durante los periodos en que el flujo es bajo. Por esta razón, las represas que se construyen en el cauce de los ríos permiten el almacenamiento del agua en los momentos en que el flujo es alto para que este se utilice en los momentos de escasez, otorgando así confiabilidad de suministro de agua [6]. Es importante resaltar que el volumen de embalsamiento depende de la variabilidad hidrológica de tal manera que, si la cantidad de agua que fluye en un río no cambia anualmente, el espacio de almacenamiento es pequeño y solo proporciona volumen de agua para reducir escasez en años en que se den flujos bajos. El volumen que se requiere para suministrar de manera confiable el agua durante varios años debe ser mucho más grande [6].

3.1. Propiedades y clasificación de sedimentos

El flujo de sedimentos que ingresa a un embalse está en función de factores como el tipo de suelo y formación geológica, cantidad e intensidad de la lluvia, cobertura y uso de suelo, topografía, la red de drenaje, escorrentía, mineralogía y granulometría del sedimento, y las características hidráulicas de los canales [3]. Por esto es importante estimar la cantidad de sedimentos transportados en el río, ya que permite evaluar los posibles impactos de la

sedimentación en el embalse [7]. Para ello es importante conocer sus propiedades y/o características.

Propiedades y características:

Las propiedades y características más importantes de los sedimentos están relacionadas directamente con la forma de la partícula, la velocidad de caída, el tamaño, la distribución granulométrica, la densidad, el peso específico, la gravedad específica y la porosidad; a continuación, describiremos cada una de ellas [8]

- ✓ Forma de la partícula: Conocer la forma de la partícula es esencial para saber su movimiento, una partícula puede ser clasificada por su redondez y su esfericidad, generalmente son elipsoides triaxiales.
- ✓ Velocidad de caída de una partícula: Se le llama velocidad de caída de una partícula cuando la fuerza de arrastre del fluido es igual o semejante al peso sugerido de la partícula, es la máxima velocidad que la partícula alcanza cuando cae libremente en el agua.
- ✓ Tamaño: La variación del tamaño de la partícula define el sedimento, esta característica permite identificar, cuantificar y diferenciar, el tamaño del sedimento según su proporción (peso o volumen) en la muestra.
- ✓ Distribución granulométrica: Para determinar las características de las partículas de un determinado tramo del cauce se deben tomar muestras en secciones transversales y longitudinales del mismo, para hacerlo se emplean métodos que relacionan el peso de la partícula en diferentes tamices con relación a la malla del mismo tamiz, para finalmente ser graficadas en una tabla log-normal.
- ✓ Densidad: La densidad es la magnitud escalar que permite medir la relación masa volumen de la partícula.
- ✓ Peso específico: El peso específico es la relación entre el peso de la partícula y su volumen.
- ✓ Gravedad específica: La gravedad específica es directamente la relación entre la densidad de la partícula y la densidad del agua.
- ✓ Porosidad: La porosidad relaciona el volumen de vacíos entre el volumen de sedimentos.

3.2. Transporte de sedimentos

Los sedimentos que se transportan a través de una corriente de agua son producto natural de la degradación del suelo. Esto se produce porque el material que proviene de la erosión llega a las corrientes por una capacidad del agua para transportar sólidos o movimientos en masa como desprendimientos, deslizamientos, etc. Por esto es importante estimar la cantidad de sedimentos transportados en el río, ya que permite evaluar los impactos de la sedimentación en el embalse [7].

Existen dos criterios para su clasificar los sedimentos: Según su método de transporte y el origen del material transportado. Según el método de transporte, puede ser de lavado o suspendido, representa el 90% (partículas muy finas, que se transportan por suspensión que aporta al río por medio de la lluvia.) en donde todo el material viene de aguas arriba y su origen es el suelo de la cuenca, el cual está ligado a sus características (litología, suelos, pendiente, escorrentía), también se puede producir por la erosión de la lluvia o algunas veces por la erosión del río el cual se sostiene gracias a la turbulencia del flujo y se desplaza con el caudal de agua, realizando una mezcla. Si la turbulencia y velocidad de la corriente decrecen, disminuye la concentración de partículas en suspensión. Cuando esto se produce, algunas partículas vuelven al fondo. Este material es de gran repercusión en la colmatación de los embalses. Dicho material proviene de tres fuentes de transporte: Transporte de sedimentos del fondo en suspensión, transporte de lavado y transporte de suspensión propiamente dicho. Para diferenciar el material de lavado y suspensión, se toma como límite entre los dos un diámetro de 0.0062mm. De esta forma, el material de lavado corresponde a las partículas menores de dicho diámetro [9].

Los sedimentos de fondo representan aproximadamente el 10% y tiene una repercusión morfológica sobre el río, pues realizan modificaciones en este. Están conformados por partículas sueltas de arena, grava o boleos, los cuales constituyen el material que forma el fondo o delta. El delta está conformado por tres partes: Zona de baja pendiente constituido por los sedimentos gruesos en el lecho del río (topset), zona de alta pendiente constituido por la cara del delta (foreset) y una zona de baja pendiente producto de la turbidez, la cual se asientan en el lecho del embalse (bottomset). En los estudios realizados en campo y laboratorio se ha encontrado que el topset y foreset están formados por arena y el bottomset por limo y arcilla. El delta es sensible a la distribución de materiales. Si hay gran cantidad

de gruesos, los mismo se posicionan en la entrada del embalse, por otro lado, si hay gran cantidad de finos, estos se dirigen a las obras principales [10].

Los materiales que conforma el delta se comportan según las características hidráulicas de la corriente y las características físicas del material y son transportados por la corriente, tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión. El cual se desplaza mediante tres movimientos: deslizándose, rodando y saltando. Las fuerzas que tratan de oponerse a dicho movimiento son el peso propio y la fricción [9]. Es el resultado de la suma de arrastre en la capa de fondo y el transporte de fondo en suspensión.

La concentración de partículas es más uniforme si el material es más fino y hay más turbulencia. Al haber material grueso o menor turbulencia, hay muy poco material suspendido en la superficie y mayores concentraciones cerca al fondo. Este transporte se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, geometría del cauce y propiedades físicas del material de fondo.

La relación entre la cantidad total de sedimentos que ingresan y la cantidad de sedimentos que se depositan en el embalse se denomina eficiencia de atrapamiento, y depende de la velocidad de caída de las partículas de sedimento, morfometría del embalse y la tasa de flujo a través del mismo, y la posición de las estructuras de salida [3].

Por otra parte, según el origen del material, puede venir del cauce y de la cuenca. Esta clasificación hace referencia a eventos de lluvias y crecida fluvial debido a que a largo plazo todo el material proviene de la cuenca. El material del cauce se transporta en suspensión y de fondo. El material en suspensión suma el material de los dos orígenes y el de fondo sólo lo hace con el cauce [9].

3.3. Información general de la modelación numérica unidimensional de la sedimentación en un embalse

Es común decir que la capacidad de transporte de sedimento del flujo es igual a la carga del material de fondo. Esta condición se conoce como transporte en condición de equilibrio [8]. En los embalses se da un efecto de retraso de flujo de forma espacial y temporal que es de importancia en el transporte de sedimentos ya que se realiza en una condición no equilibrada [3].

Los modelos de transporte de sedimentos unidimensionales son empleados cuando se requieren simulaciones en periodos largos de tiempo. Su uso es favorable debido a que se requieren menos cantidad de información de campo para su calibración y validación, otorga soluciones más estables y necesitan menos tiempos computacionales. Estos modelos no cuentan con la capacidad de simular fenómenos locales en dos o tres dimensiones, pero pueden predecir de forma efectiva volúmenes y cantidades promedias en un tramo como concentraciones de sedimentos, fricción en el lecho y velocidades de flujo.

Existe una gran diversidad de modelos unidimensionales con la capacidad de simular la sedimentación en un embalse. Algunos modelos que se destacan son HEC-6, la versión más reciente del HEC-RAS 5.0 (Incluye las capacidades de sedimentación de HEC – 6), SOBEK modelo europeo, MIKE 11 modelo Danés, SRH – 1D y los modelos GSTARS.

En este caso se hace un énfasis especialmente en el modelo HEC – RAS, el cual será una herramienta para llevar a cabo los objetivos del proyecto. Este modelo contiene cuatro análisis fluvial unidimensionales para: (1) Cálculos del flujo permanente con el perfil de superficie; (2) Simulación del flujo variable; (3) Cálculo de transporte de sedimentos con límite variable; y (4) Análisis de calidad del agua. Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos en común y cálculos hidráulico geométrico en común. Además de los cuatro componentes de análisis fluvial, el sistema contiene diversas características de diseño hidráulico que pueden juntar una vez se computan los perfiles de agua básicos. La actual versión de HEC-RAS permite hacer cálculos de la superficie de perfil en flujos permanentes y variables; cálculo de transporte de sedimentos/cama móvil; análisis de la temperatura del agua; análisis de la calidad del agua (Transporte de nutrientes y su destino); y mapeo espacial de diversos parámetros de cálculo (Profundidad, elevación de la superficie de agua, velocidad, etc.) [11].

En términos del análisis del transporte de sedimentos, HEC-RAS ofrece diversas ecuaciones, la selección de la función adecuada depende de las características de los sedimentos [11]. Las funciones de transporte de sedimento que están disponibles en HEC – RAS son:

- Ackers – White
- Engelund – Hansen
- Laursen

- Meyer – Peter Müller
- Toffaleti
- Yang

Ackers – White: Es una función de carga total de transporte que está diseñada para la gradación desde arenas hasta gravas finas; el sedimento suspendido está función de la velocidad de corte mientras que la caga del lecho es función del esfuerzo cortante [5]. Se basa en términos de tamaño de la partícula, movilidad y transporte. Los sedimentos finos son limos menores de 0.04 mm y sedimentos gruesos mayores de 2.5 mm. La función está basada en experimentos de canales usando sedimentos uniformes con canales de profundidad mayor que 0.4 [11].

Ecuación general de transporte de sedimentos para un tamaño de grano único [11]:

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u_o}{V} \right)^n} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

X= Concentración de sedimentos

G_{gr}= Parámetro de transporte de sedimentos

D_s= Diámetro medio de la partícula

D= Profundidad efectiva

U_o= Velocidad de corte

V= Promedio de velocidad del canal

N = Exponente de transición, depende del tamaño del sedimento

C = Coeficiente

F_{gr} = Parámetro de movilidad del sedimento

A = Parámetro crítico de movilidad del sedimento

Engelund – Hansen: Es una ecuación de carga total de transporte que depende de la velocidad del canal. La fuerza cortante en el lecho y el material tipo d50. Se debe aplicar únicamente para sistemas arenosos [5].

Está representado por la siguiente ecuación [11]:

$$g_s = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \left[\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

G_s = Unidad de transporte de sedimentos

γ = Peso unitario del agua

γ_s = Peso unitario de las partículas sólidas

V = Velocidad promedio del canal

τ_o = Cama de nivel de esfuerzo cortante

d_{50} = Tamaño de partícula del cual 50% es más pequeño

Laursen: Es una función de carga total de transporte, es la única función del HEC – RAS desarrollada para limos. Proviene de una combinación de análisis cualitativos, experimentos originales y datos suplementarios. Se basa en características hidráulicas [5].

Está representado por la siguiente ecuación [11]:

$$C_m = 0.01 \gamma \left(\frac{d_s}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} - 1 \right) f \left(\frac{u_o}{\omega} \right) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

C_m = Concentración de descarga de sedimentos, en peso/volumen

G = Peso unitario del agua

d_s = Diámetro medio de la partícula

D = Profundidad efectiva del flujo

τ_o = Cama de esfuerzo cortante entre la resistencia del grano

τ_c = Cama crítica del esfuerzo cortante

$f\left(\frac{u_o}{\omega}\right)$ = Función del radio de la velocidad cortante a la velocidad de caída

Meyer – Peter Müller: Es estrictamente una ecuación de carga total de transporte en donde se relaciona el esfuerzo cortante; es utilizada para arena y grava bajo condiciones de lecho plano. Es una de las ecuaciones más utilizadas y fue de las primeras en desarrollarse [5].

Está representado por la siguiente ecuación [11]:

$$\left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{\frac{3}{2}} \gamma R S = 0.047 (\gamma_s - \gamma) d_m + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{\frac{2}{3}} g_s^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

g_s = Tasa de transporte de sedimento en peso/tiempo/unidad de ancho

kr = Coeficiente de rugosidad

kr' = Coeficiente de rugosidad basado en los granos

γ = Peso unitario del agua

γ_s = Peso unitario del sedimento

g = Aceleración de la gravedad

dm = Diámetro medio de partícula

R = Radio hidráulico

S = Gradiente de energía

Toffaletti: Es una función de carga total de transporte, desarrollada para ríos largos, es utilizada para dos diferentes tamaños de partículas y cuando es aplicada a clases individuales, el programa utiliza principalmente los d50 y d65 para las clases de partículas ingresadas [5].

Está representado por la siguiente ecuación [11]:

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1 + n_v - 0.756z}$$

Ecuación 6.
(zona inferior)

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1 + n_v - z}$$

Ecuación 7.
(zona media)

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} \left[R^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z} \right]}{1 + n_v - 1.5z}$$

Ecuación 8.
(zona superior)

$$g_{sb} = M (2d_m)^{1+n_v-0.756z}$$

Ecuación 9.
(zona de fondo)

$$M = 43.2 C_L (1 + n_v) V R^{0.756 z - n_v}$$

Ecuación 10.

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssU} + g_{sb}$$

Ecuación 11.

Donde:

g_{ssL} = Transporte de sedimentos suspendidos en la zona inferior, en toneladas/día/pie

g_{ssM} = Transporte de sedimentos suspendidos en la zona media, en toneladas/día/pie

g_{ssU} = Transporte de sedimentos suspendidos en la zona superior, en toneladas/día/pie

g_{sb} = Transporte de sedimentos de fondo en toneladas/día/pie

g_s = Transporte de sedimentos total en toneladas/día/pie

M = Parámetro de concentración de sedimentos

C_L = Concentración de sedimentos en la zona inferior

R = Radio hidráulico

dm = Diámetro medio de partícula

z = Exponente que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas

nv = Exponente de temperatura

Yang: Es una función de carga total de transporte, la cual basa el transporte en el producto de la velocidad y el esfuerzo cortante. Se afecta directamente con la velocidad de la corriente [5]. El método está representado por la siguiente ecuación [11]:

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_o}{\omega} \\ + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_o}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

Ecuación 12.

(para arenas
 $dm < 2mm$)

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_o}{\omega} \\ + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{\nu} \right. \\ \left. - 0.282 \log \frac{u_o}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right)$$

Ecuación 13.

(para gravas
 $dm \geq 2mm$)

Donde:

C_t = Concentración total de sedimentos

ω = Velocidad de caída de la partícula

dm = Diámetro medio de la partícula

ν = Viscosidad cinética

u' = Velocidad de corte

V = Promedio de velocidad del canal

S = Gradiente de energía

4. DATOS IMPORTANTES DEL SITIO DE ESTUDIO

4.1. Caracterización del embalse.

El estudio se desarrolló con información del Embalse de Bucaramanga, construido por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), con el objetivo de incrementar la provisión de agua potable para el área metropolitana de Bucaramanga. El embalse está ubicado en la parte baja del curso del Río Tona (afluente del río Suratá, Santander), aguas arriba del sitio conocido como Puente Tona en la vía Bucaramanga – Matanza [12]. El espejo de agua de esta infraestructura es de 54 hectáreas, con un volumen de 18 millones de metros cúbicos y una capacidad de regulación de 1200 litros por segundo (ver Figura 1).



*Figura 1. Vista en Planta del área aferente al embalse de Bucaramanga.
Fuente: Google Maps.*

La cuenca del río Tona, es una cuenca montañosa con una cobertura vegetal conformada principalmente por bosques y cultivos; cuenta con un área de drenaje de 195 Km^2 y una pendiente promedio del 44% [10]. Para analizar el caudal que dicha cuenca aferente suministra al embalse, tomamos los registros diarios aportados por el amb para realizar una curva de duración de caudal a partir de los promedios anuales de caudal (ver Figura 2). Esta gráfica nos ofrece información resumida sobre la dinámica histórica del caudal de la cuenca en el punto de estudio, para un período de 13 años.

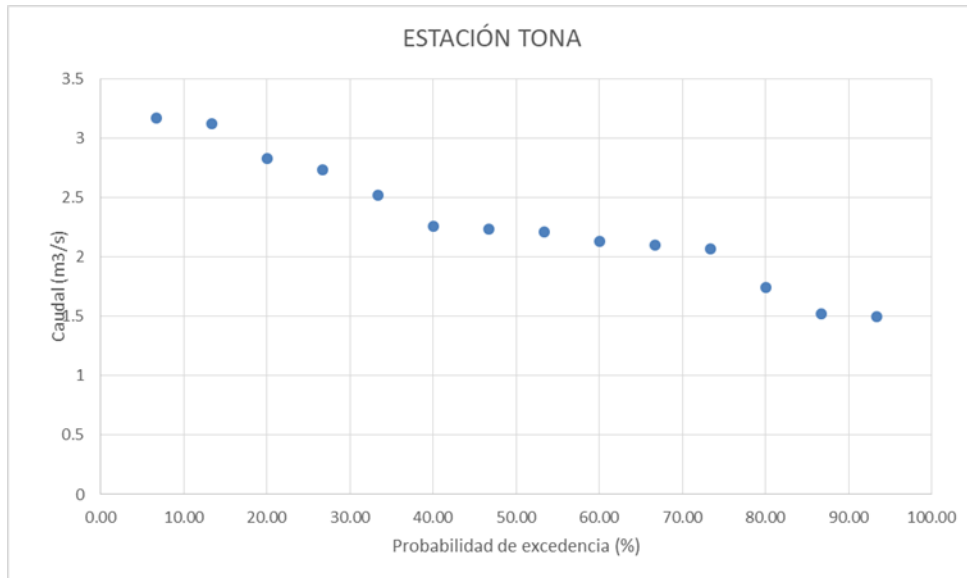


Figura 2. Curva de Duración de Caudal para la estación Puesto Tona.
Fuente: Autores.

4.2. Sedimentos

La caracterización de los sedimentos para la realización de este estudio se tomó del documento “Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga – Memorando Técnico 11”. Este estudio fue elaborado para el amb por CONALVIAS a través de INTEGRAL S.A. [10] y de él se tomó como se ve en la Figura 3, los sedimentos en suspensión contienen arena 68%, limos (20%) y arcilla (12%).

% 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

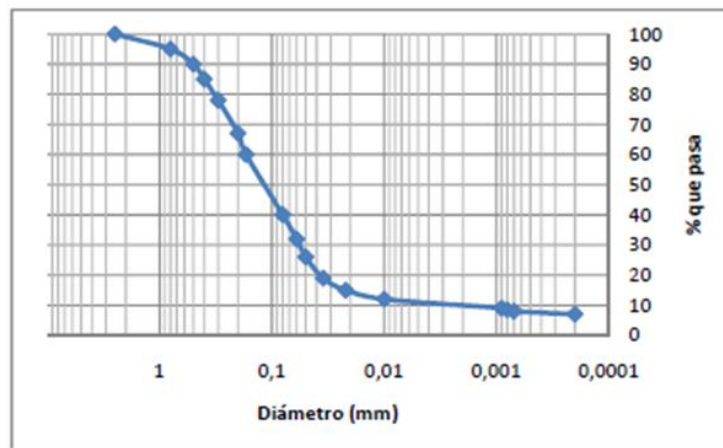


Figura 3. Caracterización de los sedimentos para la cuenca del río Tona.
Fuente: Memorando Técnico 11 – Modelo Hidráulico [10]

4.3. Geología de la zona del embalse

En la zona donde se construyó el embalse los suelos están compuestos de partículas gruesas granulares no consolidadas. Su geología se caracteriza por rocas metamórficas como pizarras, esquistos y filitas con bajo grado de meteorización, provenientes de la formación Silgará; algunos esquistos y rocas cristalinas asociadas a las unidades litológicas del complejo de Bucaramanga, ortogneis del municipio de Berlín y rocas plutónicas ácidas que, relacionadas con las altas pendientes, generan condiciones de permeabilidad muy bajas [10]. Se realizaron estudios geológicos y geotécnicos previos a la construcción del embalse de Bucaramanga por medio de perforaciones y tomografías con geófonos buscando determinar la capacidad portante del suelo en la zona. Dichos estudios encontraron que la roca era apta para la fundación de la presa y posteriormente, basados en estos resultados, se empezaron a definir los parámetros de diseño de la presa [13].

4.4. Topografía

Previamente a la construcción del embalse de Bucaramanga, se realizó el levantamiento topográfico de la zona. Dicho levantamiento cubre el área del embalse, secciones transversales paralelas a la presa, y secciones transversales especiales, entre otros levantamientos importantes. El levantamiento topográfico fue suministrado por el amb, en un archivo digital de AutoCAD. El cual fue elaborado en noviembre del año 2010. Para fines de este proyecto, nos enfocamos en el levantamiento topográfico y las secciones transversales paralelas a la presa.

4.4.1. Levantamiento topográfico del área del embalse:

El levantamiento del área del embalse contiene curvas de nivel principales cada 5 metros, resaltadas por un color naranja, y curvas de nivel cada metro de color gris. La topografía incluye tanto la zona de inundación (cota 860 msnm) como áreas aferentes al espejo de agua, llegando a una cota de 1090 msnm. El cauce del río y sus afluentes está demarcado con un color azul (ver Figura 4).

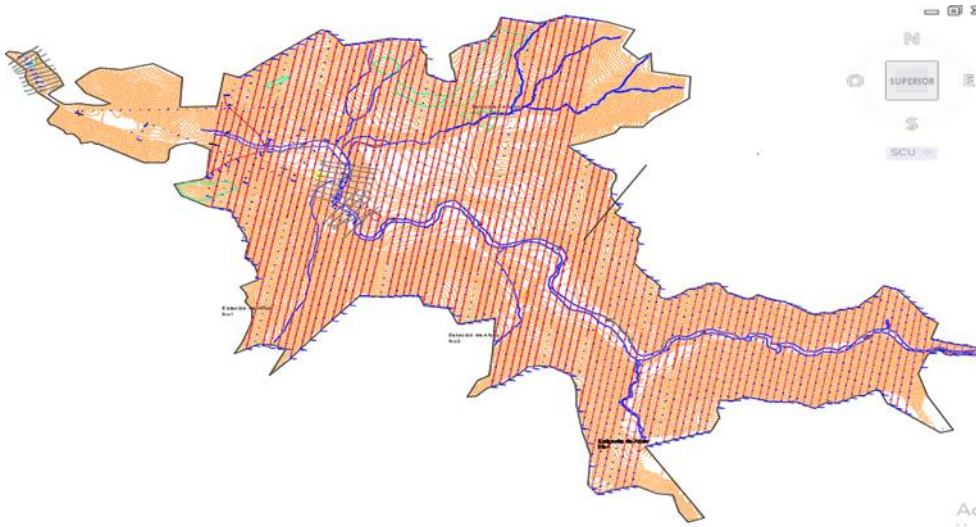


Figura 4. Vista en Planta del Levantamiento Topográfico del área del embalse de Bucaramanga.
Fuente: Autores, con base en plano topográfico del amb.

4.4.2. Secciones transversales paralelas a la presa.

El levantamiento topográfico contiene 105 secciones transversales paralelas a la presa (localizada en la parte izquierda de la figura), espaciadas entre sí cada 20 m. Estas secciones se identifican por líneas rojas en la vista en planta del levantamiento topográfico (ver Figura 4), como también por la representación gráfica en perfil de cada

una de las secciones transversales. La Figura 5 muestra ejemplos de dichas secciones, para la parte alta (sección 55), media (sección 33) y baja (sección 6) del proyecto.

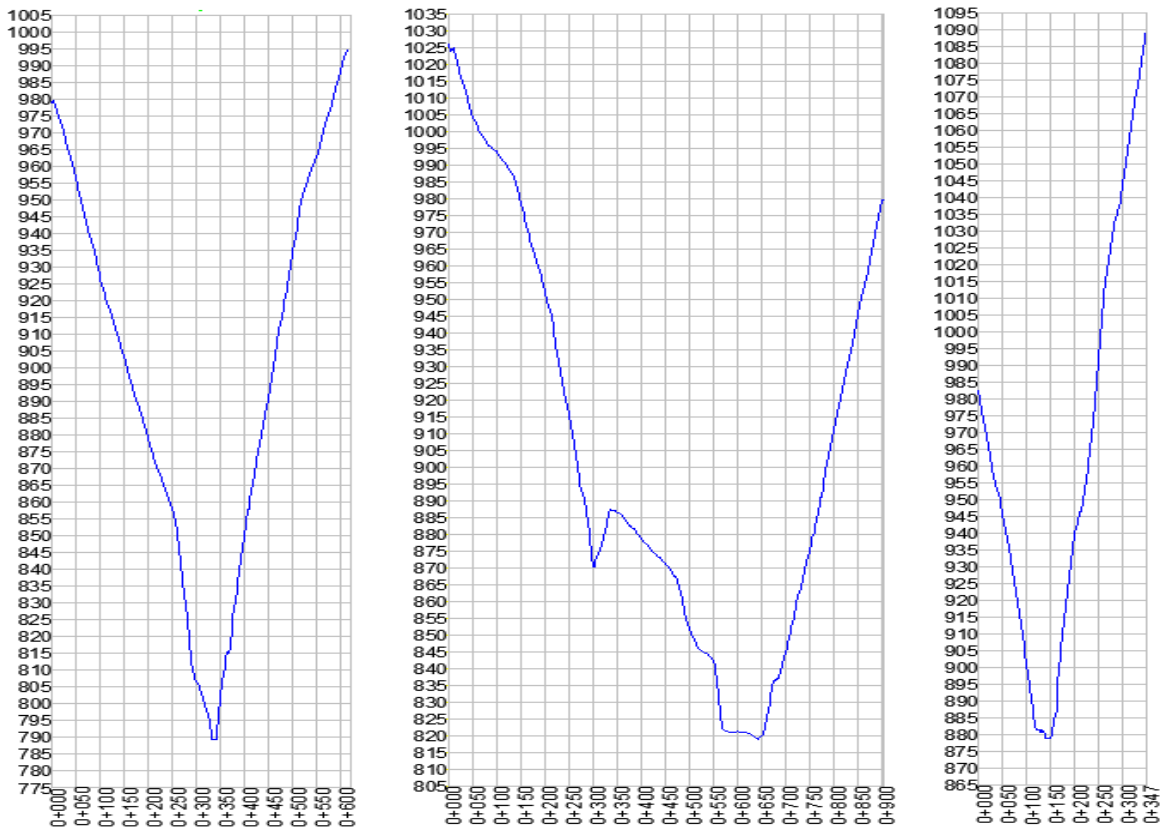


Figura 5. Muestra de Secciones Transversales para la parte alta, media y baja del proyecto.
Fuente: Autores, a partir de información proporcionada por el amb.

5. METODOLOGÍA

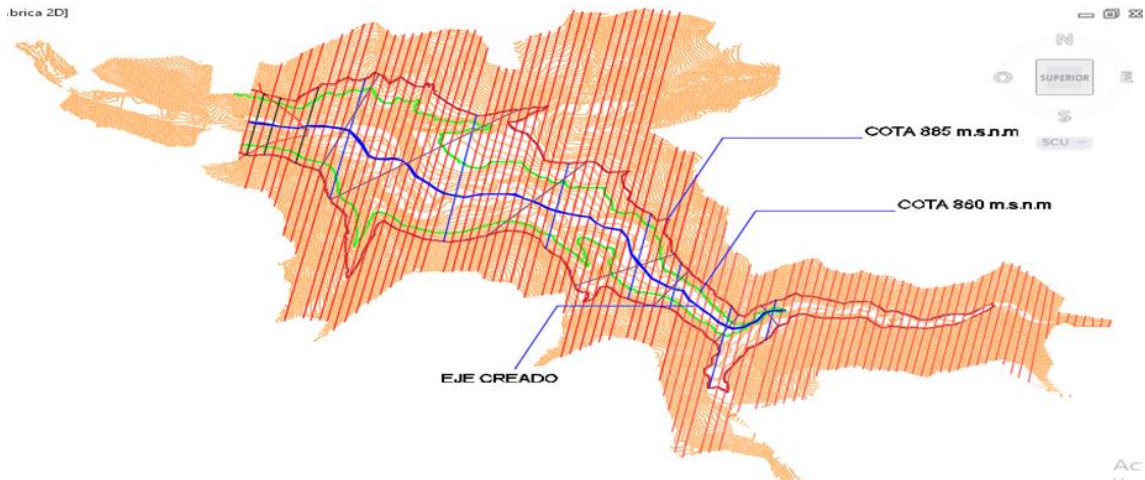
Para realizar el proyecto fue necesario revisar la información existente sobre el área de estudio, buscar y evaluar información referente a la geometría del embalse, caudales y tipos de sedimentos transportados. De igual forma fue necesario tener conocimiento de la herramienta de modelación HEC-RAS en cuanto a su interface gráfica y los principios que usa para la modelación hidráulica y de sedimentos. Para esto fue necesario apoyarnos de la documentación teórica y de aplicación de los manuales HEC-RAS (HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual [11] y HEC-RAS River Analysis System Applications Guide [14]).

La estimación de la sedimentación acumulada en el embalse de Bucaramanga, para periodos de corto, mediano y largo plazo, se realizó en cuatro etapas, las cuales iniciaron consecutivamente al culminar en su totalidad la etapa anterior. Cada una de las etapas permitió dar como resultado el cumplimiento de los objetivos específicos y posteriormente el cumplimiento del objetivo general.

5.1. Ingreso de la geometría del embalse a HEC-RAS

Los datos de la geometría fueron suministrados por el amb por medio de un archivo digital de AutoCAD. Este archivo contiene curvas de nivel cada 5 metros, 105 secciones transversales paralelas a la presa, distanciadas cada 20 metros, 6 secciones transversales especiales que corresponden a la sección de vertedero, presa, plinto, descarga, captación, y ataguía, y otros levantamientos de las obras del río Tona-Puente Matanza y río Tona-Puente Tona.

Con el objetivo de conocer el software, familiarizarnos con sus funciones y hacer una prueba de su ejecución para el análisis de un embalse, iniciamos el proyecto trabajando con dos casos simplificados (ver Figura 6). Caso 1: correr el modelo con siete secciones transversales paralelas al embalse (como fueron entregadas en el archivo de AutoCAD del amb) y Caso 2: correr el modelo con siete secciones transversales perpendiculares al eje principal del río (condiciones pre-embalse). Para los dos casos, fue necesario incluir 3 secciones finales que representan la pantalla de concreto (líneas negras). En cuanto a cotas, las secciones transversales demarcan la geometría del embalse hasta la cota 885 m.s.n.m. que corresponde a la cota máxima de la estructura de presa [15]. Esta línea está representada en color rojo en la Figura 6. La línea verde, representa la cota media de inundación del embalse que está definida por la cota del vertedero.



*Figura 6. Secciones Transversales para casos simplificados.
Fuente: Autores, con base en plano topográfico del amb.*

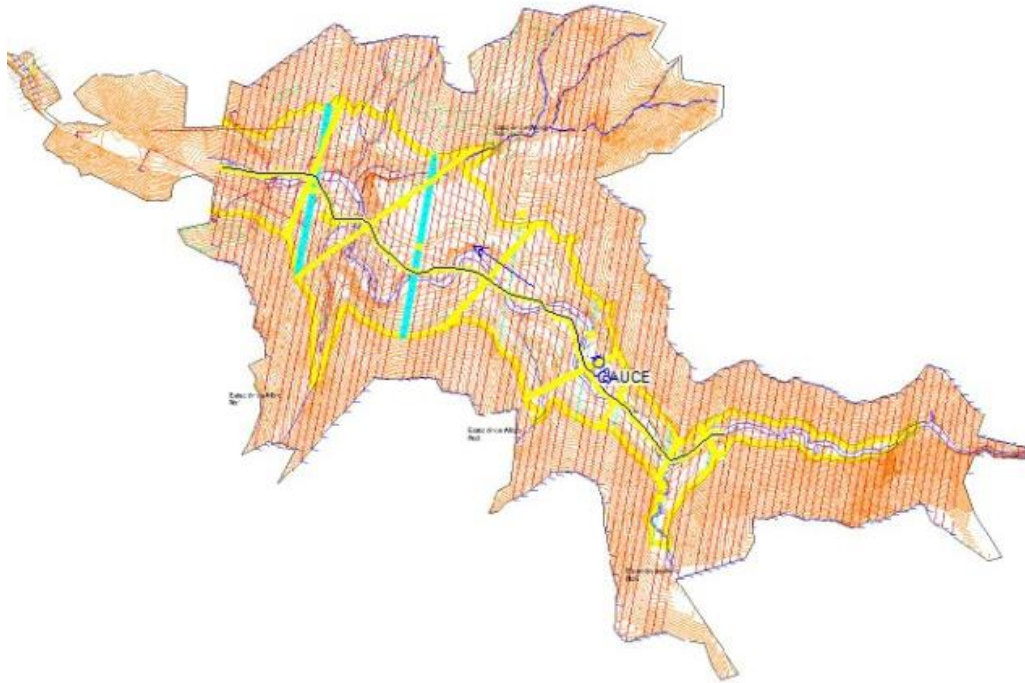
Una vez definidas las secciones a trabajar, estructuramos un archivo de Excel que contiene la información de cada una de las 10 secciones (cota – distancia desde el eje central) para los casos 1 y 2. Teniendo en cuenta que se mira hacia aguas arriba, las distancias desde el eje hasta cada uno de los puntos de la sección transversal se consideran negativas en la margen izquierda del eje principal (también llamado margen superior), y positivas en la margen derecha de este (margen inferior). La Tabla 1, muestra un ejemplo de la estructura de estas tablas para los casos 1 (secciones transversales existentes, paralelas a la presa) y 2 (secciones transversales creadas, perpendiculares al eje principal del río). Se resalta en cada una de las tablas el punto donde se alcanza la cota media de inundación para cada lado de la sección transversal.

SECCIONES TRANSVERSALES EXISTENTES			
SECCIÓN 12			
SUPERIOR		INFERIOR	
COTA	DISTANCIA	COTA	DISTANCIA
885	-227.09	810	21.93
880	-216.77	815	58.04
875	-207.28	820	65.26
870	-197.35	825	70.59
865	-189.22	830	78.59
860	-178.56	835	85.67
855	-164.29	840	92.58
850	-158.19	845	99.93
845	-152.45	850	109.63
840	-146.55	855	124.27
835	-132.65	860	142.03
830	-119.9	865	161.26
825	-105.39	870	174.86
820	-99.08	875	208.19
815	-92.02	880	214.63
810	-81.64	885	227.08
805	-67.63		
800	-56.86		
800	-20.61		
805	-4.32		

SECCIONES PERPENDICULARES CREADAS			
SECCIÓN 1			
SUPERIOR		INFERIOR	
COTA	DISTANCIA	COTA	DISTANCIA
885	-545.12	800	11.19
880	-507.67	795	57.55
875	-480.34	795	104.71
870	-449.97	800	113.78
865	-419.03	805	116.69
860	-392.14	805	118.45
855	-366.36	805	165.45
850	-320.42	810	259.49
845	-289.41	815	302.62
840	-218.16	820	326.42
835	-186.31	825	345.58
830	-150.58	830	363.33
825	-121.91	835	380.26
820	-107.69	840	395.99
815	-91.84	845	411.33
810	-58.35	850	425.16
805	-18.07	85	440.94
		860	455.91
		865	470.81
		870	485.67
		875	501.3
		880	522.31
		885	545.12

Tabla 1. Tablas de cotas y distancias para secciones transversales de los casos simplificados.
Fuente: Autores.

Antes de ingresar las secciones transversales a HEC-RAS, fue necesario localizar espacialmente el eje central sobre el cual se montan dichas secciones. La herramienta RAS Mapper nos permitió importar el archivo de AutoCAD a HEC-RAS para usarlo como base sobre el cual pudimos delinear el eje central y las secciones para cada uno de los casos simplificados. La Figura 7 muestra el eje principal digitado en HEC-RAS a partir del archivo de AutoCAD importado. La flecha azul indica la dirección del flujo de agua en el embalse.



*Figura 7. Eje Creado en HEC-RAS
Fuente: Autores.*

A continuación, ingresamos las secciones transversales a HEC-RAS. Adicional a la geometría de la sección, fue necesario proveer la siguiente información:

Downstream Reach Lengths: Este campo requiere las distancias horizontales entre secciones consecutivas para el eje central y las bancas izquierda y derecha. Estos valores varían entre sección y sección [11].

Manning's n Values: Esta opción corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning para cada sección. En nuestro caso, usamos un coeficiente de rugosidad de 0.05 para el canal principal (valor promedio para un canal natural) y 0.120 para las bancas derecha e izquierda pues son zonas con alto contenido de árboles. Asumimos que estos valores de Manning son iguales para todas las secciones transversales [11].

Main Channel Bank Stations: Este campo requiere ingresar, las distancias medidas desde el eje trazado hacia la banca izquierda y derecha, específicamente para la cota de inundación de cada sección trasversal (860m.s.n.m) [11].

Cont/Exp Coefficient: Este ítem corresponde a los coeficientes de contracción y expansión los cuales se usan para evaluar la pérdida de energía que ocurre cuando se presentan estos fenómenos en el flujo constante. Para nuestra modelación, el software suministra los datos de contracción y expansión automáticamente bajo los valores establecidos de rugosidad para el material del lecho el cual en nuestro caso es de un río natural [11].

Tras realizar la modelación hidráulica del flujo permanente para los casos I y II, obtuvimos un porcentaje de diferencia de 3% entre los caudales de salida para los dos casos; por tal motivo, decidimos que era óptimo trabajar con las secciones existentes (paralelas a la presa). La Figura 8 muestra los perfiles longitudinales de flujo para los casos I y II.

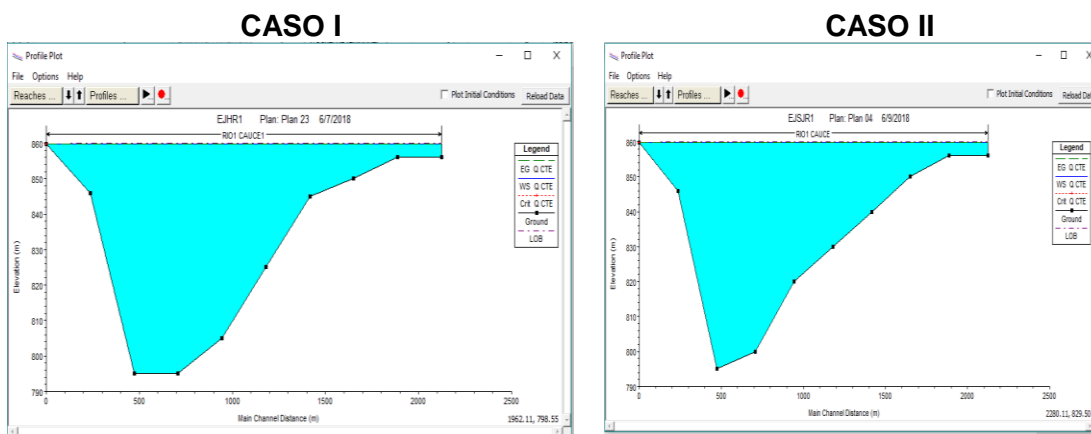


Figura 8. Perfiles longitudinales para la modelación de flujo permanente, casos I y II. (izquierda: secciones paralelas a la presa; derecha: secciones perpendiculares al canal principal). Fuente: Autores.

Para la modelación final, trabajamos con 67 de las 105 secciones transversales paralelas a la presa demarcadas, igualmente que en los casos simplificados, hasta la cota 885 msnm, e incluimos las secciones que representan la estructura de la presa. También redefinimos el eje principal de tal manera que tuviera una configuración perpendicular a cada una de las secciones transversales existentes. La Figura 9 muestra el esquema que contiene las secciones transversales usadas, delimitas por la cota 885.

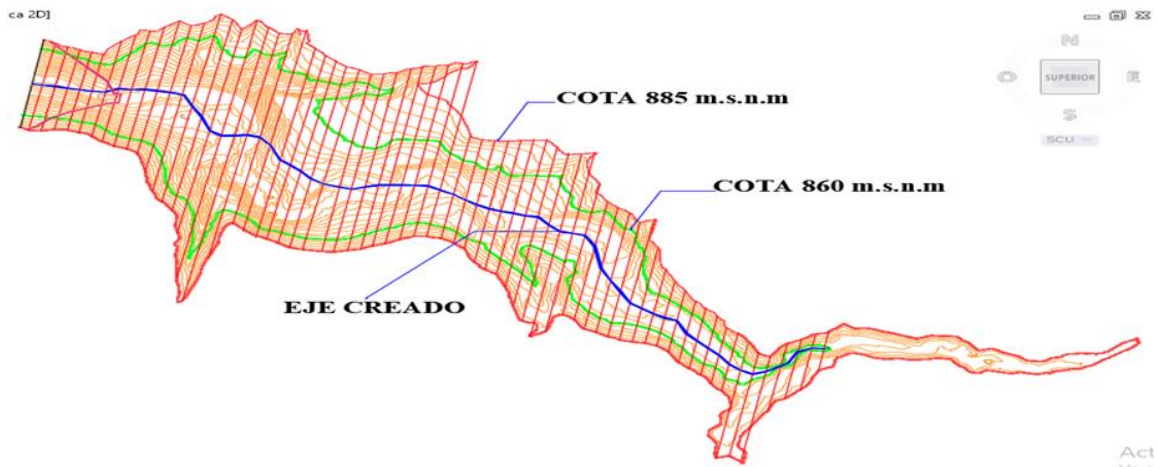


Figura 9. Secciones transversales usadas para la modelación hidráulica y de sedimentos del proyecto.

Fuente: Autores, con base en plano topográfico del amb.

Al igual que en los casos simplificados, utilizamos la herramienta RAS Mapper para importar el archivo de AutoCAD a HEC-RAS y digitar sobre él, el nuevo eje principal del proyecto. Para cada una de las secciones transversales ingresamos los datos de la sección transversal junto con sus propiedades asociadas. El Anexo 1 contiene la información correspondiente a cada una de las secciones. Se debe tener en cuenta que la numeración de estas secciones va incrementando hacia aguas arriba, es decir, la estación con número identificador menor es la primera a la izquierda en la Figura 9 (definiendo la estructura de presa). La Figura 10 contiene, en el lado izquierdo, una muestra de las distancias calculadas entre secciones tanto para el eje principal como para las bancas izquierda (superior) y derecha (inferior) (Downstream Reach Lengths) y en el lado derecho, se muestran ejemplos de los datos usados para la creación de las secciones 3 y 4. Vale la pena recordar que al realizar la creación de las secciones, los valores de las distancia son negativos en la banca izquierda de la sección (Superior) mirando hacia aguas arriba, y son positivos en la banca derecha de la sección (Inferior). Los valores del n de Manning se mantuvieron igual que para las secciones simplificadas (0.05 para el canal principal y 0.120 para las bancas izquierda y derecha). La Figura 11 presenta un ejemplo del llenado de información para la creación de una sección transversal (No. 9) para el estudio.

	SUPERIORES	CANAL	INFERIOR
0_1	15.4031	16.57	19.5817
1_2	19.9047	20.29	22.4581
2_3	21.1767	19.79	20.2404
3_4	20.2958	19.81	19.9273
4_5	20.2908	20.05	21.4557
5_6	21.1223	20.28	45.0101
6_7	23.758	23.42	29.4105
7_8	21.5099	19.9	30.7764
8_9	20.3956	20.66	25.2001
9_10	22.1495	20.45	30.4848
10_11	47.1827	20.01	21.6696
11_12	58.2297	20.31	22.5115
12_13	34.0461	31.33	37.2066
13_14	27.6732	32.33	22.8463
14_15	62.6354	40.22	31.3788
15_16	122.4309	22.09	34.9869
16_17	79.8824	20.35	26.0586
17_18	126.54	20.74	23.8592
18_19	98.9478	20.21	20.0471
19_20	25.5296	27.71	60.8452
20_21	26.6021	41.1	55.2189
21_22	18.3752	21.12	25.1586
22_23	19.8465	22.31	22.4586
23_24	22.7717	26.34	22.3044
24_25	20.4052	23.41	21.135
25_26	30.0118	27.08	23.0106
26_27	20.0328	20.15	20.589
27_28	21.4211	21.97	21.1054

SECCIÓN 3		SECCIÓN 4	
SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR
-104.005	885	-102.213	885
-96.64	880	-99.4028	880
-95.5674	875	-94.8001	875
-91.0467	870	-90.8909	870
-86.6826	865	-85.4792	865
-82.164	860	-79.4277	860
-80.6119	855	-73.4157	855
-78.7862	850	-70.6234	850
-76.3233	850	-68.727	845
74.4333	850	-64.5481	840
76.7522	855	-61.8318	840
82.504	860	58.0952	840
88.3195	865	60.3927	840
94.1891	870	65.978	845
100.3912	875	69.7736	850
106.3255	880	75.0864	855
112.3823	885	81.1119	860
		87.442	865
		92.9132	870
		97.97	875
		103.2625	880
		108.7662	885

Figura 10. Muestra de los datos medidos para el ingreso de información geométrica a HEC-RAS.
Fuente: Autores

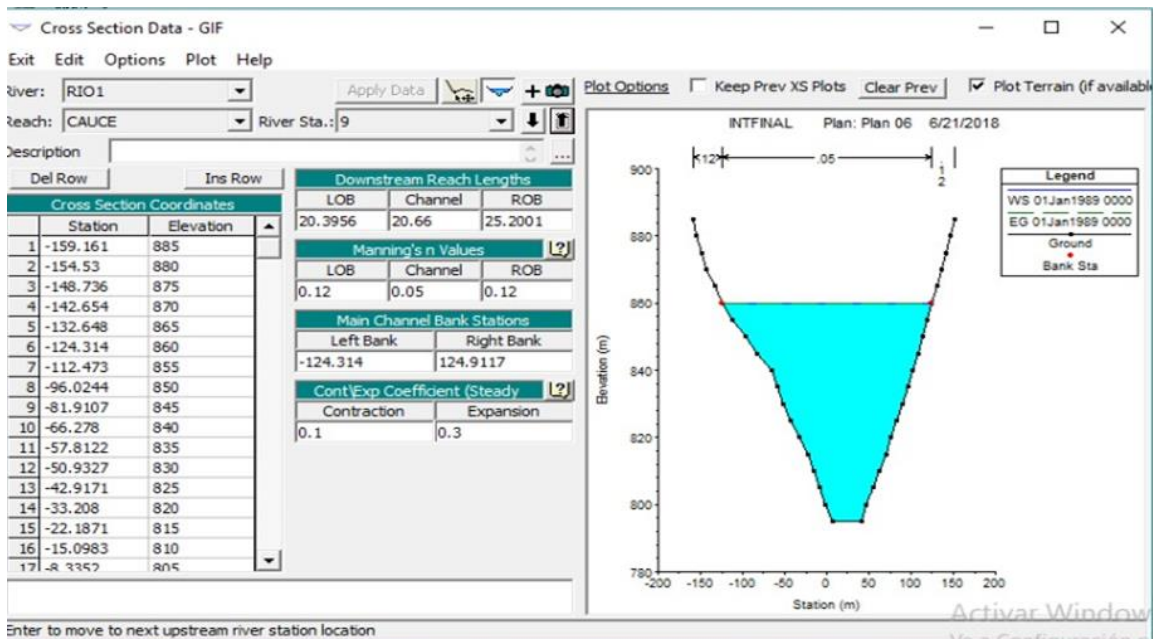


Figura 11. Ejemplo de Ingreso de Sección transversal N°. 9 junto con sus propiedades.
Fuente: Autores

5.2. Modelamiento hidráulico

Para realizar el modelamiento hidráulico fue necesario recopilar los datos de caudal de entrada al embalse en unidades de m^3/s . Esta información fue suministrada por el amb mediante datos diarios de caudal para la estación Puente Tona. El período de datos a modelar es entre los años 1989-2002. Para conocer el comportamiento del modelo y entender los requerimientos de entrada y salida del mismo, desarrollamos modelaciones para flujo permanente, no permanente, y cuasi-permanente. Presentamos la descripción de entradas y salidas del modelo para cada uno de los casos.

5.2.1. Flujo permanente.

La modelación de flujo permanente requiere ingresar la cantidad de perfiles que se deben calcular dependiendo del número de secciones que se tengan. En nuestro caso, fueron 67 perfiles. Adicionalmente, para cada perfil se deben registrar los datos de caudal. Este es un valor constante. Para nuestro caso, asumimos un valor arbitrario de $2 m^3/s$. El modelo requiere que el usuario defina las condiciones de frontera que dependen del tipo de análisis a realizar. Por ejemplo, si se va a realizar un análisis para flujo subcrítico, se deben ingresar las condiciones de frontera aguas abajo; si es un análisis de flujo supercrítico, se deben ingresar las condiciones de frontera aguas arriba; si se trata de un análisis para flujo mixto, se deben ingresar condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo [11]. Una vez definida esta opción, se elige entre las condiciones de frontera externa disponible, entre las que están:

- Alturas de la superficie del agua conocida: Se debe introducir la altura del agua para cada uno de los perfiles que se van a calcular.
- Profundidad Crítica: En este caso no se introduce nada, el programa calcula dicha profundidad para cada uno de los perfiles.
- Profundidad Normal: En la profundidad normal se debe introducir la pendiente de la línea de energía.
- Curva de gasto: Se introducen parejas de valores Nivel de agua – Caudal.

Para llevar a cabo la modelación de flujo permanente, escogimos la opción de profundidad crítica ya que nuestra modelación corresponde a un análisis subcrítico, lo cual indica que el programa calcula dicha profundidad para cada perfil.

5.2.2. Flujo no permanente.

La modelación de flujo no permanente requiere ingresar condiciones de frontera que se deben escoger teniendo en cuenta las condiciones habilitadas para cada caso y la información disponible. Las condiciones de frontera disponibles en el modelo son:

- **Flow Hydrograph (hidrograma de flujo):** El hidrograma de flujo se usa como un límite o condición de frontera aguas arriba o aguas abajo. Al activar esta opción se pueden leer datos almacenados anteriormente o se pueden ingresar datos de caudal manualmente. Para esta opción se debe introducir adicionalmente la fecha y hora de inicio de la simulación y el intervalo de los datos (segundos, minutos, horas, meses o años).
- **Stage Hydrograph (hidrograma de niveles del agua):** Este tipo de hidrograma se usa también como una condición de frontera aguas arriba o aguas abajo, su interfaz de edición es similar al utilizado en el hidrograma de flujo. El programa da la opción de ingresar los datos manualmente o adjuntarlos en un archivo HEC-DSS.
- **Stage and Flow Hydrograph:** Esta opción se puede usar al mismo tiempo con una condición de frontera aguas arriba o aguas abajo, este tipo de hidrograma se usa especialmente cuando se pueden observar los datos del escenario hasta llegar al tiempo pronosticado.
- **Rating Curve (curva de gasto):** Se puede utilizar como condición de frontera aguas abajo, esta condición se puede abrir en archivos HEC-DSS o puede ser ingresada manualmente. La curva de gasto aguas abajo es una relación de un solo valor y no influye en el ciclo de clasificación, dicha suposición podría causar errores. Cuando se utiliza esta opción, se debe tener en cuenta que la misma debe estar lo suficientemente separada aguas abajo del área de estudio, de tal manera que cualquier error que se presente no altere el alcance del estudio.
- **Normal Depth (profundidad normal):** La profundidad normal solo se puede usar como una condición límite aguas abajo para un canal abierto. Para activar esta opción se requiere ingresar la pendiente de fricción más próxima a la condición de frontera.
- **Lateral Inflow Hydrograph (hidrograma de flujo lateral):** Este hidrograma se usa como una condición de frontera interna, que permite ingresar el flujo en un punto específico y se ve reflejado en las secciones transversales aguas abajo del

hidrograma de entrada. Tiene la facilidad de poder ingresarse mediante un archivo DSS o manualmente.

- **Uniform Lateral Inflow Hydrograph (hidrograma de flujo lateral uniforme):** Este hidrograma se usa como una condición de frontera interna. Esta opción permite ingresar un hidrograma de flujo y distribuirlo uniformemente a lo largo del cauce del río entre dos secciones transversales especificadas. De la misma manera que para los casos anteriores, este hidrograma puede ser digitado manualmente o suministrado desde un archivo DSS.
- **Groundwater Interflow (interflujo de agua subterránea):** Esta condición se puede aplicar a una fracción de río o a un área de almacenamiento. Como se supone que el depósito del agua subterránea es independiente al flujo del río, se deben suministrar los datos manualmente o abrirlos de un archivo DSS.

En nuestro caso, tomamos la condición de frontera “Flow Hydrograph” ya que contábamos con un hidrograma de caudal. Introdujimos manualmente los datos a la estación 67 (última estación en perspectiva hacia aguas arriba) que corresponde al punto de entrada del caudal al embalse. Como se especificó anteriormente, fue necesario definir la fecha y hora de inicio de los datos (1989, 0000 horas) con un intervalo diario de los registros. Para la estación 1 (sección más aguas abajo del embalse), seleccionamos la condición de frontera “Normal Depth” (profundidad normal), asignándole un valor de 0.002 para la pendiente de la línea de energía. Este valor fue asumido. Para definir las condiciones iniciales de nuestra modelación, ingresamos un valor inicial de caudal en la sección 67 de $0.235 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2.3. Flujo cuasi permanente.

El flujo cuasi permanente se usa exclusivamente para el análisis del transporte de sedimentos. Este análisis incluye diversas opciones de condiciones de frontera entre las que están:

- **Flow Series (series de caudal):** Esta opción requiere condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo. Para poder realizar un análisis de sedimentos. El editor de flujo cuasi-permanente incluye automáticamente entradas paralelas a secciones transversales de los límites externos. La mayoría de los modelos de sedimentos vinculan la serie de flujo a una referencia de tiempo de inicio fijo. Adicionalmente, hay que ingresar el incremento computacional y la duración de flujo para cada caudal suministrado [11].

- **Flow Duration (Duración del Flujo):** La duración del flujo es un incremento de entrada del flujo constante, el cual representa la línea de tiempo sobre la cual el flujo, la temperatura y las cargas de sedimentos se asumen constantes, es decir, el tiempo debe ser igual que la duración del flujo, por ejemplo si los datos de caudal para la modelación están en registros diarios la duración del flujo sería 24 horas [11].
- **Computation Increment (Incremento Computacional):** El incremento computacional subdivide la duración del flujo en grandes y pequeños valores dependiendo de la variación de este. Por ejemplo, el cambio de los flujos moderados a altos, requiere incrementos computacionales más pequeños. Se sugiere entonces que previo al ingreso de los datos del incremento computacional, se analicen los caudales y se dividan en grupos dependiendo de su incremento de caudal para posteriormente asignarles valores de incremento computacional en orden ascendente, donde el menor incremento computacional indica alta variabilidad de los flujos y el mayor incremento computacional poca variabilidad en los flujos. Estos valores son de suma importancia ya que son los encargados de generar la estabilidad del modelo [11].
- **Lateral Flow Series (serie de flujo lateral):** La serie de flujo lateral se puede evaluar con cualquiera de las secciones transversales que existan en el proyecto. Esta condición se utiliza especialmente para tener en cuenta la entrada del flujo. Para esto, se debe seleccionar antes de que una serie se ingrese, una sección transversal al flujo cuasi permanente, posteriormente, se debe agregar la ubicación de cambio de flujo y en él seleccionar el archivo donde se encuentran las estaciones fluviales las cuales corresponden a los datos a ingresar a esta condición de frontera. [11].
- **Uniform Lateral Flow (flujo lateral uniforme):** El flujo uniforme lateral se comporta similar a la serie de flujo lateral pero adicionalmente, permite distribuir la escorrentía superficial de la cuenca (calculada por medio de un modelo hidrológico) a lo largo del alcance hidráulico en lugar de concentrarlo en un punto. [11].
- **Stage Time Series (series de nivel del agua):** Stage Time Series, permite al usuario ingresar una serie de tiempo de elevaciones del agua en la frontera aguas abajo, las cuales especifican las etapas para cada cálculo de aguas estancadas de flujo constante, por ende si los datos de esta etapa están disponibles o se encuentran en el periodo de simulación Stage Time Series tiene la capacidad de establecer el límite aguas abajo [11].

- **Rating Curve (curva de gasto):** La curva de gasto se escoge cuando se presenta ausencia de datos de series de tiempo y puede definir una relación descendente entre la altura del agua y el caudal. Esta opción calcula condiciones de frontera aguas abajo en respuesta a la serie de flujo en simulación [11].
- **Normal Depth (profundidad normal):** La profundidad normal solo requiere como dato de entrada la pendiente de fricción que es la misma pendiente de la línea energía. Este valor puede calcularse midiendo la pendiente de la cuenca. La profundidad normal es la condición de frontera más usada en el flujo permanente, no permanente y cuasi permanente ya que requiere solo este dato [11].
- **Quasi-Unsteady Temperature (temperatura para condiciones cuasi estacionarias):** Debido a que la velocidad de caída de los sedimentos es afectada por la viscosidad del agua, es necesario ingresar datos de temperatura del agua. Para la versión HEC-RAS 5.0.3 sólo se puede especificar una temperatura para toda la modelación [11].

Para la modelación cuasi estacionaria, al igual que en el flujo permanente, trabajamos con las condiciones de frontera “Flow Series” y “Normal Depth” debido a la disponibilidad de información del estudio. Para la estación 67 escogimos la condición de frontera “Flow Series”, ingresando la fecha y hora de inicio de la simulación (01JAN1989, 0000 horas); en la columna de duración de caudal entramos un valor de 24 horas, recordando que este valor depende de los datos que se tengan, es decir, si son datos diarios, mensuales o anuales; en la columna del incremento computacional, ingresamos valores de 12, 6, 3 o 1 dependiendo de los caudales, teniendo en cuenta que el cambio de los flujos moderados a altos requieren incrementos computacionales más pequeños. Finalmente, ingresamos el caudal para cada uno de los criterios anteriores. La Tabla 2 muestra los rangos de caudales para los cuales se asignaron los incrementos computacionales.

RANGO DE CAUDAL	INCREMENTO COMPUTACIONAL
0 < 1	12
1 < 2	6
2 < 10	3
> 10	1

*Tabla 2. Rangos de Incrementos Computacionales.
Fuente: Autores.*

Como podemos observar en la Figura 12, para la estación 1 escogimos la condición de frontera “Normal Depth”, asignándole un valor de 0.002 a la pendiente de línea de energía. Adicional a estas dos condiciones de frontera, fue indispensable para nuestra modelación ingresar la información de temperatura del agua. Para esto, se ingresaron nuevamente los datos de duración del flujo junto con las temperaturas correspondientes para cada intervalo, las cuales para nuestro caso fueron de 20°C. Dado que no se tienen datos históricos de temperatura del agua, se recomienda que se realicen muestreos que permitan acercar este dato a la condición real y así mejorar la capacidad de predicción del modelo [10].

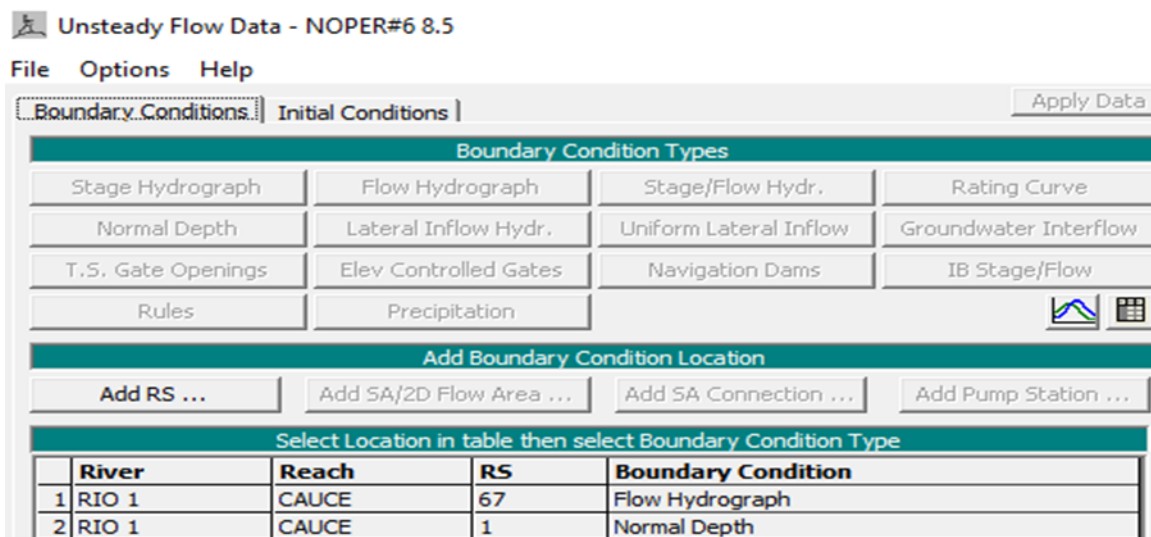


Figura 12. Condiciones de frontera para la modelación de flujo no permanente.
Fuente: Autores.

5.3. Modelamiento hidráulico de transporte de sedimentos

5.3.1. Sedimentos

Como se mencionó en la sección 4.2 (Sedimentos), la modelación usó información proporcionada por el amb, que se originó por un estudio desarrollado por INTEGRAL S.A. [10]. Dicho estudio realizó muestreos diarios de concentración superficial para sedimentos en suspensión y caudales asociados en la estación Puente Tona desde el año 2005 al 2006. Los resultados de dicho estudio presentan la curva granulométrica de material en suspensión con un porcentaje de arena del 68%, limos del 20% y arcilla del 12%. A partir de la curva granulométrica presentada en la Figura 3, realizamos las interpolaciones necesarias para asignar los valores de “porcentaje que pasa” para los diámetros definidos en la interface de HEC-RAS (ver Tabla 3).

Curva Memorando	
Diámetro (mm)	% que pasa
0.004	9
0.008	10
0.016	14
0.032	18
0.0625	32
0.125	50
0.25	72
0.5	90
1	96
2	98

*Tabla 3. Distribución Granulométrica de los sedimentos para entrada de datos a HEC-RAS.
Fuente: Autores, a partir de Memorando 11.*

Dado que la idea era evaluar el transporte de sedimentos en el embalse ante diferentes escenarios, decidimos incorporar granulometrías adicionales que nos permitieran evaluar un rango de posibilidades de sedimentación. Obtuvimos una curva propuesta por un ejemplo del Manual de HEC-RAS (ver Tabla 4) con un porcentaje de arena del 9%, limos del 57% y arcilla del 34%. Este escenario representa un espectro bastante diferente de la curva granulométrica del Memorando.

Curva Manual	
Diámetro (mm)	% que pasa
0.004	68
0.008	76.2
0.016	85.3
0.032	87.8
0.0625	93
0.125	98
0.25	99
0.5	99.4
1	99.9
2	100

*Tabla 4. Curva Granulométrica ejemplo HEC-RAS.
Fuente: HEC – RAS 5.0 Users Manual [16]*

Adicionalmente, creamos unos escenarios intermedios, de los cuales escogimos una curva a la cuál denominamos “Curva Intermedia”, su granulometría se presenta en la Tabla 5.

Curva Intermedia	
Diámetro (mm)	% que pasa
0.004	34
0.008	39
0.016	45
0.032	52
0.0625	59
0.125	68
0.25	78
0.5	90
1	100
2	100

Tabla 5. Granulometría Curva Intermedia. Fuente: Autores.

5.3.2. Introducción de datos al software

Para correr un archivo de transporte de sedimentos, es necesario contar con los siguientes requerimientos: geometría, flujo (cuasi-permanente o no permanente), sedimentos y plan de análisis de sedimentos. Una vez se introduce la geometría para las secciones transversales en el software, se procede a introducir los datos correspondientes a los sedimentos.

Se crea entonces un nuevo archivo de sedimentos, después se procede a introducir todos los datos correspondientes a condiciones iniciales y parámetros de transporte (Initial Conditions and Transport Parameters). Específicamente se refiere a: función de transporte, método de selección, método de velocidad de caída, y curva granulométrica para cada sección [16]. En el cuadro donde se introduce toda la información, las primeras tres columnas hacen referencia al río (river), cauce (reach) y sección transversal (rs) del modelo.

Función de Transporte (Transport Function): Para nuestro caso la función de transporte escogida fue Engelund – Hansen debido a que representaba mejor las características de los datos (curva granulométrica) que teníamos [16]. Esta función se utilizó para las tres curvas granulométricas, debido a que queríamos observar el comportamiento de la curva intermedia y del manual bajo estas condiciones.

La descripción de todas las funciones de transporte se encuentra consignada en la sección 3.3 de este documento.

Método de Selección (Sorting Method): Algunas veces llamado método de mezcla o de blindaje, realiza un seguimiento de la gradación del lecho que utiliza el software para calcular la capacidad de transporte para cada clase de forma de grano [16].

Al momento de escoger el método de selección, el software ofrece las siguientes opciones:

Thomas (Exner 5): Se puede modelar un lecho de tres capas, como también formar una capa de material grueso en la superficie, para así limitar la erosión que se produce en el material de fondo. Este es el método por defecto.

Active Layer: El método de la capa activa es un método de dos capas (simplificado). Para lechos de grava se asume la capa activa con un grosor igual a d_{90} . En estos casos se recomienda utilizar el método de transporte de Wilcock.

Copeland (Exner 7): Este método es el producto de una mezcla entre Thomas (Ex5) y algoritmos. Está diseñado para lechos de arena de ríos ya que forma capas de forma lenta y se obtienen resultados de erosión [16].

Para este caso, escogimos el método de Thomas (Exner 5), es decir la opción por defecto del software.

Método de Velocidad de Caída (Fall Velocity Method): Es importante al momento de hallar el transporte de sedimentos en suspensión, debido a que una partícula permanece en suspensión si los componentes verticales de turbulencia a nivel del lecho exceden la velocidad de caída [11].

Para el método de velocidad de caída el modelo ofrece las siguientes opciones:

- Ruby
- Toffaleti
- Van Rijn
- Report 12
- Dietrich

En este caso escogimos el método de Report 12 (método por defecto) debido a que el mismo mantiene una coherencia con el desarrollo de la función de transporte seleccionada.

Profundidad Máxima o Elevación Mínima (Max Depth or Min Elev): En el software, para cada sección transversal, hay un volumen de control de sedimentos; este cubre desde la mitad de la distancia entre las secciones aguas arriba y abajo de la sección de interés. Sus características son elegidas por el usuario [16]:

- **Profundidad Máxima (Max Depth):** En esta opción, se introduce un dato por debajo del fondo original del canal. El software toma como fondo original, el cálculo de la elevación erosionable mínima y le resta el dato (distancia) inicial.
- **Elevación Mínima (Min Elev):** Se introduce una elevación menor para que el modelo no la pueda erosionar.

En nuestro caso seleccionamos la elevación mínima. Los valores asignados fueron los del punto más bajo de cada sección (el “invert”).

Límites de la sección transversal móvil: Los límites son las dos columnas de Estación izquierda (Left Sta) y Estación derecha (Right Sta). El software permite sedimentación en el perímetro mojado, pero la erosión sólo se puede dar en los límites móviles definidos por el usuario. Dichos valores corresponden a los introducidos en la geometría de cada sección transversal, es decir Banca izquierda (Left bank) y Banca derecha (Right bank). Si no se tienen determinados, el software los coloca automáticamente [16]. En nuestro caso, usamos los valores que correspondían a la cota de inundación (860 m.s.n.m.). Vale la pena recordar que los valores de la banca izquierda fueron negativos y los de la banca derecha positivos debido a la orientación en la que se introdujeron los datos.

Gradación del lecho: Cada sección transversal introducida debe tener su correspondiente gradación del lecho. Para crear una nueva gradación, el usuario va al menú Definir/Editar gradación del lecho (Define/Edit Bed Gradation). Los datos se pueden introducir de las siguientes formas [16]:

- **% de finos (% Finer):** Es una curva granulométrica acumulativa asociada a la clase de grano. Los valores se introducen en porcentaje, es decir, el porcentaje que pasa.

- **Fracción o peso (Grain Class Fraction/Weight):** No es acumulativa, los valores no llegan hasta el 100%. Se debe introducir la fracción de cada grano que se tenga en la curva.

En nuestro caso utilizamos el porcentaje de finos (% Finer), basándonos en la distribución granulométrica de la Tabla 3. El software permite introducir una o más curvas granulométricas, pero en este proyecto se utilizó una para las 67 secciones elegidas (ver Figura 13).

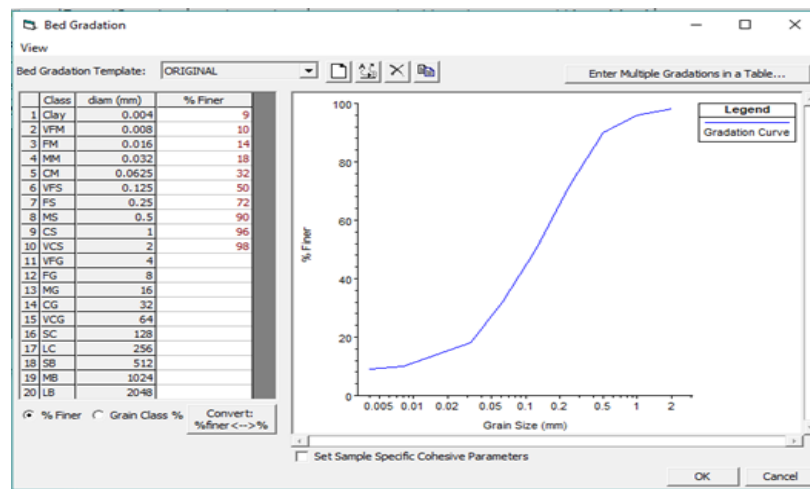


Figura 13. Gradación del lecho introducida a HEC - RAS.
Fuente. Autores.

5.3.3. Condiciones de borde para sedimentos (Boundary Conditions)

Existen diferentes condiciones de borde para los sedimentos (Sediment Boundary Condition Types):

- **Carga de equilibrio (Equilibrium Load):** Determinada por la capacidad de transporte. Es calculada por el software en cada sección y la utiliza como series de tiempo de carga en la siguiente sección transversal. Esta opción establece carga igual a capacidad y sólo se puede utilizar en secciones aguas arriba transversales externas.
- **Curva de gasto (Rating Curve):** Se basa en una entrada de agua para determinar una entrada de sedimentos. Dicha entrada de agua puede ser una serie lateral de flujo o una serie uniforme lateral de flujo. Está disponible para condiciones de borde aguas arriba. El botón de curva de gasto aparece sólo cuando el usuario selecciona una sección transversal interna asociada con una serie de flujo.

- Series de Carga de Sedimentos (Sediment Load Series): Es la opción de condición de borde más utilizada. Aquí el usuario puede darle una serie de sedimentos independiente a cada clase de grano que tenga. El HEC – DSS es una base de datos que todos los modelos pueden utilizar. Sirve para almacenar series de tiempo hidrológicas y se pueden pasar datos mediante las herramientas de HEC. Esta condición de borde necesita un archivo de HEC – DSS con series de tiempo para cada tipo de grano que se tenga, esto se hace para que sea compatible con el modelo de sedimentos [16].

En nuestro caso utilizamos la condición de borde de carga de equilibrio (Equilibrium load) debido a que esta opción no requiere de información, el software la calcula de forma automática.

5.3.4. Selección de la ecuación de función de transporte

El Software HEC – RAS en su versión 5.0.3 ofrece diversas funciones de transporte mencionadas en el numeral 3.3 del presente documento. Entre ellas están:

- Ackers – White
- Engelund – Hansen
- Laursen
- Meyer – Peter Müller
- Toffaleti
- Yang

Las funciones del transporte de sedimentos simulan transportes no lineales y predicen tasas de transporte de sedimentos a partir de parámetros hidráulicos estables y las propiedades de sedimentos. Cada una otorga un resultado diferente, debido a que cada función fue desarrollada bajo diferentes condiciones. Es importante comprender cómo fueron desarrolladas las funciones para saber si su aplicación es confiable [11].

La sensibilidad del modelo se encuentra relacionada a la función que se seleccione. Para seleccionar la función de transporte adecuada, se debe tener en cuenta el rango de suposiciones, condiciones hidráulicas y el tamaño de grano para el que cada método fue diseñado [16].

Las funciones calculan diversos transportes. El primero es el de carga del lecho (bed load) y el segundo es carga de material de lecho (bed-material load), que es la carga total menos la carga de lavado. Cuando se tienen lechos de arena con altas velocidades de transporte, el material suspendido es mayor a diferencia del que se pueda encontrar en lechos con otros materiales, por ejemplo, grava. Por esta razón es importante seleccionar una función que incluya el cálculo de sedimentos suspendidos [11].

Basado en lo anterior, la función óptima es la que represente mejor las características de los datos que se tienen (curva granulométrica). Para nuestro caso, elegimos la función de transporte Engelund – Hansen debido a que es la función que representa mejor los datos de nuestra área de estudio. Esta función predice cargas totales de sedimentos. Es adecuada para sistemas arenosos con un poco de carga suspendida, es decir, lo que se tiene en la curva granulométrica seleccionada [11]. Esta función se ha utilizado en diversos estudios de estimación de sedimentos y ha obtenido resultados precisos y confiables debido a que los resultados son similares a los obtenidos en campo [17].

5.4. Escenarios de sedimentación para el embalse

Con el ánimo de evaluar la vida útil del embalse ante diferentes condiciones de caudal y sedimentos, integramos tres curvas granulométricas (Memorando, Manual y Curva Intermedia) junto con 3 condiciones de caudal, una para los caudales observados en la estación Puente Tona y dos obtenidas a partir de la modelación hidrológica de la cuenca para escenarios futuros de clima (resultados del trabajo de grado del estudiante Gustavo Adolfo Carrillo Peña [18]). Los caudales modelados para escenarios futuros de clima son datos mensuales para la estación puente Tona, obtenidos por el ingreso de datos climatológicos escalados del modelo MIROC5 para las condiciones de emisión de gases de efecto invernadero correspondientes al RCP4.5 (emisiones de gases de efecto invernadero similares a las actuales) y al RCP8.5 (incremento rápido de las emisiones de gases de efecto invernadero).

Se corrieron entonces 9 modelos que representan condiciones actuales y potenciales de acuerdo a las diferentes combinaciones que se presentan en la Tabla 5. Los modelos denominados “Base” usan los caudales observados para la modelación, mientras que los modelos denominados “Futuro” usan los caudales obtenidos del estudio de Carrillo [18].

Sedimentos	Curva Memorando	Curva 2	Curva Manual
Caudales			
Caudal 1989-2002	Base 1	Base 2	Base 3
Caudal 2010-2050 – RCP4.5	Futuro 1	Futuro 2	Futuro 3
Caudal 2010-2050 – RCP8.5	Futuro 4	Futuro 5	Futuro 6

Tabla 5. Escenarios modelados para el embalse.
Fuente: Autores.

Cálculo del volumen de sedimentos para los escenarios modelados.

HEC-RAS permite acceder a gráficas y coordenadas de los resultados de la modelación del transporte de sedimentos (opción Sediment XS – Bed Change Plot), como se muestra en las Figuras 15 y 16, respectivamente. En la Figura 14 se muestra el ejemplo de la sección 57 donde la línea negra indica la sección transversal al inicio de la modelación (2010), y la línea azul indica la sección transversal al finalizar el período de modelación del transporte de sedimentos (2050).

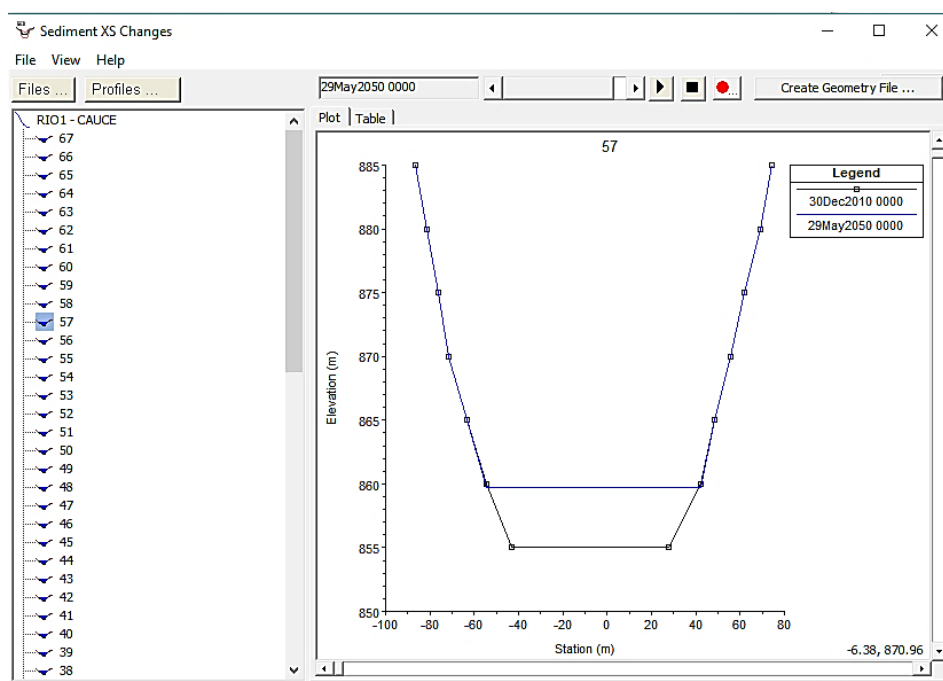


Figura 14. Sección transversal 57 con resultados de la modelación de sedimentos (negro: sección transversal inicial; azul: sección transversal final)
Fuente. Autores.

En la Figura 15 se muestran los datos correspondientes a la sección 57 para la modelación en sus etapas inicial y final, asociadas a las líneas negra y azul de la Figura 14.

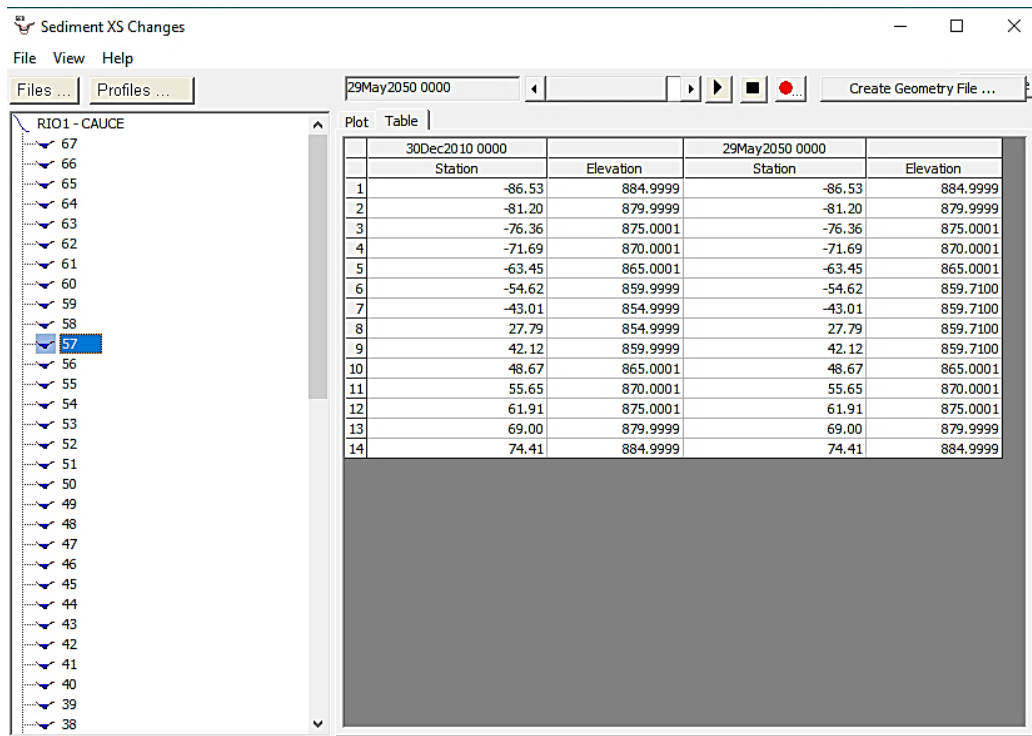


Figura 15. Datos de la sección transversal 57 para las etapas inicial y final de la modelación.
Fuente. Autores.

La información de las secciones, junto con la geometría ya conocida para el embalse, permitió hacer el cálculo de áreas sedimentadas para cada sección, el volumen sedimentado asociado a cada sección (área sedimentada \times longitud entre puntos medios de secciones transversales consecutivas), y totalizar el volumen de sedimentos para cada uno de los escenarios modelados. Estos volúmenes se compararon con el volumen total inicial del embalse para evaluar el porcentaje de reducción de su capacidad. El proceso de cálculo del volumen total del embalse siguió la misma dinámica presentada para el caso de los volúmenes de sedimentación, pero para las secciones transversales iniciales hasta la cota de inundación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las dudas que teníamos, una vez familiarizadas con el funcionamiento básico del software fue cómo crear el embalsamiento. Al incluir las secciones transversales de la presa pudimos generar dicha condición. La Figura 16 muestra en su parte superior las secciones transversales perpendiculares al eje (ver Figura 9 de la Sección 5.1) y en su parte inferior, el embalsamiento producido al correr el modelo hidráulico.

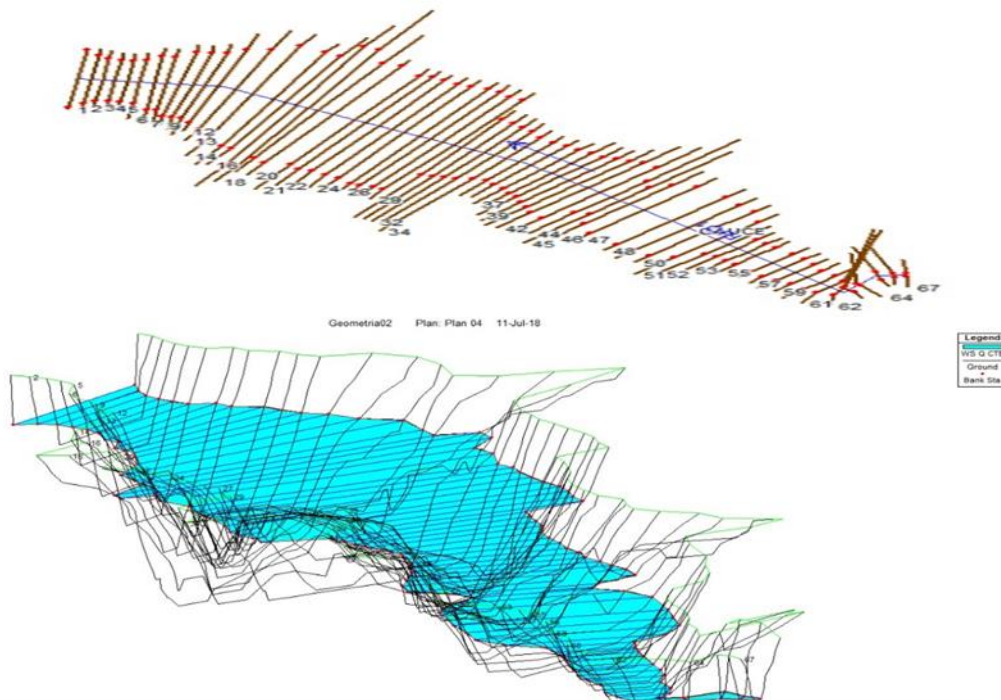


Figura 16. Modelo del embalse en HEC-RAS.
Fuente: Autores.

6.1. Resultados de la modelación de flujo no permanente

La modelación para flujo no permanente permite observar resultados para cada una de las secciones del modelo. Aquí nos enfocamos en revisar las secciones 1, 33 y 67, que corresponden a la primera sección aguas abajo (presa), una sección intermedia, y la sección de entrada al embalse, respectivamente, para los caudales del período 1989-2002. Las Figuras 18 a 20 muestran las profundidades máximas observadas (y sus líneas de energía asociadas) en cada una de las secciones (Max Chl Dpth): 0.20 m para la sección 1, 35.26 m para la sección 33 y 1.01 m para la sección 67. Estos valores están directamente relacionados con la geometría no uniforme del embalse.

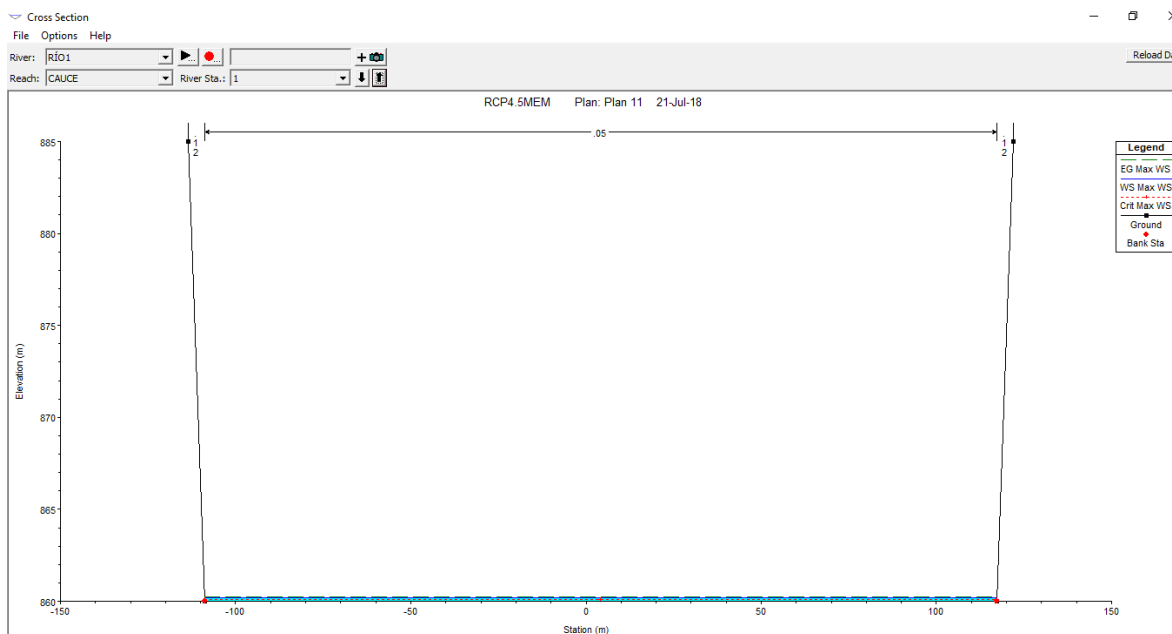


Figura 17. Máximo nivel del flujo para la sección 1.
Fuente: Autores.

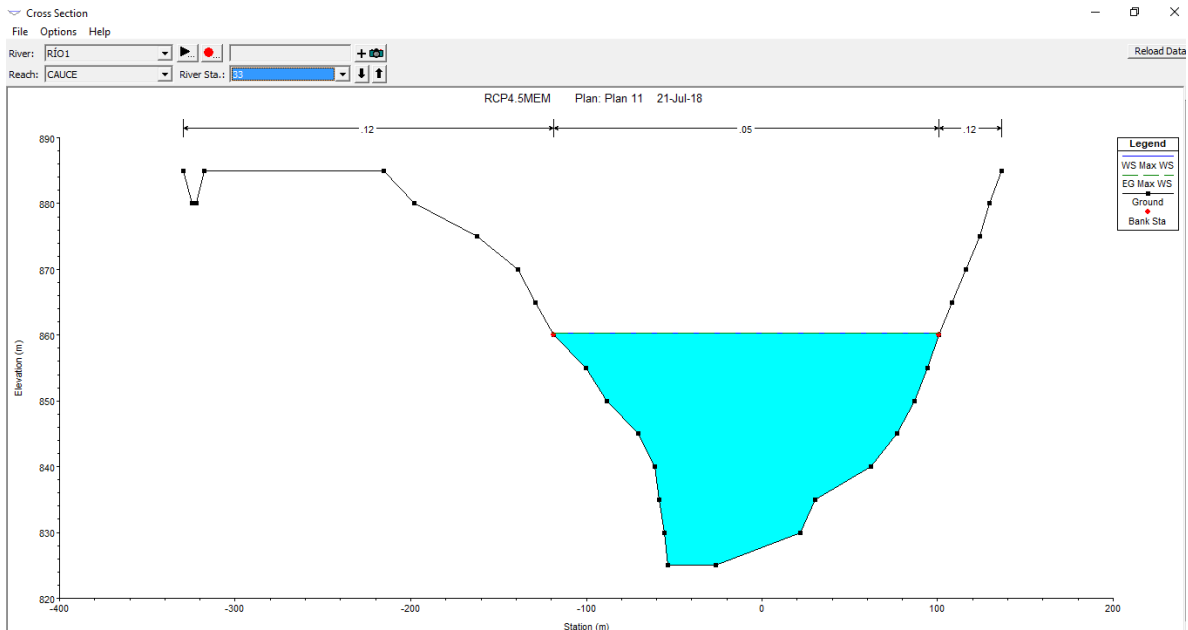


Figura 18. Máximo nivel del flujo para la sección 33.
Fuente: Autores.

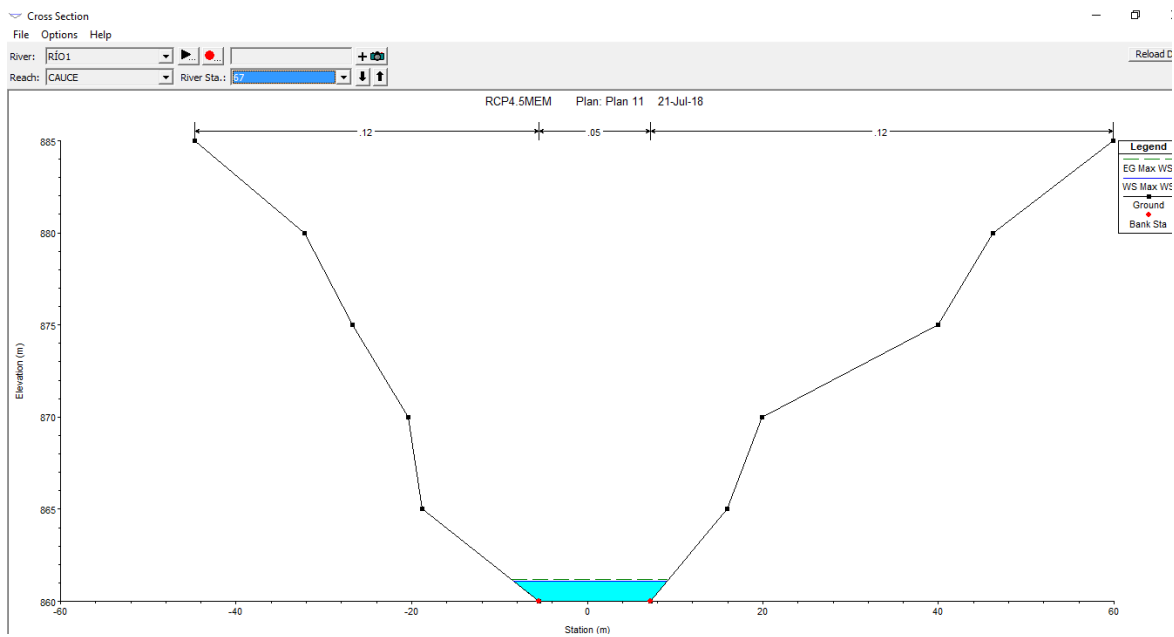


Figura 19. Máximo nivel del flujo para la sección 67.
Fuente: Autores.

Las Figuras 21 a 23 muestran las series de tiempo de nivel de agua (Stage, color azul) y caudal (Flow, color verde) para las secciones 1, 33 y 67, respectivamente. En ellas se

aprecia la dinámica de la modelación para los datos diarios de caudal que se ingresaron como condición de frontera al modelo. Se aprecian variaciones menores entre los valores máximos de nivel de agua y caudal para las tres secciones.

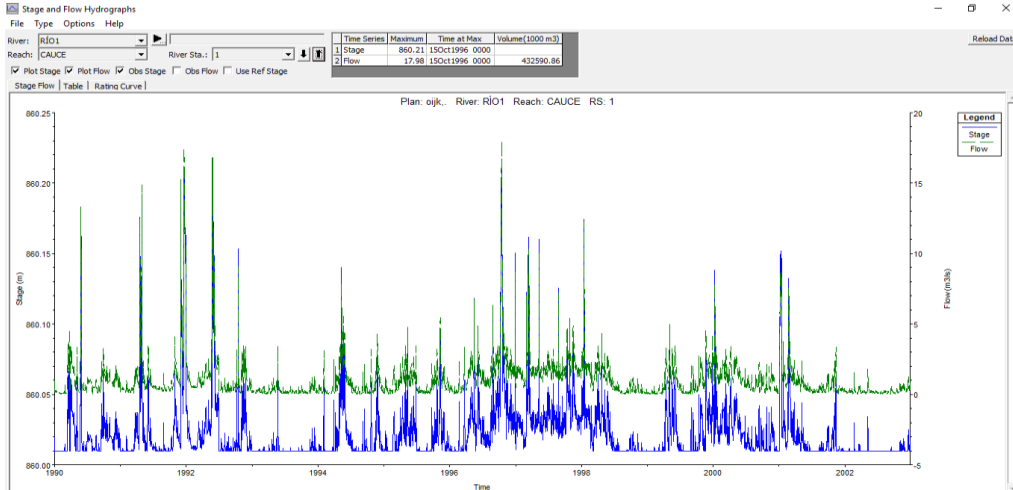


Figura 20. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 1.
Fuente: Autores.

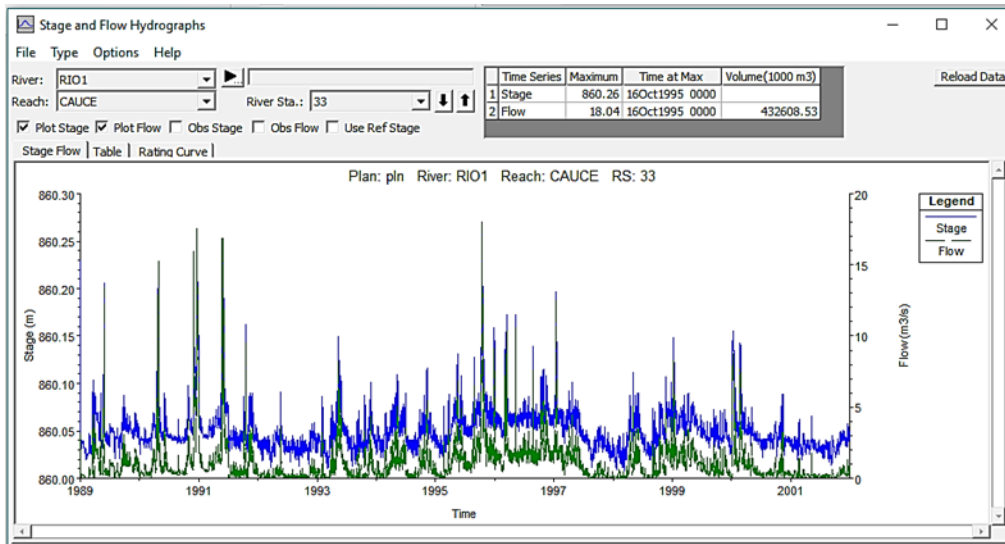


Figura 21. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 33.
Fuente: Autores.

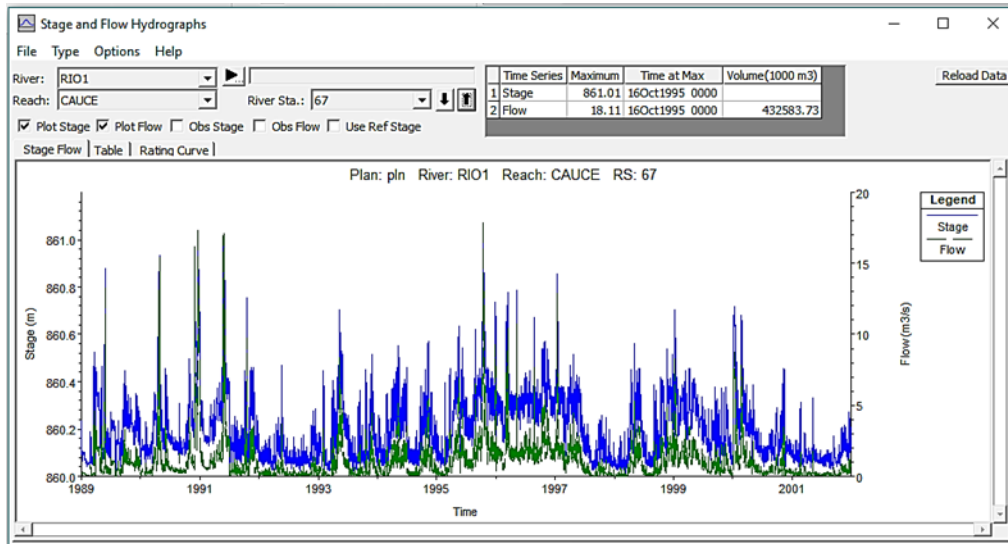


Figura 22. Diagrama de niveles de agua y caudal para la sección 67.
Fuente: Autores.

En el perfil longitudinal del embalse (ver Figura 23) se observan los diversos cambios en el flujo. Al inicio sube la línea de energía igual que la superficie del agua, después las mismas presentan un comportamiento constante. A partir de la sección 60 se presenta una elevación considerable en la línea de energía y la superficie del agua, debido a que dichas secciones sobrepasan la cota de inundación y ese exceso se dirige a las estructuras de salida.

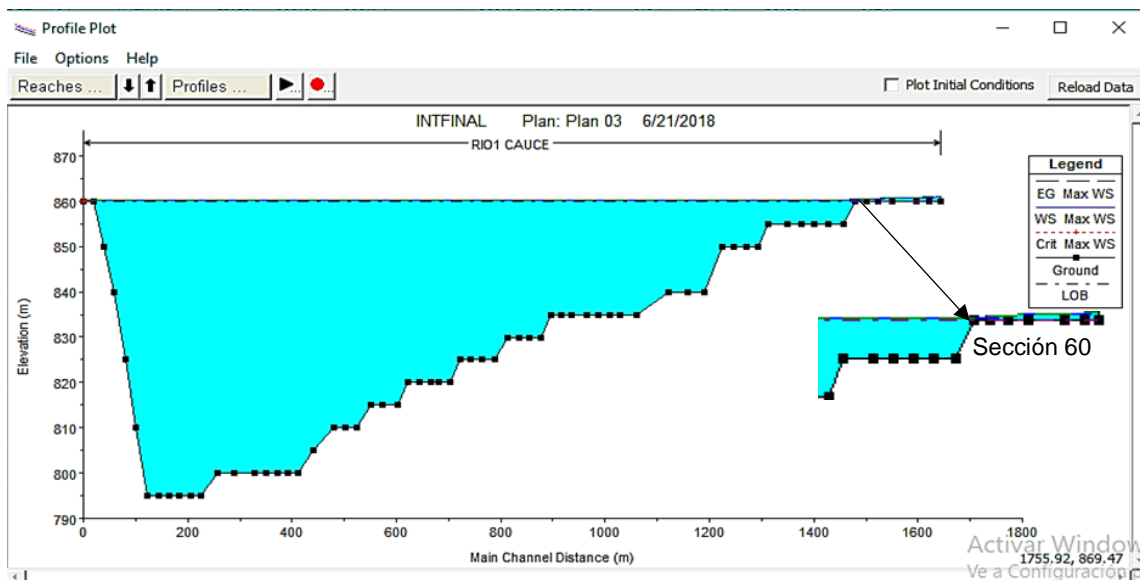


Figura 23. Perfil longitudinal para flujo no permanente (1989-2002).
Fuente: Autores.

Para cada sección también es posible acceder a una tabla de salida de resultados (Cross Section Output) donde se muestran los datos de salida para la sección y para el canal principal y sus bancas izquierda y derecha (ver Figuras 25 a 27). Como podemos observar en las tablas anteriores en la sección 1 la profundidad mínima es de 860 msnm, en la sección 33 la profundidad mínima corresponde a 825 msnm y finalmente en la sección 67 la profundidad mínima tiene un valor de 860 msnm, lo cual quiere decir que el agua esta represada de inicio a fin de la modelación ya que inicia y termina en la misma cota, dicho valor también representa la cota de inundación del embalse.

Plan: pln RIO1 CAUCE RS: 1 Profile: Max WS					
Element		Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	860.20				
Vel Head (m)	0.01	0.120	0.050	0.120	
W.S. Elev (m)	860.20				
Crit W.S. (m)	860.09				
E.G. Slope (m/m)	0.003560				
Q Total (m3/s)	17.92	0.00	44.42	0.00	
Top Width (m)	226.00	0.00	44.42	0.00	
Vel Total (m/s)	0.40	0.00	17.92	0.00	
Max Chl Dpth (m)	0.20	0.04	225.93	0.04	
Conv. Total (m3/s)	300.4	0.03	0.40	0.04	
Length Wtd. (m)		0.10	0.20	0.10	
Min Ch El (m)	860.00	0.0	300.4	0.0	
Alpha	1.00	0.20	225.93	0.20	
Frctn Loss (m)		0.63	6.86	0.66	
C & E Loss (m)		0.02	2.77	0.02	
Element					
Wt. n-Val.					
Reach Len. (m)					
Flow Area (m2)					
Area (m2)					
Flow (m3/s)					
Top Width (m)					
Avg. Vel. (m/s)					
Hydr. Depth (m)					
Conv. (m3/s)					
Wetted Per. (m)					
Shear (N/m2)					
Stream Power (N/m s)					
Cum Volume (1000 m3)					
Cum SA (1000 m2)					

Figura 24. Tabla de resultados para la sección 1.
Fuente: Autores.

Plan: pln RIO1 CAUCE RS: 33 Profile: Max WS					
Element		Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	860.26				
Vel Head (m)	0.00	0.120	0.050	0.120	
W.S. Elev (m)	860.26	23.31	20.25	30.58	
Crit W.S. (m)		0.07	4701.87	0.05	
E.G. Slope (m/m)	0.000000	0.07	4701.87	0.05	
Q Total (m3/s)	18.04	0.00	18.04	0.00	
Top Width (m)	220.13	0.54	219.21	0.37	
Vel Total (m/s)	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max Chl Dpth (m)	35.26	0.13	21.45	0.13	
Conv. Total (m3/s)	684969.6	0.1	684969.3	0.1	
Length Wtd. (m)	20.25	0.60	239.17	0.45	
Min Ch El (m)	825.00	0.00	0.00	0.00	
Alpha	1.00	0.00	0.00	0.00	
Frctn Loss (m)	0.00	0.09	6707.51	0.05	
C & E Loss (m)		0.68	233.04	0.36	
Element					
Wt. n-Val.					
Reach Len. (m)					
Flow Area (m2)					
Area (m2)					
Flow (m3/s)					
Top Width (m)					
Avg. Vel. (m/s)					
Hydr. Depth (m)					
Conv. (m3/s)					
Wetted Per. (m)					
Shear (N/m2)					
Stream Power (N/m s)					
Cum Volume (1000 m3)					
Cum SA (1000 m2)					

Figura 25. Sección 33 Tabla de resultados para la sección 33.
Fuente: Autores.

Cross Section Output

File Type Options Help

River: RIO1 Profile: Max WS

Reach CAUCE RS: 67 Plan: gjb

Plan: pln RIO1 CAUCE RS: 67 Profile: Max WS

		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	861.10	Wt. n-Val.	0.120	0.050	0.120
Vel Head (m)	0.09	Reach Len. (m)	59.96	20.02	22.13
W.S. Elev (m)	861.01	Flow Area (m2)	1.35	12.74	0.89
Crit W.S. (m)		Area (m2)	1.35	12.74	0.89
E.G. Slope (m/m)	0.004586	Flow (m3/s)	0.46	17.35	0.29
Q Total (m3/s)	18.11	Top Width (m)	2.69	12.64	1.76
Top Width (m)	17.08	Avg. Vel. (m/s)	0.34	1.36	0.33
Vel Total (m/s)	1.21	Hydr. Depth (m)	0.50	1.01	0.50
Max Chl Dpth (m)	1.01	Conv. (m3/s)	6.8	256.3	4.3
Conv. Total (m3/s)	267.4	Wetted Per. (m)	2.87	12.64	2.03
Length Wtd. (m)	20.79	Shear (N/m2)	21.23	45.35	19.67
Min Ch El (m)	860.00	Stream Power (N/m s)	7.26	61.76	6.39
Alpha	1.22	Cum Volume (1000 m3)	0.27	8428.81	11.48
Frcn Loss (m)	0.13	Cum SA (1000 m2)	1.49	362.08	4.09
C & E Loss (m)					

Errors, Warnings and Notes

Enter to move to next downstream river station location

Figura 26. Tabla de resultados para la sección 67.
Fuente: Autores.

6.2. Análisis de sedimentación para escenarios base.

Los resultados de la sedimentación para el escenario “Base 1” (curva granulométrica “Memorando” y datos de caudal de 1989-2002”) se pueden ver en las Figuras 28 y 29. La Figura 27 muestra el perfil longitudinal del embalse con áreas sedimentadas en color blanco que se localizan principalmente en la zona de entrada al embalse (derecha en la figura). La Figura 28 muestra un extracto de la tabla de datos de HEC-RAS para la modelación de sedimentos. En dicha tabla, la columna “Invert Change” muestra los cambios en el lecho de cada una de las secciones transversales. Para nuestro caso, dadas las condiciones de frontera seleccionadas, solo tenemos valores positivos indicando condiciones de sedimentación en cada una de las secciones.

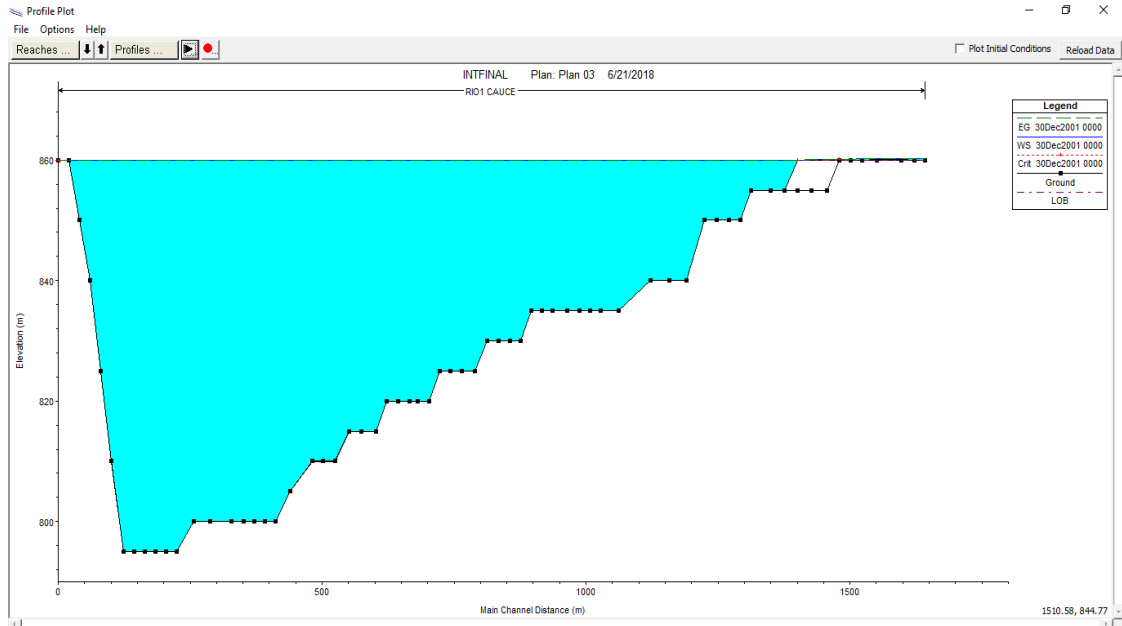


Figura 27. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 1.
Fuente: Autores.

File View Help
 Files ... Reaches ... Profiles ... Variables ... Plot Observed Data 30Dec1990 17:00:00

Profile Plot | Schematic Plot | Table

River	Reach	RS	Ch Dist	Ch Invert E [m]	Sound Channel [m]	Flow [m ³ /s]	Velocity [m/s]	Shear Stress [m]	
14	R301	CAUCE	54	21.73986	830.001	9.520136E-04	15.30468	2.407369E-02	9.06833E-04
15	R301	CAUCE	53	22.41987	830.0009	8.908301E-04	15.30468	2.019401E-02	6.150965E-04
16	R301	CAUCE	52	23.6601	830.0008	7.499777E-04	15.30468	2.027999E-02	6.871739E-04
17	R301	CAUCE	51	33.13012	830.0008	7.439621E-04	15.30468	1.102979E-02	1.883051E-04
18	R301	CAUCE	50	33.13987	840.0007	5.621423E-04	15.30468	5.701912E-03	5.139923E-05
19	R301	CAUCE	49	36.23005	840.0007	5.142964E-04	15.30468	4.38181E-03	2.458874E-05
20	R301	CAUCE	48	60.43014	840.0005	4.063695E-04	15.30468	4.039179E-03	2.047324E-05
21	R301	CAUCE	47	32.79008	835.0003	2.795433E-04	15.30468	3.992049E-03	2.032169E-05
22	R301	CAUCE	46	20.02993	835.0001	1.705743E-04	15.30468	6.90541E-03	8.011099E-05
23	R301	CAUCE	45	20.46	835.0001	1.586038E-04	15.30468	7.22301E-03	8.470618E-05
24	R301	CAUCE	44	24.06	835	1.36691E-04	15.30468	4.817288E-03	1.372521E-04
25	R301	CAUCE	43	27.39988	835	1.179548E-04	15.30468	7.011801E-03	9.560144E-05
26	R301	CAUCE	42	20.07992	835.0001	1.273421E-04	15.30468	5.796151E-03	5.308002E-05
27	R301	CAUCE	41	18.87997	835	1.237909E-04	15.30468	4.231991E-03	2.573132E-05
28	R301	CAUCE	40	20.3899	835	1.210643E-04	15.30468	3.83443E-03	1.943932E-05
29	R301	CAUCE	39	20.22988	830.0001	9.879437E-05	15.30468	3.899971E-03	2.065009E-05
30	R301	CAUCE	38	20.05988	830.0001	9.057609E-05	15.30468	3.662737E-03	8.05557E-05
31	R301	CAUCE	37	22.62012	830.0001	8.65783E-05	15.30468	3.93009E-03	2.011102E-05
32	R301	CAUCE	36	22.9301	830.0001	7.423396E-05	15.30468	4.325401E-03	2.626611E-05
33	R301	CAUCE	35	24.35992	835.0001	6.949888E-05	15.30468	3.889757E-03	2.046309E-05
34	R301	CAUCE	34	22.31999	825.0001	6.330337E-05	15.30468	3.720802E-03	1.836236E-05
35	R301	CAUCE	33	20.25	825.0001	5.560729E-05	15.30468	3.274236E-03	1.470507E-05
36	R301	CAUCE	32	20.15002	825.0001	5.168733E-05	15.30468	3.013071E-03	1.179598E-05
37	R301	CAUCE	31	20.53011	820.0001	4.63283E-05	15.30468	2.582759E-03	8.672505E-06
38	R301	CAUCE	30	16.26992	820.0001	4.126847E-05	15.30468	2.731076E-03	9.898634E-06
39	R301	CAUCE	29	21.79999	820.0001	3.912068E-05	15.30468	2.65713E-03	9.531387E-06
40	R301	CAUCE	28	21.96998	820.0001	3.409381E-05	15.30468	2.58182E-03	9.737733E-06
41	R301	CAUCE	27	20.15002	820.0001	3.039117E-05	15.30468	2.336774E-03	7.997959E-06
42	R301	CAUCE	26	27.07996	815.0002	2.644904E-05	15.30468	2.108147E-03	6.93765E-06
43	R301	CAUCE	25	23.40996	815.0002	2.293383E-05	15.30468	2.24029E-03	1.002118E-05
44	R301	CAUCE	24	26.3199	815.0002	2.088373E-05	15.30468	2.133982E-03	8.420938E-06
45	R301	CAUCE	23	22.31014	809.9999	1.570237E-05	15.30468	1.68992E-03	4.964123E-06
46	R301	CAUCE	22	21.1199	809.9999	1.529136E-05	15.30468	1.574106E-03	3.790089E-06
47	R301	CAUCE	21	41.10013	809.9999	1.620689E-05	15.30468	1.307391E-03	2.088998E-06
48	R301	CAUCE	20	27.39988	805	1.328801E-05	15.30468	1.084437E-03	1.421417E-06
49	R301	CAUCE	19	20.21007	800.0001	1.036359E-05	15.30468	8.923605E-04	8.719638E-07
50	R301	CAUCE	18	20.74012	800.0001	8.861874E-06	15.30468	8.779004E-04	9.413142E-07
51	R301	CAUCE	17	20.34997	800.0001	7.867723E-06	15.30468	9.230442E-04	1.068684E-06

Figura 28. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 1.
Fuente: Autores.

Las granulometrías denominadas “Curva Intermedia” y “Curva Manual” crearon condiciones de sedimentación más fuertes. Para el caso del escenario “Base 3” (curva granulométrica “Manual” y datos de caudal de 1989-2002), se evidencia una zona más extensa de sedimentación aguas arriba del embalse. Esto se debe a que los valores del porcentaje que pasa inician con un valor mayor, es decir, que hay más finos en la curva granulométrica La Figura 29 muestra el perfil longitudinal de la modelación con áreas sedimentadas en blanco. Un comportamiento similar fue encontrado Juan Pablo Sánchez y Eduardo Jaramillo en la tesis “ANÁLISIS DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO NO PERMANENTE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CON EL MODELO HEC-RAS” [5].

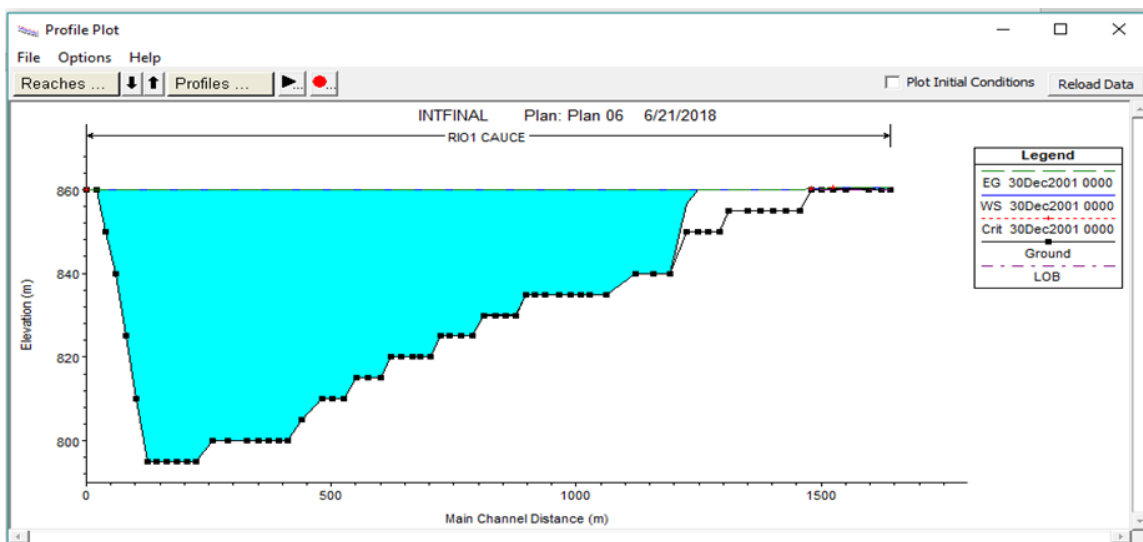


Figura 29. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 3.
Fuente: Autores.

La Figura 30 confirma el incremento de la sedimentación con este escenario. Las secciones 51 a 60 son las que muestran mayores valores en la columna de cambio de lecho (invert change).

Sediment Spatial Plot

File View Help

Profiles Variables Plot Observed Data

Profile	Reach	Plan	Ch. Elev.	Ch. Bottom Elev.	Segment Change	Plan Elev.	Velocity	Shear Stress
1	R01	CAUCE	87	20.51887	0.000000	0.294633	5.44227E-02	1.07469E-02
2	R02	CAUCE	85	24.66899	0.000000	0.294633	5.38158E-02	9.77738E-03
3	R03	CAUCE	85	46.82002	0.000000	0.294633	4.96188E-02	8.61339E-03
4	R04	CAUCE	85	27.28996	0.000000	0.294633	4.20880E-02	8.81301E-03
5	R05	CAUCE	87	22.22986	0.000000	0.294633	0.48046E-02	2.07056E-03
6	R06	CAUCE	84	23.44001	0.000000	0.294633	6.97411E-02	2.46923E-02
7	R07	CAUCE	81	23.53007	0.000000	0.294633	0.39310E-02	1.710E-03
8	R08	CAUCE	85	26.14885	0.000000	0.294633	5.24850E-02	2.02129E-02
9	R09	CAUCE	89	26.31003	0.000000	0.294633	6.01200E-02	2.17900E-02
10	R10	CAUCE	88	24.58894	0.000000	0.294633	5.21100E-02	2.04488E-02
11	R11	CAUCE	87	26.31003	0.000000	0.294633	5.02612E-02	2.42448E-02
12	R12	CAUCE	86	37.53014	0.000000	0.294633	6.01200E-02	2.46324E-02
13	R13	CAUCE	85	20.22994	0.000000	0.294633	5.87697E-02	2.15292E-02
14	R14	CAUCE	84	21.77996	0.000000	0.294633	5.96188E-02	1.88619E-02
15	R15	CAUCE	83	22.42987	0.000000	0.294633	4.79682E-02	1.55241E-02
16	R16	CAUCE	83	23.66811	0.000000	0.294633	3.93881E-02	8.28291E-03
17	R17	CAUCE	81	33.11012	0.000000	0.294633	9.0214E-04	1.72243E-04
18	R18	CAUCE	80	33.11007	0.000000	0.294633	1.23899E-04	1.88853E-04
19	R19	CAUCE	89	36.22005	0.000000	0.294633	8.31812E-05	9.31475E-04
20	R20	CAUCE	88	40.41014	0.000000	0.294633	7.84942E-05	7.76097E-04
21	R21	CAUCE	87	32.79008	0.000000	0.294633	7.75129E-05	7.73209E-04
22	R22	CAUCE	86	30.62003	0.000000	0.294633	1.34364E-04	3.87151E-04
23	R23	CAUCE	85	20.46	0.000000	0.294633	1.40311E-04	3.23246E-04
24	R24	CAUCE	84	24.46	0.000000	0.294633	1.53289E-04	5.52856E-04
25	R25	CAUCE	83	27.70998	0.000000	0.294633	1.38731E-04	3.89867E-04
26	R26	CAUCE	82	30.87992	0.000000	0.294633	1.12579E-04	2.03512E-04
27	R27	CAUCE	81	19.47997	0.000000	0.294633	8.22088E-05	9.82127E-04
28	R28	CAUCE	80	20.3899	0.000000	0.294633	7.61273E-05	7.36523E-04
29	R29	CAUCE	89	20.22998	0.000000	0.294633	7.93062E-05	7.80940E-04
30	R30	CAUCE	88	20.81008	0.000000	0.294633	7.08932E-05	8.40502E-04
31	R31	CAUCE	87	22.42012	0.000000	0.294633	7.41243E-05	7.66292E-04
32	R32	CAUCE	86	22.93011	0.000000	0.294633	8.37071E-05	8.13140E-04
33	R33	CAUCE	85	24.51002	0.000000	0.294633	7.52661E-05	7.70681E-04
34	R34	CAUCE	84	22.31999	0.000000	0.294633	7.19452E-05	6.91800E-04
35	R35	CAUCE	83	20.13	0.000000	0.294633	6.33174E-05	5.84250E-04
36	R36	CAUCE	82	20.13002	0.000000	0.294633	5.82297E-05	4.40847E-04
37	R37	CAUCE	81	20.53011	0.000000	0.294633	4.98708E-05	3.23340E-04
38	R38	CAUCE	80	18.28992	0.000000	0.294633	5.27812E-05	3.72612E-04

Figura 30. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 3. Fuente: Autores.

Para el caso del escenario "Base 2" (curva granulométrica "Curva Intermedia" y datos de caudal de 1989-2002"), se obtuvieron condiciones intermedias de sedimentación como se ilustra en las Figuras 32 y 33. La sedimentación sigue ocurriendo en la parte alta del embalse (aguas arriba) pero con valores de cambio de lecho menores que para el escenario "Base 3".

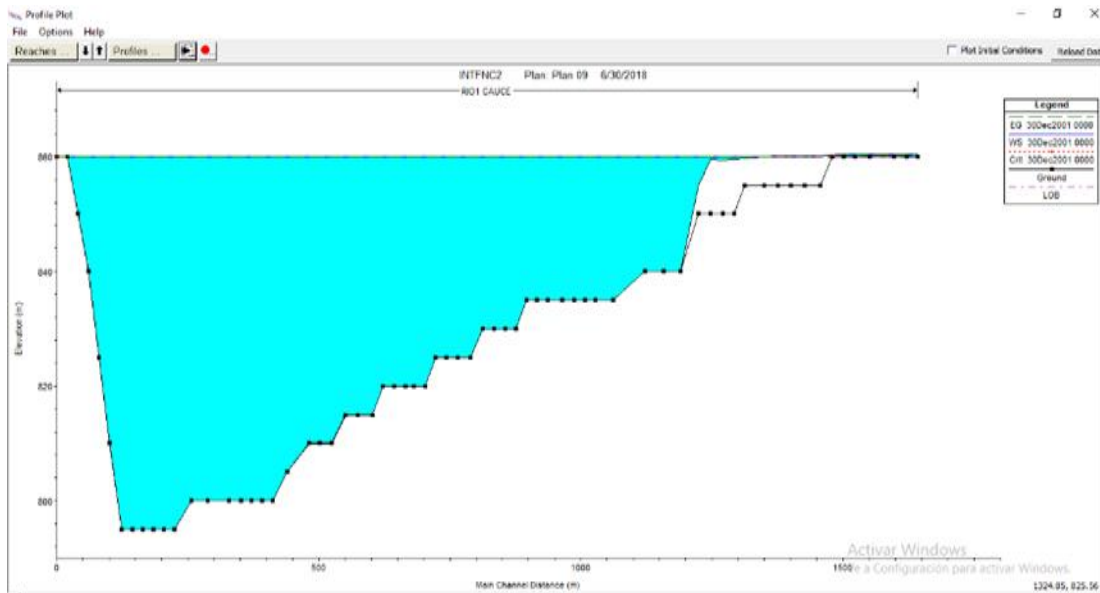


Figura 31. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Base 2. Fuente: Autores.

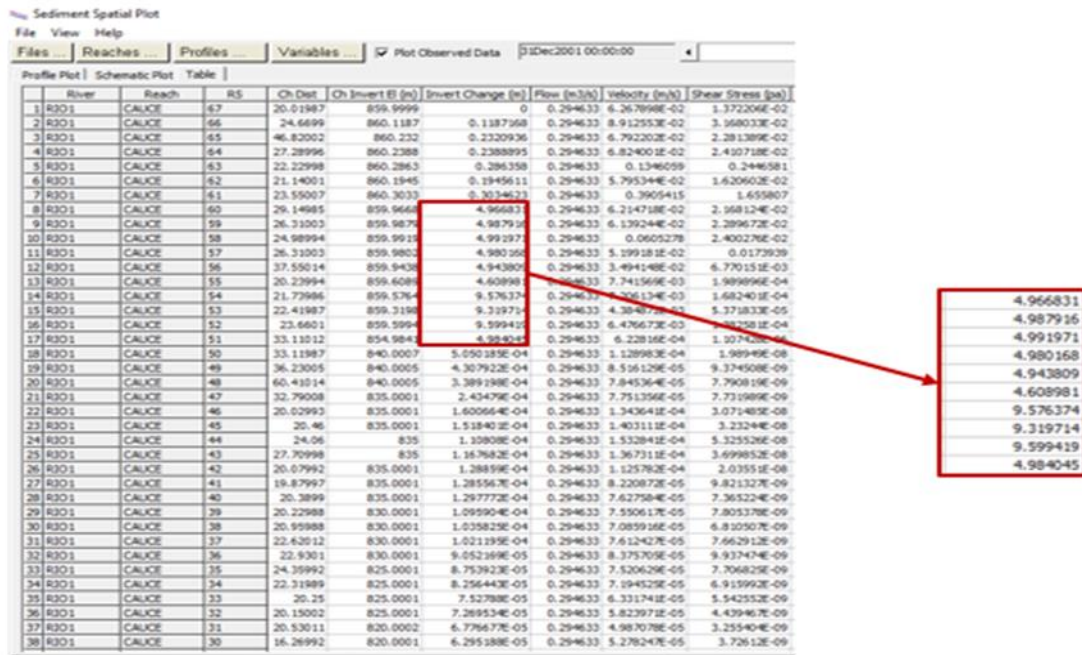


Figura 32. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Base 2. Fuente: Autores.

6.3. Análisis de sedimentación para escenarios futuros.

De acuerdo con la Tabla 5 de la sección 5.4, en esta sección presentamos los resultados de la sedimentación para escenarios futuros (1 al 6). Para cada uno de los escenarios mostramos la tendencia en la sedimentación y calculamos el volumen de los sedimentos generados.

6.3.1. RCP 4.5 (Escenarios futuros 1, 2, y 3)

Los resultados de la modelación para los escenarios futuros 1, 2, y 3 se muestran esquemáticamente con los perfiles longitudinales (ver Figuras 34, 35 y 36). En ellos se ve que se conserva la tendencia de mayor sedimentación en la zona de entrada del embalse (color blanco) con algunas diferencias notables entre el comportamiento del escenario Futuro 1 (RCP 4.5 y curva granulométrica “Memorando”) y los escenarios Futuro 2 (RCP 4.5 y curva granulométrica “Curva Intermedia”) y Futuro 3 (RCP 4.5 y curva granulométrica “Manual”). El escenario Futuro 1 muestra mayor acumulación de sedimentos en las secciones de entrada al embalse debido al tipo de granulometría que presenta (menor cantidad de finos).

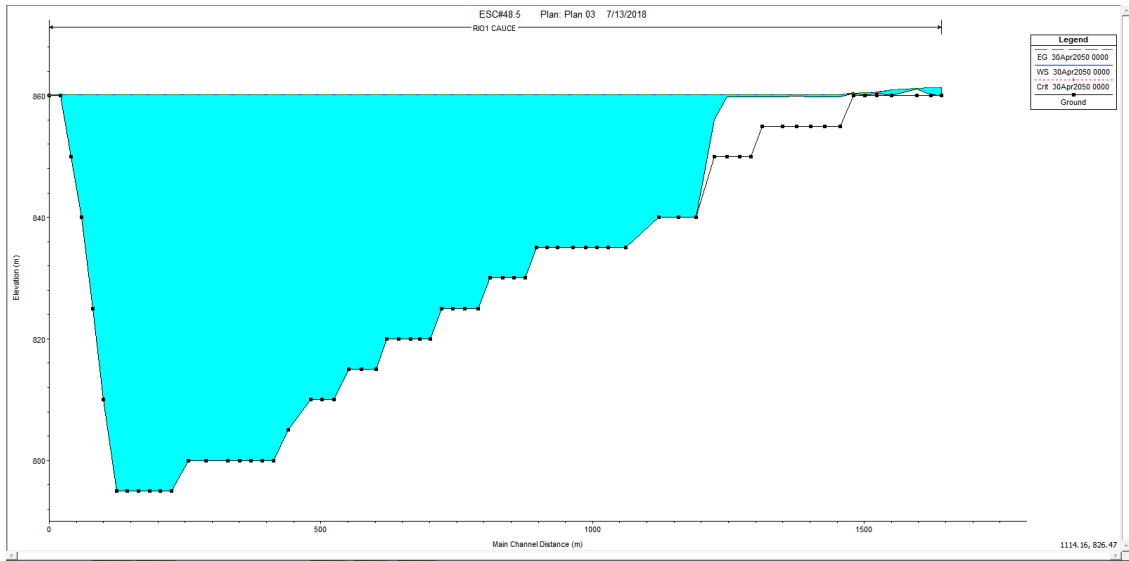


Figura 33. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 1.
Fuente: Autores.

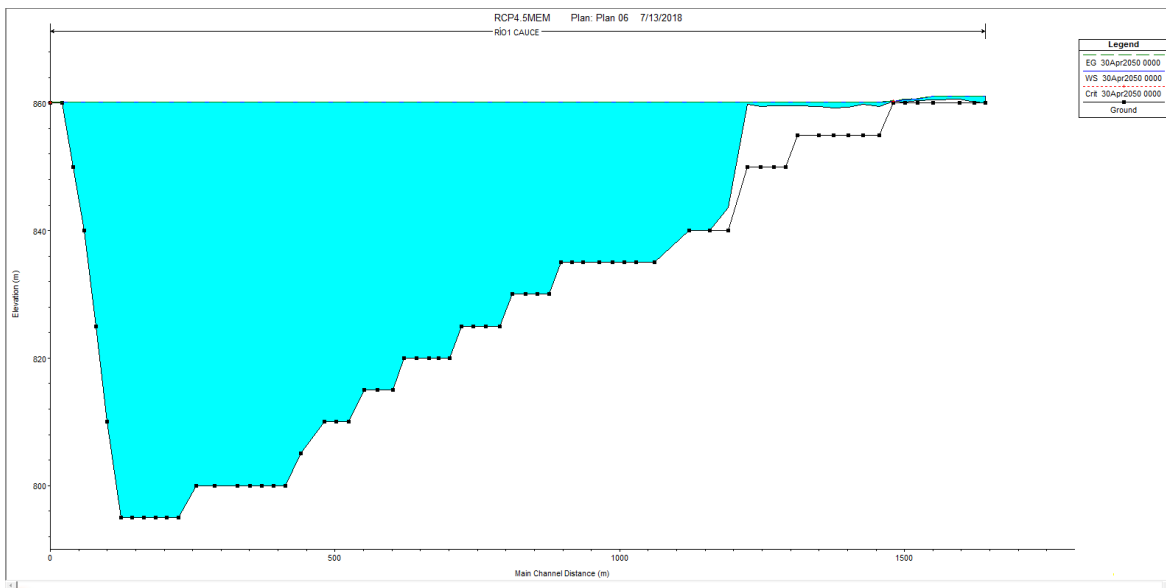


Figura 34. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 2.
Fuente: Autores.

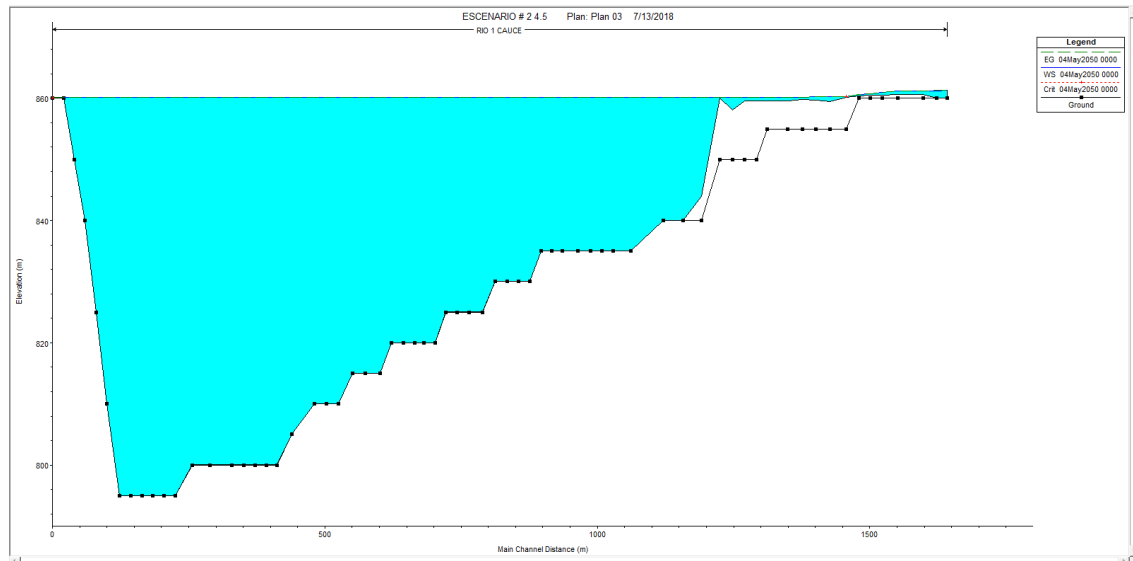


Figura 35. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 3.
Fuente: Autores.

HEC-RAS ofrece tablas de resultados para la modelación del transporte de sedimentos. Las Figuras 37 a 39 presentan muestras de las tablas importadas de HEC-RAS a Excel para cada uno de los escenarios, con un enfoque en las secciones transversales finales (aguas arriba) pues es en ellas donde se localiza la mayoría de la sedimentación. En las figuras se pueden ver datos sobre la altura de los sedimentos en cada una de las secciones, la velocidad, el flujo, y la concentración de sedimentos, entre otras variables. Estas tablas nos permitieron realizar el análisis cuantitativo de los volúmenes sedimentados por sección y para todo el embalse. Para el análisis usamos la información de cambio de lecho (invert change).

	Ch Dist	Ch Invert m	w _{sel}	Observed Data	Invert Change	Flow	Velocity	Shear Stress	Mass Bed Change All	Mass In Cum	Long Cum Mass Change	Sed Concentration	Ch Mann n
		m	m		m	m ³ /s	m/s	Pa	Tonnes	Tonnes	Tonnes	mg/l	
67	20.01987	859.9999	861.3965	3.40E+38	0	6.839998	0.3656157	0.298842	0	2128011	0	65.26937	0.05
66	24.6699	860.6215	861.2969	3.40E+38	0.6215348	6.839998	1.29215	5.705205	0.5232072	2128011	0.5232072	75.96021	0.05
65	46.82002	860.5519	860.7136	3.40E+38	0.6520511	6.839998	1.257904	7.258105	1061521	2128006	1062.044	75.96021	0.05
64	27.28996	860.2537	860.5304	3.40E+38	2.54E-01	6.839998	0.4513632	0.7481147	198.2948	2117391	1260.339	101.0509	0.05
63	22.22998	860.0329	860.4354	3.40E+38	3.30E-02	6.839998	0.687894	1.601527	-2.344493	2115408	1257.995	112.1478	0.05
62	21.14001	860.0292	860.3503	3.40E+38	2.93E-02	6.839998	0.58025	1.226634	3.963216	2115431	1261.958	127.5017	0.05
61	23.55007	860.04	860.2701	3.40E+38	4.01E-02	6.839998	0.4792096	0.9364454	15.38406	2115391	1277.342	144.0882	0.05
60	29.14985	859.7252	860.2572	3.40E+38	4.725166	6.839998	0.2153923	0.1705002	14097.59	2115238	15374.94	123.8859	0.05
59	26.31003	859.7889	860.2475	3.40E+38	4.788926	6.839998	0.2138224	0.1477359	15634.47	197426.2	31009.41	10.4437	0.05
58	24.98994	859.8572	860.2385	3.40E+38	4.857287	6.839998	0.2041951	1.44E-01	26060.87	181791.7	57070.27	123.2959	0.05
57	26.31003	859.8682	860.2296	3.40E+38	4.868236	6.839998	1.92E-01	1.29E-01	20186.88	155730.8	77257.15	101.8421	0.05
56	37.55014	859.8391	860.2204	3.40E+38	4.839159	6.839998	1.95E-01	1.30E-01	21560.73	135644	98807.88	101.184	0.05
55	20.23994	859.7635	860.2079	3.40E+38	4.763542	6.839998	1.96E-01	1.38E-01	17759.56	113993.2	116667.4	100.3082	0.05
54	21.73986	859.4254	860.2016	3.40E+38	9.425409	6.839998	0.1908828	0.1708002	22639.27	96233.66	139206.7	100.2528	0.05
53	22.41987	859.7567	860.1949	3.40E+38	9.75665	6.839998	0.1875159	1.24E-01	26494.64	73594.38	165701.4	32.2612	0.05
52	23.6601	859.5491	860.1892	3.40E+38	9.549111	6.839998	0.1858891	1.25E-01	26985.6	47099.74	192687	65.30244	0.05
51	33.11012	850.25	860.1904	3.40E+38	0.2499739	6.839998	5.1E-03	4.13E-05	1028.381	20114	193715.3	3.92E-06	0.05
50	33.11987	840.1711	860.1904	3.40E+38	0.1710033	6.839998	2.62E-03	1.07E-05	770.0185	19085.76	194485.4	3.58E-06	0.05
49	36.23005	840.1793	860.1904	3.40E+38	1.79E-01	6.839998	1.98E-03	5.07E-06	833.6666	18315.74	195319	3.52E-06	0.05
48	60.41014	840.1685	860.1904	3.40E+38	0.168303	6.839998	1.82E-03	4.20E-06	1108.49	17482.08	196427.5	3.43E-06	0.05
47	32.79008	835.1528	860.1904	3.40E+38	1.53E-01	6.839998	1.80E-03	4.16E-06	940.224	16373.59	197367.7	3.36E-06	0.05
46	20.02993	835.1244	860.1904	3.40E+38	1.24E-01	6.839998	3.03E-03	1.82E-05	263.9177	15433.36	197631.7	3.35E-06	0.05
45	20.46	835.1207	860.1904	3.40E+38	1.21E-01	6.839998	3.25E-03	1.73E-05	179.4323	15169.44	197811	3.33E-06	0.05
44	24.06	835.0908	860.1904	3.40E+38	9.09E-02	6.839998	3.54E-03	2.82E-05	175.7751	14990.01	197986.9	3.33E-06	0.05
43	27.70998	835.0988	860.1904	3.40E+38	9.89E-02	6.839998	3.16E-03	2.16E-05	240.4539	14814.24	198227.3	3.31E-06	0.05
42	20.07992	835.1139	860.1904	3.40E+38	1.14E-01	6.839998	2.80E-03	1.09E-05	261.2126	14573.78	198488.4	3.29E-06	0.05
41	19.87997	835.1191	860.1904	3.40E+38	1.19E-01	6.839998	1.90E-03	5.25E-06	296.82	14312.66	198785.3	3.27E-06	0.05
40	20.3899	835.127	860.1904	3.40E+38	1.27E-01	6.839998	1.77E-03	3.95E-06	296.1032	14015.84	1990814	3.25E-06	0.05

Figura 36. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 1. Fuente: Autores.

	Ch Dist	Ch Invert E	w _{sel}	Invert Change	Flow	Velocity	Shear Stress	EG Slope	Mass Bed Change All	Mass In Cum All	Long. Cum Mass Change	Sediment Concentration	Ch Mann n
		m	m	m	m ³ /s	m/s	pa	m/m	Tonnes	Tonnes	Tonnes	mg/l	
67	20.01987	859.9999	861.2672	0.000000	9.169998	0.542996	0.680839	5.37E-04	0	401768.8	0	540.8318	0.05
66	24.6699	860.08	861.2532	0.080072	9.169998	0.565877	0.758687	6.47E-04	9.22653	401768.8	9.22653	540.8318	0.05
65	46.82002	860.636	861.2361	0.636065	9.169998	0.463326	0.641089	1.09E-03	941.7433	401759.6	950.9699	596.9005	0.05
64	27.28996	860.037	8.61E+02	0.037076	9.169998	0.373796	1.48571	2.26E-03	9.200518	400817.8	960.1704	663.8712	0.05
63	22.22998	860.4844	860.9162	0.484539	9.169998	0.79088	2.068003	4.79E-03	217.71	400808.6	1177.88	663.8712	0.05
62	21.14001	860.468	860.7418	0.468097	9.169998	0.912831	3.206885	1.17E-02	529.502	400590.9	1707.382	663.8712	0.05
61	23.55007	860.3456	860.5999	0.345663	9.169998	0.581126	1.332065	5.24E-03	614.9261	400061.4	2322.309	663.8712	0.05
60	29.14985	857.2982	860.2599	2.298201	9.169998	1.18613	7.13E+00	4.75E-02	11255.32	399446.5	13577.63	12750.38	0.05
59	26.31003	860.2255	860.2255	5.225469	9.169998	1.69E-01	7.70E-02	9.82E-05	22762.89	388191.2	36340.52	64.97474	0.05
58	24.98994	859.7611	860.2211	4.761171	9.169998	0.196869	1.20E-01	2.26E-04	37401.02	365428.3	737415.3	83.05536	0.05
57	26.31003	859.7173	860.2139	4.717299	9.169998	2.14E-01	1.50E-01	3.38E-04	35478.56	328027.3	109220.1	131.6583	0.05
56	37.55014	859.5941	860.2097	4.594140	9.169998	1.59E-01	7.38E-02	1.18E-04	34116.12	292548.7	143336.2	54.6468	0.05
55	20.23994	859.5839	860.205	4.583902	9.169998	1.65E-01	8.00E-02	1.29E-04	47571.97	258432.6	190908.2	51.404	0.05
54	21.73986	859.6082	860.202	9.608175	9.169998	1.73E-01	8.84E-02	1.48E-04	38075.88	210860.6	228984.1	52.87346	0.05
53	22.41987	859.5186	860.1996	9.518557	9.169998	1.50E-01	6.49E-02	9.96E-05	27001.91	172784.7	255986	44.97211	0.05
52	23.6601	858.7517	860.2003	8.751666	9.169998	4.02E-02	3.13E-03	1.45E-06	29647.06	145782.8	285633	29.34372	0.05
51	33.11012	859.5257	860.1853	9.525691	9.169998	5.16E-01	1.46E+00	1.55E-02	60220.63	116135.8	345853.7	7782.527	0.05
50	33.11987	844.2565	860.1948	4.256350	9.17E+00	5.13E-03	5.40E-05	4.63E-09	49725.95	55915.14	395579.6	5.07E-01	0.05
49	36.23005	840.0632	8.60E+02	0.063017	9.17E+00	2.63E-03	8.92E-06	5.21E-10	321.6828	6189.185	395901.3	4.56E-01	0.05
48	60.41014	840.0573	8.60E+02	0.057153	9.169998	2.42E-03	7.41E-06	4.16E-10	403.52	5867.502	396304.8	4.04E-01	0.05
47	32.79008	835.0505	8.60E+02	0.050562	9.17E+00	2.40E-03	7.35E-06	3.98E-10	326.6783	5463.982	396631.5	3.73E-01	0.05
46	20.02993	835.0406	8.60E+02	0.040723	9.17E+00	4.04E-03	3.21E-05	1.59E-09	89.94473	5137.304	396721.4	3.66E-01	0.05
45	20.46	835.0393	8.60E+02	0.039431	9.17E+00	4.33E-03	3.06E-05	1.47E-09	60.92321	5047.359	396782.3	3.62E-01	0.05
44	24.06	835.0295	8.60E+02	0.029645	9.17E+00	4.72E-03	4.99E-05	2.36E-09	59.54887	4986.436	396841.9	3.58E-01	0.05
43	27.70998	835.0321	8.60E+02	0.032200	9.17E+00	4.21E-03	3.82E-05	1.93E-09	81.27731	4926.887	396923.2	3.52303	0.05
42	20.07992	835.0375	860.1948	0.037639	9.17E+00	3.42E-03	2.10E-05	1.05E-09	89.36427	4845.609	397012.6	3.47E-01	0.05
41	19.87997	835.0386	8.60E+02	0.038693	9.17E+00	2.54E-03	9.30E-06	4.71E-10	99.67507	4756.245	397112.6	3.41E-01	0.05
40	20.3899	835.0411	8.60E+02	0.041159	9.17E+00	2.36E-03	7.01E-06	3.35E-10	99.09941	4656.57	397211.3	3.35E-01	0.05

Figura 37. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 2. Fuente: Autores.

Ch Dist	Ch Invert E	Wsel	Invert Change	Flow	Velocity	Shear Stres	EG Slope	Mass Bed Change All	Mass In Cum All	Long. Cum Mass Change	Sediment Concentration	Ch Mann r	
	m	m	m	m ³ /s	m/s	pa	m/m	Tonnes	Tonnes	Tonnes	mg/l		
67	20.01987	859.9999	861.0345	0.000000	9.169998	0.671454	1.113897	1.08E-03	0	302127.2	0	1181.636	0.05
66	24.6639	861.0021	861.0021	1.002214	9.169998	0.739767	1.414088	1.56E-03	16.75129	302127.2	16.75129	1153.843	0.05
65	46.82002	860.3628	861.0065	0.362885	9.169998	0.287761	0.211149	2.24E-04	423.419	302110.5	440.1703	325.3354	0.05
64	27.28996	860.0118	860.9844	0.011857	9.169998	0.292963	0.775996	9.44E-04	0.295922	301687	440.4662	351.6773	0.05
63	22.22998	860.0855	860.928	0.085601	9.169998	0.458345	0.564138	7.00E-04	5.048548	301686.8	445.5148	402.4614	0.05
62	21.4001	860.5662	860.8607	0.566268	9.169998	0.847937	2.700392	9.17E-03	630.0906	301681.7	1075.605	402.4614	0.05
61	23.55007	860.4772	860.7435	0.477330	9.169998	0.55467	1.194944	4.49E-03	1036.066	301051.6	2111.672	402.4614	0.05
60	29.14985	859.576	860.4351	4.576070	9.169998	1.157964	7.02E+00	4.83E-02	13693.45	300015.5	15805.12	3641.829	0.05
59	26.31003	860.3887	860.3887	5.388740	9.169998	0.304716	0.306197	7.04E-04	15018.92	286322.1	30824.04	594.7058	0.05
58	24.98994	859.7955	860.3856	4.795503	9.169998	0.154824	6.83E-02	1.02E-04	21536.92	271303.2	52360.96	44.9993	0.05
57	26.31003	858.509	860.3861	3.509085	9.169998	5.05E-02	5.18E-03	2.77E-06	18774.14	249766.3	71135.1	22.62369	0.05
56	37.55014	859.8761	860.3842	4.876139	9.169998	0.180152	9.89E-02	1.79E-04	25333.5	230992.1	96468.6	66.63541	0.05
55	20.23994	859.5261	860.3057	4.526097	9.169998	1.00209	5.36E+00	5.23E-02	44830.65	205658.6	141299.3	5296.075	0.05
54	21.73986	860.1988	860.1988	10.198760	9.169998	0.226117	1.66E-01	3.65E-04	33071.9	160828	174371.1	191.6653	0.05
53	22.41987	858.5593	860.2002	8.559297	9.169998	5.78E-02	7.03E-03	4.18E-06	23493.32	127756.1	197864.5	31.2383	0.05
52	23.6601	859.4791	860.1994	9.479063	9.169998	1.16E-01	3.69E-02	4.89E-05	26636.86	104262.7	224501.3	35.34941	0.05
51	33.11012	857.4777	860.1998	7.477723	9.169998	3.62E-02	3.04E-03	1.27E-06	50939.38	77625.88	275440.7	29.26599	0.05
50	33.11987	841.3129	860.1998	1.312732	9.169998	3.89E-03	2.52E-05	1.84E-09	14764.27	26686.51	290205	2.79E+01	0.05
49	36.23005	840.1128	860.1998	0.112624	9.169998	2.64E-03	8.99E-06	5.26E-10	531.9114	11922.23	290736.9	2.67E+01	0.05
48	60.41014	840.1058	860.1998	0.105667	9.169998	2.43E-03	7.47E-06	4.20E-10	705.9468	11390.32	291442.8	2.53E+01	0.05
47	32.79008	835.0958	860.1998	0.095875	9.169998	2.40E-03	7.40E-06	4.02E-10	597.4027	10684.38	292040.3	2.42E+01	0.05
46	20.02993	835.0779	860.1998	0.078009	9.169998	4.05E-03	3.23E-05	1.60E-09	167.5687	10086.97	292207.8	2.39E+01	0.05
45	20.46	835.0756	860.1998	0.075683	9.169998	4.34E-03	3.08E-05	1.48E-09	113.9165	9919.403	292321.7	2.37E+01	0.05
44	24.06	835.0563	860.1998	0.056369	9.169998	4.73E-03	5.01E-05	2.38E-09	116.6032	9805.487	292433.3	2.35E+01	0.05
43	27.70998	835.0618	860.1998	0.061951	9.169998	4.22E-03	3.85E-05	1.94E-09	152.6615	9693.884	292586	2.330225	0.05
42	20.07992	835.0724	860.1998	0.072529	9.169998	3.42E-03	2.11E-05	1.06E-09	168.3465	9541.223	292754.3	2.30E+01	0.05
41	19.87997	835.0746	860.1998	0.074681	9.169998	2.54E-03	9.35E-06	4.75E-10	188.3479	9372.876	292942.7	2.28E+01	0.05
40	20.3899	835.0795	860.1998	0.079575	9.169998	2.36E-03	7.04E-06	3.37E-10	187.8739	9184.528	293130.6	2.25E+01	0.05

Figura 38. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 3. Fuente: Autores.

Para conocer el volumen total de sedimentos en el embalse para cada escenario, calculamos los volúmenes sedimentados por sección transversal (como se describió en la metodología) y totalizamos para todo el embalse. Las figuras 40 a 42 muestran extractos de los cálculos realizados para cada uno de los tres escenarios.

SECCIÓN	ÁREAS ESCENARIO 1 (m ²)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m ³)
67	0	8.285	0
66	2.44	18.43	44.3632
65	31.36	20.04	628.4544
64	22.42	19.8	443.316
63	8.8	19.93	175.384
62	24.25	20.165	489.00125
61	39.49	21.85	862.8565
60	307.57	21.66	6661.96662
59	297.62	20.28	6035.7336
58	355.75	20.555	7312.44125
57	378.55	20.23	7658.0665
56	350.81	20.16	7072.3296
55	363.19	25.82	9377.5658
54	572.24	31.83	18214.3992
53	756.48	36.275	27441.312
52	689.74	31.155	21488.8497
51	1311.41	21.22	27828.1202
50	511.74	20.545	10513.6983
49	8.75	20.475	179.15625
48	7.64	23.96	183.0544
47	6.29	34.405	216.40745
46	3.15	31.11	97.9965
45	2.81	21.715	61.01915
44	2.52	24.325	61.299
43	3.09	24.875	76.86375
42	3.41	25.245	86.08545
41	4.64	23.615	109.5736
40	4.45	21.06	93.717
39	3.6	21.84	78.624
38	3.55	18.99	67.4145
37	3.35	18.4	61.64
36	3.17	20.34	64.4778
35	3.11	20.2	62.822

Figura 39. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 1. Fuente: Autores.

SECCIÓN	ÁREAS ESCENARIO 2 (m ²)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m ³)
67	0	8.285	0
66	2.4623	18.43	45.380189
65	18.7481	20.04	375.711924
64	19.2946	19.8	382.03308
63	15.2967	19.93	304.863231
62	11.82856	20.165	238.5229124
61	18.4009	21.85	402.059665
60	293.7383	21.66	6362.371578
59	286.901	20.28	5818.35228
58	342.3281	20.555	7036.554096
57	351.8515	20.23	7117.355845
56	350.3275	20.16	7062.6024
55	368.3004	25.82	9509.516328
54	583.9923	31.83	18588.47491
53	700.4132	36.275	25407.48883
52	700.9729	31.155	21838.8107
51	1302.1566	21.22	27631.76305
50	796.9995	20.545	16374.35473
49	5.309	20.475	108.701775
48	4.6478	23.96	111.361288
47	3.8413	34.405	132.1599265
46	1.9263	31.11	59.927193
45	1.7222	21.715	37.397573
44	1.5525	24.325	37.7645625
43	1.8905	24.875	47.0261875
42	2.1222	25.245	53.574939
41	2.8283	23.615	66.7903045
40	2.7222	21.06	57.329532
39	2.2142	21.84	48.358128
38	2.1703	18.99	41.213997
37	2.0552	18.4	37.81568
36	1.9432	20.34	39.524688
35	1.9055	20.2	38.4911

Figura 40. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 2.
Fuente: Autores.

SECCIÓN	ÁREAS ESCENARIO 3 (m ²)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m ³)
67	0	8.285	0
66	1.7362	18.43	31.998166
65	25.5203	20.04	511.426812
64	18.9152	19.8	374.52036
63	13.7675	19.93	274.386275
62	22.752	20.165	458.79408
61	26.6829	21.85	583.021365
60	156.2014	21.66	3383.322324
59	325.2131	20.28	6595.321668
58	366.4054	20.555	7531.462997
57	394.0988	20.23	7972.618724
56	360.3543	20.16	7264.742688
55	365.586	25.82	9439.43052
54	590.5157	31.83	18796.11473
53	713.16	36.275	25869.879
52	640.6011	31.155	19957.92727
51	1266.2724	21.22	26870.30033
50	932.3031	20.545	19154.16719
49	15.7106	20.475	321.674535
48	14.8787	23.96	356.493652
47	13.0342	34.405	448.441651
46	6.652	31.11	206.94372
45	5.9644	21.715	129.516946
44	5.3693	24.325	130.6082225
43	6.5813	24.875	163.7098375
42	7.4225	25.245	187.3810125
41	9.9643	23.615	235.3069445
40	9.584	21.06	201.83904
39	7.7819	21.84	169.956696
38	7.6531	18.99	145.332369
37	7.2732	18.4	133.82688
36	6.9127	20.34	140.604318
35	6.7937	20.2	137.23274

Figura 41. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 2.
Fuente: Autores.

Finalmente, la *Tabla 6* resume el total del volumen sedimentado para cada uno de los tres escenarios futuros. Los resultados obtenidos sugieren que, a mayor cantidad de finos en la granulometría del escenario, se obtiene una mayor cantidad de sedimentos acumulados en el embalse. Es importante que futuros estudios evalúen el impacto que diferentes métodos de transporte de sedimentos pueden tener en estos resultados.

<i>Escenario</i>	<i>Volumen de sedimentos (m³)</i>
<i>Futuro 1</i>	<i>143,490</i>
<i>Futuro 2</i>	<i>156,937</i>
<i>Futuro 3</i>	<i>163,733</i>

*Tabla 6. Volumen total de sedimentos para escenarios futuros 1, 2 y 3.
Fuente: Autores.*

6.3.2. RCP 8.5 (Escenarios futuros 4, 5, y 6)

Los resultados de la modelación para los escenarios futuros 4, 5, y 6 se muestran esquemáticamente con los perfiles longitudinales (ver Figuras 43, 44 y 45). Al igual que para los escenarios del RCP 4.5, en ellos se ve que se conserva la tendencia de mayor sedimentación en la zona de entrada del embalse (color blanco) con algunas diferencias notables entre el comportamiento del escenario Futuro 4 (RCP 8.5 y curva granulométrica “Memorando”) y los escenarios Futuro 5 (RCP 8.5 y curva granulométrica “Curva Intermedia”) y Futuro 6 (RCP 8.5 y curva granulométrica “Manual”). El escenario Futuro 4 muestra mayor acumulación de sedimentos en las secciones de entrada al embalse debido al tipo de granulometría que presenta (menor cantidad de finos).

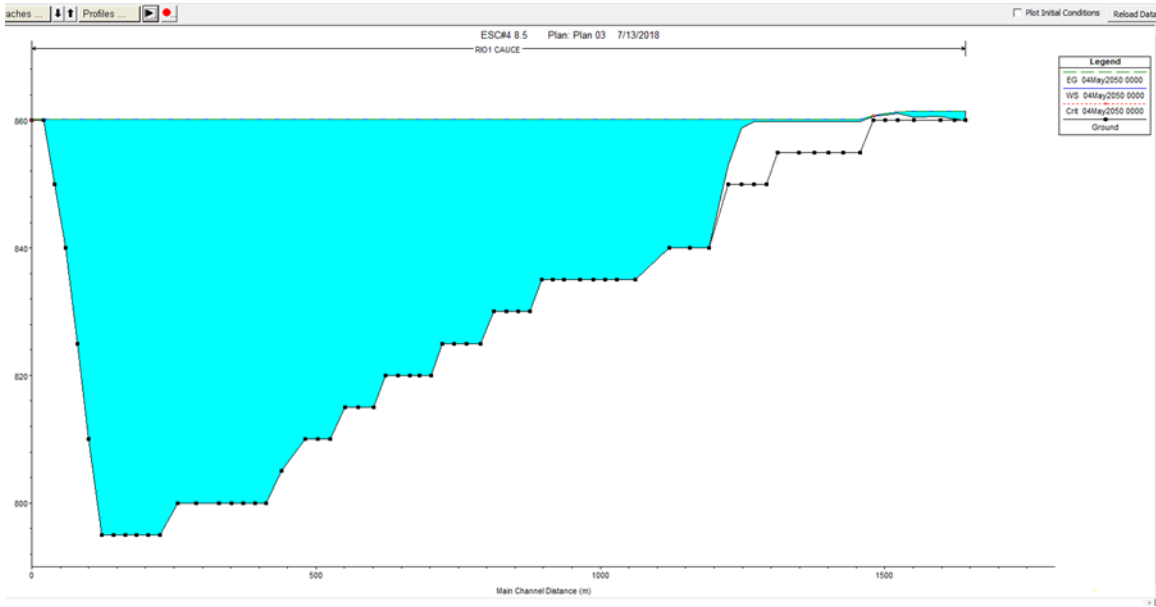


Figura 42. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 4.
Fuente: Autores.

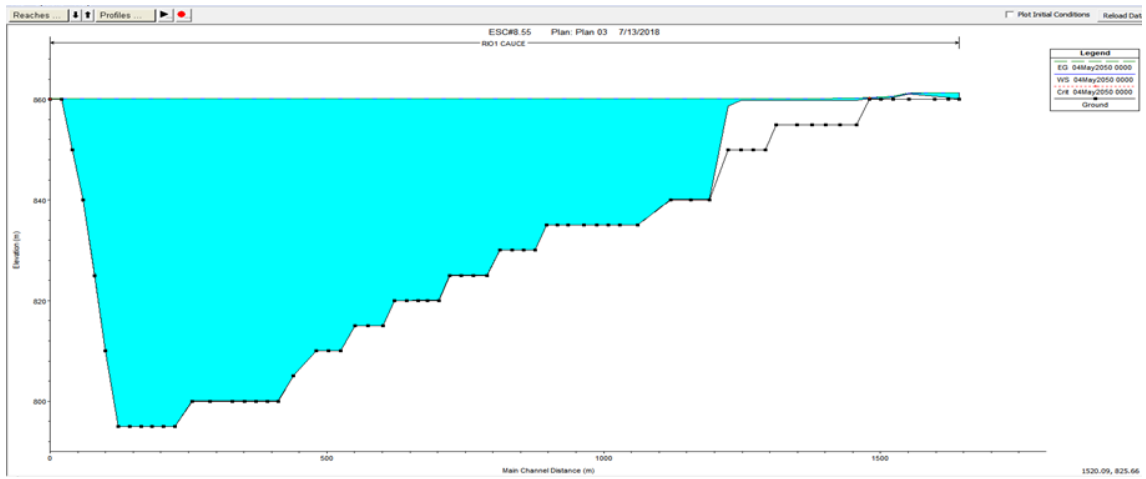


Figura 43. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.
Fuente: Autores.

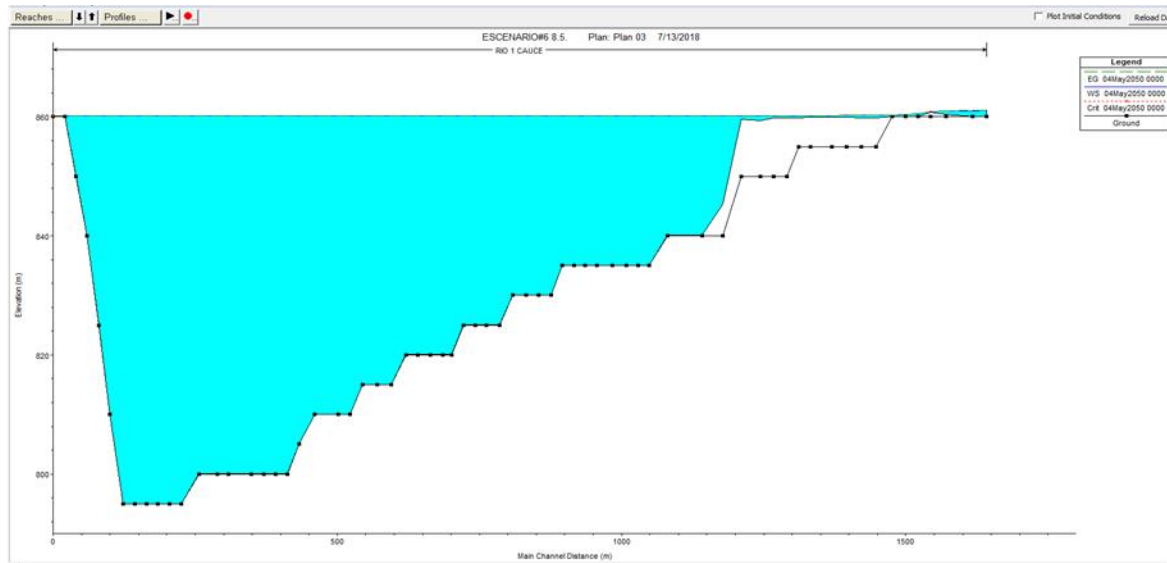


Figura 44. Perfil longitudinal con modelación de sedimentos, escenario Futuro 6.
Fuente: Autores.

Las Figuras 46, 47 y 48 presentan extractos de las tablas de resultados de HEC-RAS para estos escenarios futuros 4 al 6. El enfoque se da para las secciones 40-67 que es donde se ven los cambios más importantes en el lecho (Invert Change).

	Ch Dist	Ch Invert El	Wsel	Invert Change	Flow	Velocity	Shear Stress	EG Slope	Mass Bed Change All	Mass In Cum All	Long. Cum Mass Change	Sediment Concentration	Ch Mann n
	m	m	m	m	m ³ /s	m/s	pa	m/m	Tonnes	Tonnes	Tonnes	mg/l	
67	20.01987	859.9999	861.4047	0.000000	6.219998	0.3304182	0.2435957	1.73E-04	0	249219.7	0	73.37054	0.05
66	24.6699	860.1046	861.4	0.104721	6.219998	0.3463439	0.2749798	2.12E-04	11.34676	249219.7	11.34676	73.37054	0.05
65	46.82002	860.6718	861.3961	0.671846	6.219998	0.2538101	0.1792436	2.48E-04	1990.728	249208.4	2002.075	73.85897	0.05
64	27.28996	860.0348	861.3849	0.034914	6.219998	0.1701164	0.2557063	2.66E-04	163.0165	247217.7	2165.091	63.08162	0.05
63	22.22998	861.0619	861.2978	1.061979	6.219998	0.7002603	1.983211	8.41E-03	791.9553	247054.6	2957.047	63.08162	0.05
62	21.14001	860.8682	861.1132	0.868334	6.219998	0.6921076	1.913208	7.82E-03	1135.192	246262.7	4092.239	63.08162	0.05
61	23.55007	860.6392	860.7402	0.639283	6.219998	0.9939153	5.300121	5.25E-02	1581.623	245127.5	5673.862	63.08162	0.05
60	29.14985	859.8036	860.2144	4.803667	6.219998	0.1978151	1.32E-01	3.21E-04	14269.96	243545.9	19943.82	65.34735	0.05
59	26.31003	859.7635	860.2052	4.763503	6.219998	0.2026243	0.1344952	3.03E-04	25754.57	229275.9	45698.39	63.53066	0.05
58	24.98994	859.8245	860.197	4.824587	6.219998	0.1901093	1.26E-01	3.37E-04	25810.97	203521.3	71509.36	65.37801	0.05
57	26.31003	859.8383	860.1886	4.838308	6.219998	1.83E-01	1.19E-01	3.40E-04	19906.38	177710.4	91415.74	64.38483	0.05
56	37.55014	859.8053	860.1802	4.805334	6.219998	0.179865	1.12E-01	2.99E-04	20543.16	157804	111958.9	59.23332	0.05
55	20.23994	859.7805	860.1696	4.780468	6.219998	0.176743	1.06E-01	2.70E-04	29061.09	137260.8	141020	56.35404	0.05
54	21.73986	859.765	860.1643	9.764960	6.219998	0.1740609	1.03E-01	2.56E-04	24877.22	108199.7	165897.2	55.91968	0.05
53	22.41987	859.7668	860.1589	9.766781	6.219998	0.1683527	9.66E-02	2.45E-04	31973.1	83322.52	197870.3	54.96919	0.05
52	23.6601	858.7451	860.159	8.745070	6.219998	7.67E-02	1.63E-02	1.28E-05	26114.97	51349.41	223985.3	0.5498599	0.05
51	33.11012	853.0099	860.1592	3.009948	6.219998	7.37E-03	1.13E-04	1.86E-08	23600.65	25234.44	247585.9	9.50E-05	0.05
50	33.11987	840.0187	860.1592	0.018614	6.219998	2.36E-03	8.63E-06	5.89E-10	103.1054	1633.785	247689	7.17E-05	0.05
49	36.23005	840.0172	860.1592	0.016993	6.219998	1.78E-03	4.10E-06	2.39E-10	91.00316	1530.68	247780	5.73E-05	0.05
48	60.41014	840.0153	860.1592	0.015108	6.219998	1.64E-03	3.41E-06	1.91E-10	111.0421	1439.677	247891.1	4.36E-05	0.05
47	32.79008	835.0129	860.1592	0.013052	6.219998	1.62E-03	3.38E-06	1.83E-10	86.63354	1328.635	247977.7	3.63E-05	0.05
46	20.02993	835.0103	860.1592	0.010375	6.219998	2.74E-03	1.48E-05	7.32E-10	23.35624	1242.001	248001.1	3.48E-05	0.05
45	20.46	835.0099	860.1592	0.010020	6.219998	2.94E-03	1.41E-05	6.76E-10	15.75719	1218.645	248016.8	3.38E-05	0.05
44	24.06	835.0074	860.1592	0.007523	6.219998	3.20E-03	2.30E-05	1.09E-09	15.36834	1202.888	248032.2	3.30E-05	0.05
43	27.70998	835.0081	860.1592	0.008159	6.219998	2.86E-03	1.76E-05	8.90E-10	20.92816	1187.519	248053.1	3.17E-05	0.05
42	20.07992	835.0094	860.1592	0.009518	6.219998	2.32E-03	9.71E-06	4.84E-10	22.94051	1166.591	248076.1	3.02E-05	0.05
41	19.87997	835.0096	860.1592	0.009764	6.219998	1.72E-03	4.28E-06	2.17E-10	25.50839	1143.651	248101.6	2.87E-05	0.05
40	20.3899	835.0103	860.1592	0.010364	6.219998	1.60E-03	3.23E-06	1.54E-10	25.28	1118.142	248126.9	2.72E-05	0.05

Figura 45. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 4.
Fuente: Autores.

	Ch Dist	Ch Invert m	Wsel m	Observed Data	Invert Change m	Flow m ³ s	Velocity m/s	Shear Stress PA	Mass Bed Change all tonnes	Mass In Cum tonnes	Long Cum Mass Change tonnes	Sed Concentration mg/l	Ch Mann r
67	20.01987	859.9999	861.3295	3.40E+38	0	6.219998	0.3501532	0.2786217	0	343661.6	0	86.80017	0.05
66	24.6699	860.3475	861.3174	3.40E+38	0.3475676	6.219998	0.4661387	0.5485159	28.80495	343661.6	28.80495	86.80017	0.05
65	46.82002	860.6302	861.3124	3.40E+38	0.6303258	6.219998	0.2969527	0.2064076	880.5537	343632.8	909.3586	87.30393	0.05
64	27.28996	861.037	861.2345	3.40E+38	1.04E+00	6.219998	0.8262135	2.947268	2031.59	342752.2	2940.948	87.30393	0.05
63	22.22998	860.4042	860.6362	3.40E+38	4.04E-01	6.219998	0.9385636	3.582832	-10.02041	340720.6	2930.928	96.50641	0.05
62	21.14001	860.1983	860.5092	3.40E+38	1.98E-01	6.219998	0.5449057	1.095207	0.5789868	340730.7	2931.507	110.0165	0.05
61	23.55007	860.1816	860.2825	3.40E+38	1.82E-01	6.219998	0.9960926	5.326987	-22.46784	340730.1	2909.039	125.3384	0.05
60	29.14985	859.849	860.2363	3.40E+38	4.849053	6.219998	0.2110347	0.1534551	19913.74	340752.5	22822.78	80.51388	0.05
59	26.31003	859.8119	860.2247	3.40E+38	4.811938	6.219998	0.2179033	0.1593474	26219.16	320838.8	49041.94	89.09504	0.05
58	24.98994	859.8634	860.2146	3.40E+38	4.863448	6.219998	0.2007287	1.43E-01	39428.08	294619.6	88470.02	77.29209	0.05
57	26.31003	859.8705	860.205	3.40E+38	4.870499	6.219998	1.89E-01	1.27E-01	29319.25	255191.6	117789.3	65.78982	0.05
56	37.55014	859.8401	860.1954	3.40E+38	4.84015	6.219998	1.90E-01	1.27E-01	24320.06	225872.3	142109.3	65.86649	0.05
55	20.23994	859.8136	860.1823	3.40E+38	4.81361	6.219998	1.89E-01	1.24E-01	35134.43	201552.3	177248.8	63.35597	0.05
54	21.73986	859.804	860.1756	3.40E+38	9.803957	6.219998	0.1869918	0.1213377	38606.23	166417.8	215850	62.83755	0.05
53	22.41987	859.8075	860.1686	3.40E+38	9.807454	6.219998	0.1832231	1.18E-01	30062.47	127811.6	245912.5	63.95311	0.05
52	23.6601	859.8234	860.1614	3.40E+38	9.823351	6.219998	0.1748297	1.09E-01	31560.79	97749.12	277473.3	63.35242	0.05
51	33.11012	858.6781	860.1621	3.40E+38	8.678064	6.219998	4.53E-02	5.78E-03	56248.23	66188.34	333721.5	6.20E-02	0.05
50	33.11987	840.1021	860.1622	3.40E+38	0.1018946	6.219998	2.38E-03	8.81E-06	535.5482	9940.103	334257	8.39E-05	0.05
49	36.23005	840.0989	860.1622	3.40E+38	9.87E-02	6.219998	1.79E-03	4.16E-06	514.1346	9404.555	334771.2	7.71E-05	0.05
48	60.41014	840.0892	860.1622	3.40E+38	8.91E-02	6.219998	1.65E-03	3.45E-06	641.4883	8890.42	335412.7	7.11E-05	0.05
47	32.79008	835.0779	860.1622	3.40E+38	7.81E-02	6.219998	1.63E-03	3.42E-06	512.3454	8248.932	335925	6.81E-05	0.05
46	20.02993	835.0623	860.1622	3.40E+38	6.24E-02	6.219998	2.75E-03	1.50E-05	139.6063	7736.586	336064.6	6.75E-05	0.05
45	20.46	835.0603	860.1622	3.40E+38	6.04E-02	6.219998	2.95E-03	1.42E-05	94.35895	7596.98	336158.9	6.70E-05	0.05
44	24.06	835.0452	860.1622	3.40E+38	4.53E-02	6.219998	3.21E-03	2.32E-05	92.11239	7502.621	336251.1	6.66E-05	0.05
43	27.70998	835.0491	860.1622	3.40E+38	4.92E-02	6.219998	2.87E-03	1.78E-05	125.564	7410.509	336376.6	6.61E-05	0.05
42	20.07992	835.0574	860.1622	3.40E+38	5.75E-02	6.219998	2.33E-03	9.78E-06	137.8312	7284.944	336514.5	6.54E-05	0.05
41	19.87997	835.0589	860.1622	3.40E+38	5.90E-02	6.219998	1.73E-03	4.32E-06	153.4631	7147.113	336667.9	6.48E-05	0.05

Figura 46. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.
Fuente: Autores.

	Ch Dist	Ch Invert El	Wsel	Invert Change	Flow	Velocity	Shear Stress	EG Slope	Mass Bed Change All	Mass In Cum All	Long. Cum Mass Change	Sediment Concentration	Ch Mann r
		m	m	m	m ³ /s	m/s	pa	m/m	Tonnes	Tonnes	Tonnes	mg/l	
67	24.6699	859.9999	861.0367	0.000000	6.219998	0.454439	0.5098664	4.92E-04	0	542033.5	0	247.1148	0.05
66	46.82002	860.0491	861.023	0.049172	6.219998	0.4651737	0.5455053	5.60E-04	-0.8556194	542033.5	-0.8556194	248.7624	0.05
65	27.28996	860.3807	861.0056	0.380846	6.219998	0.2931065	0.2506686	3.99E-04	632.3308	542034.4	631.4752	245.0623	0.05
64	22.22998	860.0516	860.803	0.051725	6.219998	1.104886	98.54958	2.87E-01	-3.020959	541402.1	628.4542	261.8601	0.05
63	21.14001	860.0648	860.4562	0.064836	6.219998	0.6617504	1.515005	4.02E-03	32.71741	541405.1	661.1716	287.8312	0.05
62	23.55007	860.0712	860.3793	0.071319	6.219998	0.5470557	1.11851	3.63E-03	6.591315	541372.3	667.7629	319.059	0.05
61	29.14985	860.0761	860.2832	0.076193	6.219998	0.4842619	0.9904368	4.78E-03	45.9805	541365.8	713.7435	355.2083	0.05
60	26.31003	859.8096	860.2554	4.809588	6.219998	0.2450185	2.23E-01	5.14E-04	22837.89	541319.8	23551.63	239.8555	0.05
59	24.98994	859.8666	860.2421	4.866655	6.219998	0.2363911	0.1926799	5.06E-04	47379.38	518481.9	70931.02	225.6911	0.05
58	26.31003	859.9035	860.2288	4.903552	6.219998	0.2224801	1.81E-01	5.69E-04	51771.87	471102.5	122702.9	239.4536	0.05
57	37.55014	859.9141	860.2139	4.914112	6.219998	2.14E-01	1.71E-01	5.72E-04	54249.57	419330.6	176952.5	237.2996	0.05
56	20.23994	859.8752	860.1935	4.875257	6.219998	0.2116182	1.64E-01	5.14E-04	66202.8	365081.1	243155.3	213.5919	0.05
55	21.73986	859.8612	860.1827	4.861213	6.219998	0.2167498	1.71E-01	5.33E-04	41963.95	298878.3	285119.2	237.0836	0.05
54	22.41987	859.8284	860.1741	9.828317	6.219998	0.1888938	1.24E-01	3.36E-04	29371.03	256914.3	314490.3	112.3947	0.05
53	23.6601	859.8218	860.1642	9.821750	6.219998	0.2112714	1.64E-01	5.22E-04	36596.03	227543.3	351086.3	226.9543	0.05
52	33.11012	859.3672	860.1644	9.367235	6.219998	7.31E-02	1.43E-02	1.77E-05	40252.04	190947.3	391338.3	0.7456982	0.05
51	33.11987	859.5261	860.164	9.526071	6.219998	5.17E-02	7.75E-03	1.21E-05	75111.76	150695.2	466450.1	0.2723217	0.05
50	36.23005	845.3351	860.1641	5.334918	6.219998	4.19E-03	3.59E-05	3.37E-09	64328.95	75583.45	530779	2.14E-03	0.05
49	60.41014	840.1093	860.1641	0.109169	6.219998	1.80E-03	4.16E-06	2.44E-10	726.1323	11254.51	531505.1	1.56E-03	0.05
48	32.79008	840.0993	860.1641	0.099164	6.219998	1.65E-03	3.45E-06	1.94E-10	637.5818	10528.37	532142.8	1.23E-03	0.05
47	20.02993	835.0904	860.1641	0.090465	6.219998	1.63E-03	3.42E-06	1.86E-10	320.3741	9890.793	532463.1	1.11E-03	0.05
46	20.46	835.0757	860.1641	0.075793	6.219998	2.76E-03	1.50E-05	7.42E-10	126.0168	9570.418	532589.1	1.07E-03	0.05
45	24.06	835.0737	860.1641	0.073810	6.219998	2.95E-03	1.43E-05	6.85E-10	123.3973	9444.401	532712.5	1.03E-03	0.05
44	27.70998	835.0554	860.1641	0.055436	6.219998	3.22E-03	2.33E-05	1.10E-09	127.4974	9321.004	532840	9.89E-04	0.05
43	20.07992	835.06	860.1641	0.060103	6.219998	2.87E-03	1.78E-05	9.01E-10	137.9333	9193.507	532977.9	9.46E-04	0.05
42	19.87997	835.0703	860.1641	0.070401	6.219998	2.33E-03	9.80E-06	4.90E-10	137.8296	9055.573	533115.8	9.04E-04	0.05
41	20.3899	835.0726	860.1641	0.072669	6.219998	1.73E-03	4.33E-06	2.20E-10	186.3381	8917.744	533302.1	8.50E-04	0.05
40	20.22988	835.0772	860.1641	0.077320	6.219998	1.61E-03	3.26E-06	1.56E-10	185.6727	8731.406	533487.8	7.99E-04	0.05

Figura 47. Muestra de la tabla de datos para la modelación de sedimentos, escenario Futuro 5.
Fuente: Autores.

Al igual que para los escenarios 1 a 3, totalizamos los volúmenes de sedimentos generados en el embalse. Las Figuras 49 a 51 muestran extractos de las tablas generadas para la totalización de dichos volúmenes.

SECCIÒN	ÀREAS ESCENARIO 4 (m2)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m3)
67	0	8.285	0
66	2.2694	18.43	41.825042
65	26.9566	20.04	540.210264
64	17.8126	19.8	352.68948
63	30.1714	19.93	601.316002
62	42.2037	20.165	851.0376105
61	49.3444	21.85	1078.17514
60	294.7991	21.66	6385.348506
59	293.6696	20.28	5955.619488
58	371.3022	20.555	7632.116721
57	404.595	20.23	8184.95685
56	377.6072	20.16	7612.561152
55	381.2636	25.82	9844.226152
54	598.2152	31.83	19041.18982
53	719.7189	36.275	26107.8031
52	674.531	31.155	21015.01331
51	536.9737	21.22	11394.58191
50	4.6659	20.545	95.8609155
49	4.2353	20.475	86.7177675
48	3.9402	23.96	94.407192
47	3.3594	34.405	115.580157
46	1.6975	31.11	52.809225
45	1.516	21.715	32.91994
44	1.3599	24.325	33.0795675
43	1.6726	24.875	41.605925
42	1.8751	25.245	47.3368995
41	2.5045	23.615	59.1437675
40	2.4152	21.06	50.864112

Figura 48. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 4.
Fuente: Autores.

SECCIÒN	ÀREAS ESCENARIO 5 (m2)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m3)
67	0	8.285	0
66	7.53	18.43	138.7779
65	25.29	20.04	506.8116
64	45.59	19.8	902.682
63	11.49	19.93	228.9957
62	9.64	20.165	194.3906
61	14.02	21.85	306.337
60	297.66	21.66	6447.3156
59	294.15	20.28	5965.362
58	373.07	20.555	7668.45385
57	406.38	20.23	8221.0674
56	379.27	20.16	7646.0832
55	382.55	25.82	9877.441
54	599.36	31.83	19077.6288
53	720.49	36.275	26135.77475
52	714.39	31.155	22256.82045
51	1247.68	21.22	26475.7696
50	25.38	20.545	521.4321
49	24.47	20.475	501.02325
48	23.1	23.96	553.476
47	20.11	34.405	691.88455
46	10.2	31.11	317.322
45	9.13	21.715	198.25795
44	8.21	24.325	199.70825
43	10.06	24.875	250.2425
42	11.33	25.245	286.02585
41	15.18	23.615	358.4757
40	14.58	21.06	307.0548

Figura 49. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 5.
Fuente: Autores.

SECCIÒN	ÀREAS ESCENARIO 4 (m2)	LONGITUD (m)	VOLUMEN (m3)
67	0	8.285	0
66	2.2694	18.43	41.825042
65	26.9566	20.04	540.210264
64	17.8126	19.8	352.68948
63	30.1714	19.93	601.316002
62	42.2037	20.165	851.0376105
61	49.3444	21.85	1078.17514
60	294.7991	21.66	6385.348506
59	293.6696	20.28	5955.619488
58	371.3022	20.555	7632.116721
57	404.595	20.23	8184.95685
56	377.6072	20.16	7612.561152
55	381.2636	25.82	9844.226152
54	598.2152	31.83	19041.18982
53	719.7189	36.275	26107.8031
52	674.531	31.155	21015.01331
51	536.9737	21.22	11394.58191
50	4.6659	20.545	95.8609155
49	4.2353	20.475	86.7177675
48	3.9402	23.96	94.407192
47	3.3594	34.405	115.580157
46	1.6975	31.11	52.809225
45	1.516	21.715	32.91994
44	1.3599	24.325	33.0795675
43	1.6726	24.875	41.605925
42	1.8751	25.245	47.3368995
41	2.5045	23.615	59.1437675
40	2.4152	21.06	50.864112

Figura 50. Muestra del cálculo del volumen de sedimentos, escenario Futuro 6.
Fuente: Autores.

La *Tabla 7* resume el total del volumen sedimentado para cada uno de los tres escenarios futuros. Los resultados obtenidos sugieren que, a mayor cantidad de finos en la granulometría del escenario, se obtiene una mayor cantidad de sedimentos acumulados en el embalse. Esta tendencia es similar a los escenarios 1 a 3. Sin embargo, la combinación de la granulometría con los caudales generados por el escenario climático, resultan en menor producción de sedimentos para el escenario Futuro 4 (en comparación con Futuro 1), similar producción de sedimentos para los escenarios Futuro 5 y Futuro 2, y mayor producción de sedimentos para el escenario Futuro 6 (en comparación con Futuro 3).

Escenario	Volumen de sedimentos (m ³)
Futuro 4	128,889
Futuro 5	155,707
Futuro 6	181,347

Tabla 7. Volumen total de sedimentos para escenarios futuros 4, 5 y 6.
Fuente: Autores.

Después de obtener los volúmenes de los seis escenarios, procedimos a comparar los volúmenes de sedimentos producidos para cada escenario con respecto al volumen inicial

calculado para el embalse (20,794,396 m³). La *Tabla 8* muestra el porcentaje de reducción que los sedimentos representarían para el volumen útil del embalse de acuerdo con los datos utilizados, para cuarenta años de modelación.

	<i>Escenario</i>	<i>Volumen de sedimentos (m³)</i>	<i>Porcentaje</i>
RCP 4.5	<i>Futuro 1</i>	143,490	0.69
	<i>Futuro 2</i>	156,937	0.75
	<i>Futuro 3</i>	163,733	0.79
RCP 8.5	<i>Futuro 4</i>	128,889	0.62
	<i>Futuro 5</i>	155,707	0.75
	<i>Futuro 6</i>	181,347	0.87

Tabla 8. Porcentaje de reducción de la capacidad volumétrica del embalse por efectos de sedimentación
Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio desarrollado nos permitió cumplir con los objetivos propuestos. Usamos el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS para modelar el transporte de sedimentos en un embalse ante posibles escenarios de caudal y tipos de sedimentos, para evaluar los impactos que dichos escenarios podrían tener en la capacidad de almacenamiento del embalse.

El trabajo realizado nos permitió comprender los fundamentos de la modelación hidráulica para caudal y sedimentos. Los ejercicios de modelación para flujo permanente y no permanente permitieron consolidar nuestro entendimiento sobre sus diferencias, y de esta manera, logramos avanzar y fortalecernos en el conocimiento. Vale la pena aclarar que el ejercicio presentado no contó con datos que permitieran realizar la validación de los escenarios modelados, pero busca con su desarrollo, motivar a los manejadores del recurso a pensar en la necesidad de realizar actividades de monitoreo que, a futuro, permitan el mejoramiento del ejercicio de modelación.

Antes de iniciar con la modelamiento en HEC-RAS, se presentaron inconvenientes con respecto al ingreso de la geometría en el software ya que se contaban con secciones paralelas al embalse y con secciones creadas perpendiculares al eje, para solucionarlo se realizó la modelación para dos casos simplificados de 7 secciones trasversales, de la que se obtuvo que el porcentaje entre los caudales de salida de cada caso no excedía el 3%, pudiéndose concluir que al ser mínimos los cambios entre las dos casos, era más viable realizar la modelación final con las secciones originales del levantamiento topográfico del área de estudio, ya que generan menor porcentaje de error.

Para conseguir una correcta modelación, se deben introducir inicialmente datos de geometría (secciones transversales), posteriormente datos de caudal (hidrogramas) y finalmente datos de sedimentos (curva granulométrica). Todos los datos permitieron determinar la cantidad de sedimentos acumulados (volumen) en un embalse mediante diferentes escenarios a futuro.

El trabajo desarrollado nos permitió elaborar simultáneamente y como un aporte al conocimiento del software, un manual detallado de la herramienta de modelación HEC-RAS enfocado específicamente en el volumen acumulado de sedimentos en un embalse para diferentes escenarios de uso del suelo y climatología de la cuenca aferente.

Para realizar la modelación hidráulica del transporte de sedimentos, es importante contar con los requerimientos, en especial con el flujo cuasi permanente pues, aunque el hidrograma que se utiliza es el mismo del flujo no permanente, esta modelación requiere de datos extra como la duración del flujo para cada intervalo, el incremento computacional y la temperatura del agua que se presente en la zona de estudio.

Los porcentajes de reducción del embalse calculados a partir de los escenarios futuros tienen un valor pequeño si se compara con la capacidad (volumen) total del embalse, lo cual es bueno debido a que no compromete su vida útil y puede seguir suministrando el recurso hídrico a la comunidad.

Se fortaleció la capacidad investigativa mediante el estudio y consulta de productos académicos y documentos técnicos. Esto condujo al aprendizaje del uso de herramientas de modelación y de sedimentos en cuerpos de agua.

Los resultados obtenidos sugieren que, a mayor cantidad de finos en la granulometría del escenario, se obtiene una mayor cantidad de sedimentos acumulados en el embalse. Es importante que futuros estudios evalúen el impacto que diferentes métodos de transporte de sedimentos pueden tener en estos resultados.

En el desarrollo del proyecto se observó la importancia de los caudales, debido a que son determinantes en la cantidad de sedimentos producidos por una granulometría en particular.

Gracias a este proyecto de investigación comprendimos la importancia que tienen los sedimentos en los embalses, en especial como afectan la vida útil del mismo, por esta razón es necesario continuar investigando sobre este fenómeno no solo en cuanto a su comportamiento, sino también en cuanto a estrategias para mitigar dicha acumulación.

La investigación realizada nos permitió comprender el comportamiento del software en cuanto a su memoria acumulativa, por ello se recomienda crear copias de seguridad de cada proyecto en una memoria externa, de tal manera que quede eliminado del ordenador.

En el transcurso del estudio desarrollado se encontraron diversos inconvenientes en cuanto al comportamiento del software, para solucionarlos se acudió a manuales y blogs relacionados con el software HEC – RAS.

Se recomienda que en estudios futuros se evalúe el efecto del uso de diferentes funciones de transporte de sedimentos en los resultados, pues cada función se desarrolló bajo diferentes condiciones y la selección de la misma depende de forma directa de las características de la granulometría que se tenga.

Se recomienda introducir los datos de forma correcta y tener precaución al momento de realizar la modelación hidráulica del flujo no permanente, pues el mismo necesita de un tiempo de simulación, el cual no puede ser mayor o menor al tiempo de duración del hidrograma, este tipo de cosas producen errores, los cuales se encuentran solucionados en el Anexo del presente documento.

Se recomienda leer previamente los manuales del Software HEC – RAS, pues los mismos traen ejemplos, fundamentos hidráulicos de cómo se realizó el software y la explicación del funcionamiento de cada opción que se tiene. Esto con el fin de tener conocimiento previo de la herramienta de modelación hidráulica y de esta forma facilitar su uso.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Sarago, «CALIBRACIÓN DE UNA ECUACIÓN PARA EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA EL LIMÓN, EN EL RÍO ZAMORA», UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, LOJA - ECUADOR, 2013.
- [2] Universidad de Pirua, «CAPÍTULO 1: SEDIMENTOS». .
- [3] I. Perea, «MODELACIÓN DEL DELTA DE SEDIMENTO EN UN EMBALSE QUE PRESENTA RÁPIDAS FLUCTUACIONES DE NIVEL», Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013.
- [4] J. García, «DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS», en *DINÁMICA DE FLUIDOS*, México: Universidad Sonora, 2012.
- [5] J. P. Sánchez y E. A. Jaramillo, «ANÁLISIS DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO NO PERMANENTE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CON EL MODELO HEC - RAS», ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, QUITO, 2010.
- [6] G. Annandale y G. Morris, «Overview of Sedimentation Issues», en *Extending the life of Reservoirs*, Washintong, DC: WORLD BANK GROUP, 2016, pp. 23-36.
- [7] G. Annandale y G. Morris, «Sediment Yield», en *Extending the life of Reservoirs*, Washintong, DC: WORLD BANK GROUP, 2016, pp. 45-48.
- [8] T. Guarín, «MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS. EJEMPLOS DE APLICACIÓN POR EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EXCEL Y MATLAB.», Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2014.
- [9] M. García y J. A. Maza, «TRANSPORTE DE SEDIMENTOS», en *MANUAL DE INGENIERÍA DE RÍOS*, UNAM., México, 1985, pp. 2-10.
- [10] amb, «Memorando Técnico 03 - Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse.» sep-2011.
- [11] G. Brunner, «HEC - RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual.» feb-2016.
- [12] Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, «UBICACIÓN EMBALSE DE BUCARAMANGA». .
- [13] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «APOYO FINANCIERO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO DE REGULACIÓN EMBALSE DE BUCARAMANGA». 29-ene-2013.
- [14] G. Brunner, J. Warner, B. Wolfe, S. Piper, y L. Marston, «HEC - RAS, River Analysis System Applications Guide.» feb-2016.
- [15] INTEGRAL S.A., «ESTUDIOS Y DISEÑOS DEL PROYECTO DE REGULACIÓN DEL RÍO TONA EMBALSE DE BUCARAMANGA», INFROME, sep. 2011.
- [16] G. W. Brunner y C. HEC, «HEC - RAS River Analysis System. User's Manual». feb-2016.
- [17] J. Sanjeev y J. Xu, «BEDLOAD AND SUSPENDED LOAD TRANSPORT IN THE 140-KM REACH DOWNSTREAM OF THE MISSISSIPPI RIVER AVULSION TO THE ATCHAFALAYA RIVER», n.º Water, p. 28, sep. 2017.
- [18] G. Carrillo, «ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDIRCA PARA LA CUENCA DEL RÍO TONA MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT», Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, 2018.