

**APLICACIÓN DE HEC-RAS 5.0 PARA LA MODELACIÓN DE UNA ZONA
SUSCEPTIBLE DE INUNDACIONES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA.**

JUAN SEBASTIAN CASTAÑEDA TORRES

PAOLA ANDREA RIVERA RANGEL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2017

**APLICACIÓN DE HEC-RAS 5.0 PARA LA MODELACIÓN DE UNA ZONA
SUSCEPTIBLE DE INUNDACIONES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA.**

JUAN SEBASTIAN CASTAÑEDA TORRES

PAOLA ANDREA RIVERA RANGEL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director

ANDRÉS ALMEYDA ORTIZ

Ingeniero Civil, M.Sc

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

*Ahora que culmina esta etapa y trae consigo este gran triunfo, me gustaría
dedicarlo a:*

*Mis papás, Cosme y Aida, por sus palabras de aliento, por mostrarme el camino,
por ser mi ejemplo y principalmente por el gran esfuerzo que hicieron para que
pudiera cumplir esta meta.*

*Paola porque luchó junto a mí. Por su comprensión, su apoyo y por todo lo que
compartimos durante estos cinco años.*

*Mi primo Richard y a mis tías; Cecilia y Eulalia, por su ayuda, compañía y palabras
de aliento.*

*A mis hermanos, abuelos, primos, amigos y a todos los que contribuyeron de una
u otra forma.*

A Dios por los muchos dones y bendiciones que me ha dado.

Este logro también es de ustedes.

JUAN SEBASTIAN CASTAÑEDA TORRES

A mis padres Alfonso y Betty por su esfuerzo, comprensión, dedicación, paciencia, disposición para escucharme y la sabiduría que me brindaron a lo largo de este camino.

A mi compañero de carrera, proyecto y vivencias, Sebastian, por la compañía y el amor incondicional, ese amor que me brinda paz en todo momento. Gracias le doy por su compromiso y dedicación con este trabajo y deseo que pueda seguir llenando el mundo con su presencia.

A mis hermanos Diana, Viviana y Óscar que creyeron en mí y en mis capacidades para afrontar el mundo que hoy dejo atrás.

A mis sobrinos, por darme el empuje para ser mejor por ellos y para ellos.

A mis amigos de siempre y a aquellos que conocí en la universidad por el apoyo brindado, mantenerse a mi lado y especialmente por demostrarme que hay amistades que están por encima de todo mal.

A Dios por ser mi guía y mi mano protectora.

PAOLA ANDREA RIVERA RANGEL

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de proyecto, el ingeniero Andrés Almeyda Ortiz por la asesoría brindada durante todo este proceso, el apoyo y la motivación que recibimos de su parte y su dedicación.

A Dios por darnos la sabiduría, paciencia y salud para poder llevar a cabo este trabajo de la mejor manera.

A nuestros padres por su paciencia y apoyo durante toda nuestra carrera.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 ESTADO DEL ARTE DEL SOFTWARE.	24
2.1.1 Interfaz del software.....	25
2.1.2 Ventajas y capacidades	26
2.1.3 Ecuación de saint venant y onda difusa.	27
2.1.4 Intervalo computacional.	28
2.1.5 Limitaciones.	29
2.1.6 Exactitud del modelo.....	29
2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIABLES Y DATOS DE ENTRADA.....	30
2.3 RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA EL MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE.	31
2.4 MODELACIÓN EN EL SOFTWARE DEL CASO DE ESTUDIO.	36
2.4.1 Ingreso de datos de entrada.	36
2.4.1.1 Información acerca de la presa:	38
2.4.1.2 Zonas de flujo 2D:	41
2.4.1.3 Condiciones de contorno:.....	42

2.4.2	Simulación.....	44
2.4.2.1	Escenario 1.	46
2.4.2.2	Escenario 2.	48
3.	RESULTADOS.....	50
3.1	MODELACIÓN.....	50
3.1.1	Escenario 1. Río Tona antes de la construcción de la presa – Ecuación Saint Venant.	50
3.1.2	Escenario 1. Río Tona sin presa- Ecuación Onda Difusa.	52
3.1.3	Escenario 2. Río Tona con presa – Ecuación Saint Venant.....	53
3.1.4	Escenario 2. Río Tona con presa – ecuación Onda Difusa.....	58
3.2	LIMITANTES EN LA SIMULACIÓN.	62
3.3	DETERMINACIÓN DE PELIGROSIDAD DE LA INUNDACIÓN.....	63
4.	MANUAL PARA HEC-RAS 5.0 ENFOCADO A ÁREAS DE INUNDACIÓN.	64
5.	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES.....	67
	REFERENCIAS	68
	ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Geometría del embalse.	23
Figura 2. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.	24
Figura 3. Interfaz de la primera versión de HEC-RAS.	26
Figura 4. Interfaz de diferentes versiones de HEC-RAS.	26
Figura 5. Interfaz HEC-RAS 5.0.3.	26
Figura 6. Curvas de nivel.	31
Figura 7. TIN (Red Irregular de Triángulos).	32
Figura 8. DEM (Modelo Digital de Elevaciones).	33
Figura 9. Hidrograma de entrada al modelo.	33
Figura 10. Curva de gasto del vertedero Morning Glory.	34
Figura 11. Pendiente media ponderada.	34
Figura 12. Ingreso del layer de Manning en <i>RAS Mapper</i>	37
Figura 13. Elementos del escenario 1.	37
Figura 14. Elementos del escenario 2.	38
Figura 15. Información de la presa.	39
Figura 16. Editor de la compuerta.	40
Figura 17. Editor de la presa.	41

Figura 18. Editor de las zonas de flujo 2D.	42
Figura 19. Celdas en el contorno de la zona 2D.....	42
Figura 20. Análisis de flujo inestable.	44
Figura 21. Opciones y tolerancias del flujo inestable para la ecuación Saint Venant del escenario 1.	46
Figura 22. Valores de intervalos para la ecuación Saint Venant del escenario 1. .	47
Figura 23. Opciones y tolerancias del flujo inestable para la ecuación Onda Difusa del escenario 1.	48
Figura 24. Valores de intervalos para la ecuación Onda Difusa del escenario 1...	48
Figura 25. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Saint Venant [m]....	51
Figura 26. Mapa de inundación con velocidades-Ecuación Saint Venant [m/s].....	51
Figura 27. Mapa de inundación con velocidades-Ecuación Onda Difusa [m/s]	52
Figura 28. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Onda Difusa [m]	53
Figura 29. Errores de la simulación.	54
Figura 30. Opciones y tolerancias del flujo inestable.....	55
Figura 31. Errores en la simulación de la inundación.	55
Figura 32. Mapa de inundación con profundidades-Saint Venant [m].	56
Figura 33. Mapa de inundación con velocidades-Saint Venant [m/s].	56
Figura 34. Velocidades alrededor de la zona de descarga del vertedero-Saint Venant [m/s].....	57

Figura 35. Hidrogramas de entrada y de salida del embalse-Saint Venant.	58
Figura 36. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Onda Difusa [m]. ...	59
Figura 37. Mapa de inundación con velocidades-Onda Difusa [m/s].	59
Figura 38. Velocidades alrededor de la zona de descarga del vertedero-Onda Difusa [m/s].	61
Figura 39. Hidrogramas de entrada y de salida del embalse-Onda Difusa.....	61
Figura 40. Factor de gravedad de la inundación.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Capacidades de HEC-RAS en diferentes versiones.....	25
Tabla 2. Coeficientes de Manning	35
Tabla 3. Características de la presa	35
Tabla 4. Procedimientos a realizar para cada escenario.....	36
Tabla 5. Condiciones para la selección de intervalos	45
Tabla 6. Características zonas aguas abajo de la presa.....	62

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Curvas de nivel de la zona del embalse de Bucaramanga.....	73
Anexo B. TIN de la zona del embalse de Bucaramanga.....	75
Anexo C. DEM de la zona del embalse de Bucaramanga.	76
Anexo D. Obtención de modelo de elevación digital (DEM)	77
Anexo E. Ecuaciones para hallar el intervalo computacional.....	87
Anexo F. Geometría del vertedero de excesos.....	88
Anexo G. Características de las mallas creadas para cada escenario	89
Anexo H. Reporte brindado por el software HDF view sobre la profundidad de la inundación en el escenario 1. Ecuación onda difusa.	90
Anexo I. Escenario 1 - Mapa de profundidad con la ecuación Saint Venant.....	91
Anexo J. Escenario 1 - Mapa de velocidad con la ecuación Saint Venant.....	92
Anexo K. Escenario 1 - Mapa de profundidad con la ecuación onda difusa.	93
Anexo L. Escenario 1 - Mapa de velocidad con la ecuación onda difusa	94
Anexo M. Escenario 2 - Mapa de profundidad con la ecuación Saint Venant.....	95
Anexo N. Escenario 2 - Mapa de velocidad con la ecuación Saint Venant.....	96
Anexo O. Escenario 2 - Mapa de profundidad con la ecuación onda difusa.....	97
Anexo P. Escenario 2 - Mapa de velocidad con la ecuación onda difusa.	98

Anexo Q. Tipos de errores de convergencia que se pueden presentar durante la simulación.....	99
Anexo R. Valores de los hidrogramas de entrada y salida del embalse	100
Anexo S. Factor de gravedad para el cálculo de la peligrosidad	101
Anexo T. Manual HEC-RAS 5.0 enfocado a áreas de inundación.....	102

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE HEC-RAS 5.0 PARA LA MODELACIÓN DE UNA ZONA SUSCEPTIBLE DE INUNDACIONES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.*

AUTORES: JUAN SEBASTIAN CASTAÑEDA TORRES
PAOLA ANDREA RIVERA RANGEL**

PALABRAS CLAVE: HEC-RAS, SIMULACIÓN 2D, EMBALSE, INUNDACIÓN, HDF VIEW.

DESCRIPCIÓN:

Los modelos hidráulicos que permiten predecir consecuencias de futuras inundaciones son cada vez más usados gracias a la claridad y veracidad de la información que se puede obtener de ellos. Este trabajo presenta la modelación en HEC-RAS 5.0 de la inundación que se podría presentar antes y después de la ejecución del Proyecto de Regulación del río Tona con la llegada del hidrograma asociado a la creciente máxima probable. Para su ejecución se realizó una búsqueda en la literatura con el fin de conocer variables de entrada, limitaciones del software, errores comunes durante la simulación y capacidades de la simulación 2D. Posterior a la ejecución del software, se obtuvieron mapas de simulación de la inundación con perfiles de profundidad, elevación de la superficie del agua y velocidad respecto a cada celda asignada. Además, por medio del software HDF View, se pudo contar con tablas detalladas de información hidráulica sobre distintos parámetros por celdas, nodos o caras de celdas. Se encontró que el intervalo computacional y el tamaño de las celdas son variables que tienen gran influencia sobre los resultados y la estabilidad de la simulación. Para el caso de estudio se seleccionaron aproximadamente 3.2 kilómetros del río Tona donde se construyó el Proyecto de Regulación del Embalse de Bucaramanga. Este trabajo ofrece un estudio que busca encontrar las bondades del software HEC-RAS 5.0 como simulador de inundaciones gracias a la herramienta 2

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortíz.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF HEC-RAS 5.0 TO A SUSCEPTIBLE FLOOD AREA IN THE METROPOLITAN AREA OF BUCARAMANGA.*

AUTHORS: JUAN SEBASTIAN CASTAÑEDA TORRES
PAOLA ANDREA RIVERA RANGEL**

KEYWORDS: HEC-RAS, 2D SIMULATION, DAM, FLOOD, HDF VIEW.

DESCRIPTION:

Hydraulic models that can be able to predict consequences for future floods are increasingly used thanks to the truthfulness of the information that can be got from them. This paper presents the simulation of the flood that could happen before and after the construction of the dam in the Tona river because of the hydrograph using HEC-RAS 5.0. For its execution, a research was done regarding some literature in order to know the input data, software limitations, common errors during the simulation and capabilities of 2D simulation. After the software execution, depth and velocity flood maps were obtained for each cell. Furthermore, detailed hydraulic tables about different parameters for cells, cell faces and nodes were given by the software HDF view. It was observed that the computation interval and the cell size have a big influence on the results and the stability of the simulation. For the case of study were selected about 3.2 kilometers from the Tona river where the dam was built. This paper offers a study that looks forward to finding the capabilities of HEC-RAS 5.0 as a flood simulator thanks to the two dimensional tool.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical engineering. School of Civil Engineering. Director: Andrés Almeyda Ortíz.

INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la vida del hombre, este se ha ubicado en asentamientos, por lo tanto, la localización, cantidad y distribución del agua han sido factores trascendentales. Debido al calentamiento global, el ciclo del agua se ha visto afectado incrementando los problemas asociados al recurso hídrico, trayendo consigo sequías en algunos casos y en otros provocando temporadas de lluvias prolongadas que muchas veces llevan a la generación de inundaciones, las cuales se consideran como los desastres naturales más importantes y con mayor probabilidad de ocurrencia que el resto de desastres juntos. [1].

Las inundaciones se presentan como resultado de las crecientes de los ríos, las cuales son originadas por lluvias intensas o como consecuencia de la rotura u operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica [2]. Entonces entendidas como obras hidráulicas de gran envergadura, las presas proporcionan la capacidad de controlar el flujo del agua con el fin de simplificar la vida, aunque en algunos aspectos también representan una amenaza inherente e inevitable para el medio ambiente y la seguridad pública [3]. La Ley 1523 de 2012 [4], plantea la necesidad de análisis específicos de riesgo y planes de contingencia ante este tipo de obras que permitan diseñar e implementar medidas para la reducción del riesgo, así como también planes de emergencia y contingencia que serán de obligatorio cumplimiento.

El clima extremo debido al cambio climático que se ha presentado en los últimos años, ha demostrado la necesidad de contar con herramientas para la toma de decisiones, entre estas los software que permiten generar modelos de inundación precisos y confiables como advertencia anticipada a los daños que se podrían presentar en situaciones de tormenta severa y de esta forma permitan entender sus

riesgos y dar planificación y gestión a los mismos [5] [6]. Esto se acentúa si se tiene en cuenta que hay zonas de alto riesgo de inundación en las cuales no hay planes de seguridad y se pueden ver asentamientos humanos cerca a la zona afectada.

El modelamiento de inundaciones ha tenido gran avance mejorando su precisión y confiabilidad en los últimos años debido a la llegada de los sistemas geográficos de información (GIS) y a los modelos de elevación digital de alta definición (DEM) [5]. Tanto la resolución como los errores que posea el DEM son atributos que afectan de manera considerable los resultados del modelo hidráulico. Muchos estudios han concluido que los resultados de los mapas de inundación pueden ser mejorados usando únicamente datos topográficos de alta calidad [7].

De los diferentes software se destaca HEC-RAS siendo el más usado en los Estados Unidos para modelado de inundaciones [7] que hasta 2016 solo permitía su uso en una sola dimensión del flujo. Esta es la forma tradicional de simular el flujo en el canal de un río la cual, aunque es ampliamente utilizada, solo describe los procesos de inundación sobre el canal principal y no sobre sus llanuras. [8] Otras dificultades más frecuentes, presentes en todos los software de modelamiento existentes, coinciden principalmente en la naturaleza y calidad de los datos de entrada al sistema, especialmente del modelo digital de elevaciones, ya que de este depende la precisión y calidad de la información de salida [8].

Actualmente HEC RAS en su más reciente versión, la versión 5.0, permite generar modelos del flujo de agua en dos dimensiones (2D), ayudando a la cuantificación de parámetros hidráulicos y permitiendo la elaboración de mapas de inundación, así como el desarrollo de planes de emergencia para mitigar el riesgo de pérdidas de personas, bienes materiales o ambientales que se pueda presentar en caso de determinada inundación [9].

Una de las características más llamativas del software consiste en su gratuidad, lo cual lo hace asequible a cualquier persona que lo desee usar, simplemente descargándolo de la página oficial del USACE (US Army Corps of Engineers).

En el presente trabajo se muestran las bondades del software HEC-RAS 5.0 para la simulación de la inundación posible a presentarse en la cuenca del río Tona antes y después de la ejecución del Proyecto de Regulación del Embalse de Bucaramanga. Además se presenta la información necesaria para el modelamiento y visualización de resultados con la ayuda del software HDF view.

1. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

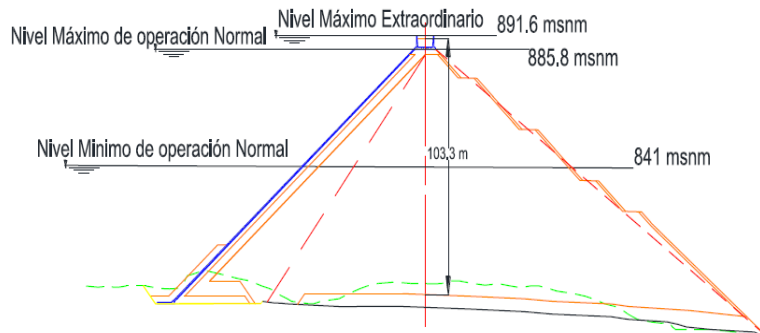
Teniendo en cuenta la información disponible con la que se contaba para dicho caso de estudio, además de los estudios realizados por José Salas, Germán Gavilán e Integral Ingenieros Consultores [10], [11] y [12], se tomó la decisión de modelar la cuenca del río Tona, antes y después de la construcción del Proyecto de Regulación del Embalse de Bucaramanga.

La cuenca del río Tona está ubicada en el noroeste de Bucaramanga, Santander. Dicha cuenca desemboca en el río Suratá y es afluente del río Lebrija; sus afluentes son las quebradas Arnania, Carrizal y Golondrinas. El río Tona cuenta con una pendiente media del cauce de 12% [11].

La climatología de la zona cuenta con febrero como el mes más seco y octubre como el más lluvioso. Además, presenta valores de precipitación media anual y temperatura media del aire de 1213 mm y 23°C respectivamente [13].

El Proyecto de Regulación del río Tona se encuentra ubicado aproximadamente 600 metros aguas arriba de la confluencia del río Tona al río Suratá en el sitio conocido como Puente Tona [11]. En la Figura 1, se muestra la geometría del embalse, en la cual se puede observar que el nivel máximo de operación normal del embalse es de 885.8 m.s.n.m. y el nivel máximo extraordinario es de 891.6 m.s.n.m.

Figura 1. Geometría del embalse.



Fuente: Tomado de [13].

La presa es de tipo enrocado con cara de concreto cuyo espesor varía entre 0.3 y 0.6 metros y cuenta con un vertedero de excesos tipo Morning Glory que se encuentra en la cota 885.8 m.s.n.m. [13].

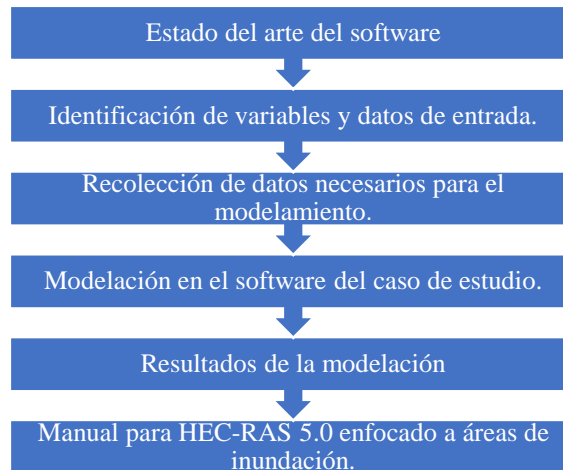
Con el fin de realizar la simulación de la inundación que se podría presentar en la zona de estudio por medio del software HEC-RAS 5.0, se tuvieron en cuenta dos escenarios, i). Río Tona antes de que la presa fuese construida ii). Río Tona con presa.

HEC-RAS 5.0 consiste en un software de uso libre elaborado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) de la U.S Army Corps of Engineers (USACE), el cual a partir de su primera versión, HEC-RAS 1.0, lanzada en agosto de 1995, ha ido evolucionando vertiginosamente hasta la última versión, HEC-RAS 5.0.3, estrenada en septiembre de 2016. Entre sus capacidades generales se encuentra el modelamiento de calidad del agua, sedimentos y flujo estable e inestable, tomando este último para la modelación de inundaciones.

2. METODOLOGÍA

Se estableció el procedimiento a seguir mostrado en la Figura 2 para el desarrollo del presente trabajo:

Figura 2. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.



2.1 ESTADO DEL ARTE DEL SOFTWARE.

Mediante una búsqueda en la página oficial del software, en bases de datos como web science, science direct, scopus y en tesis desarrolladas previamente en la universidad, se logró identificar la evolución y perfeccionamiento del software, principalmente a través de sus dos versiones más recientes. Así mismo, se identificó la variación en los datos de entrada, el modelamiento y los resultados, específicamente en el modelamiento de inundaciones generadas por afluentes.

De la investigación se obtuvo que el avance del software va desde su primera entrega en la cual solo permitía modelar el flujo en una dimensión (1D) y en la condición de flujo permanente o estable. Esto se considera en cierto grado limitante para conocer de manera más precisa el comportamiento del flujo, que se hace

notable en casos donde no se ajusta adecuadamente a la morfología del terreno por donde circula el flujo de agua [9], de esta forma, los modelos 1D han sido criticados debido a que la representación del flujo como bidimensional (2D) dará predicciones más acertadas sobre la propagación de la onda de inundación [14].

Ahora para la última entrega del software, las capacidades que ofrece abarcan la modelación del flujo en una y dos dimensiones, análisis de transporte de sedimentos y análisis de calidad de agua, todo esto en régimen de flujo crítico, sub-crítico o mixto (Tabla 1).

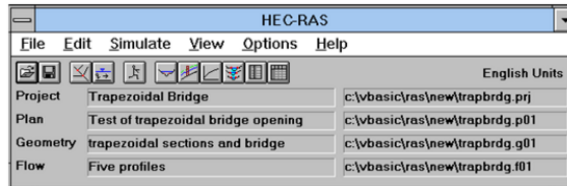
Tabla 1. Capacidades de HEC-RAS en diferentes versiones.

Versión	Modelización		Flujo		Análisis de Transporte de Sedimentos	Análisis de calidad del agua	Año de lanzamiento
	1D	2D	Permanente	No permanente			
2.2	✓		✓				1998
3.1.3	✓		✓	✓			2005
4.1.0	✓		✓	✓	✓	✓	2010
5.1.3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2016

Fuente: Tomado y adaptado de [9].

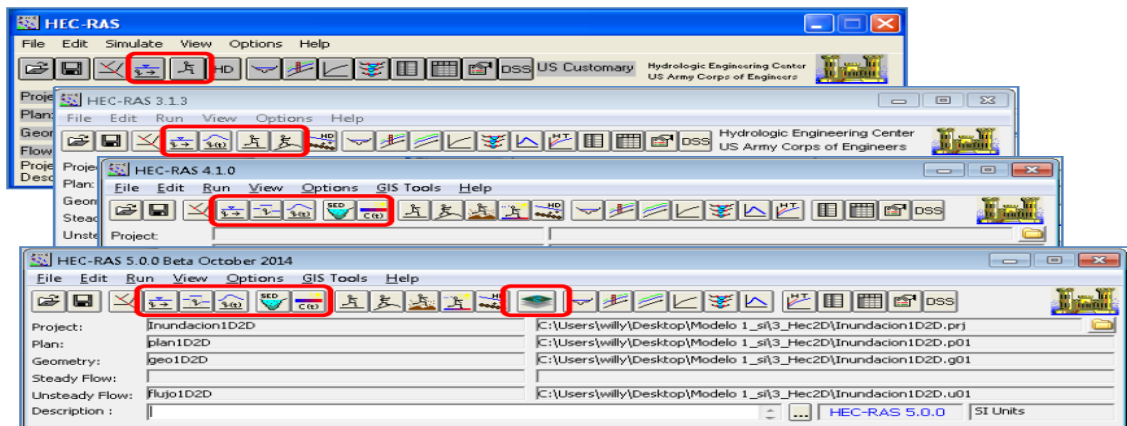
2.1.1 Interfaz del software. En cuanto a la interfaz del software no se muestran cambios sustanciales a través de las versiones que se han desarrollado, conservando en esencia la estructura inicial, aunque se han incluido cambios respecto a las funciones y capacidades del software con el tiempo, como los señalados en las Figura 3, Figura 4 y Figura 5.

Figura 3. Interfaz de la primera versión de HEC-RAS.



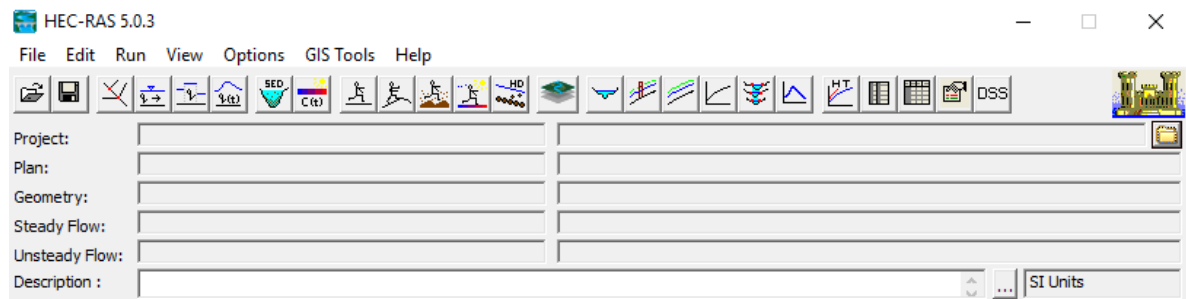
Fuente: Tomado de [15].

Figura 4. Interfaz de diferentes versiones de HEC-RAS.



Fuente: Tomado de [9].

Figura 5. Interfaz HEC-RAS 5.0.3.



2.1.2 Ventajas y capacidades. A continuación se encuentra una lista con las ventajas y capacidades con las que cuenta el software en su versión 5.0 [16]:

- Modelar flujo en 1D, 2D y su combinación.

- El uso de dos ecuaciones para el procesamiento de la información: Saint-Venant u Onda difusa.
- Solución implícita al algoritmo de volúmenes finitos, lo que otorga mayor estabilidad y robustez al software.
- Malla computacional estructurada o no estructurada. Las celdas que la conforman pueden ser triángulos, rectángulos o cualquier polígono hasta de ocho lados.
- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y caras de celda.
- Mapas y animaciones de inundación por medio de la herramienta *RAS Mapper*.
- Uso del DEM para ingresar la información del terreno.
- Algoritmo de solución basado en multiprocesadores.
- Procesadores de 32 o 64 bits.

Es importante destacar la importancia que tiene el uso del DEM para el mapa de inundaciones dinámico, debido a que una descripción detallada de la superficie del terreno es obligatoria para desarrollar un modelo hidráulico de calidad sobre un canal natural, debido a que de otro modo los ríos podrían recorrer llanuras de inundación distintas a las que realmente poseen y así se generarían modelos irreales [3], [5].

Además, existe una relación entre la zona inundada y la resolución del DEM, ya que las áreas de inundación se incrementan con la disminución de la resolución del modelo digital de elevación (DEM) [7]. Esto sugiere que los DEM de poca resolución pueden llegar a predecir extensiones de inundación mayores a la que realmente podría ocurrir.

2.1.3 Ecuación de Saint Venant y Onda difusa. El software cuenta con dos tipos de ecuaciones para realizar el modelamiento, el uso de cualquiera de estas

depende de ciertas características y limitaciones que serán descritas a lo largo del presente capítulo.

En general las ecuaciones de Onda difusa otorgan una solución más rápida, debido a que requieren intervalos computacionales más grandes y tienen mayor estabilidad, mientras que las ecuaciones de Saint Venant requieren intervalos computacionales menores pero deben ser usadas obligatoriamente para determinados casos de estudio, por ejemplo, cuando se está modelando la rotura de una presa, se cuenta con contracciones y expansiones abruptas, se quiere modelar la propagación de la onda o se desean velocidades detalladas alrededor de una estructura hidráulica [16].

En caso tal de que el proyecto no encaje en alguna de las condiciones previamente descritas, la solución brindada por [16], consiste en modelar tanto con Saint Venant como con Onda difusa y si los resultados de las dos simulaciones dan muy distintos, se tomará el de la ecuación Saint Venant como el más preciso.

2.1.4 Intervalo computacional. El intervalo de computación es usado en las simulaciones en condición de flujo inestable o no permanente. Este es uno de los parámetros más importantes a ingresar al modelo, por lo tanto, su selección debe hacerse con precaución debido a que puede afectar el resultado de la simulación.

El intervalo computacional debe ser tan pequeño como para que describa con precisión los cambios en el hidrograma de entrada al modelo, por lo tanto existe un método para poder calcularlo con base en este. Como regla general, el intervalo de computación debe ser menor que el tiempo que se demora el hidrograma en llegar desde el valor mínimo de caudal hasta el máximo que se presentará dividido en 20.

El valor para el intervalo computacional se seleccionará garantizando que se cumpla la condición de Courant dependiendo de la ecuación que se usa para resolver el

modelo, Saint Venant u Onda difusa, consecuentemente esta se compara con el valor obtenido de la regla general procurando el cumplimiento de la última [16], [17].

Las ecuaciones para hallar el intervalo computacional se encuentran en el Anexo E.

2.1.5 Limitaciones. A continuación, se presenta una lista de las limitaciones con las que cuenta el software en la actualidad [16]:

- No se puede modelar transporte de sedimentos erosión/deposición en áreas de flujo 2D.
- No se permite modelar calidad del agua en áreas de flujo 2D.
- No se permiten conectar estaciones de bombeo a celdas en áreas de flujo 2D.
- No se permite la modelación de estructuras hidráulicas como los puentes dentro de la zona 2D, aunque sí se puedan modelar culverts y presas mediante la herramienta de conexión de áreas 2D *SA/2D Area Conn* (conector de áreas de almacenamiento y áreas 2D).
- No se permiten elementos 1D en zonas 2D, tales como las secciones transversales, por lo tanto se deben realizar conexiones entre estas y la zona de estudio de inundación por medio de estructuras laterales.

2.1.6 Exactitud del modelo. Se define como la cercanía de la solución numérica a la solución real. A continuación se presenta una lista con los factores que afectan la exactitud del modelo [17]:

- Suposiciones y limitaciones del modelo descritas en el numeral 0 del presente documento.
- Exactitud de los datos geométricos de las estructuras que se quieran modelar en el software, teniendo en cuenta que no todas las características que estas posean existen en el software para ser modeladas.

- Exactitud de los datos de flujo que se ingresarán en las condiciones de contorno, es decir, el hidrograma para flujo inestable aguas arriba y la pendiente media ponderada aguas abajo.
- Exactitud del DEM.

Para garantizar la exactitud del modelo este debe calibrarse a fin de verificar que se ajuste a la realidad. Para esto deben usarse eventos reales y medidos, ingresar las variables al modelo, ejecutarlo y con los resultados obtenidos comparar con el evento real. Las variables que se pueden ajustar para calibrar el modelo van desde el número de Manning hasta los coeficientes de estructuras hidráulicas.

2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIABLES Y DATOS DE ENTRADA.

Para la identificación de las variables y datos de entrada se recurrió a los manuales encontrados en la documentación de la página del Hydrologic Engineering Center. Adicionalmente, se realizó una búsqueda en bases de datos como web of science, science direct y scopus acompañado con las palabras clave HEC-RAS, inundación y simulación 2D. También se complementó con una búsqueda en internet de documentos que permitieran contextualizar lo encontrado en la documentación del software, esto se logró con algunos foros basados en ArcGIS y HEC-RAS.

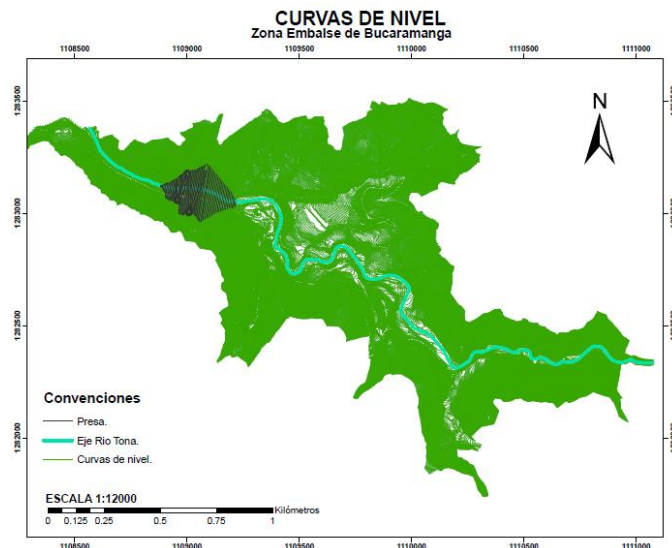
De esta investigación se encontró que es necesario ingresar la geometría del terreno, ya sea mediante secciones transversales al cauce o mediante el DEM; pendiente media ponderada del tramo de río en estudio; coeficiente de Manning como condición de frontera; hidrograma de entrada y características geométricas de las estructuras presentes [16] , [17] , [18].

2.3 RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA EL MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE.

En la recolección de los datos fue necesario recurrir a diferentes fuentes de donde se obtuvo:

- Las curvas de nivel con una resolución en la elevación de un metro correspondientes a la zona del embalse de Bucaramanga referenciadas en el sistema MAGNA – Colombia – Bogotá, fueron tomadas de [19] (Figura 6) (Anexo A). Fue necesario realizar una serie de procedimientos en el software ArcGIS para que, de esta manera, se pudiese obtener el DEM.

Figura 6. Curvas de nivel.

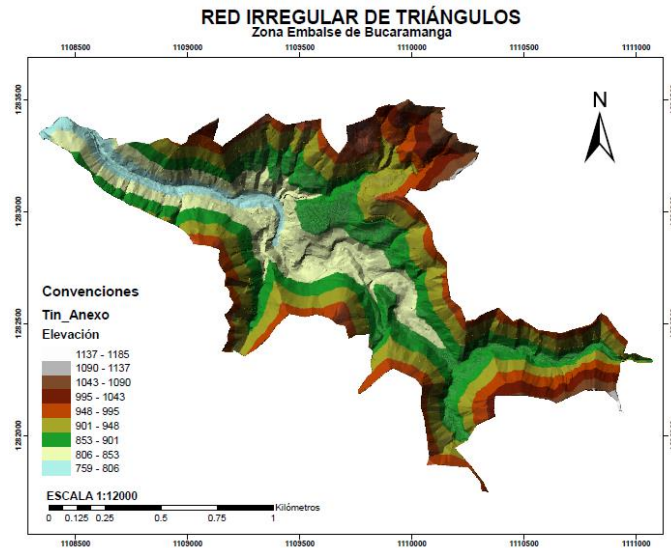


Fuente: Tomado y adaptado de [19].

Se usó la metodología propuesta por [20] usando el SIG (Sistema de información geográfica) ArcGIS, esta consistió en llevar las curvas de nivel a un TIN (Red Irregular de Triángulos) mediante la herramienta *Crear TIN*, para tomar solo la zona de interés se procedió a cortar el TIN con las herramientas

Interpolar forma y editar TIN (Figura 7). El TIN se encuentra de forma detallada en el Anexo B.

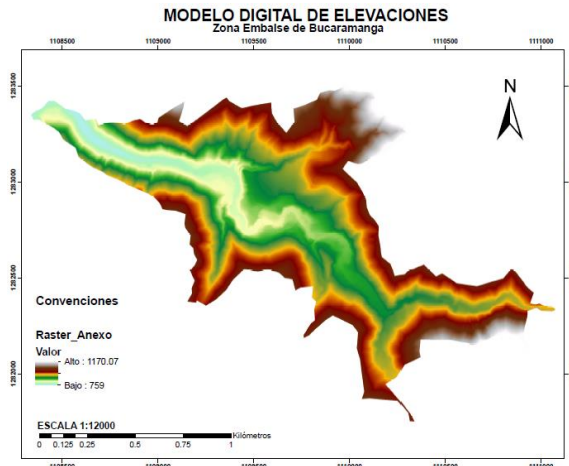
Figura 7. TIN (Red Irregular de Triángulos).



Una vez se completaron estos pasos y se obtuvo el TIN, se procedió a generar el DEM usando la herramienta de conversión *TIN a RASTER* (Figura 8). El DEM se encuentra de forma detallada en el Anexo C.

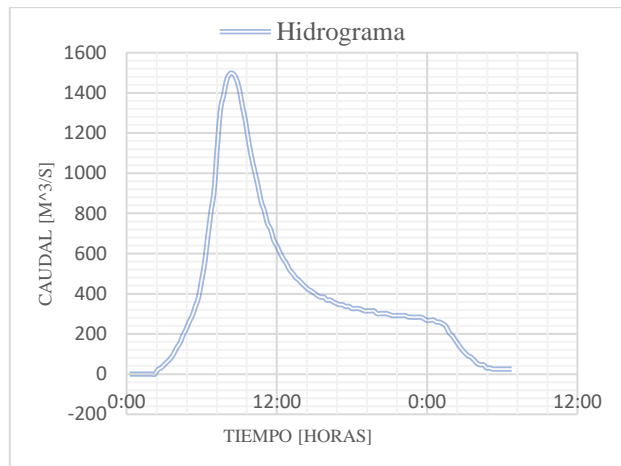
El procedimiento detallado para la obtención del DEM se encuentra en el Anexo D.

Figura 8. DEM (Modelo Digital de Elevaciones).



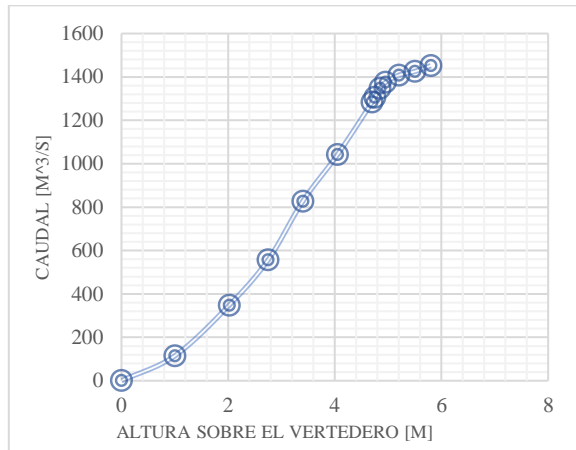
- El hidrograma correspondiente a la creciente máxima probable, es decir, teóricamente la mayor intensidad de precipitación para cierta duración que es físicamente posible sobre una cuenca determinada y en un periodo particular del año, el cual en este caso de estudio tiene un valor de 1500 $[m^3/s]$ aproximadamente y fue elaborado por [11] (Figura 9).

Figura 9. Hidrograma de entrada al modelo.



- La curva de gasto del vertedero Morning Glory diseñado para evacuar la creciente máxima probable, fue obtenida de [13].

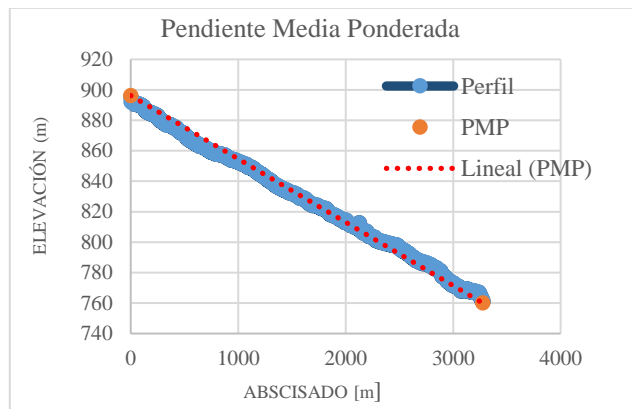
Figura 10. Curva de gasto del vertedero Morning Glory.



Fuente: Tomado y adaptado de [13].

- La pendiente media ponderada del tramo de río se obtuvo mediante el software ArcGIS, dividiendo en segmentos el eje del río y tomando los valores de elevación en cada uno de los nodos formados para finalmente obtener el perfil del río. Con esta información se determinó el área bajo el perfil obtenido y fijando la elevación del nodo inicial, se halló el valor de pendiente para una recta que iguala el área bajo la gráfica del perfil (Figura 11).

Figura 11. Pendiente media ponderada.



- El Coeficiente de Manning fue tomado de [21]. La cobertura vegetal del río Tona está conformada principalmente por pastos y bosques, seguido de otro tipo de cultivos usados para la agricultura y el pastoreo.

Tabla 2. Coeficientes de Manning

Item	n
Lecho de río	0.03
Laderas de terreno natural	0.04

Fuente: Tomado y adaptado de [21].

Es necesario tener en cuenta que estos coeficientes podrían ser más precisos si se contara con información medida en campo que permita su cálculo.

Las características geométricas correspondientes a las estructuras identificadas para el caso de estudio, vertedero tipo Morning Glory (Anexo F) y presa (Figura 1 y Tabla 3), se encontraron en [13] y [21] respectivamente.

Tabla 3. Características de la presa

Tipo	Enrocado con cara de concreto.
Altura máx. presa	103.3 m.
Altura máx. con parapeto	104.6 m.
Cota Cresta Relleno	886.3 m.s.n.m..
Longitud	270 m
Ancho	10 m
Pendientes de los taludes	1.5H:1V Aguas arriba. 1.4H:1V Aguas abajo.

Fuente: Tomado de [13].

2.4 MODELACIÓN EN EL SOFTWARE DEL CASO DE ESTUDIO.

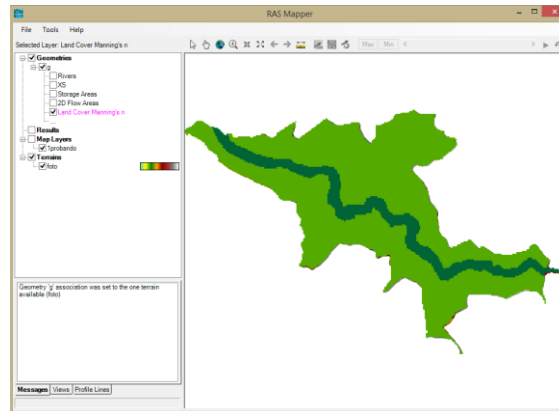
El modelamiento en el software se realizó en dos etapas. La etapa inicial consistió en el ingreso de datos de entrada y la etapa final, en la simulación. Debido a que se realizaron dos escenarios de simulación, i). Río Tona antes de la construcción de la presa y ii). Río Tona con presa, en la Tabla 4 se nombran los procedimientos que se realizaron para cada simulación. Estos procedimientos serán explicados a lo largo del presente capítulo:

Tabla 4. Procedimientos a realizar para cada escenario.

Río Tona sin presa	Río Tona con presa
Se enlazó el DEM y el Layer de Manning a RAS Mapper	Se enlazó el DEM y el Layer de Manning a RAS Mapper
Se dibujaron las zonas 2D y las condiciones de contorno	Se dibujaron las zonas 2D, las condiciones de contorno y la presa
Se definieron el tamaño de las celdas de la zona 2D	Se definieron el tamaño de las celdas de la zona 2D
Se ingresó la información de las zonas de contorno	Se ingresó la información de las zonas de contorno y la presa

2.4.1 Ingreso de datos de entrada. Esta etapa se llevó a cabo de acuerdo a los datos requeridos para el presente caso de estudio. Inicialmente se dio uso a la herramienta *RAS Mapper*, por medio de la cual se suministró el DEM y el layer de coeficientes de Manning (Figura 12).

Figura 12. Ingreso del layer de Manning en *RAS Mapper*.



Posteriormente, gracias a la herramienta *Geometry Editor* (editor de geometría), fue posible identificar la ubicación de la presa por medio de la opción *SA/2D Area Conn*, la cual permite al software conectar la estructura con las dos zonas de estudio que se encuentran aguas arriba y aguas abajo de esta; dibujar sus respectivas zonas de estudio 2D por medio de la herramienta *2D Flow Area* (área de flujo 2D) y trazar sus condiciones de contorno aguas arriba y abajo de la zona de estudio por medio de la herramienta *SA/2D Area BC Lines* (condiciones de contorno de las áreas de almacenamiento y de las zonas 2D). En la Figura 13 y en la Figura 14 se muestran los elementos dibujados para cada escenario a modelar en el presente proyecto.

Figura 13. Elementos del escenario 1.

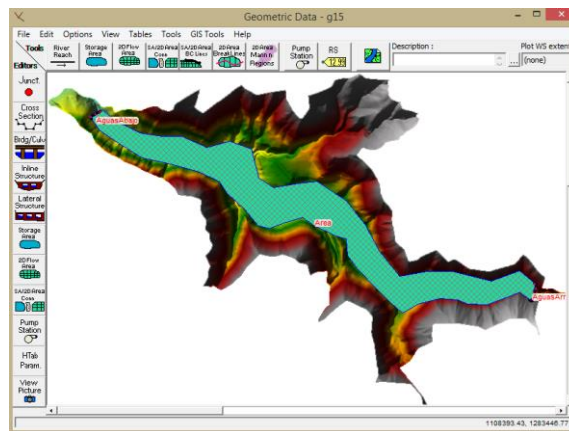
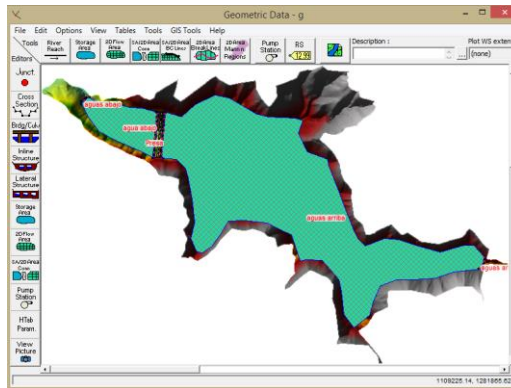


Figura 14. Elementos del escenario 2.



Por último, fue necesario ingresar la información detallada que requiere el software, tal como:

2.4.1.1 Información acerca de la presa. Posterior a la ubicación de la presa, se procedió a ingresar información acerca de su geometría y vertedero de excesos para el escenario de la simulación del río Tona con presa. Con el fin de ingresar esta información, se dio uso a la herramienta *Connection Data Editor* (editor de la conexión) y se seleccionaron los tipos de estructuras que se deseaban agregar al modelo, es decir, presa y vertedero y se ingresaron sus datos así:

- Presa: Por medio de la herramienta *Weir/Embankment* (presa) se accedió a la ventana *Storage Area Connection Weir Data* (Figura 15), donde se ingresó la información geométrica de la presa. En el campo *Weir Width* (grosor de la presa) el valor de 10 metros, el cual hace referencia al ancho de la parte superior de la presa en la dirección del flujo, sin tener en cuenta el ancho ocupado por las laderas aguas arriba y abajo de esta. Los campos *Weir Coefficient* (coeficiente de la presa) y *Weir Crest Shape* (forma de la cresta de la presa) son usados cuando la estructura que se quiere modelar es un azud, en la cual el agua transitará por encima de esta y por lo tanto la forma

de la cresta y el coeficiente de descarga serán importantes. En el presente trabajo no tendrán importancia debido a que se cuenta con un vertedero de excesos. La información respecto a la geometría de la presa se ingresó en la tabla derecha, en la cual se definió como ancho de la presa, es decir, la longitud de esta perpendicular a la dirección del flujo, como 300 metros y se ingresó un valor de altura igual a 891.6 m.s.n.m.

Figura 15. Información de la presa.

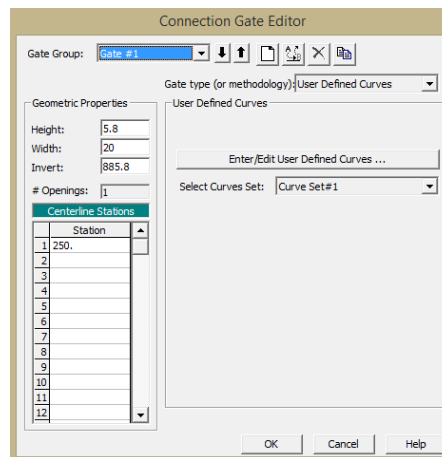
Station	Elevation
0	891.6
300	891.6

- Vertedero de excesos: Debido a que el software no cuenta con el vertedero tipo Morning Glory, se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas por [22], según las cuales, este tipo de vertedero puede ser ingresado al software por medio de una compuerta gracias a la *herramienta User Defined Curves*, es decir, curva de gasto (caudal vs altura) definida por el usuario para la compuerta, en la cual se muestra el control de descarga de agua para el vertedero dependiendo de su abertura, sin importar la influencia del agua que se encuentre abajo de la presa. En la curva de gasto del vertedero del caso de estudio (Figura 10), se puede encontrar que la altura máxima de agua sobre el vertedero es de 5.8 metros, es decir, desde el nivel máximo de operación normal hasta el nivel máximo extraordinario.

Por medio de la herramienta *Gate* (compuerta) se accedió a la ventana *Connection Gate Editor* (Figura 16), en donde se estableció en el campo de

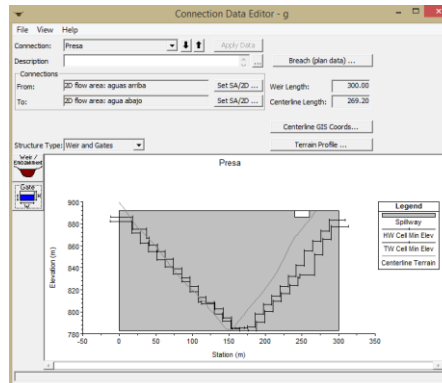
altura, 5.8 metros; en el de ancho, 20 metros y en el de Invert, el cual se refiere a la cota más baja del vertedero, 885.8 m.s.n.m. Para el campo de ancho se puede asignar cualquier valor debido a que la descarga no se registrará por la dimensión del ancho, sino por los datos de la curva de gasto. Dado que es un vertedero tipo Morning Glory, solo tendrá una abertura que será igual a la máxima altura según los criterios del software, por lo tanto, se estableció un solo eje para la compuerta en la abscisa 250 metros. Para poder ingresar la curva definida de la presa, se escogió la opción *User Defined Curves* como tipo de compuerta y por medio de la opción *Enter/Edit User Defined Curves* (ingresar/editar las curvas definidas por el usuario), se ingresaron los valores de la curva.

Figura 16. Editor de la compuerta.



Una vez se ingresaron todos los datos, se pudo comprobar que la presa quedaba dentro de los rangos del terreno al igual que el vertedero como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Editor de la presa.



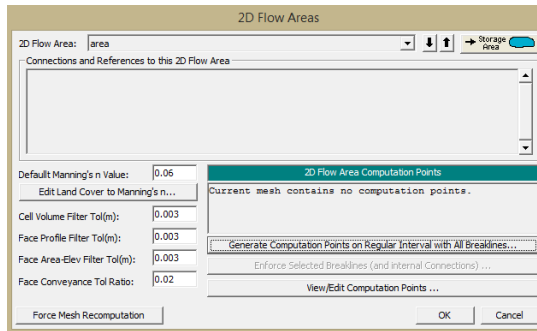
2.4.1.2 Zonas de flujo 2D. Para cada una de las zonas 2D que fueron dibujadas (Figura 13 y

Figura 14), se asignó su respectivo tamaño de malla. Según las recomendaciones encontradas en [16], el tamaño de la malla se debe escoger de acuerdo a dos factores, el primero consiste en asignar un valor tal que su tamaño y orientación describan la forma del terreno, debido a que estas controlarán el movimiento del agua; el segundo se basa en la pendiente del terreno, es decir, si se cuenta con un terreno donde la pendiente cambia suavemente, se podrán usar tamaños de celda grandes. Por el contrario, si las pendientes del terreno cambian bruscamente, se tendrán que usar celdas pequeñas que describan los cambios en la superficie del agua.

La información respecto a las zonas de flujo 2D fue ingresada por medio de la *herramienta Edit 2D Flow Area/Generate Computation Points on Regular Interval with All Breaklines* (editar las áreas de flujo 2D/generar la malla computacional) (Figura 18).

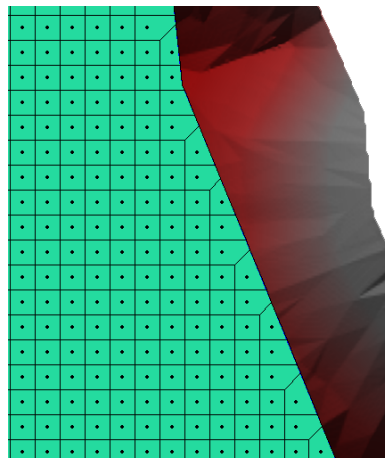
Teniendo en cuenta las recomendaciones dadas, se tomó un tamaño de grilla de 10 metros x 10 metros para los dos escenarios presentados. En el Anexo G se muestran el número de celdas para cada caso de estudio y sus características.

Figura 18. Editor de las zonas de flujo 2D.



Es necesario tener en cuenta que el software tratará de crear todas las celdas del mismo tamaño, pero debido a que el contorno de la zona 2D no es uniforme, las celdas que se crearán allí serán irregulares, por lo tanto, su área cambiará con respecto a la ingresada.

Figura 19. Celdas en el contorno de la zona 2D.



De esta forma se comprueba que para los dos escenarios se está conservando la similitud en el valor de área ingresado para las celdas 10x10 que es igual a 100 [m²].

2.4.1.3 Condiciones de contorno. Las condiciones de contorno para este caso de estudio fueron ubicadas en el extremo aguas arriba y en el extremo aguas abajo de la zona de interés para los dos escenarios propuestos. Esto se hizo con el fin de que la línea que definiría la zona aguas arriba representaría la entrada del

hidrograma y la zona aguas abajo, representaría la pendiente del final de la zona de estudio.

Para la condición de contorno ubicada aguas arriba fue necesario ingresar el hidrograma para la creciente máxima probable y para la condición aguas abajo, la pendiente media ponderada del lecho del río cercano a esta. Dicha información se ingresó por medio de la herramienta *Edit/Unsteady Flow Data* (Editor de información del flujo inestable), en esta se pudieron visualizar las dos condiciones de contorno, asignándose aguas arriba el tipo de condición *Flow Hydrograph* (hidrograma) y aguas abajo, *Normal Depth* (pendiente media ponderada).

El ingreso de datos en cuanto al hidrograma, se realizó asignando un intervalo de tiempo de quince (15) minutos para 112 datos de entrada. Además, se definió la pendiente de energía por medio de la cual se distribuirá el flujo en las celdas que componen el contorno, la cual se encuentra con el nombre de *EG Slope for distributing flow along BC Line* (línea de energía para distribuir el flujo a lo largo de la línea de contorno). Se tomó un valor de 0.0001 teniendo en cuenta que la entrada al terreno posee una pendiente perpendicular a la dirección del flujo muy baja.

La pendiente media ingresada en *Normal Depth* fue de 0.04 de acuerdo a lo mostrado en la Figura 11.

Debido a que los dos escenarios requirieron los mismos datos de contorno, es decir, el hidrograma y la pendiente, este procedimiento se realizó de la misma manera para los dos casos.

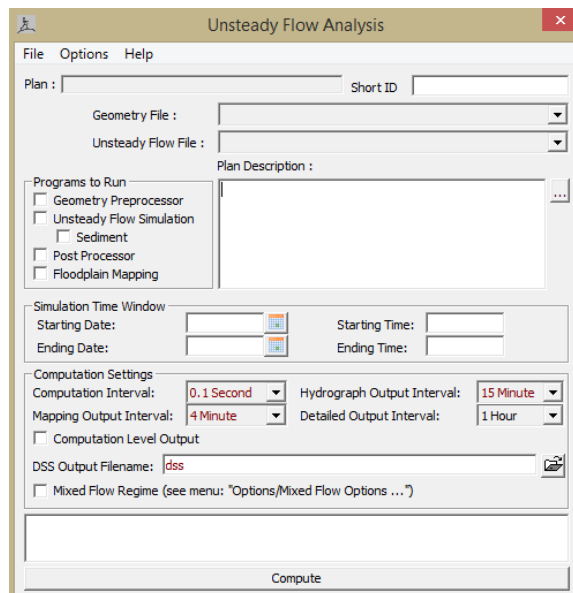
Debido a que en el escenario 2. Río Tona con presa, la simulación inició con el embalse en el nivel máximo de operación normal, es decir, 885.8 m.s.n.m., este dato de entrada se ingresó por medio de la ventana *Initial Conditions* (condiciones iniciales), asignándose al área 2D aguas arriba dicha altura.

Por último, se ingresaron los datos correspondientes a la condición de contorno de la presa debido al vertedero para el escenario 2. Para esto se usó la opción *T.S. Gate Openings* (series de apertura de las compuertas) y en esta se asignaron 112 datos de entrada e intervalo de tiempo de quince minutos, de igual forma que en el hidrograma. De esta forma, todos los datos se ingresaron como 5.8 metros que es la altura máxima sobre el vertedero, teniendo en cuenta que el vertedero nunca debe tener limitaciones en la entrada, por lo tanto siempre debe estar en su abertura máxima.

2.4.2 Simulación. La simulación se dividió en partes, la primera se hizo para el escenario 1. Río Tona sin Presa y la segunda se hizo para el escenario 2. Río Tona con presa.

Mediante la herramienta *Perform an Unsteady Flow Simulation* (simular flujo inestable), se accedió a la ventana *Unsteady Flow Analysis* (Figura 20), en la cual se pudieron establecer los parámetros relativos al intervalo computacional y los intervalos de salida de información.

Figura 20. Análisis de flujo inestable.



La simulación se realizó desde las 00:00 del día uno (1) hasta las 03:45 del día dos (2), teniendo en cuenta que estos fuesen los valores mínimos y máximos de tiempo del hidrograma.

Para intervalo computacional no se realizaron los cálculos que se recomiendan en el numeral 0 debido a que fue necesario realizar las simulaciones con valores muy bajos de intervalos computacionales para que no se presentaran errores en las celdas, dichos valores son inferiores al propuesto por la regla general, el cual dio como resultado que el intervalo computacional debe ser menor o igual a 19.5 minutos. Los valores seleccionados para los otros intervalos debieron cumplir con lo mostrado en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones para la selección de intervalos

Hydrograph Output Interval	\geq	I.C
Detailed Output Interval	\geq	I.C
I.C: Intervalo computacional		

El primero hace referencia al intervalo de tiempo que se desea que tenga el hidrograma de salida, para el cual se seleccionó el tiempo de 15 minutos, con el objetivo de que contara con la misma cantidad de datos que el hidrograma de entrada. El segundo se refiere al intervalo de tiempo para el cual se crearán perfiles sobre la elevación de la superficie del agua, para el cual se tomó un valor de una hora.

Para el intervalo de visualización del mapa (*Mapping Output Interval*), se tomó un valor de 4 minutos para todos los escenarios simulados, con el fin de poder observar el cambio con el tiempo en la profundidad y velocidad.

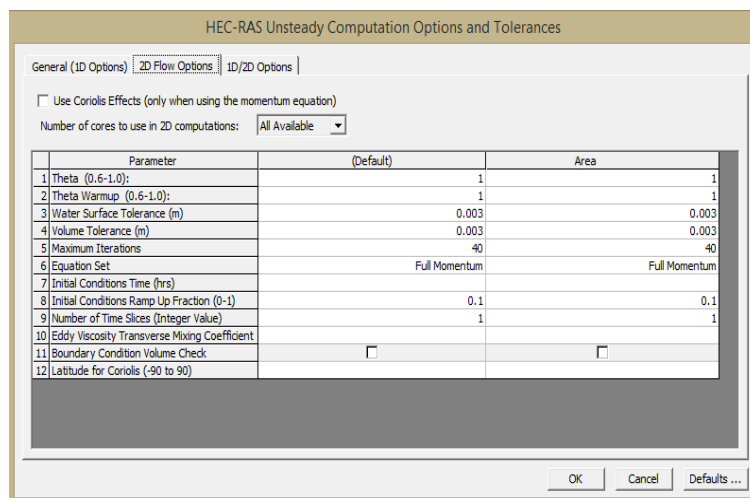
Por medio del software HDF View del grupo HDF, fue posible obtener resultados numéricos de la simulación para cada celda, debido a que este muestra valores de profundidad por celda, velocidad por cara de celda, velocidad en X y Y por cada nodo y esfuerzo cortante en cada cara de celda. Estos resultados son dados para

cada celda un número de veces igual al tiempo total de la simulación dividido en el intervalo que se asignó para la visualización de la inundación (*Mapping Output Interval*).

2.4.2.1 Escenario 1. Río Tona antes de la construcción de la presa. Para la simulación del escenario 1 se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas en el numeral 3.1.3, en las cuales se nombran algunas de las características que debe poseer el terreno o la modelación para que se ejecute la simulación únicamente con la ecuación de Saint Venant. Una de dichas características es la presencia de contracciones y expansiones abruptas en el tramo de estudio. Aunque el modelo cuenta con gran número de contracciones, se realizó la simulación tanto con Saint Venant como con Onda Difusa, con el fin de poder comparar los modelos.

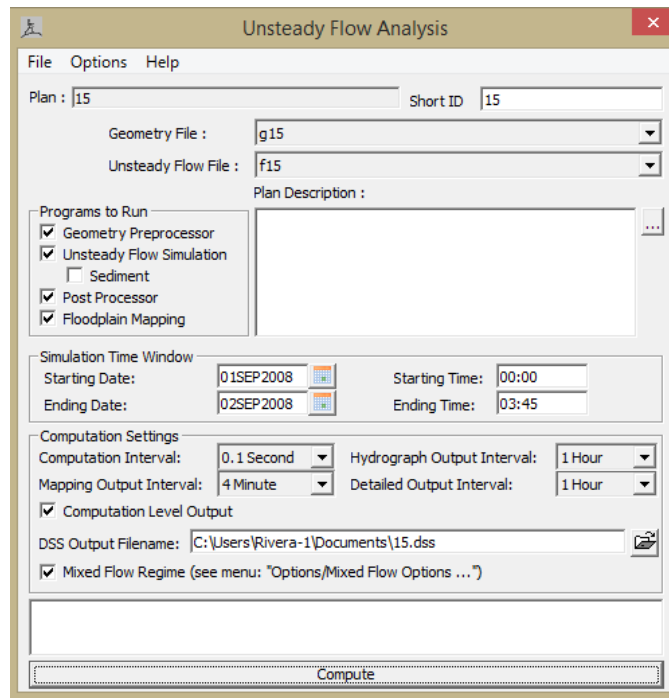
- Simulación usando la ecuación Saint Venant: para realizar la simulación se modificó en la opción *Unsteady Computation Options and Tolerances* (Opciones y tolerancias de la simulación inestable) el tipo de ecuación a usar, escogiéndose la ecuación Full Momentum, el cual es el nombre que el software le da a la ecuación de Saint Venant (Figura 21).

Figura 21. Opciones y tolerancias del flujo inestable para la ecuación Saint Venant del escenario 1.



Para el valor del intervalo computacional se tomaron 0.1 segundos, debido a que este tipo de ecuación requiere tiempos muy bajos para que no se presenten errores durante la simulación (Figura 22).

Figura 22. Valores de intervalos para la ecuación Saint Venant del escenario 1.



- Simulación usando la ecuación Onda Difusa:

Para realizar la simulación, se modificó en Unsteady Computation Options and Tolerances (Figura 23) el tipo de ecuación escogiéndose la opción Onda difusa.

Como valor de intervalo computacional se tomaron dos segundos, teniendo en cuenta que esta ecuación es más flexible en cuanto a este intervalo (Figura 24).

Figura 23. Opciones y tolerancias del flujo inestable para la ecuación Onda Difusa del escenario 1.

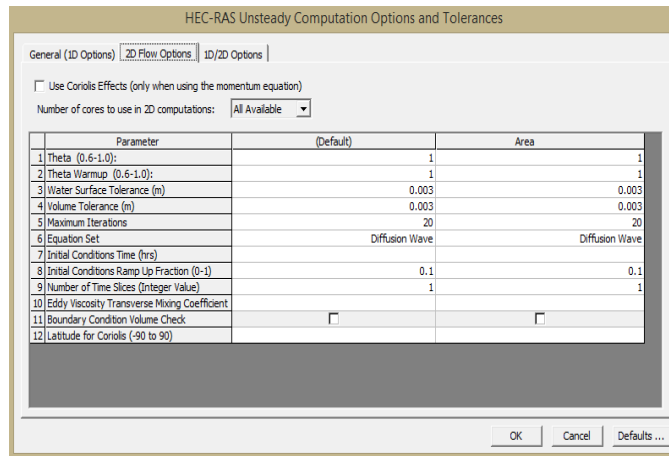
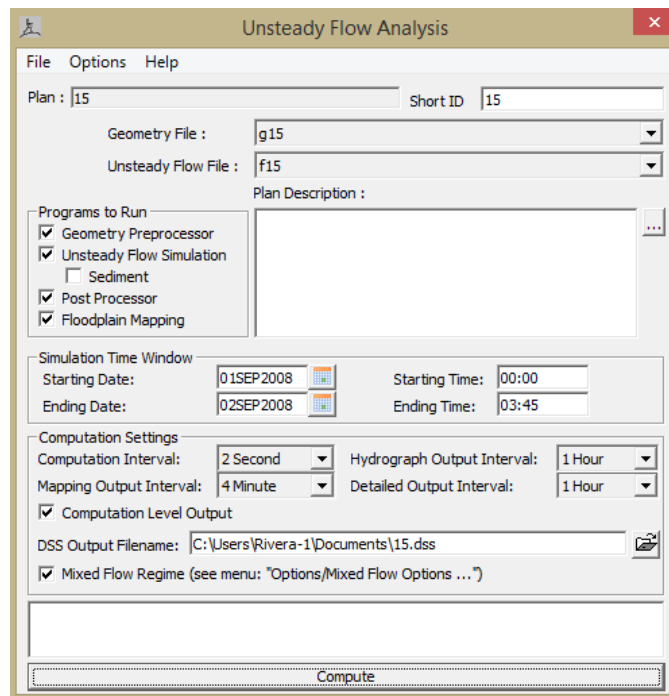


Figura 24. Valores de intervalos para la ecuación Onda Difusa del escenario 1.



2.4.2.2 Escenario 2. Río Tona con presa. Para la simulación del escenario 2 también se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas en el numeral 3.1.3, debido a que el modelo cuenta con una estructura como presa y se desean conocer

las velocidades alrededor de esta, lo cual es posible gracias a la ecuación Saint Venant, por lo tanto se decidió simular con las dos ecuaciones para comparar los modelos.

- Simulación usando la ecuación Saint Venant: para realizar la simulación se realizó el procedimiento descrito para el escenario 1 con la ecuación Saint Venant, con los mismos valores que en este se muestran para intervalo computacional.
- Simulación usando la ecuación Onda Difusa: para realizar la simulación se realizó el procedimiento descrito en el escenario 1 para la ecuación Onda Difusa, teniendo como única diferencia el valor del intervalo computacional, debido a que en el presente modelamiento se tomó un valor de 0.2 segundos, debido a que la presencia de la presa requiere mayor detalle en la simulación.

3. RESULTADOS

3.1 MODELACIÓN.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada escenario y para cada ecuación utilizada en la simulación, además de los resultados máximos obtenidos para la profundidad y la velocidad obtenidas en cada caso gracias al software HDF View. Los reportes brindados por dicho software se encuentran en el Anexo H.

Los resultados en el área inundada se compararon con el área ocupada por el caudal medio anual del río Tona, el cual es de $1.11 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

3.1.1 Escenario 1. Río Tona antes de la construcción de la presa – Ecuación Saint Venant. Una vez la simulación finalizó, se pudieron observar los mapas de inundación por medio de la herramienta *RAS Mapper*, de esta se obtuvo el mapa de profundidades (Figura 25) y el mapa de velocidades (Figura 26) a lo largo del tramo de estudio. Los mapas detallados se encuentran en los Anexos I y J.

Se obtuvo una profundidad máxima a lo largo del tramo de 18.88 metros, la cual se generó aproximadamente en la mitad del tramo del río. Las velocidades que se presentaron variaron desde el máximo valor obtenido que fue de 15 [m/s] , que se generó en el eje del río, a profundidades cercanas o iguales a cero en los costados del tramo.

Figura 25. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Saint Venant [m]

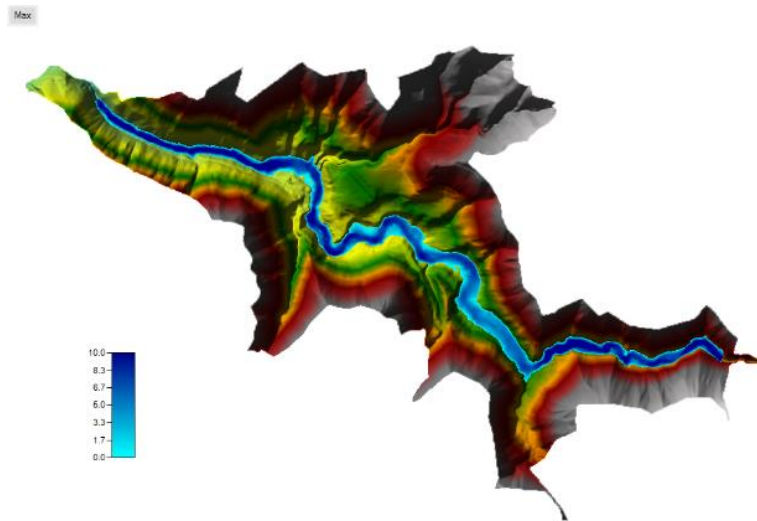
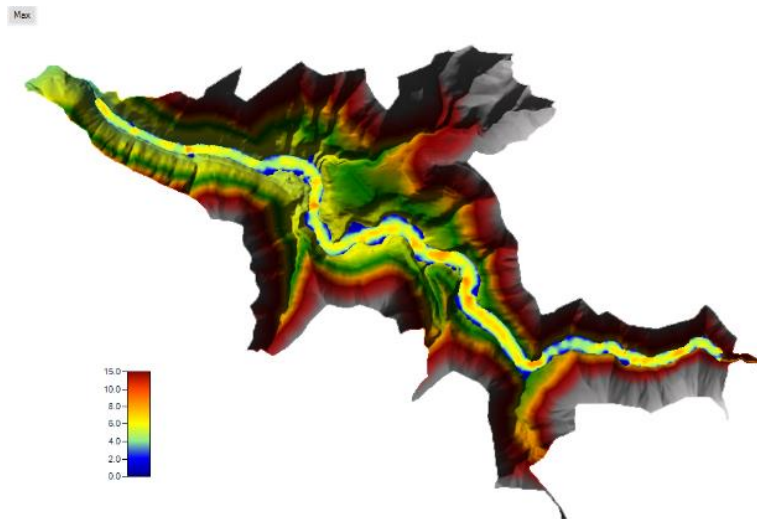


Figura 26. Mapa de inundación con velocidades-Ecuación Saint Venant [m/s]



El área inundada obtenida fue de 14.46 [Ha], la cual es aproximadamente el triple del área que ocupa el caudal medio anual del río Tona sobre su eje.

3.1.2 Escenario 1. Río Tona sin presa- Ecuación Onda Difusa. La simulación por medio de la ecuación Onda Difusa, dio como resultado mapas de profundidad (Figura 27) y velocidad (Figura 28) de los cuales se obtuvo una profundidad máxima de 15.33 metros a lo largo del tramo. Los mapas detallados se encuentran en los Anexos K y L.

Las velocidades que se presentaron iban desde 27.89 [m/s] en algunas zonas del eje del río a valores de velocidad iguales o cercanos a cero en los costados de este.

Figura 27. Mapa de inundación con velocidades-Ecuación Onda Difusa [m/s]

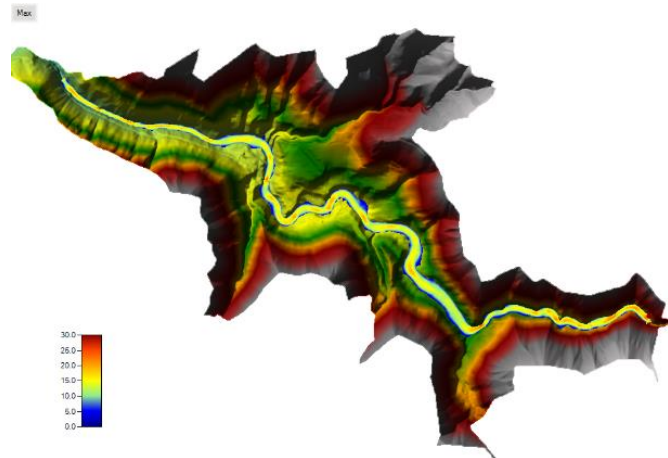
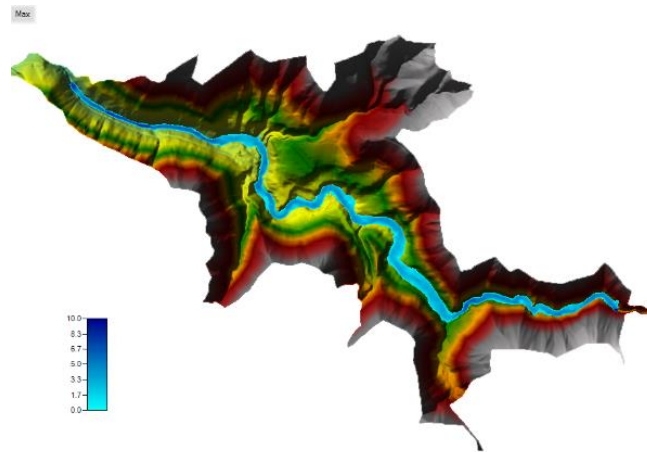


Figura 28. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Onda Difusa [m]



La inundación tuvo un alcance horizontal que varió desde 67 metros a 10 metros, generando un área de inundación igual a 9.84 [Ha], la cual es aproximadamente el doble del área que ocupa el caudal medio anual en el río Tona. Teniendo en cuenta lo estipulado en el numeral 3.1.3, según el cual, si al modelar el caso de estudio con las dos ecuaciones los resultados de estas dan muy distintos, se tomará como verdadero el resultado dado por la simulación con la ecuación Saint Venant.

En el presente caso de estudio se presentaron profundidades máximas para Saint Venant y Onda Difusa de 18.88 metros y 15.33 metros respectivamente, debido a esta diferencia de 3.55 metros, se tomaron los resultados obtenidos por medio de Saint Venant como los verdaderos. Por lo tanto, todas las viviendas o estructuras que se encontraban dentro de las 14.46 hectáreas de inundación generada por medio de la ecuación Saint Venant, se hubiesen visto afectadas durante la avenida.

3.1.3 Escenario 2. Río Tona con presa – Ecuación Saint Venant. Durante la simulación se encontraron inconvenientes respecto a algunas celdas de la zona 2D aguas debajo de la presa, a pesar de que la simulación se realizó con el mínimo intervalo computacional permitido, es decir, 0.1 segundos y llevando el número de iteraciones por celda hasta 40, el cual es el máximo permitido.

El resultado de la simulación mostró los errores que se encuentran en la Figura 29, en la cual se puede observar que para determinadas celdas se presentaron errores de convergencia.

Figura 29. Errores de la simulación.

```

Performing Unsteady Flow Simulation HEC-RAS 5.0.0 February 2016

Maximum iterations of 40
Cell      WSEL  ERROR  CONVERGENCE
01SEP2008 04:39:14 agua abajo Cell #    537    790.58  0.0071  1
01SEP2008 05:08:49 agua abajo Cell #    574    796.49  0.0450  2
01SEP2008 05:11:08 agua abajo Cell #    540    790.84  0.0272  1
01SEP2008 05:14:04 agua abajo Cell #    537    790.68  0.0032  2
01SEP2008 05:21:10 agua abajo Cell #    537    790.57  0.0180  2
01SEP2008 05:31:41 agua abajo Cell #    540    790.82  0.0060  1
01SEP2008 06:05:27 agua abajo Cell #    536    792.38  0.2505  3
01SEP2008 08:20:49 agua abajo Cell #    537    790.60  0.0437  2
01SEP2008 08:21:25 agua abajo Cell #    537    790.58  0.0326  2
01SEP2008 08:39:11 agua abajo Cell #    540    790.86  0.0060  1
01SEP2008 08:39:53 agua abajo Cell #    540    790.86  0.0215  1
01SEP2008 08:53:09 agua abajo Cell #    537    790.94  0.0042  2
01SEP2008 09:04:54 agua abajo Cell #    538    790.88  0.0328  2
01SEP2008 09:37:34 agua abajo Cell #    538    790.96  0.1318  1
01SEP2008 10:44:10 agua abajo Cell #    538    790.98  0.0993  1
01SEP2008 10:51:11 agua abajo Cell #    538    790.98  0.0978  1
01SEP2008 12:10:51 agua abajo Cell #    538    790.73  0.0150  1

Finished Unsteady Flow Simulation

Writing Results to DSS
Computing Stored Results Maps
Completed storing 0 results map layer

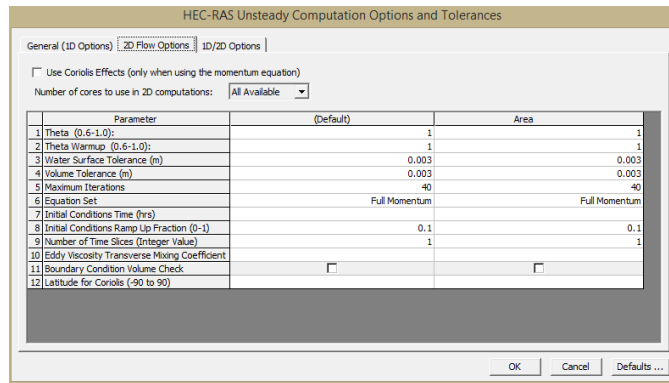
```

Cuando la ecuación con la cual se esté simulando, en este caso Saint Venant, encuentra una solución que posee un error menor al establecido como la tolerancia de la superficie del agua de la celda, el software lo toma como respuesta válida; pero cuando el error es mayor, el software comienza a iterar en busca de una respuesta con menor error. Es importante tener en cuenta que el software solo iterará hasta el número de iteración máximo permitido. En caso tal de que el error continúe siendo mayor al máximo, dicha celda aparecerá en la lista de mensajes que genera la simulación y dependiendo del tipo de error que presente, se ubicará del 1-4 como se muestra en el Anexo Q.

Los resultados muestran que se ha alcanzado el número máximo de iteraciones en busca de una respuesta válida para 5 celdas. Dichos errores no impiden que el software realice la simulación y dependiendo de su magnitud se pueden considerar sin importancia.

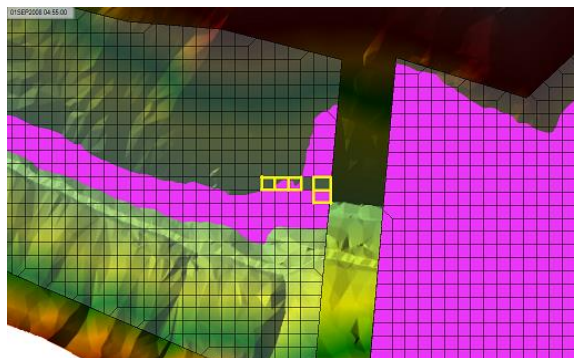
El paso a seguir para poder eliminar los errores presentados, sería aumentar la tolerancia de la elevación de la superficie del agua (Figura 30) pero, teniendo en cuenta las magnitudes de errores que se obtuvieron, se tendría que asignar una tolerancia de 0.26 como mínimo, la cual es bastante grande comparada con la usada que fue de 0.003.

Figura 30. Opciones y tolerancias del flujo inestable.



Una vez HEC-RAS finalizó el proceso de simulación, se pudieron observar en *RAS Mapper* inconsistencias en el mapa de inundaciones en las celdas que presentaron errores, las cuales se encontraban aguas abajo de la presa como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Errores en la simulación de la inundación.



Cuando en *RAS Mapper* se visualizó el mapa de inundación, se pudo comprobar que en estas celdas no tenían flujo continuo sino intermitente, es decir, no describía una inundación real.

Los mapas de profundidad y velocidad se muestran en la Figura 32 y Figura 33 respectivamente. La simulación inició con el embalse en la cota 885.8 m.s.n.m. en la zona 2D aguas arriba de la presa, es decir, en el nivel máximo de operación normal del embalse (Figura 1) y la profundidad máxima que se obtuvo al finalizar la simulación fue de 891.607 m.s.n.m., la cual superó a la altura de la presa que es de 891.6 m.s.n.m en siete milímetros, lo cual se puede deber a la sensibilidad del modelo. Los mapas detallados se encuentran en los Anexos M y N.

Figura 32. Mapa de inundación con profundidades-Saint Venant [m].

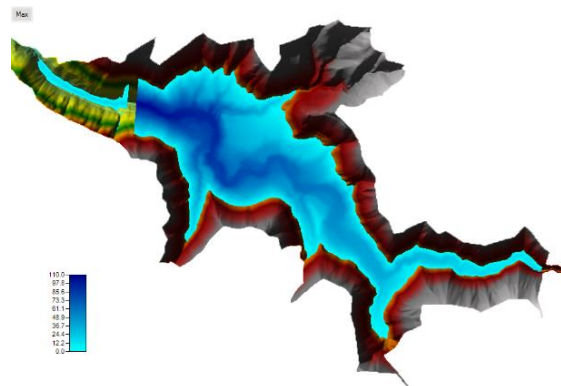
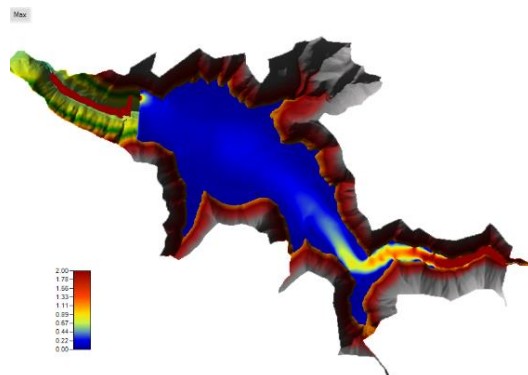


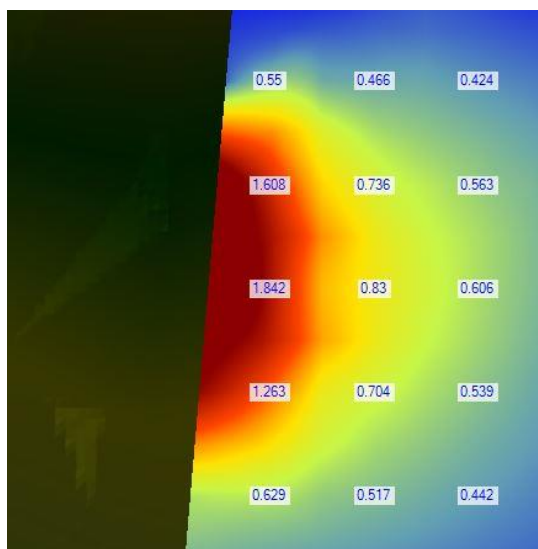
Figura 33. Mapa de inundación con velocidades-Saint Venant [m/s].



Al inicio del tramo se presentan velocidades del orden de 9.6 [m/s], la cuales van disminuyendo gradualmente a lo largo de la franja roja hasta que obtienen valores cercanos a 1.5 [m/s], posteriormente la velocidad comienza a disminuir tanto en la dirección paralela al flujo como perpendicular a esta, hasta encontrarse velocidades cercanas o iguales a cero en la lámina del embalse.

Las velocidades aumentan en la zona de descarga del vertedero como se puede observar en la Figura 34, en donde se muestra que los valores varían entre 0.4 [m/s] y 2.5 [m/s] justo en la descarga.

Figura 34. Velocidades alrededor de la zona de descarga del vertedero-Saint Venant [m/s].

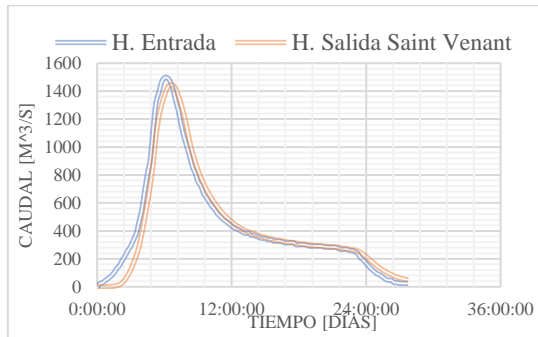


Se obtuvo un área de la lámina de agua de 56.12 hectáreas en el momento en que el embalse se encontraba en su elevación máxima, es decir, 891.6 m.s.n.m., la cual es aproximadamente 12 veces más grande que el área ocupada por el caudal medio anual en el río Tona.

Por medio de la herramienta *Plot Stage and Flow Hydrograph* (gráfica del hidrograma) se obtuvo el hidrograma de salida en el vertedero, en el cual se

encontró una descarga máxima de 1445 [m³/s] como se muestra en la Figura 35. Los valores del hidrograma para cada intervalo de tiempo se encuentran en el Anexo R.

Figura 35. Hidrogramas de entrada y de salida del embalse-Saint Venant.



En busca de resultados que permitan una simulación confiable, no se consideró prudente aumentar la tolerancia y se concluyó que la ecuación de Saint Venant no puede brindar resultados que permitan conocer las velocidades el flujo aguas abajo, aunque sí las permite conocer aguas arriba de la presa.

3.1.4 Escenario 2. Río Tona con presa – ecuación Onda Difusa. Al finalizar la simulación se pudo observar que ninguna celda presentaba errores de convergencia, por lo tanto se procedió a visualizar en *RAS Mapper* la simulación de la inundación para mapas de profundidad (Figura 36) y de velocidad (Figura 37). Los mapas detallados se encuentran en los Anexos O y P.

Figura 36. Mapa de inundación con profundidades-Ecuación Onda Difusa [m].

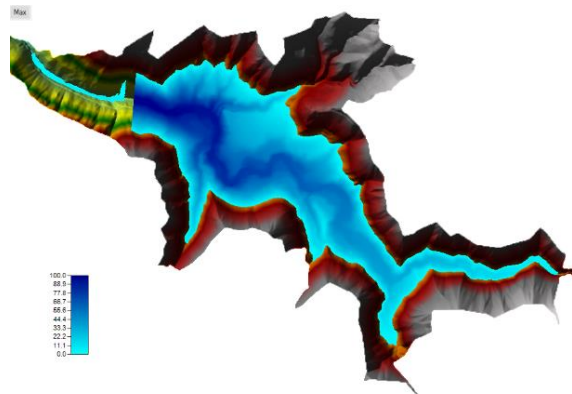
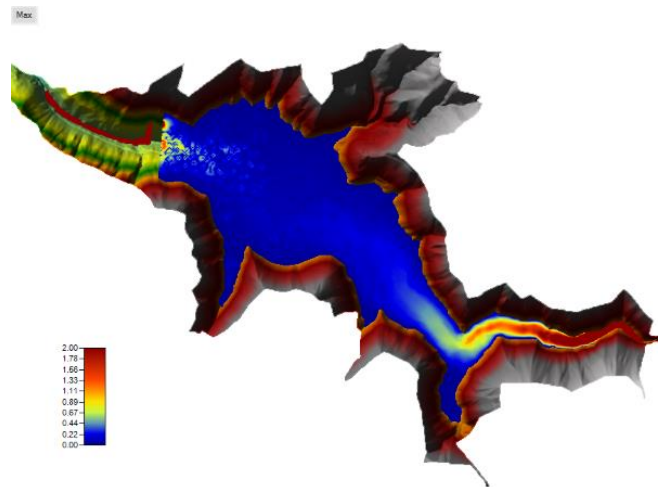


Figura 37. Mapa de inundación con velocidades-Onda Difusa [m/s].



Así como en la simulación con Saint Venant, la simulación inició con el embalse en la cota 885.8 m.s.n.m. y en el punto más alto alcanzó una elevación de 891.601 m.s.n.m. Teniendo en cuenta que la elevación máxima de la presa es de 891.6 metros, por lo tanto el nivel del embalse aguas arriba sobrepasa a la presa por un milímetro, lo cual se puede deber a la sensibilidad del modelo.

Al inicio del tramo aguas arriba se generaron velocidades que variaron desde 22.6 [m/s] hasta el final de la franja roja con valores cercanos a 1.5 [m/s] y de igual forma a la simulación hecha con la ecuación Saint Venant, los valores de la velocidad fueron disminuyendo hasta tomar valores iguales o cercanos a cero a lo largo y ancho de la lámina del embalse.

Las velocidades generadas cerca a la zona de descarga del vertedero se muestran en la Figura 38, donde se puede observar que los valores variaron desde 0.3 [m/s] hasta 2.7 [m/s] justo en la descarga.

Se generaron velocidades que variaron desde 23 [m/s] hasta 2 [m/s] al comienzo del tramo, la cual iba disminuyendo gradualmente tanto en la dirección del flujo como perpendicular a este, mientras comenzó a avanzar la avenida sobre la lámina de agua del embalse que se encontraba en la cota 885.8 m.s.n.m. al iniciar la simulación. La velocidad disminuyó hasta que tomó valores iguales o cercanos a cero y retomó valores elevados de velocidad en las zonas cercanas al vertedero de excesos, lo cual se debe a que allí se presentó la descarga del flujo.

Se obtuvo un área de la lámina del agua de 55.82 hectáreas en el momento en que el embalse se encontraba en su máxima elevación. Dicha área es aproximadamente 12 veces el área ocupada por el caudal medio anual del río Tona, al igual que con la ecuación Saint Venant.

Gracias a la herramienta *Plot Stage and Flow Hydrograph*, se obtuvo el hidrograma de salida de la misma forma que con la ecuación Saint Venant. El valor máximo de descarga obtenido fue de 1449.78 [m³/s] como se puede observar en la Figura 39. Los valores del hidrograma para cada intervalo de tiempo se encuentran en el Anexo R.

Figura 38. Velocidades alrededor de la zona de descarga del vertedero-Onda Difusa [m/s].

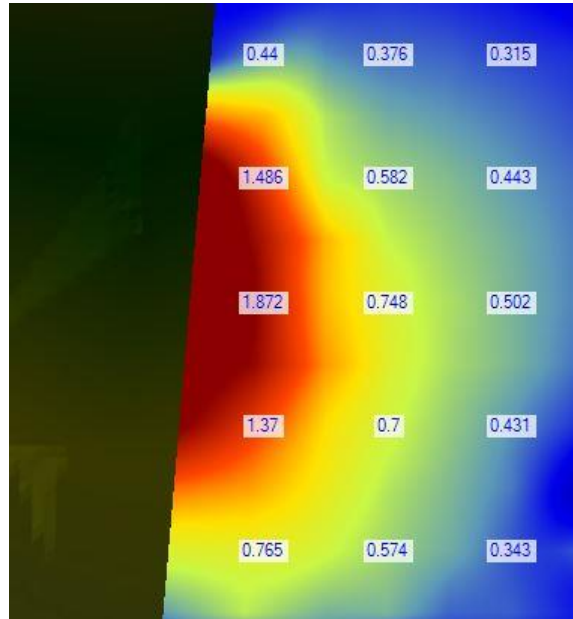
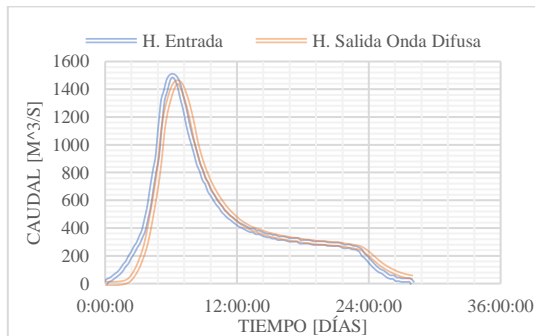


Figura 39. Hidrogramas de entrada y de salida del embalse-Onda Difusa.



Tanto en el hidrograma de salida que se obtuvo para la ecuación Saint Venant, como el que se obtuvo para la ecuación Onda Difusa, se evidencia que estos tienen un comportamiento similar al hidrograma de entrada, por lo tanto, esto quiere decir que el embalse lamina muy poco debido a que el área del vaso del embalse es pequeña.

3.2 LIMITANTES EN LA SIMULACIÓN.

De acuerdo a la geometría de la presa, esta cuenta con un túnel de sección tipo baúl que termina en un salto de sky con el fin de entregar el flujo que ingresa al vertedero de excesos a un cuenco de erosión y posteriormente al río Tona. HEC-RAS no posee ninguna herramienta que permita modelar este tipo de estructuras, por lo tanto, los resultados obtenidos para la zona aguas abajo poseen un margen de error debido a que en la simulación la descarga se realiza en forma de caída sobre la presa y esa es la única forma de pérdida de energía con la que cuenta el software.

En la Tabla 6 se muestran los valores máximos de profundidad y velocidad obtenidos para cada zona aguas abajo de la presa según la ecuación usada, además se muestran los valores de área inundada para cada caso.

Tabla 6. Características zonas aguas abajo de la presa.

	Saint Venant	Onda Difusa
Profundidad [m]	18.5	10.1
Velocidad [m/s]	30.1	49.8
Área inundada [Ha]	1.76	0.99

Debido a que para el área inundada se tuvo en cuenta el contorno de la zona, no importaron los errores de convergencia presentados en algunas celdas durante la simulación con la ecuación Saint Venant. Se puede observar que existe una diferencia de 0.77 [Ha], presentándose menor profundidad en la simulación con la ecuación Onda Difusa.

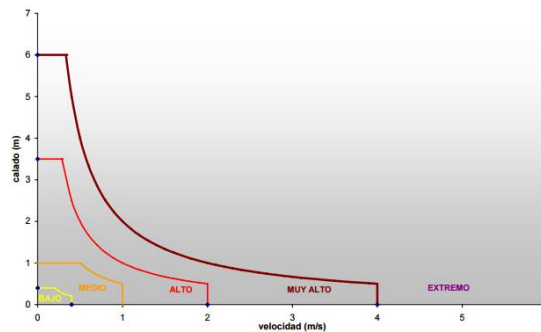
3.3 DETERMINACIÓN DE PELIGROSIDAD DE LA INUNDACIÓN.

De acuerdo a la Agencia Catalana del Agua, la peligrosidad relacionada con una inundación depende de la capacidad de empuje o arrastre que tenga el flujo, lo cual se puede definir por medio de la profundidad y velocidad que se generen.

En la Figura 40 se puede observar el rango de velocidades y profundidades para cada factor de gravedad. La tabla con los valores y la descripción de cada factor se encuentran en el Anexo S.

De acuerdo a esta información, para todos los escenarios modelados en el presente trabajo se presenta un factor de gravedad catalogada como extrema, debido a que en todos la profundidad y velocidad máxima superan los 4 [m] y 6 [m/s] respectivamente.

Figura 40. Factor de gravedad de la inundación.



Fuente: Tomado de [23]

4. MANUAL PARA HEC-RAS 5.0 ENFOCADO A ÁREAS DE INUNDACIÓN.

Con el fin de presentar un manual práctico para la modelación de inundaciones en HEC-RAS 5.0, se consultaron los textos guía encontrados en la página oficial del software [16], [17].

Se realizó la selección de información sobre la cual se deseaba ingresar en el manual, de tal forma que se explicaran las variables de entrada, la visualización de resultados, entre otros factores sobre los cuales se rige la correcta modelación en el software. El manual se adjunta en el Anexo T.

5. CONCLUSIONES

La nueva versión del software HEC-RAS cuenta con varias ventajas que pudieron ser observadas en el presente trabajo. Entre estas ventajas se encuentra la visualización de resultados, debido a que es posible realizar simulaciones y observar el cambio que se va presentando a lo largo de la inundación. Por otra parte se encuentra la solución a una limitación que se observaba en las versiones anteriores del software, la cual consistía en que la inundación se restringía horizontalmente a la longitud que tuviesen las secciones transversales, en la nueva versión se pueden ingresar modelos de elevación digital que abarquen todo la zona de estudio, por lo tanto, no se encuentran limitaciones en cuanto a la extensión de las inundaciones. Además de lo anteriormente nombrado, el software en su nueva versión cuenta con el análisis en dos dimensiones, es decir, se pueden observar los cambios de velocidad, entre otras variables, no únicamente en la dirección del flujo, sino también perpendicular a este, siendo una ventaja de gran importancia debido a que los resultados que se obtienen son más cercanos a la realidad.

Las ventajas previamente nombradas, la facilidad de uso del software gracias a los manuales con los que cuenta y la gratuidad de este, convierten a HEC-RAS en un software con grandes ventajas y capacidades para el modelamiento de inundaciones.

La información que requiere el software para el modelamiento de inundaciones consiste en datos relacionados a la crecida máxima probable, modelos de elevación digital, información acerca de las estructuras hidráulicas que se encuentren en la zona de estudio y coeficientes de Manning, por lo tanto, de acuerdo a la calidad de la información que se tenga dependerán los resultados de la

inundación que se pueda obtener, por lo tanto, es indispensable contar con un análisis detallado de esta información.

De los resultados que se obtuvieron de los escenarios simulados en el software, se encontraron diferencias entre las simulaciones realizadas con la ecuación Saint Venant y la ecuación Onda Difusa, especialmente en los valores de velocidad máxima presentados en cada caso, aunque en todos los escenarios la presa atenuó la velocidad que ingresaba, observándose valores cercanos o iguales a cero en la mayoría el área de la lámina generada.

Se validó que los cambios en el intervalo computacional y el tamaño de la malla afectan considerablemente la convergencia de la simulación, presentándose tramos donde la inundación no está describiendo un suceso real. Además, se comprobó que la simulación en dos dimensiones es útil en zonas donde se presenta inundación de llanuras, debido a que muestra el cambio de velocidades en las dos direcciones, siendo esto útil para el estudio de sedimentos.

Se encontró que para todos los escenarios simulados existe un factor de gravedad debido a la inundación que se encuentra catalogado como extremo, lo cual indica que antes de la construcción de la presa se requerían planes de emergencia en caso de inundación, teniendo en cuenta que esta no se extiende hacia las llanuras y posterior a la construcción de la presa es necesario evaluar las zonas de mayor riesgo aguas abajo y aguas arriba de esta.

RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer un estudio en campo sobre los coeficientes de Manning en busca de resultados más precisos en la rugosidad del cauce. Además se recomienda la revisión en los datos de entrada, tales como el hidrograma en busca de posibles cambios que puedan generar consecuencias en el mapa de inundaciones.

El trabajo presentado muestra la descarga del agua por el vertedero como una caída, debido a una limitante del software, por lo tanto se recomienda una investigación para encontrar una solución efectiva para dicho inconveniente.

REFERENCIAS

- [1] ASIA DISASTER REDUCTION CENTER (ARDC). Natural disaster data book 2009 (an analytical review). Kobe, Japan, 2009. p. 23.

- [2] ROMO, S. Estimación del riesgo por inundación en la ribera del río Mulato (Mocoa-Colombia). Tesis de maestría en Sistemas de Información Geográfica. Mocoa: UNIGIS. 2016, p. 105.

- [3] ABIMAEL, L. Dam Breach Analysis Using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: The Case of Kesem Kebena Dam. Tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica. Addis Abeba: Addis Abeba University. 2015, p. 92.

- [4] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1523 (24, abril, 2012). Por el cual se crea la política nacional de gestión del riesgo de desastres. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2012, no 48411.

- [5] KNEBL, M. R., et al. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*. 2005, vol. 75, pp. 325-336.

- [6] MOYA, V., et al. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua*. 2016, vol. 3, nº 1, pp. 25-33.

- [7] SAKSENA, S. y MERWADE, V. Incorporating the Effect of DEM Resolution and Accuracy for Improved Flood Inundation Mapping. *Journal of Hydrology*. 2015, vol. 530, pp. 180-194.
- [8] VOZINAKI, A. K., et al. Comparing 1D- and combined 1D/2D hydraulic simulations using high resolution topographic data, the case study of Koiliaris basin, Greece. *Hydrological Sciences Journal*. 2017, vol. 62, nº 4, pp. 642-656.
- [9] LLUÉN, W. Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. 2015, p. 10.
- [10] SALAS, J. D. y GAVILÁN, G. E. Informe 1. Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga (Río Tona). 2011, p. 24.
- [11] INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES. Memorando Técnico 03. Hidrología, Clima y Sedimentos del embalse de Bucaramanga. 2012, p. 75.
- [12] SALAS, J. D. y GAVILÁN G.E. Informe 2. Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga (Río Tona). 2011, p. 23.
- [13] ALMEYDA, A. Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Madrid: SPANCOLD. 2014, p. 127.

- [14] PAPPENBERGER, F., et al. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*. 2005, vol. 302, pp. 46-69.
- [15] CivilGEO. CivilGEO Engineering Software. [En línea]. (Recuperado en 02 de febrero de 2017. Disponible en: <https://www.civilgeo.com/the-road-to-hec-ras/>).
- [16] HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 171.
- [17] HEC-RAS River Analysis System User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 960.
- [18] HEC-RAS River Analysis System Applications Guide; Version 5.0; U.S Army Corps of Engineers; 2016, p. 519.
- [19] INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES. Memorando Técnico 01 - Cartografía, Geodesia y Topografía. 2011, p. 31.
- [20] MANCEBO, S., ORTEGA, E., FERNÁNDEZ, L. y VALENTÍN, A. LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental: ejercicios. Madrid, 2009, pp. 92-125. ISBN 978-84-692-8534-3.
- [21] Casallas, E. y Chacón S. Estimación del hidrograma de salida en la hipotética rotura de la presa del proyecto de regulación del río Tona - Embalse de

Bucaramanga. Tesis de pregrado para Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2016, p. 68.

[22] GOODELL, C. R. Advanced Gate Operation Strategies in HEC-RAS 5.0. *6th International Symposium on Hydraulic Structures* (28 de junio de 2016). Portland, pp. 519-527.

[23] GREGO, E., et al. Riesgos y cuantificación de daños por inundación. p. 15.

BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1523 (24, abril, 2012). Por el cual se crea la política nacional de gestión del riesgo de desastres. Diario Oficial. Bogotá D.C., 2012, no 4841

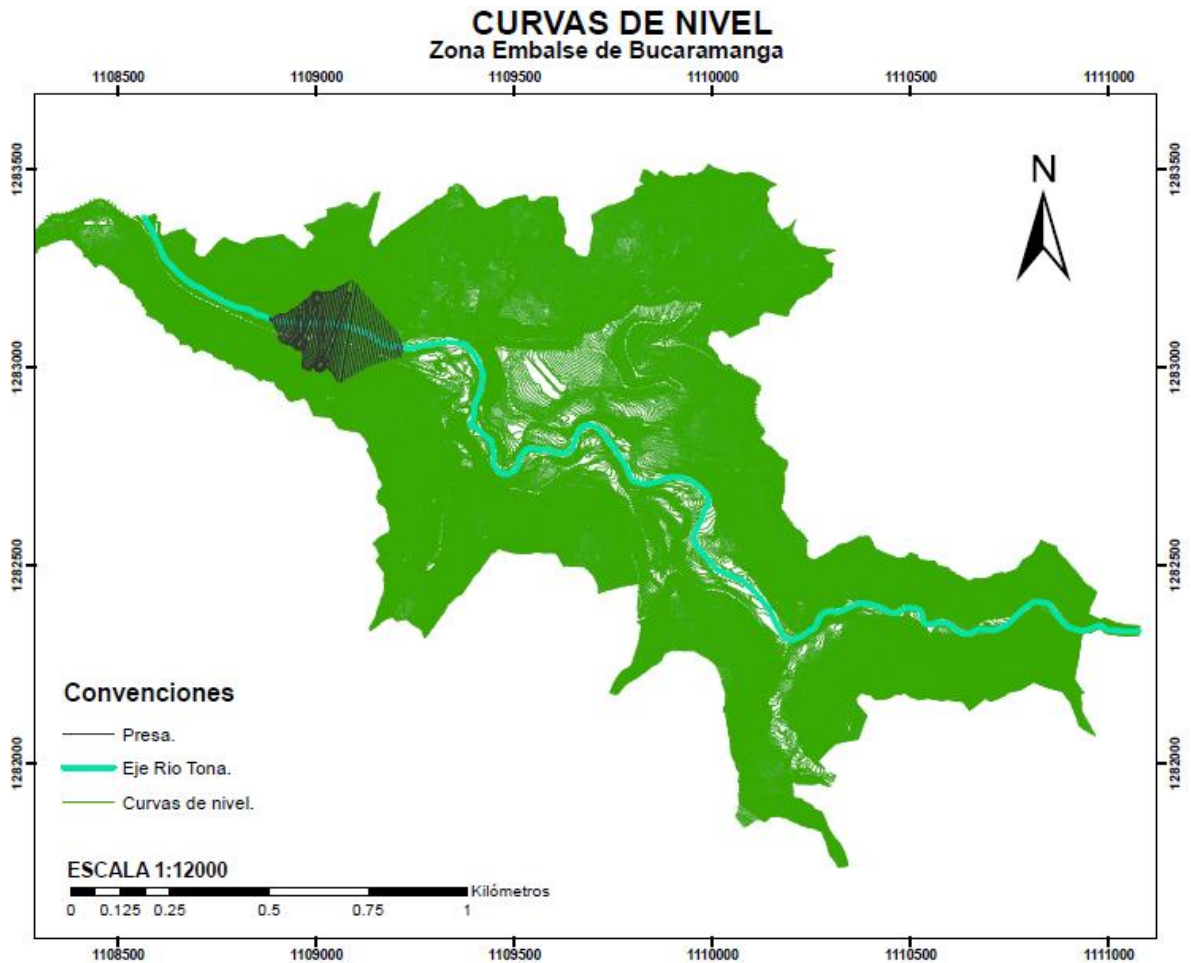
HEC-RAS River Analysis System Applications Guide; Version 5.0; U.S Army Corps of Engineers; 2016, p. 519.

HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 171.

HEC-RAS River Analysis System User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 960.

ANEXOS

Anexo A. Curvas de nivel de la zona del embalse de Bucaramanga.

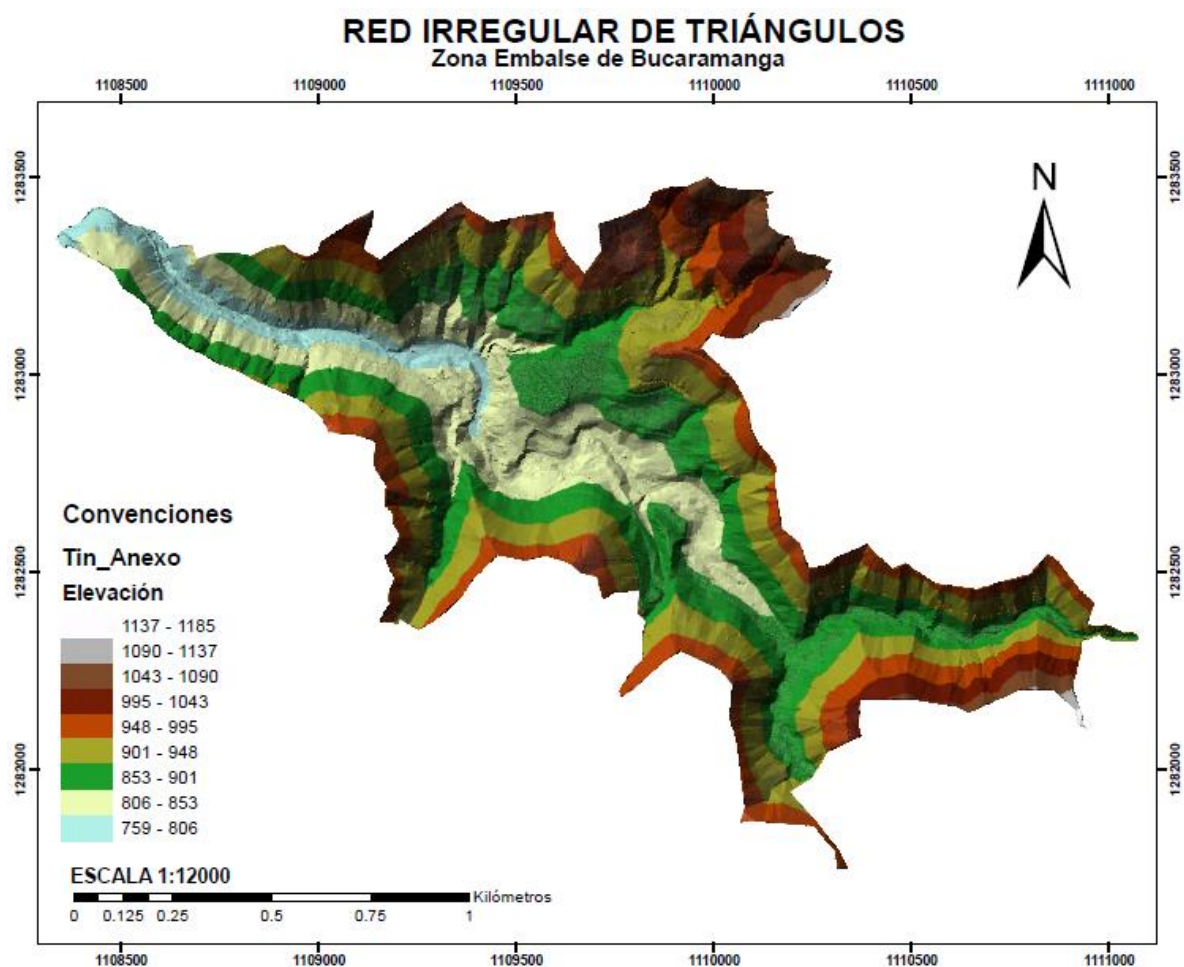


Fuente: Tomado y adaptado de ¹.

¹ INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES. Memorando Técnico 01 - Cartografía, Geodesia y Topografía. 2011, p. 31.

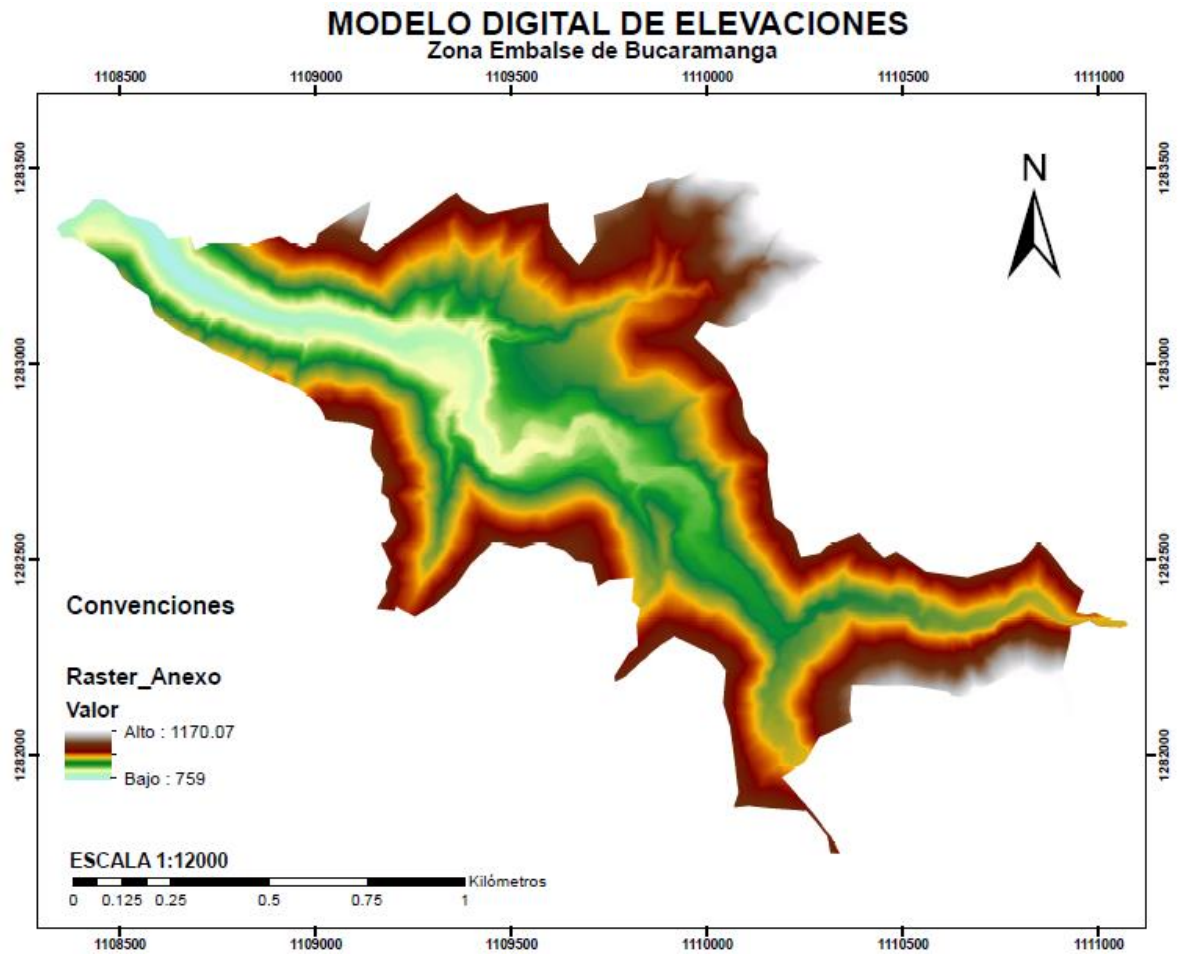
Nota: Se anexa en el archivo digital el mapa en formato SHAPE bajo el nombre ANEXO A.

Anexo B. TIN de la zona del embalse de Bucaramanga.



Nota: Se anexa en el archivo digital el mapa en formato TIN bajo el nombre ANEXO B.

Anexo C. DEM de la zona del embalse de Bucaramanga.



Nota: Se anexa en el archivo digital el mapa en formato GRID bajo el nombre ANEXO C.

Anexo D. Obtención de modelo de elevación digital (DEM)

La obtención del DEM se logró a partir de una serie de procesos realizados sobre las curvas de nivel, Figura 41, tomadas de ² con resolución en la elevación de un metro correspondientes a la zona del embalse de Bucaramanga referenciadas en el sistema proyectado MAGNA – Colombia – Bogotá.

La metodología usada se propone en ³. El procedimiento resumido se muestra en la Figura 42.

Figura 41. Curvas de Nivel.

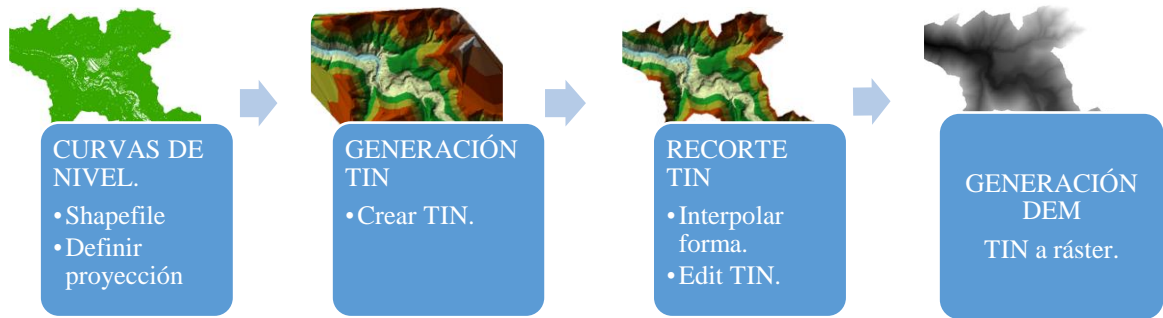


Fuente: Tomado de ².

² INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES. Memorando Técnico 01 - Cartografía, Geodesia y Topografía. 2011, p. 31.

³ MANCEBO, S., ORTEGA, E., FERNÁNDEZ, L. y VALENTÍN, A. Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental: ejercicios. Madrid, 2009, pp. 92-125. ISBN 978-84-692-8534-3.

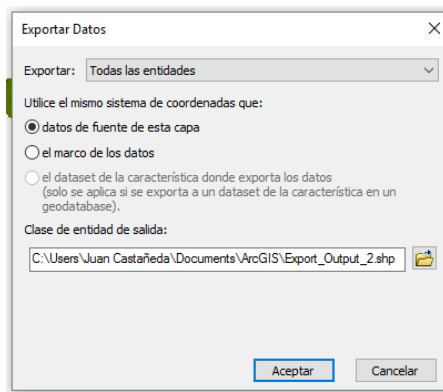
Figura 42. Procedimiento Resumido.



GENERAR SHAPEFILE.

Como primer paso se llevaron las curvas de nivel que venían en formato .dwg al programa ArcGIS y se guardaron como shapefile. Mediante la herramienta exportar datos.

Figura 43. Exportar datos.



DEFINIR PROYECCIÓN.

A continuación, se procedió a definir en ArcGIS el sistema de proyección sobre el que se encontraba referenciadas nuestras curvas de nivel, esto con la herramienta *definir proyección*, Figura 45, que se encuentra en *herramientas de administración de datos* del *ArcToolbox* (Figura 44). El sistema de coordenadas para nuestro caso es Magna-Colombia-Bogotá (Figura 46).

Figura 44. Ruta Definir Proyección-ArcToolbox.

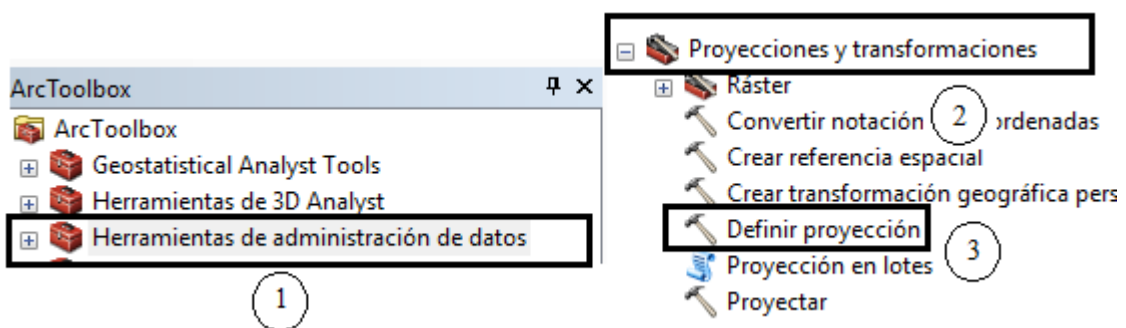


Figura 45. Interfaz Definir Proyección.

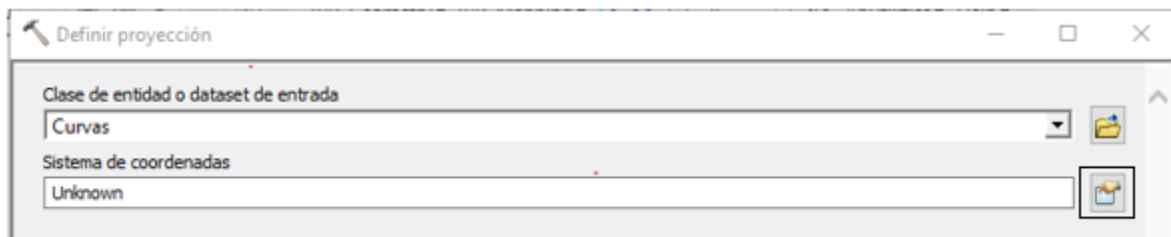
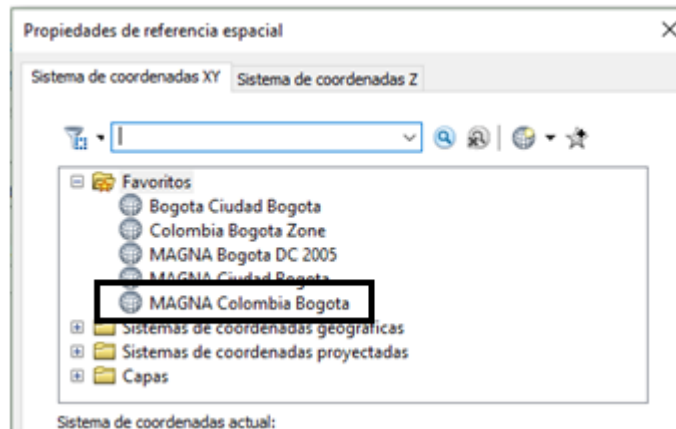


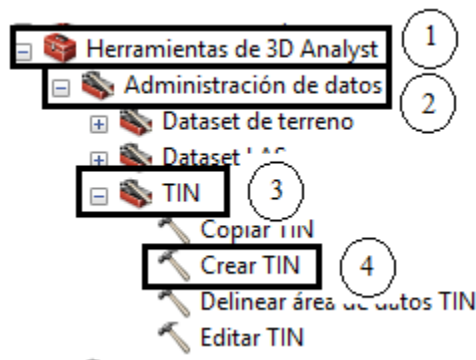
Figura 46. Sistema de coordenadas proyectado.



GENERACIÓN DEL TIN.

Continuando con el proceso se procede a generar un TIN para esto con la herramienta *Crear TIN*, Figura 48, que se encuentra en *Herramientas de 3D Analyst* en el *ArcToolbox* (Figura 47).

Figura 47. Ruta Crear TIN.

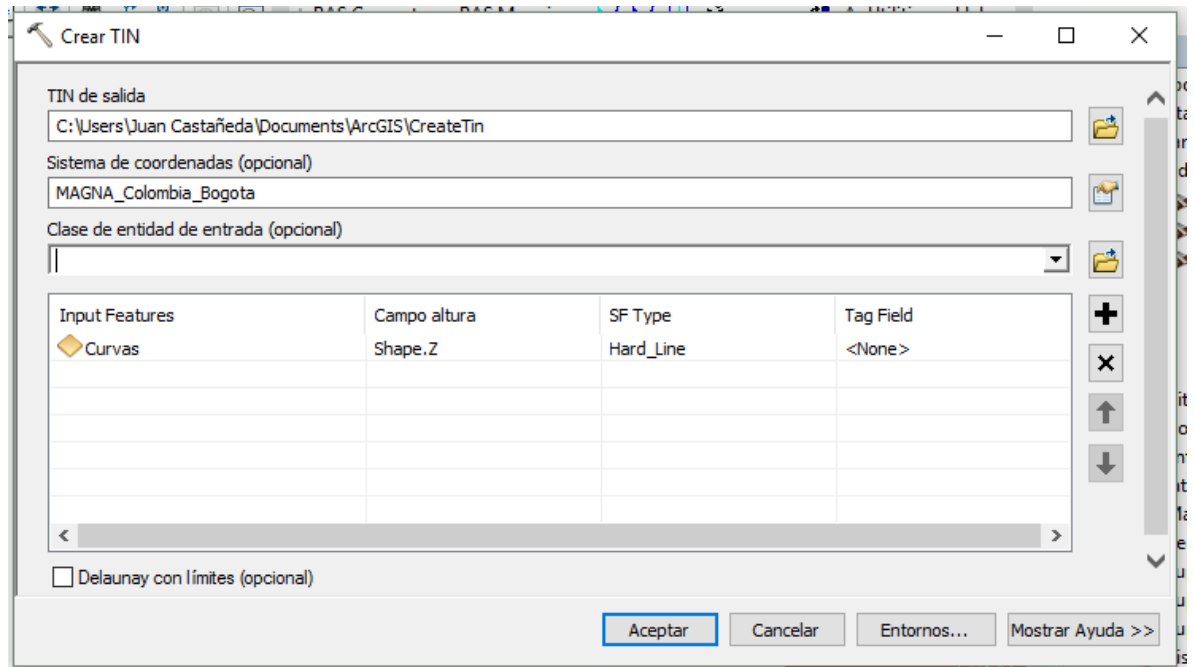


En la ventana *Edit TIN* definimos:

- La ruta de almacenamiento.
- El sistema de coordenadas proyectado (Magna-Colombia-Bogotá).

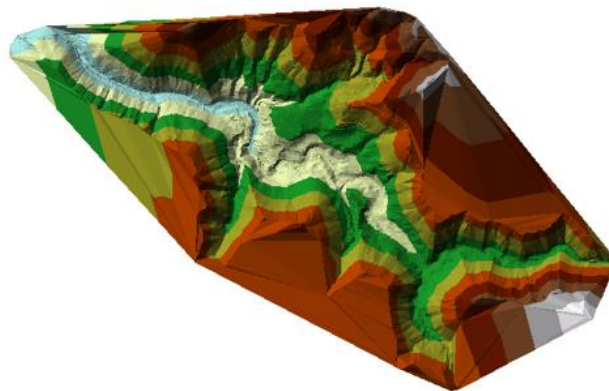
- La entidad a partir de la cual lo generamos en nuestro caso es el shapefile correspondiente a las curvas de nivel.

Figura 48. Interfaz Crear TIN.



Para finalizar se procedió a cargar el modelo, obteniéndose:

Figura 49. TIN.



Como se puede notar en la Figura 49, el programa interpola llenando los vacíos que había en los alrededores de las curvas de nivel. Como no era de nuestro interés el

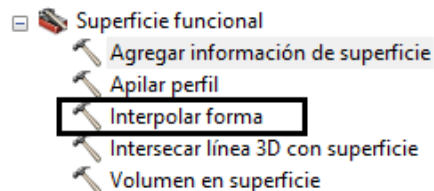
siguiente paso consistió en retirar esas zonas que el programa interpoló. Para esto usamos las herramientas *interpolar forma* y *editar TIN* sobre un polígono de recorte (Figura 50) y el TIN.

Figura 50. Polígono de recorte.



La primera sirve para añadir a una entidad propiedades de una superficie y con esto podemos utilizar esta entidad para recortar la superficie y respetar la elevación de la misma sobre los bordes de la entidad. La herramienta *interpolar forma*, Figura 52, se encuentra en *Herramientas de 3D analyst* del *ArcToolbox* (Figura 51).

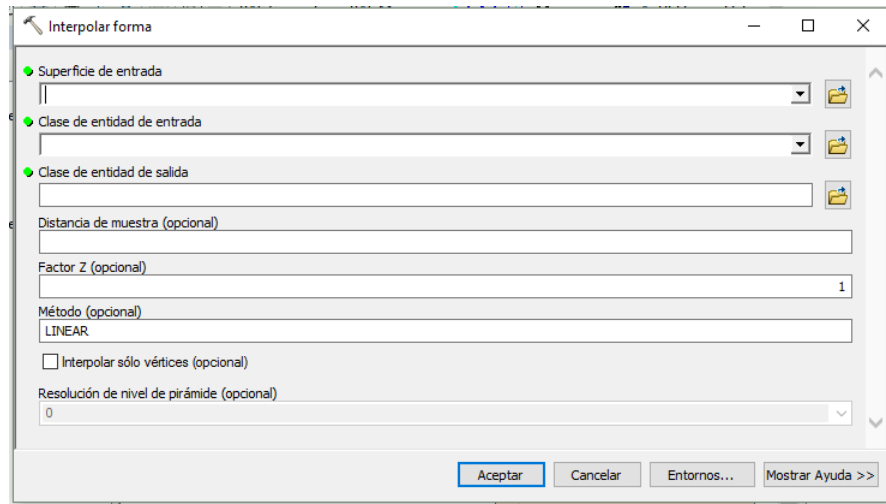
Figura 51. Interpolar forma ArcToolbox.



- En superficie se suministró la superficie de la que necesitábamos los datos.
- Como clase de entidad de entrada tomamos el polígono que tenía la forma de la superficie de interés.

- Para clase de entidad de salida el programa generó un nuevo polígono que en sus bordes contenía los mismos datos de elevación de la superficie.

Figura 52. Interpolar forma.



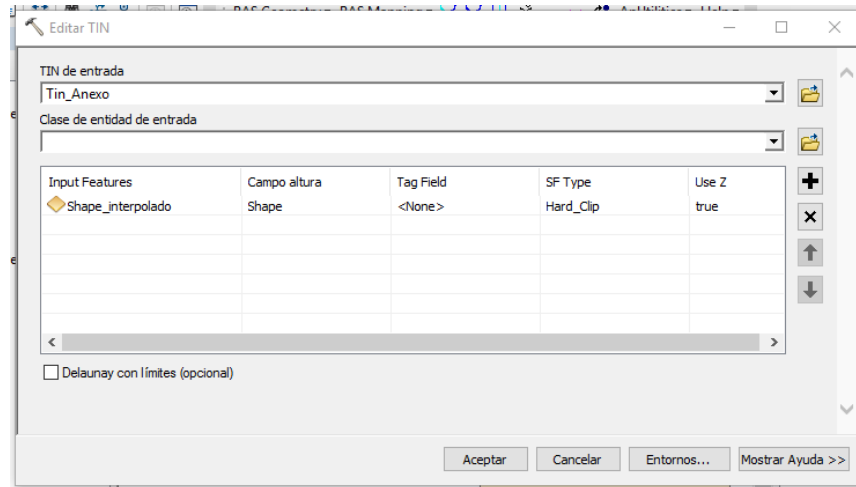
A continuación, con le herramienta *Editar TIN* cortamos la superficie con el polígono obtenido de interpolar forma.

Los datos suministrados a *Editar TIN* son:

- TIN de entrada: en este ingresamos la superficie TIN para recortar.
- Clase de entidad de entrada seleccionamos el polígono obtenido de *Interpolar Forma*.

En la columna SF type es importante seleccionar la opción *Hard_Clip*.

Figura 53. Editar TIN.



Como resultado, Figura 54, obtuvimos el TIN con la forma deseada.

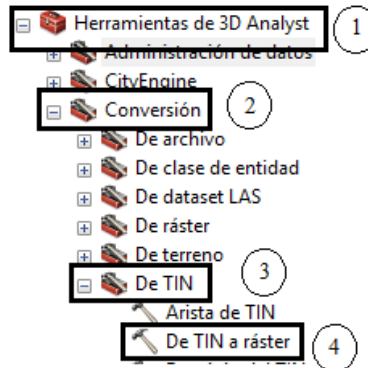
Figura 54. TIN Recortado.



TIN A RÁSTER.

El paso final consistió mediante la herramienta de *TIN a Raster*, Figura 56, generar el modelo digital de elevaciones listo para ingresar a HEC-RAS. La herramienta se encuentra en *Herramientas de 3D Analyst* del *ArcToolbox*. (Figura 55).

Figura 55. Ruta De TIN a Raster-ArcToolbox.



Los datos que se ingresaron fueron:

- TIN de entrada: el TIN recortado.
- En distancia de muestra se indicó al programa el tamaño de celdas de salida para nuestro caso un metro.

Así se obtiene el modelo digital de elevaciones como se puede ver en la Figura 57.

Figura 56. De TIN a Raster.

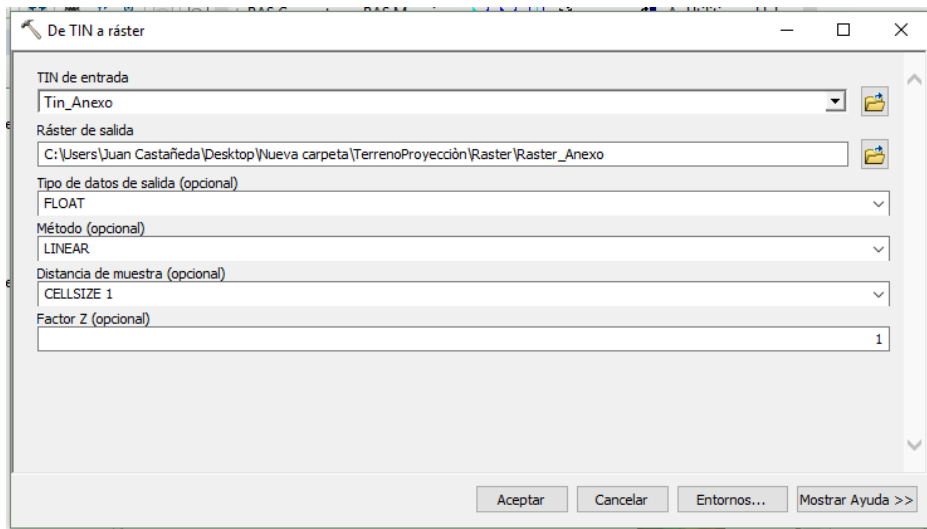


Figura 57. DEM.



Anexo E. Ecuaciones para hallar el intervalo computacional.

- Regla general:

$$\Delta T \leq \frac{t_{CMP} - t_{min}}{20} \quad (1)$$

Donde:

t_{CMP} = Tiempo en que ocurre el valor máximo del hidrograma.

t_{CMP} = Tiempo en que ocurre el valor mínimo del hidrograma.

- Ecuación de Saint Venant:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq (1). \text{ Con un } C \text{ máximo} = 3. \quad (2)$$

Donde:

C = Número de courant.

V = Velocidad de la onda. (ft/s)

ΔT = Intervalo de computación. (s)

ΔX = Tamaño promedio de las celdas (ft)

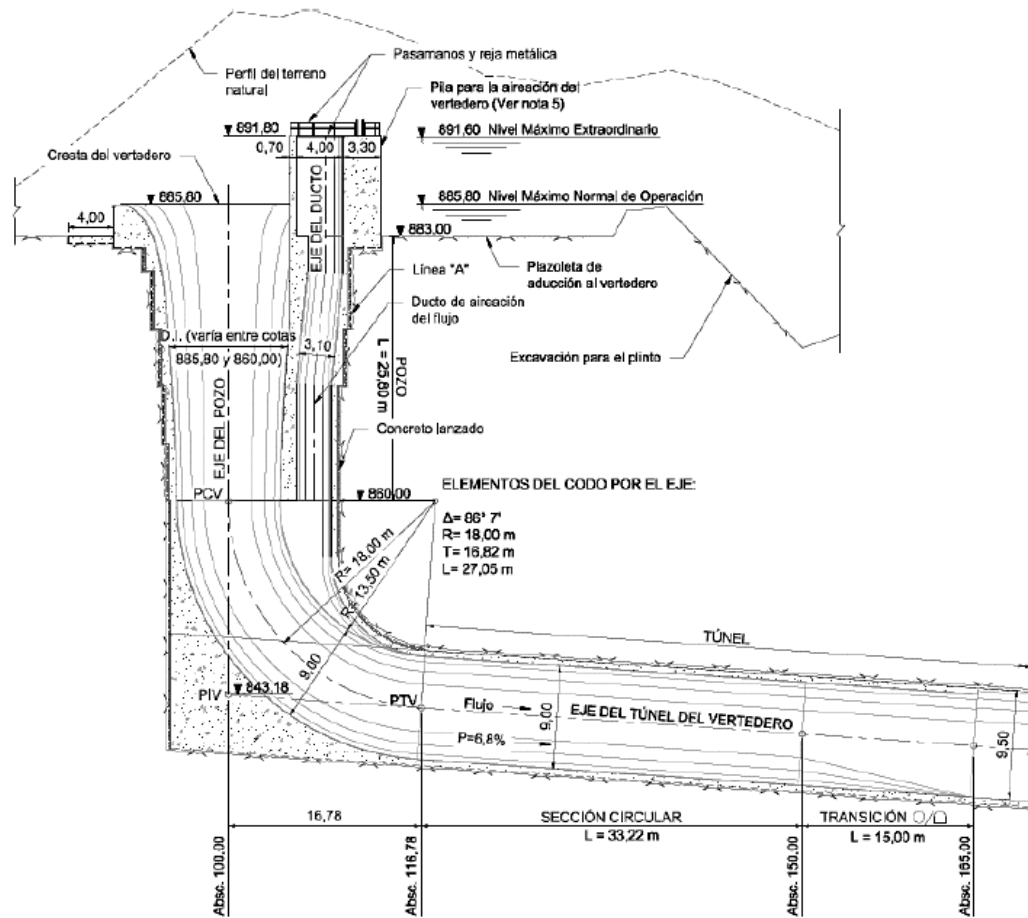
- Ecuación de onda difusa:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 2. (\text{Con un } C \text{ máximo} = 5). \quad (3)$$

Fuente: Tomado y adaptado de ⁴

⁴ HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 171.

Anexo F. Geometría del vertedero de excesos.



Fuente: Tomado de ⁵.

⁵ ALMEYDA, A. Simulación a escala reducida del embalse de Bucaramanga. Tesis de maestría en Ingeniería Civil. Madrid: SPANCOLD. 2014, p. 127.

Anexo G. Características de las mallas creadas para cada escenario

	Área 2D	Tamaño del celda	Número de celdas	Área máx celdas [m ²]	Área mín celdas [m ²]	Área prom celdas [m ²]
Escenario 1. Río Tona antes de la const. de la presa	área	10x10	4043	181.36	78.76	103.39
Escenario 2. Río Tona con presa	área aguas arriba	10x10	8612	237.54	79.48	101.67
	área aguas abajo	10x10	837	164.66	85.48	103.7

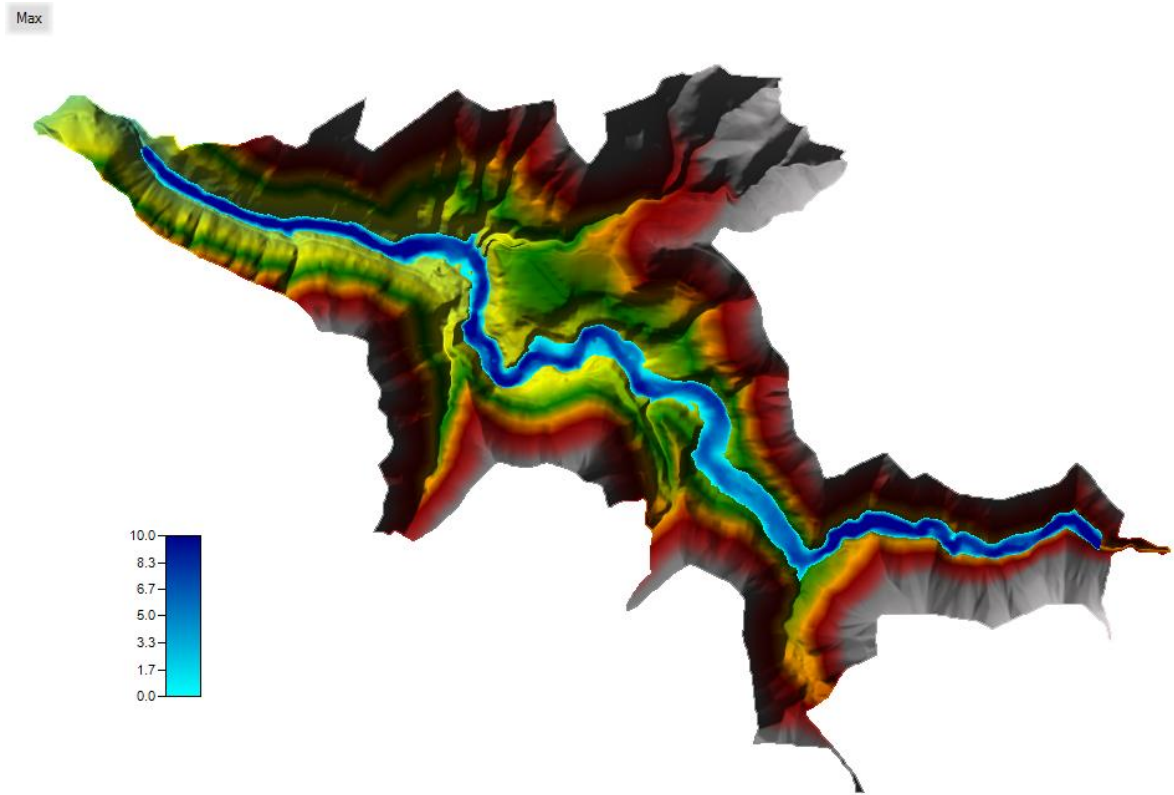
Anexo H. Reporte brindado por el software HDF view sobre la profundidad de la inundación en el escenario 1. Ecuación onda difusa.

Table

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	2.0256568	2.1207777	1.2662898	0.0	0.0	2.521874	2.7939131	1.7156105	0.0	0.0	0.0
8	0.0	2.055045	2.1521802	1.298238	0.0	0.0	2.5539463	2.826167	1.7482389	0.0	0.0	0.0
9	0.0	2.0830348	2.1820662	1.3286638	0.0	0.0	2.5844724	2.8568707	1.7791061	0.0	0.0	0.0
10	0.0	2.1276805	2.2296865	1.3771842	0.0	0.0	2.6331367	2.9058306	1.8283939	0.0	0.0	0.0
11	0.0	2.1763997	2.2815747	1.4301219	0.0	0.0	2.68619	2.9592166	1.8821545	0.0	0.0	0.0
12	0.0	2.2214885	2.3294847	1.4790117	0.0	0.0	2.7351787	3.0085237	1.9318192	0.0	0.0	0.0
13	0.0	2.27105	2.3816664	1.5322882	0.0	0.0	2.788557	3.062232	1.9859229	0.0	0.0	0.0
14	0.0	2.3105853	2.4231998	1.5747099	0.0	0.0	2.831074	3.10502	2.0290432	0.0	0.0	0.0
15	0.0	2.3513224	2.4659069	1.6183712	0.0	0.0	2.8748505	3.1480843	2.07347	0.0	0.0	0.0
16	0.0	2.3920772	2.5085773	1.6619947	0.0	0.0	2.9185867	3.1931136	2.1178641	0.0	0.0	0.0
17	0.0	2.431126	2.5495138	1.7039014	0.0	0.0	2.9605896	3.235413	2.1605327	0.0	0.0	0.0
18	0.0	2.4677699	2.5878973	1.7432029	0.0	0.0	2.9999788	3.2750878	2.2005663	0.0	0.0	0.0
19	0.0	2.5042229	2.626036	1.7822418	0.0	0.0	3.0390992	3.3144946	2.2403312	0.0	0.0	0.0
20	0.0	2.5410812	2.6645539	1.8216813	0.0	0.0	3.0786092	3.3542967	2.2804995	0.0	0.0	0.0
21	0.0	2.5889622	2.7124336	1.8706938	0.0	0.0	3.1277094	3.4037676	2.3304365	0.0	0.0	0.0
22	0.0	2.6384504	2.7661154	1.9256775	0.0	0.0	3.1827836	3.4592571	2.386461	0.0	0.0	0.0

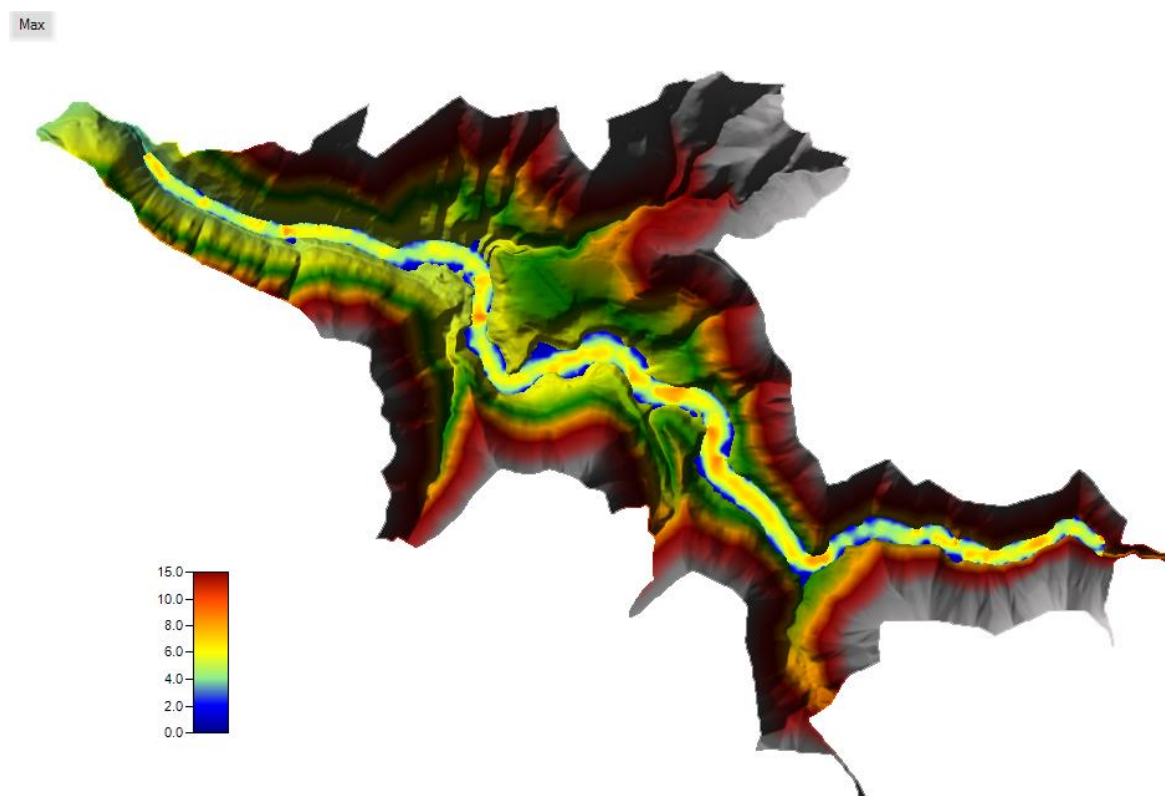
Nota: En el archivo digital se adjuntan los reportes brindados por el software para los distintos escenarios simulados en formato .txt con el nombre ANEXO H.

Anexo I. Escenario 1 - Mapa de profundidad con la ecuación Saint Venant.



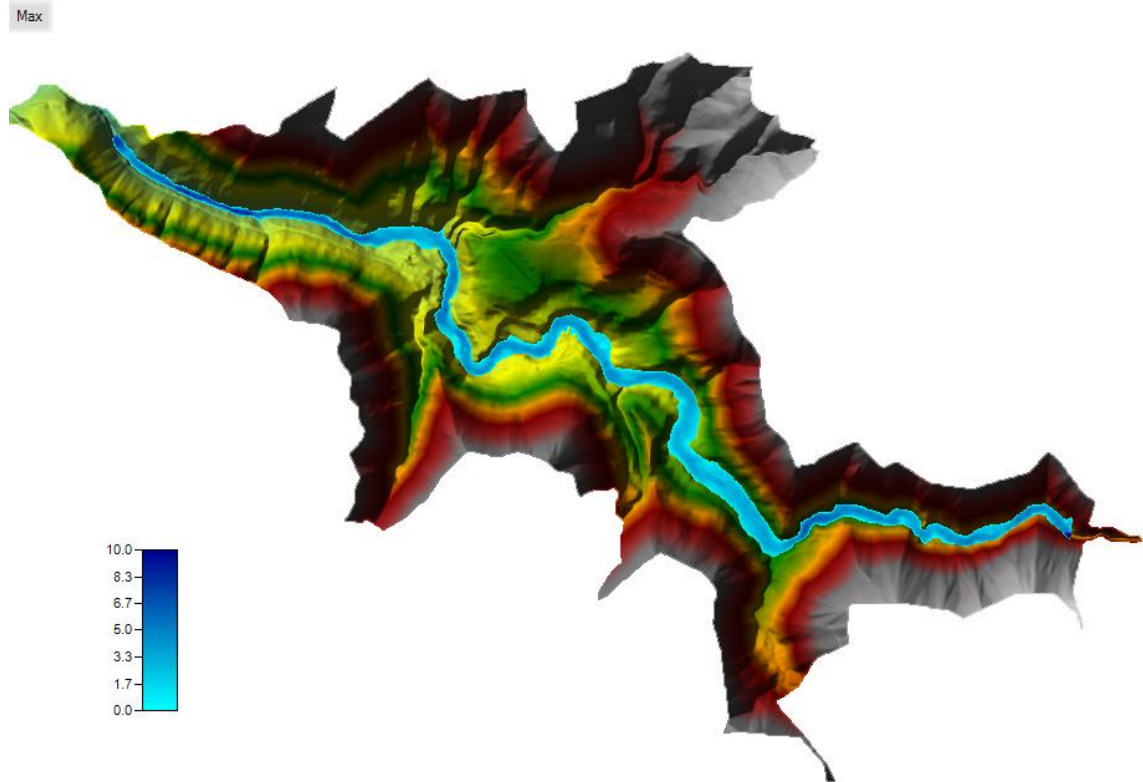
Nota: Se anexa en el archivo digital el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO I. Las unidades del mapa se encuentran en metros.

Anexo J. Escenario 1 - Mapa de velocidad con la ecuación Saint Venant



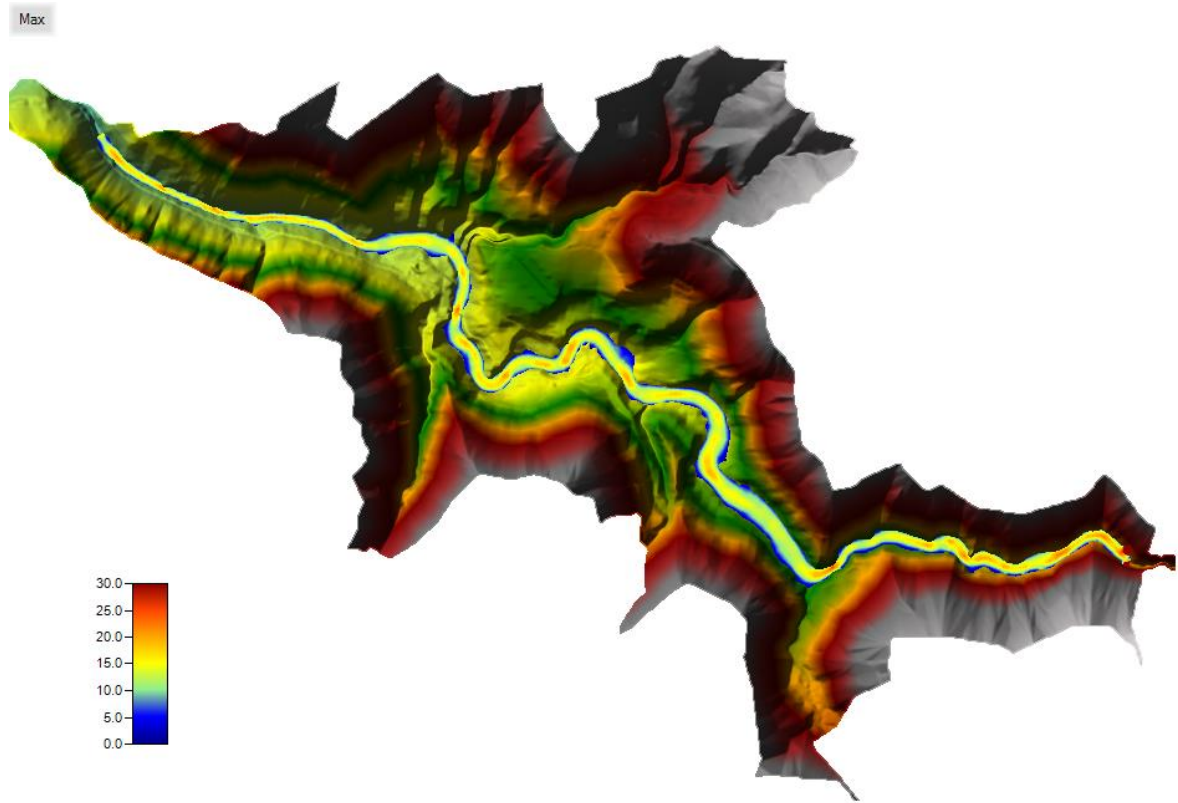
Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO J. Las unidades del mapa se encuentran en metros sobre segundo (m/s).

Anexo K. Escenario 1 - Mapa de profundidad con la ecuación onda difusa.



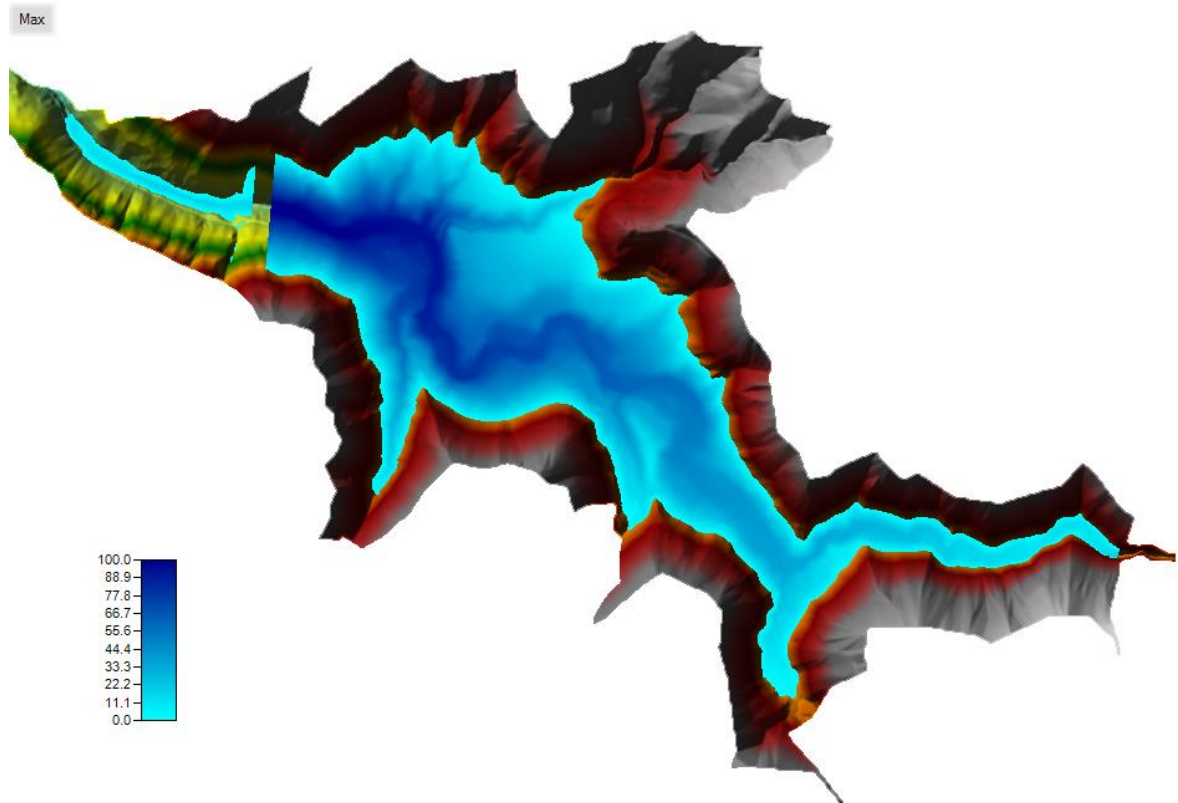
Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO K. Las unidades del mapa se encuentran en metros

Anexo L. Escenario 1 - Mapa de velocidad con la ecuación onda difusa



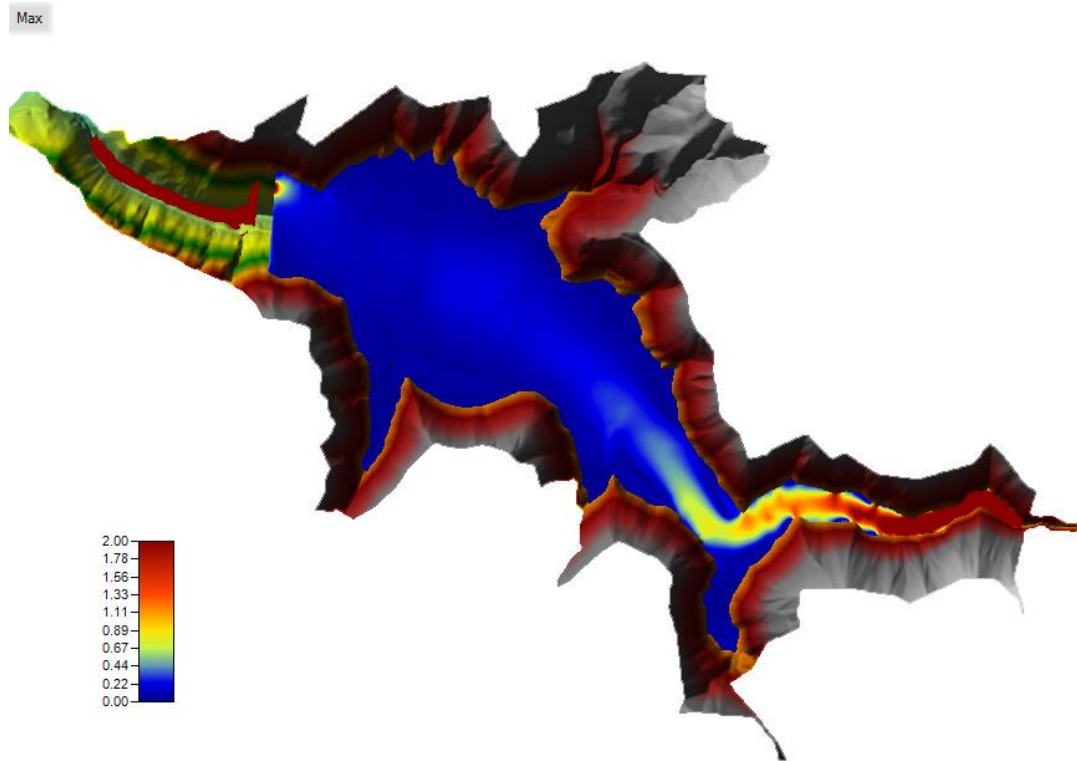
Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO L. Las unidades del mapa se encuentran en metros sobre segundo (m/s).

Anexo M. Escenario 2 - Mapa de profundidad con la ecuación Saint Venant



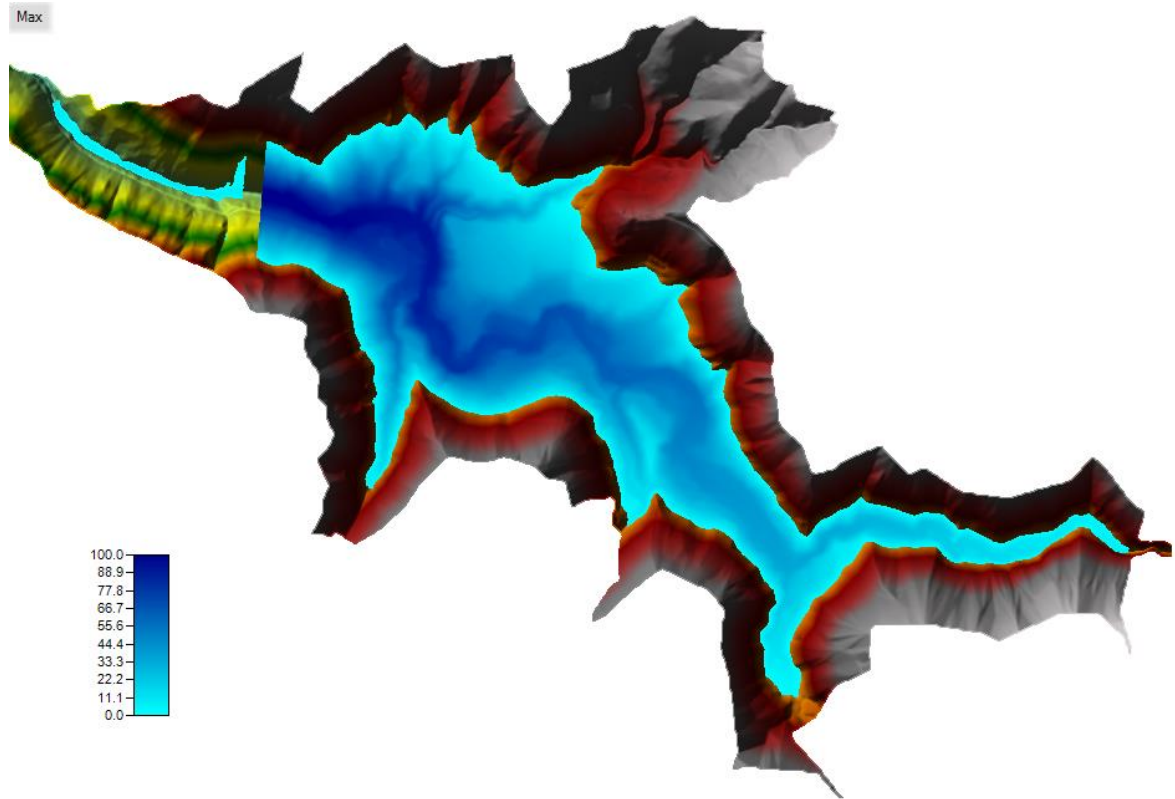
Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO M. Las unidades del mapa se encuentran en metros.

Anexo N. Escenario 2 - Mapa de velocidad con la ecuación Saint Venant



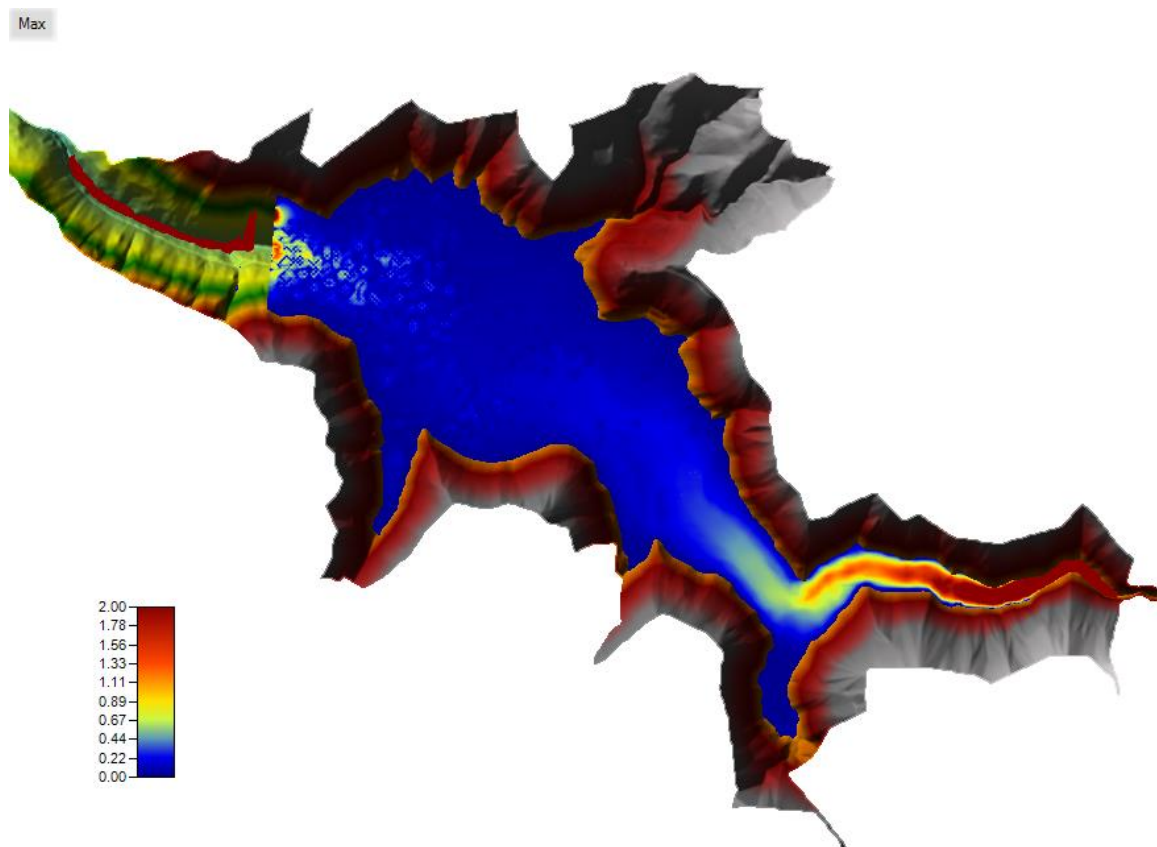
Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO N. Las unidades del mapa se encuentran en metros sobre segundo (m/s).

Anexo O. Escenario 2 - Mapa de profundidad con la ecuación onda difusa.



Nota: Se anexa en el archivo digital el mapa en formato TIF bajo el nombre Anexo O. Las unidades del mapa se encuentran en metros.

Anexo P. Escenario 2 - Mapa de velocidad con la ecuación onda difusa.



Nota: En el archivo digital se adjunta el mapa en formato TIF bajo el nombre ANEXO P. Las unidades del mapa se encuentran en metros sobre segundo (m/s).

Anexo Q. Tipos de errores de convergencia que se pueden presentar durante la simulación.

Convergencia	Definición
1	Alcanzó el número máximo de iteraciones pero estaba convergiendo
2	Alcanzó el número máximo de iteraciones pero estaba divergiendo
3	Alcanzó el número máximo de iteraciones. Estaba divergiendo con valores de elevación de superficie del agua positivos y negativos
4	Alcanzó el número máximo de iteraciones. Estaba convergiendo con valores de elevación de la superficie del agua positivos y negativos

Fuente: Tomado y adaptado de ⁶.

⁶ HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual; Version 5.0; U.S. Army Corps of Engineers; 2016, p. 171.

Anexo R. Valores de los hidrogramas de entrada y salida del embalse

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Tiempo	Hidrograma de entrada	Hidrograma de salida - Saint Venant	Hidrograma de salida - Onda Difusa							
2	0:00:00	0	0	0							
3	0:15	22.491	0.01	0.01							
4	0:30	30.94	0.08	0.08							
5	0:45	46.141	0.34	0.34							
6	1:00	61.453	0.98	1							
7	1:15	77.208	2.27	2.32							
8	1:30	100	4.65	4.76							
9	1:45	130.235	8.92	9.1							
10	2:00	153.532	15.83	16.1							
11	2:15	191.815	29.78	30.4							
12	2:30	222.535	53.08	54.05							
13	2:45	260.817	84.04	85.32							
14	3:00	291.084	121.71	123.45							
15	3:15	337.398	170.75	172.78							
16	3:30	383.374	225.18	227.48							
17	3:45	468.117	294.33	298.51							
18	4:00	559.865	386.88	391.76							
19	4:15	690.958	494.31	500.39							
20	4:30	812.525	608.34	615.96							
21	4:45	918.858	730.55	739.27							
22	5:00	1133.998	886.69	899.75							
23	5:15	1318.187	1079.02	1095.8							

Nota: En el archivo digital se adjunta la información numérica obtenida del software sobre el hidrograma de salida para cada tipo de ecuación en formato .xlsx, bajo el nombre ANEXO R.

Anexo S. Factor de gravedad para el cálculo de la peligrosidad

Gravedad	Descripción	Rango	Factor de Gravedad
Extrema	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 4 metros, una velocidad mayor que 6 m/s o el producto de ambas superior a 2 m ² /s	$c > 4m$ $v > 6 \text{ m/s}$ $c \cdot v > 2m^2/s$	6.0
Muy alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 2 y 4 metros, una velocidad entre 3,5 y 6 m/s o el producto de ambas superior a 1 m ² /s	$2 < c < 4m$ $3,5 < v < 6 \text{ m/s}$ $1 < c \cdot v < 2m^2/s$	4.0
Alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 1 y 2 metros, una velocidad entre 1 y 3,5 m/s o el producto de ambas superior a 0,5 m ² /s	$1 < c < 2m$ $1 < v < 3,5 \text{ m/s}$ $0,5 < c \cdot v < 1m^2/s$	2.0
Moderada	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 0,4 metros, una velocidad mayor a 0,4 m/s y el producto de ambas superior a 0,08 m ² /s	$0,4 < c < 1m$ $0,4 < v < 1 \text{ m/s}$ $0,08 < c \cdot v < 0,5m^2/s$	1.0
Baja	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado inferior a 0,4 metros, una velocidad menor a 0,4 m/s y el producto de ambas menor que 0,08 m ² /s	$c \leq 0,4m$ $v \leq 0,4 \text{ m/s}$ $c \cdot v \leq 0,08m^2/s$	0.5

Fuente: Tomado de ⁷.

⁷ GREGO, E., et al. Riesgos y cuantificación de daños por inundación. p. 15.

Anexo T. Manual HEC-RAS 5.0 enfocado a áreas de inundación

1.	INSTALACIÓN DE HEC-RAS 5.0.....	104
1.1.	Requisitos.	104
1.2.	Como conseguir HEC-RAS.....	104
1.3.	Instalación.....	105
2.	CONFIGURAR UN NUEVO PROYECTO.....	110
3.	INGRESAR LA INFORMACIÓN DEL TERRENO.....	112
3.1.	Ingresar un Modelo digital de elevaciones (DEM).....	112
3.2.	Ingresar Secciones Transversales.	114
4.	DIBUJAR ÁREAS DE FLUJO 2D.	116
4.1.	Generación de la malla computacional.	119
4.2.	Agregar líneas de ruptura dentro del área de flujo 2D.	124
4.3.	Editar/Modificar la malla computacional.	127
4.4.	Potenciales problemas que se pueden presentar en la generación de la malla.	128
5.	DIBUJAR ÁREAS DE ALMACENAMIENTO.....	133
6.	INGRESAR COEFICIENTE DE MANNING.	135
6.1.	Dibujar polígonos de coeficiente de Manning.....	141
7.	TIPOS DE ANÁLISIS DE FLUJO PARA INUNDACIONES.	144
7.1.	Combinación del análisis 1D/2D.	145
7.2.	Análisis de flujo 2D.....	150

8.	ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE.....	153
8.1.	Condiciones de contorno.....	153
8.2.	Condiciones iniciales.....	166
9.	EJECUTAR EL ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE.	168
10.	ECUACIÓN DE SAINT VENANT Y ONDA DIFUSA PARA EL MODELAMIENTO 2D.	174
10.1.	Intervalo computacional.	175
11.	VISUALIZACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN EN <i>RAS MAPPER</i>	177
11.1.	Agregar mapas a <i>RAS Mapper</i>	180
11.2.	Agregar imágenes satelitales a <i>RAS Mapper</i>	181
11.3.	Obtener tablas de propiedades por celdas.....	183
11.4.	Obtener perfiles en <i>RAS Mapper</i>	184
11.5.	Guardar mapas de inundación.....	186
12.	USO DEL SOFTWARE HDF VIEW PARA LOS ARCHIVOS DE SALIDA. 189	
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	190

1. INSTALACIÓN DE HEC-RAS 5.0.

A continuación se muestra el procedimiento necesario para realizar la instalación del software.

1.1. Requisitos.

Antes de instalar el software, el usuario debe verificar que su computador cumpla con los requisitos mínimos descritos a continuación.

- Computador basado en Intel o compatible con procesador Pentium o superior. Se recomienda desde Intel I3. Si se va a modelar en 2D lo ideal es un procesador con varios núcleos.
- Mínimo un gigabyte de almacenamiento interno libre. Se recomiendan 10 gigas libres.
- Mínimo 2 gigabytes de memoria RAM. Se recomienda 4 gigabytes.
- Microsoft Windows XP, Vista, 7 o Windows 8.

1.2. Cómo conseguir HEC-RAS.

Para conseguir el software se accede a la página web del *Hydrologyc Engeering Center* de la USACE (<http://www.hec.usace.army.mil>) a continuación en la pestaña Software se accede a HEC-RAS (Figura 58). La ruta completa es: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx>. Siguiendo la ruta se puede encontrar la versión más reciente de HEC-RAS y dos sitios de descarga. Si es del interés del usuario también puede descargar alguna de las versiones archivadas al final de la página (Figura 59).

Figura 58. Descargar HEC-RAS.

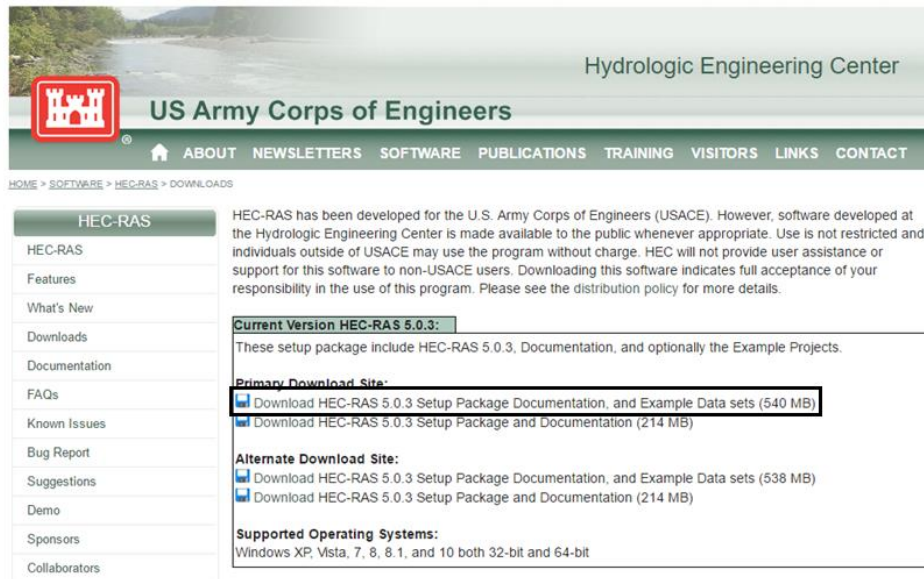
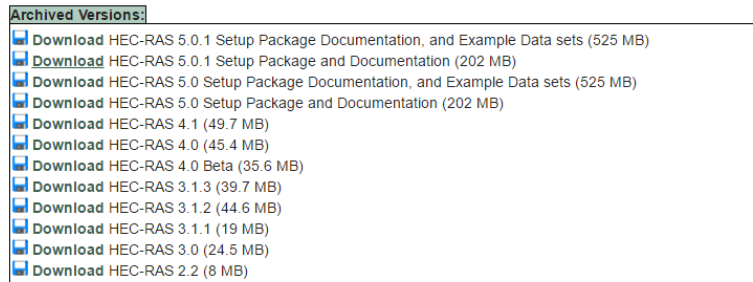


Figura 59. Diferentes versiones archivadas que se pueden descargar.



Se selecciona la opción de descarga de interés y se procede a descargar en el ordenador.

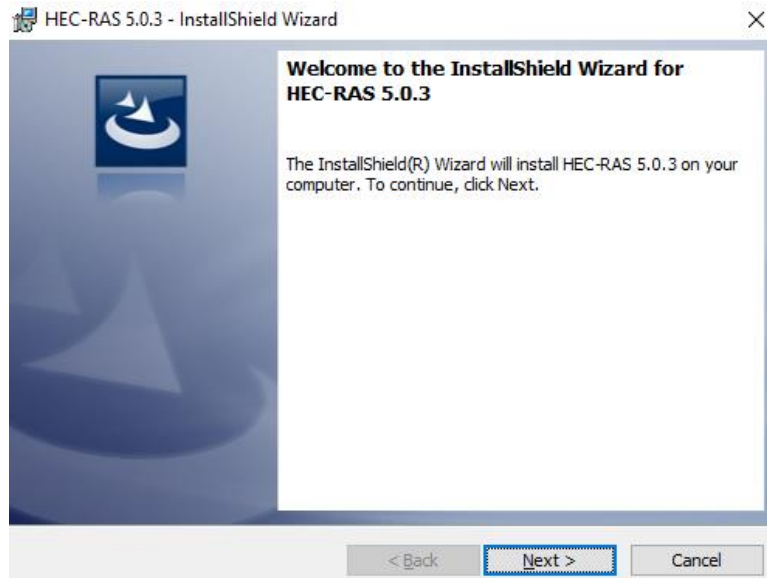
Al finalizar la descarga el usuario debe buscar la carpeta donde se alojó la aplicación y la ejecuta en modo administrador para proceder a la instalación.

1.3. Instalación.

Anteriormente se mostró el procedimiento para conseguir el software, el paso a seguir consiste en la instalación del software, lo que permite al usuario usarlo en el

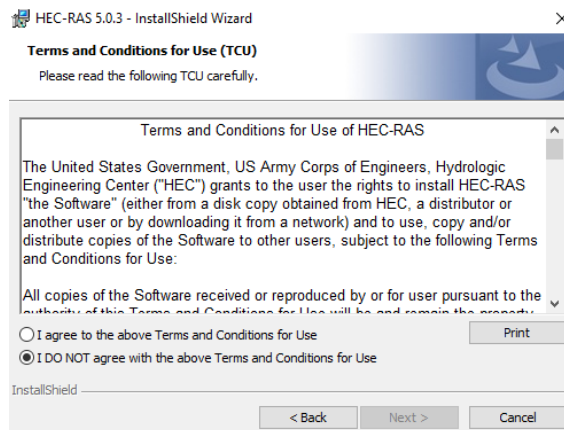
ordenador. Para comenzar con la instalación se debe abrir la aplicación descargada y aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 60.

Figura 60. Inicio de instalación.



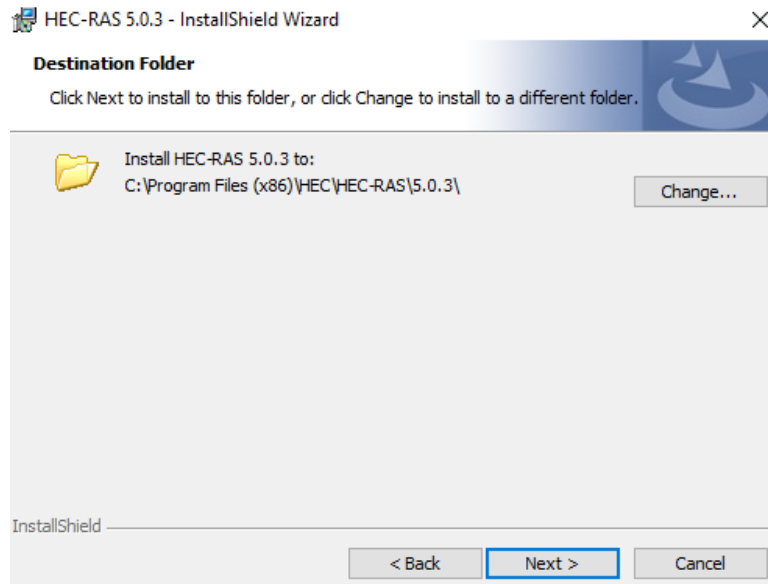
El usuario debe dar clic en *Next* para continuar. A continuación, aparece la ventana que contiene los términos y condiciones de uso del software, el usuario los debe leer y si concuerda con estos, debe seleccionar la opción “*I agree to the above terms and conditions for use*” y luego *Next* (Figura 61).

Figura 61. Términos y condiciones de uso.



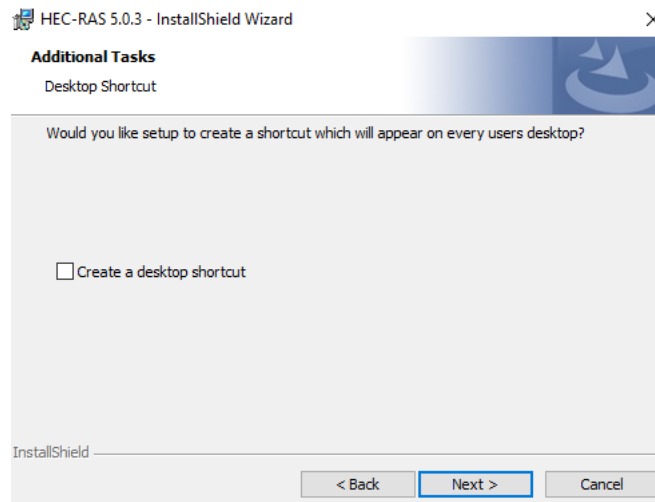
La siguiente ventana permite configurar la ruta de instalación del software, una vez definida, se debe dar clic a *Next* (Figura 62).

Figura 62. Ruta de instalación HEC-RAS.



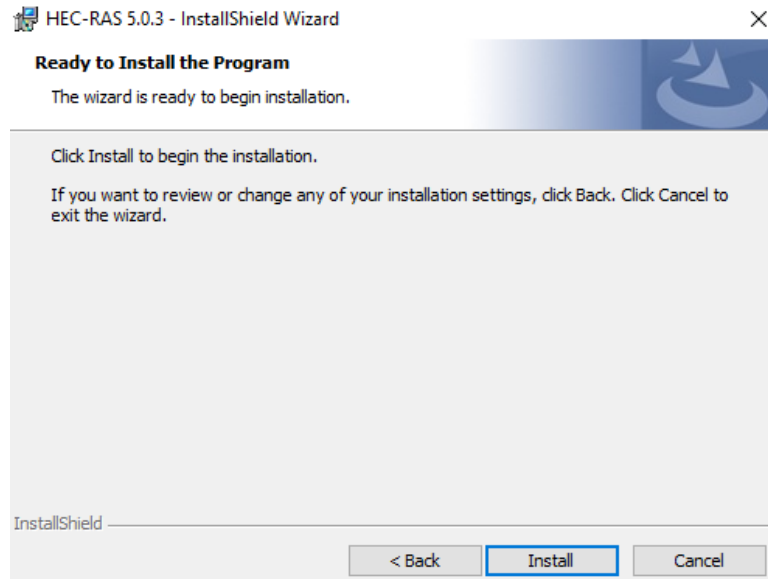
A continuación, se le permite al usuario definir si desea un acceso directo del software en el escritorio, al definirlo se da clic en *Next* (Figura 63).

Figura 63. Acceso directo en el escritorio.



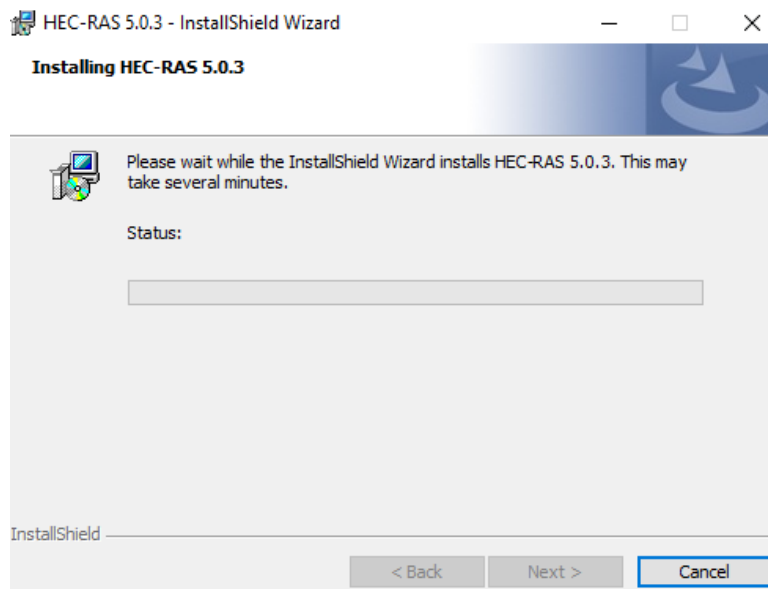
En la ventana que continúa, el usuario debe definir si desea hacer algún cambio o revisar alguna de las selecciones anteriores, para continuar presionamos *Next*.

Figura 64. Revisión selecciones anteriores.



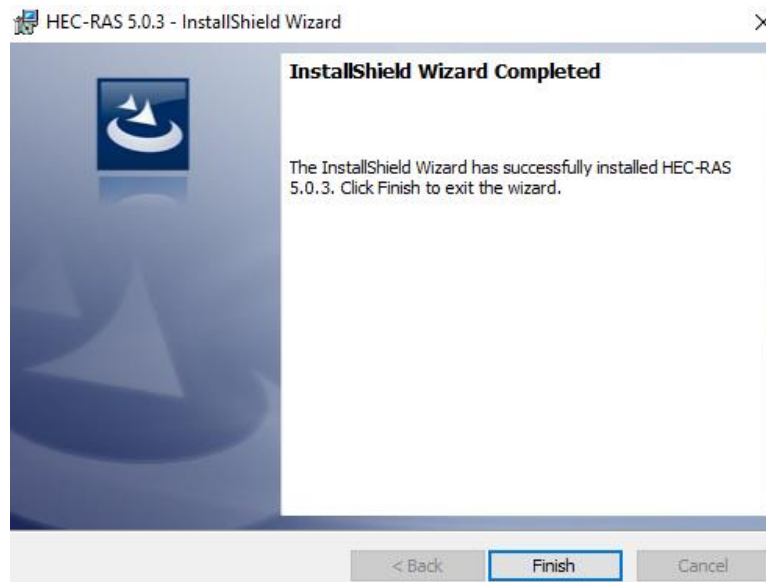
Posteriormente el usuario debe esperar mientras finaliza la instalación.

Figura 65. Proceso instalación.



Cuando finalice la instalación aparecerá una nueva ventana en la cual se debe seleccionar la opción *Finish* y de esta forma finaliza la instalación del software HEC-RAS 5.0.

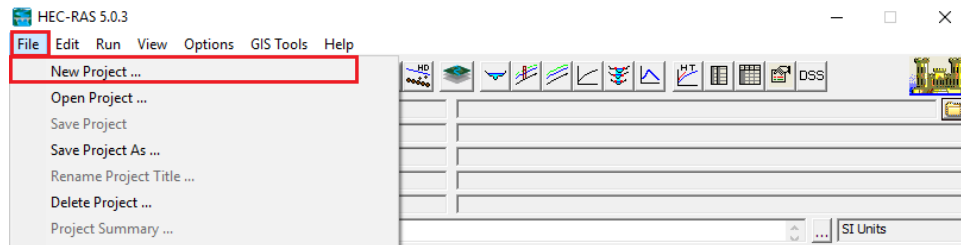
Figura 66. Finalización instalación.



2. CONFIGURAR UN NUEVO PROYECTO.

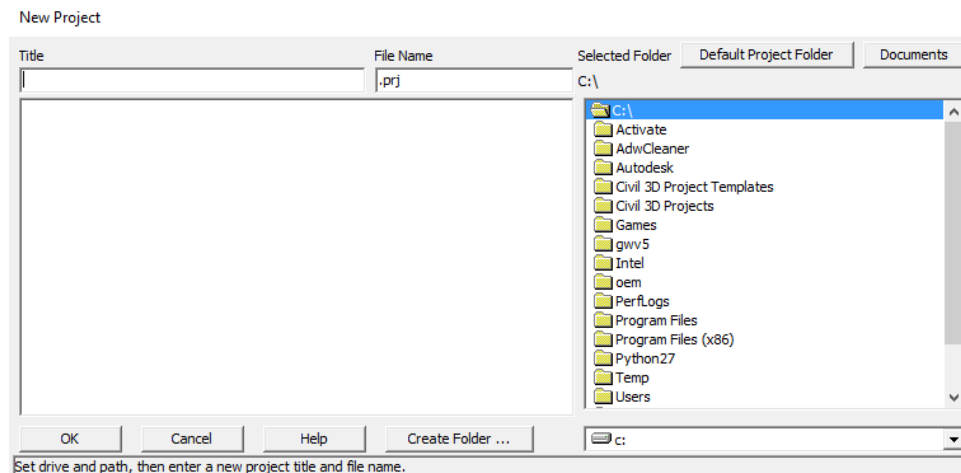
Para iniciar el trabajo con el software lo primero que se debe realizar es configurar el proyecto, nombre, ruta de almacenamiento y unidades. Primero, el usuario debe crear un nuevo proyecto, para esto en la pestaña *file* se encuentra la opción *New Project* (Figura 67).

Figura 67. Ruta New Project.



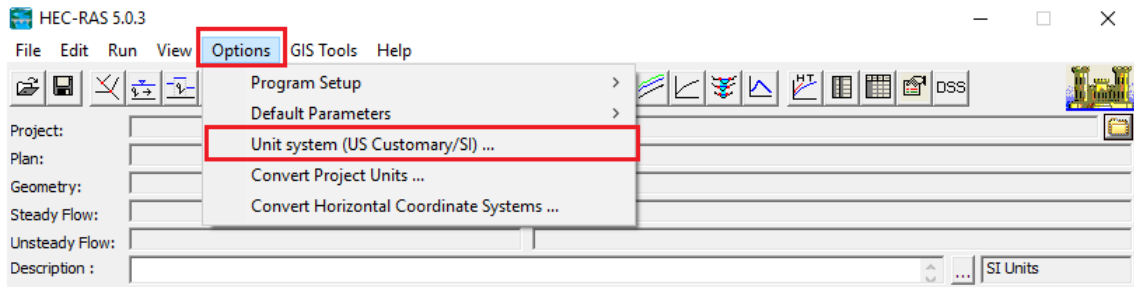
Desde allí se configura el título y nombre del proyecto, así mismo como la ruta para almacenar el archivo (Figura 68).

Figura 68. New Project



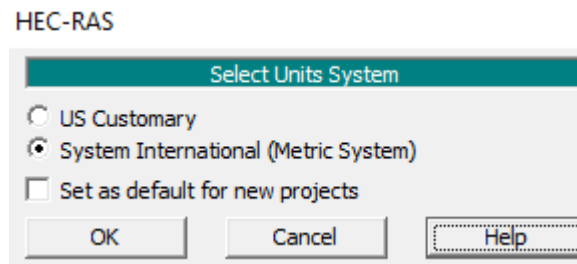
A continuación, se deben definir las unidades sobre las que se trabajará el proyecto, lo cual se puede hacer por medio de la pestaña *Options*, en la cual el usuario puede encontrar la opción *Unit System* (Figura 69).

Figura 69. Ruta Unit system.



Allí se debe seleccionar la opción de unidades de interés. Si se desea evitar repetir este paso en proyectos futuros se debe seleccionar la opción *Set as default for new projects* (Figura 70).

Figura 70. Seleccionar unidades del proyecto.



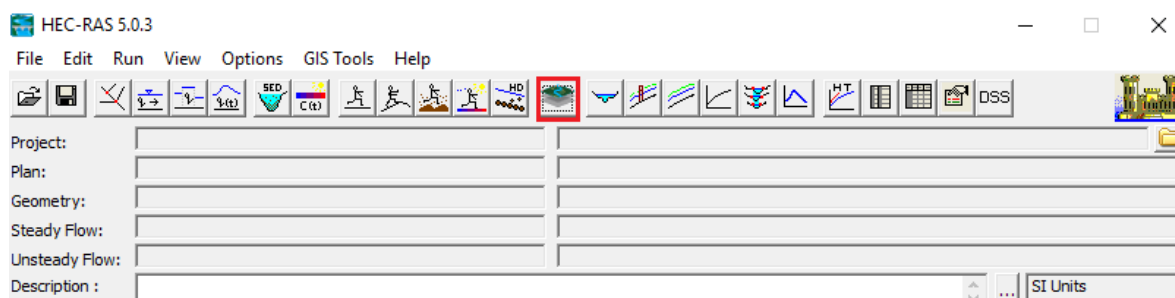
3. INGRESAR LA INFORMACIÓN DEL TERRENO.

La información acerca del terreno puede ser ingresada por medio de modelos digitales de elevación (DEM) o por medio de secciones transversales. A continuación se explican las ventajas y desventajas que representan cada uno de ellos.

3.1. Ingresar un Modelo digital de elevaciones (DEM).

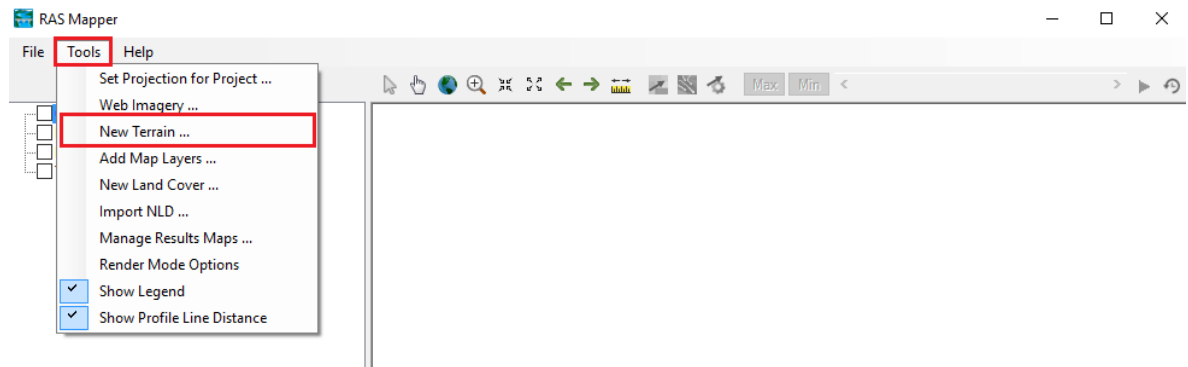
El modelo digital de elevaciones permite ingresar el terreno sobre el que ocurre la inundación. En La versión 5.0 del software, incluir el DEM consiste en la forma más rápida para tener la información del terreno debido a que si se hace por medio de secciones transversales, se puede convertir en un proceso largo. Para ingresar la geometría del terreno mediante un modelo digital de elevaciones, el usuario debe ingresar a la herramienta *RAS Mapper* (Figura 14).

Figura 71. Ruta *RAS Mapper*.



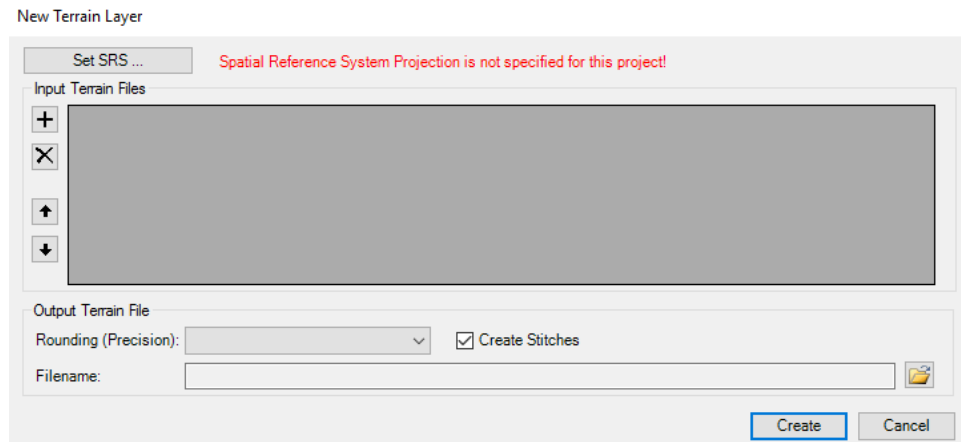
Una vez el usuario se encuentre en la ventana de la herramienta *RAS Mapper*, debe seleccionar la opción *tools* donde se encuentra *New Terrain* y hacer clic sobre esta (Figura 72).

Figura 72. Ruta New Terrain.



A continuación, mediante el botón *set SRS* se debe definir el sistema de referencia espacial proyectado del DEM. En *Input Terrain Files* se añade el archivo correspondiente al terreno. Por último se debe dar el nombre con el que se almacenará el proyecto y la precisión en la elevación del modelo. Al finalizar el usuario debe dar clic al botón *Create*.

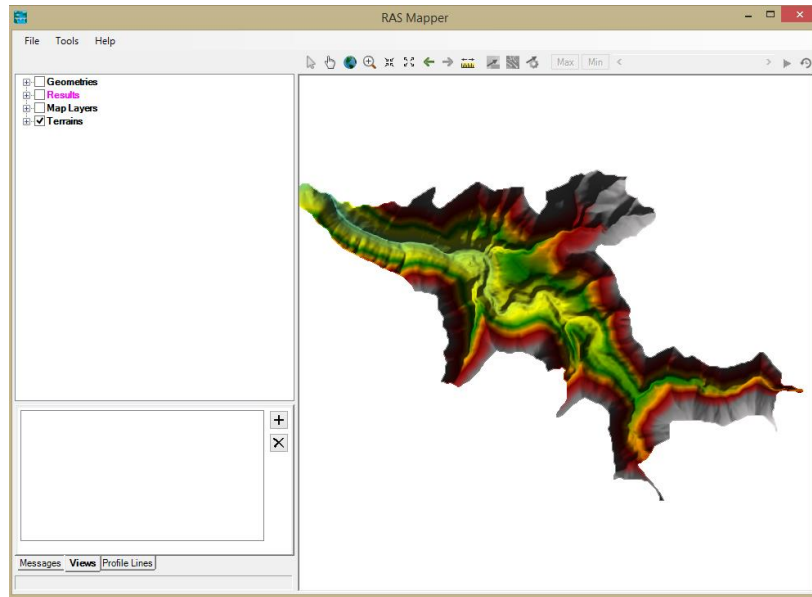
Figura 73. New Terrain.



Luego de que se ha cargado el terreno al software, este lo convierte en un GeoTIFF file format (tif). Lo cual hace que el archivo se convierta de 2 a 20 veces más pequeño que el original (FLT o ESRI).

Al finalizar el proceso, el DEM se puede observar en *RAS Mapper* como se muestra en la Figura 74. Si en la ventana *RAS Mapper* no aparece el terreno, el usuario debe dar clic al tercer botón ubicado en la barra de herramientas horizontal.

Figura 74. Ejemplo de Terreno cargado en *RAS Mapper*.



Para cambiar los colores y contornos en el terreno, se debe dar clic derecho sobre este y seleccionar la opción *Layer Properties*. Después de que el terreno es creado, el usuario puede colocar en el editor de geometría, una foto de fondo del terreno.

3.2. Ingresar Secciones Transversales.

El usuario debe ingresar información acerca de las secciones transversales si desea realizar un modelo combinado, es decir, combinación 1D y 2D, en donde las secciones representan en análisis unidimensional. Para conocer con detalle cuándo se debe usar este tipo de modelación, el usuario debe revisar el numeral 7 del presente manual.

Las secciones transversales para realizar un modelamiento preciso deben ser importadas, de tal forma que cada sección transversal cuente con gran cantidad de

puntos que describan la forma del terreno. Para importar la geometría, el usuario debe ir a la ventana *Geometric data* (Figura 75) y debe dar clic a la opción *File* del menú para posteriormente seleccionar la opción *Import Geometry Data*. Una vez allí el usuario puede escoger el tipo de archivo en el cual tenga guardadas las secciones transversales como se observa en la Figura 76.

Figura 75. Ruta para ingresar a la ventana Geometric Data

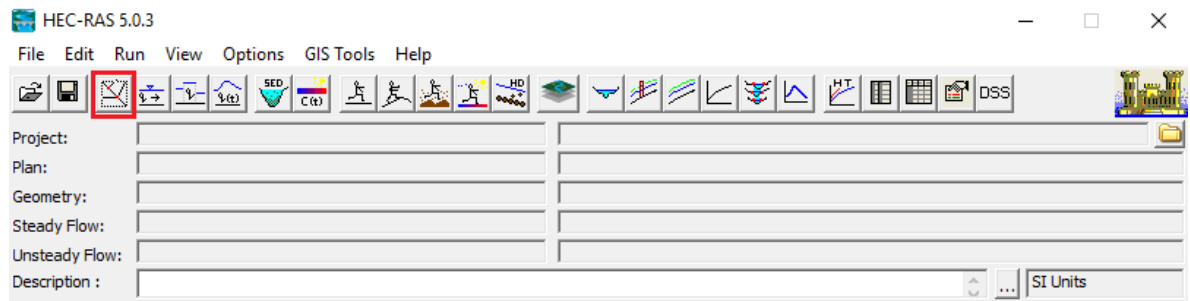
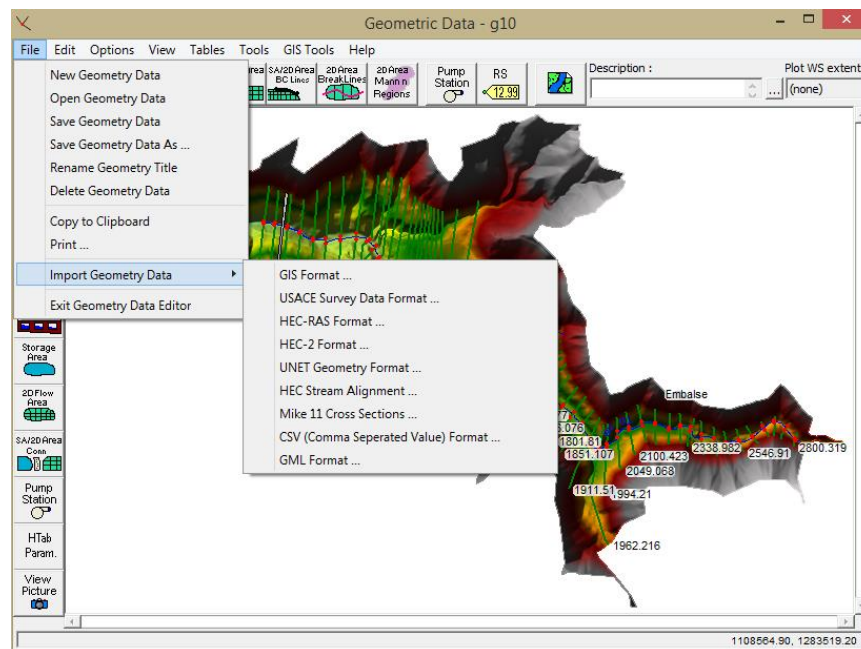


Figura 76. Importar secciones transversales



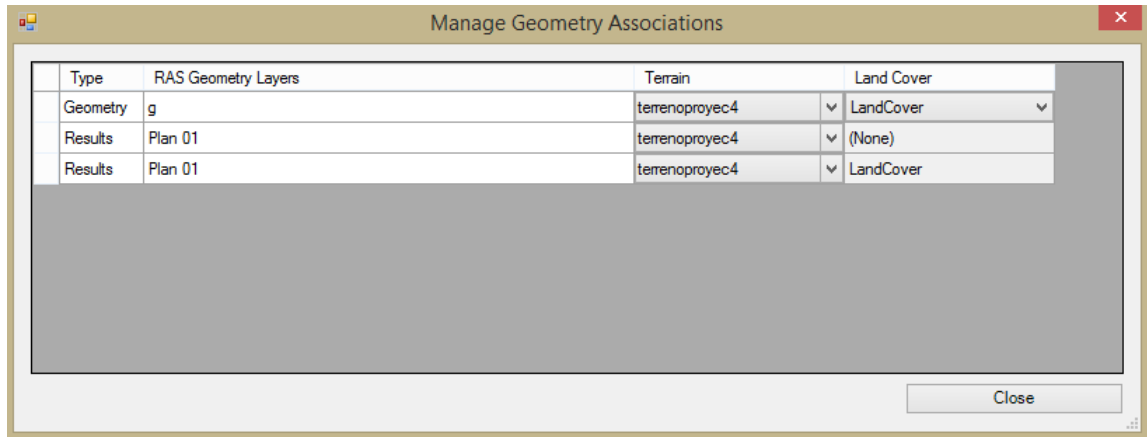
El usuario debe tener en cuenta que dicho archivo, además de contener las secciones transversales, también debe contener el eje del río y los bancos de este.

4. DIBUJAR ÁREAS DE FLUJO 2D.

Dentro de las nuevas capacidades con las que cuenta la última versión del software, se encuentra el uso de zonas 2D, las cuales permiten el análisis bidimensional del flujo que se encuentre o pase por ellas. Las zonas 2D son polígonos que el usuario dibuja sobre el terreno. El usuario debe agregar un polígono que represente el contorno de la zona por donde el flujo será estudiado de forma bidimensional por el software. Es necesario tener en cuenta que el tamaño de las celdas debe definir el terreno sobre el que se encuentren, es decir, para terrenos con pendientes que cambien rápidamente se necesitan tamaños de malla computacional pequeños y para terrenos en los que haya poco cambio de pendientes, se necesitan tamaños de malla computacional grande.

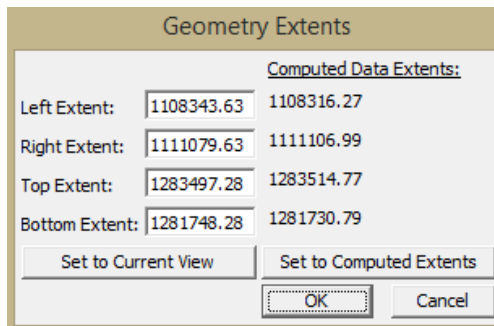
Antes de dibujar las áreas 2D, el usuario debe ingresar a la ventana *Geometric Data* una foto del DEM cargado previamente, debido a que esta le sirve como guía para saber por dónde debe dibujar las zonas 2D. Esta imagen se puede ver automáticamente en la ventana *Geometric Data* en primera instancia, pero la imagen desaparece una vez se comienza a editar allí, por lo tanto, se sugiere ir a la ventana *RAS Mapper* y hacer clic derecho sobre la carpeta *Terrains* que se encuentra en la columna izquierda de la ventana, posteriormente se debe seleccionar la opción *Manage Terrain Associations* (Figura 77).

Figura 77. Relacionar el terreno con la ventana de geometría



En esta ventana el usuario únicamente podrá visualizar la opción *Geometry* en la columna *Type*, debido a que el modelo aún no se ha ejecutado. Como se puede observar, para la opción de geometría se pueden seleccionar tanto el terreno como la cobertura vegetal en *Terrain* y *Land Cover* respectivamente. El usuario debe asegurarse de que el terreno corresponda al que desea ingresar como imagen en la ventana *Geometric Data*. Una vez el usuario haya revisado esto, debe dirigirse a la ventana *Geometric Data*, allí seleccionar la opción *view* del menú y posteriormente debe escoger la opción *Set Schematic Plot Extents* (Figura 78).

Figura 78. Extensión de la ventana de geometría



En esta ventana el usuario debe hacer clic en el botón *Set to Computed Extents*. Esta opción restablecerá las extensiones de la ventana de la geometría.

Una vez se compruebe que la ventana *Geometric Data* cuenta con la imagen del terreno y que esta permanece constante, el usuario debe dibujar las zonas 2D. Para esto se usa la herramienta *2D Flow Area* que se encuentra en la barra horizontal de herramientas (Figura 79). Al seleccionar esta opción, el usuario puede comenzar a dibujar el polígono que defina la zona 2D que desea. Cada vez que el usuario quiera finalizar una línea para cambiar de dirección, debe hacer clic sobre el terreno y la siguiente línea que cree quedará ligada a la anterior y así sucesivamente. Cuando quiera cerrar el polígono, debe llevar el cursor hasta la intercepción con el primer punto de la primera línea creada y hacer doble clic obteniéndose un dibujo similar al mostrado en la Figura 80, aunque no debe tener los cuadrados que se encuentran dentro del área. Posteriormente el software pide un nombre para dicha área 2D.

Figura 79. Herramienta 2D Flow Area para dibujo.

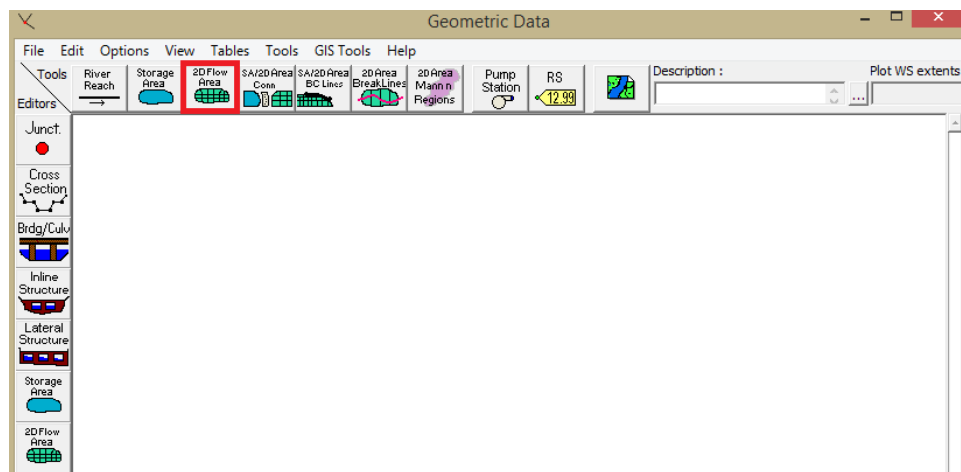
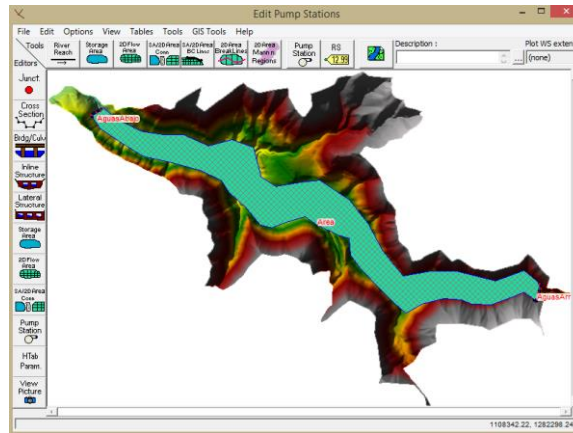


Figura 80. Ejemplo de área 2D.



Se debe tener en cuenta que las áreas de flujo 2D pueden ser importadas junto con el archivo de secciones transversales al software.

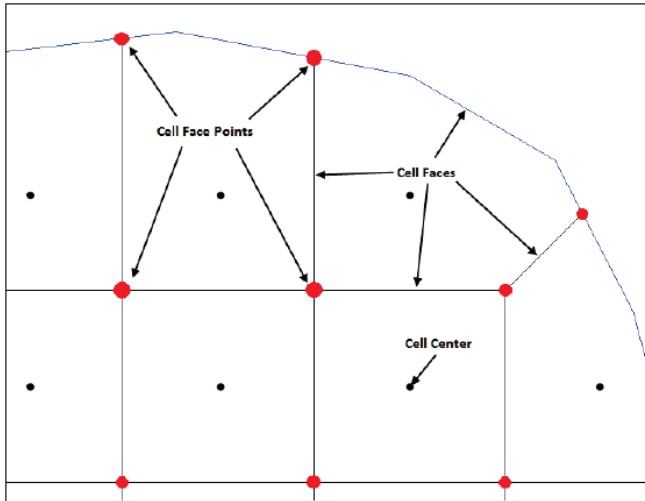
4.1. Generación de la malla computacional.

Luego de que se han creado las áreas 2D que se requieren en el modelo, el usuario debe asignar un tamaño de malla computacional que se creará dentro de esta. Las mallas computacionales constan de celdas de las cuales se puede obtener información hidráulica. Cada celda cuenta con una serie de elementos que son descritos a continuación:

- *Cell Center*: Aquí es donde la elevación de la superficie del agua será computada para determinada celda. El centro de la celda no necesariamente debe corresponder al centroide de esta.
- *Cell Faces*: Estas son las que componen los contornos de las celdas. Las caras de las celdas se encuentran delimitadas por los nodos y aunque normalmente son líneas rectas entre estos, se puede presentar que son varias líneas que conforman la cara de la celda.
- *Cell Face Points*: Estos puntos son conocidos como nodos e indican el final y comienzo de determinada cara de la celda. Los puntos de las caras del

contorno del área de flujo 2D, se usan para conectar dicha área con elementos 1D y con condiciones de contorno.

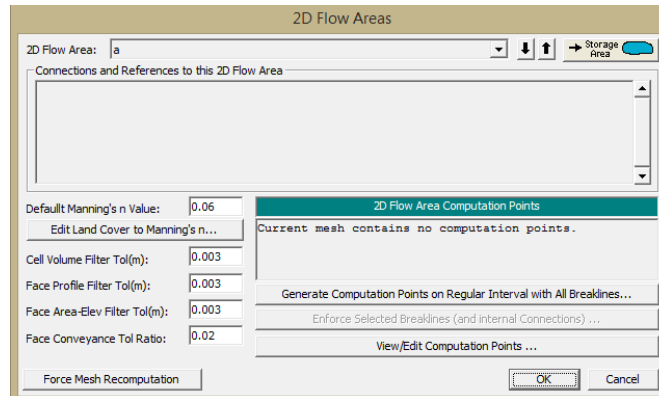
Figura 81. Elementos que conforman las celdas.



Para generar la malla se deben seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar el botón *2D Flow Area* de la columna izquierda de la ventana *Geometric Data* (Figura 79) o hacer clic sobre el área 2D creada y seleccionar la opción *Edit 2D Flow Area*, con lo cual aparece la ventana mostrada a continuación:

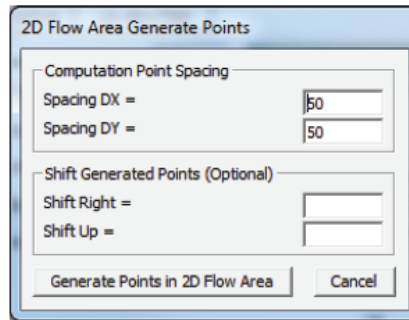
Figura 82. Editor de áreas 2D.



Por medio de esta ventana el usuario puede seleccionar el tamaño nominal de las celdas y de esta manera generar la malla computacional. Con el fin de realizar este procedimiento se deben seguir los siguientes pasos:

- 1.1. Seleccionar el botón *Generate Computation Points on Regular Interval with All Breaklines*, esto abre una ventana que le permite al usuario ingresar el tamaño de la celda.
- 1.2. En esta nueva ventana generada (Figura 83), el usuario debe ingresar el valor de cada lado de la celda, teniendo en cuenta que la celda nominal o estándar es de forma rectangular o cuadrada. Por ejemplo, si el usuario ingresa el valor $DX=50$ y $DY=50$, va a obtener una malla computacional con celdas que posean esas dimensiones, excepto aquellas que se encuentren cercanas al borde de la zona 2D o alrededor de líneas de ruptura, debido a que allí se crean de forma irregular, por lo tanto, esas celdas tendrán valores de área cercanos al área que se obtiene con las dimensiones ingresadas para las celdas nominales.

Figura 83. 2D Flow Area Generate Points



- 1.3. La ventana también cuenta con una opción para ingresar en dónde al usuario le gustaría que el centro de la celda comenzara, en términos de una dirección X y Y superior izquierda. Estos campos no son obligatorios de ingresar, debido a que por defecto, el software usa la esquina superior izquierda del polígono que representa el contorno del área de flujo 2D como inicio de la generación de la malla.
- 1.4. Después de que los campos DX y DY han sido ingresados (punto 1.2), se debe dar clic el botón *Generate Points in 2D Flow Area*, lo que genera que el software compute las coordenadas para los centros de las celdas. Para poder visualizar estas coordenadas, el usuario debe dar clic a la opción *View/Edit Computation Points*, la cual muestra los puntos en una tabla.
- 1.5. Como último paso el usuario debe dar clic a la opción *Force Mesh Recomputation*, la cual permite que el software genere la malla sobre la zona 2D.

El usuario debe tener presente que si está desarrollando un modelo en el cual ya se haya generado la malla computacional, al cambiar los valores DX y DY y presionar la opción *Force Mesh Recomputation*, la malla va a cambiar por completo, así como los cambios que se hayan realizado en ella.

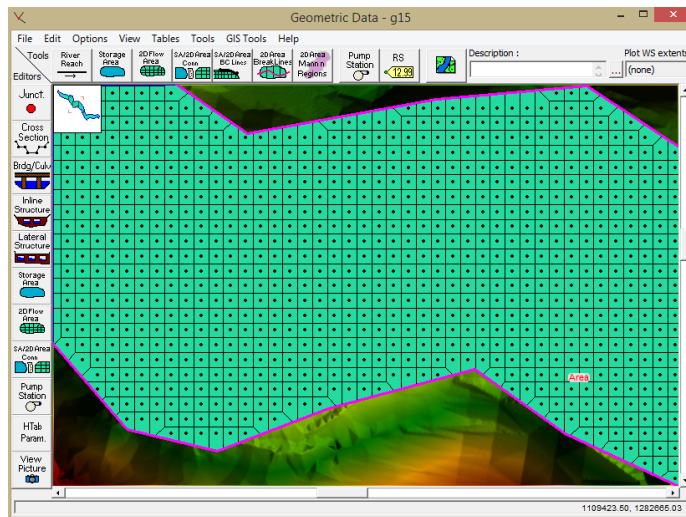
En la ventana *2D Flow Areas* se puede observar que hay cinco campos adicionales para tener en cuenta, cada uno de estos es explicado a continuación:

- *Defaults Manning's n value*: este campo es usado para ingresar el valor de Manning que por defecto será usado para la zona 2D en tal caso que no se ingrese un layer de Manning. Si en determinado caso, el layer de Manning no alcanza a cubrir todas las partes del terreno, el software toma el valor del coeficiente de Manning ingresado en esta casilla siempre que la zona 2D esté cubriendo esa parte del terreno.

- Filtros:
 - *Cell Volumen Filter Tol*: Esta tolerancia es usada para reducir el número de puntos de la curva de volumen versus elevación para las celdas 2D que se desarrollan durante el pre procesamiento.
 - *Cell Profile Filter Tol*: Esta tolerancia es usada para reducir el número de puntos que se extraen del terreno para cada cara de las celdas 2D.
 - *Cell Area-Elev Filter Tol*: Esta tolerancia es usada para reducir el número de puntos que se obtienen en las tablas de propiedades hidráulicas de las caras de las celdas. Entre menor sea la cantidad de puntos, más rápido será su cálculo, pero reducirá la precisión de las relaciones hidráulicas de la cara.
 - *Face Conveyance Tol Radio*: Esta tolerancia es usada para definir si se requieren más o menos puntos en el extremo inferior de la tabla de propiedades de las caras.

Una vez se han ingresado y configurado todos los campos descritos previamente, el usuario debe hacer clic en *OK* e inmediatamente debe poder visualizar la malla computacional dentro de la zona 2D como se muestra en la Figura 84.

Figura 84. Área 2D después de configurar la malla computacional.

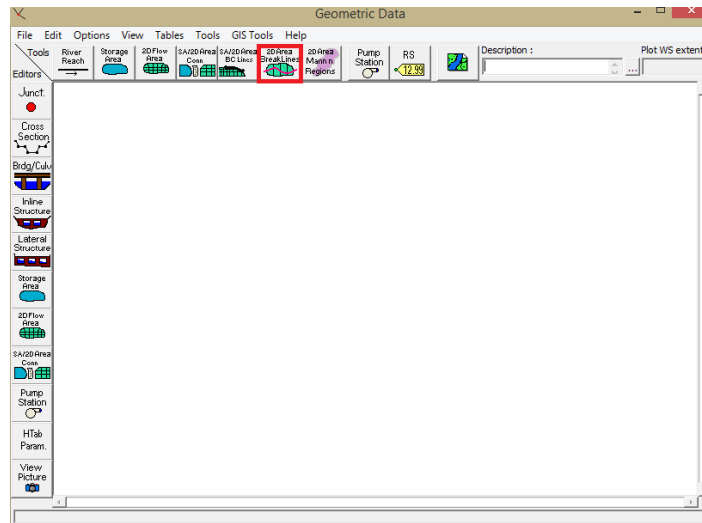


Como se recalcó anteriormente, las celdas que se encuentran cercanas al contorno de la zona 2D pueden adquirir forma y esto se hace con el fin de asegurar la similitud entre estas áreas y la nominal.

4.2. Agregar líneas de ruptura dentro del área de flujo 2D.

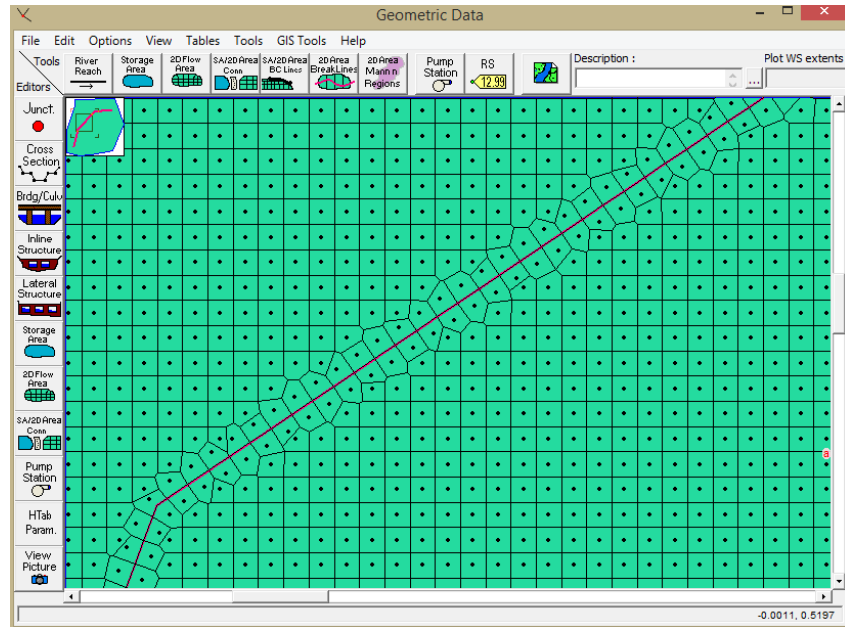
Las líneas de ruptura son usadas como barrera para el flujo o controlar la dirección de este, por ejemplo, se pueden agregar a lo largo de diques, carreteras o cualquier terreno algo que impida el paso del flujo por algún tiempo. Estas líneas son agregadas por medio de la herramienta *2D Area Breaklines* (Figura 85).

Figura 85. Herramienta para dibujar líneas de ruptura



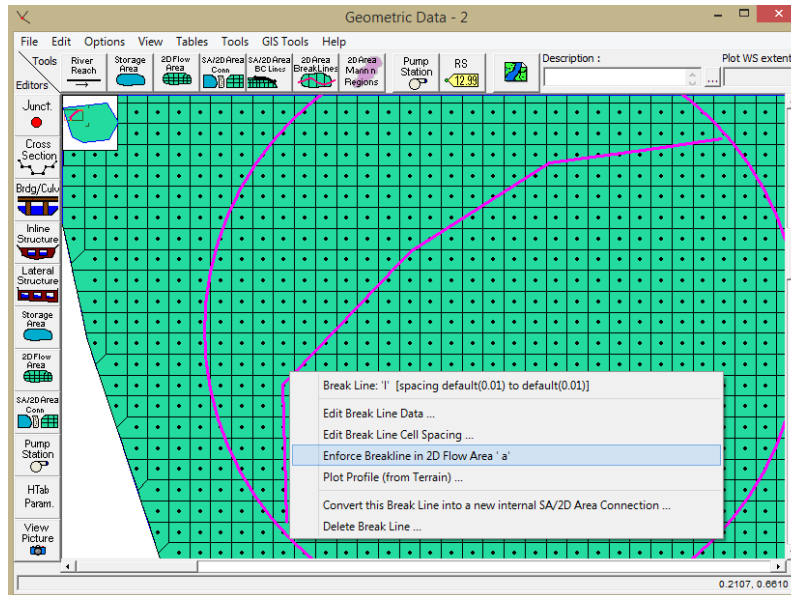
Estas líneas pueden ser creadas antes o después de que se haya generado la malla computacional. Para crearla se hace selecciona la herramienta *2D Area Breaklines* y posteriormente se hace clic sobre el terreno en el punto donde se desee dibujar la línea y se continúa dibujando de la misma manera que la zona 2D hasta que el usuario desee finalizarla dando donde clic y asignándole un nombre. Si el usuario crea la línea de ruptura antes de la generación de la malla computacional, al generar esta última, las celdas que rodeen la línea de ruptura alinearán una de sus caras con esta como se puede ver en la Figura 86. Al igual que con las celdas que se generan alrededor del contorno del área 2D, estas celdas también tendrán forma irregular.

Figura 86. Línea de ruptura creada antes de la generación de la malla



Si el usuario agrega la línea de ruptura después de haber generado la malla, las caras de las celdas que la rodeen no se alinearán automáticamente, por lo tanto, se debe hacer clic sobre la línea de ruptura y seleccionar la opción *Enforce Breakline in 2D Flow Area*. De esta forma, las celdas que se encuentren alrededor de la línea de ruptura se alinearán con esta.

Figura 87. Reubicación de las celdas alrededor de la línea de ruptura.



El usuario debe tener en cuenta que las líneas de ruptura pueden ser importadas desde ShapeFiles, pueden ser dibujadas a mano, como se explicó previamente o se pueden anexar las coordenadas detalladas de esta.

4.3. Editar/Modificar la malla computacional.

La malla computacional puede ser editada o modificada, agregando, moviendo o eliminando nodos que se encuentren en el contorno de la zona 2D o centros de celdas. Esto se puede realizar por medio de la opción *Edit* de la ventana *Geometric Data*, en la cual se encuentran las herramientas *Add Points*, *Remove Points* y *Move Points/Objects*. Una vez que se escoja alguna de estas herramientas, el usuario podrá manipular los puntos que se encuentren dentro de la zona 2D, por ejemplo, para agregar nodos se selecciona la opción *Add Points* y se hace clic en cualquier lugar que esté dentro de la malla, para eliminar nodos se selecciona la opción *Remove Points* y se selecciona cualquier nodo que componga la malla y para mover nodos, se selecciona la opción *Move Points/Objects* y se seleccionan los nodos que

se quieran mover, manteniéndolos seleccionados hasta que se hayan movido al lugar donde se desea.

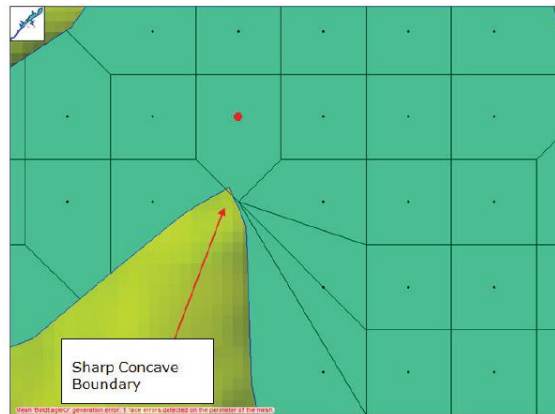
Cuando el usuario termine de editar la malla, debe seleccionar de nuevo la opción *Edit* y deseleccionar la opción de edición que se encuentre activa en ese momento, de esta forma se guardan los cambios generados en la malla.

4.4. Potenciales problemas que se pueden presentar en la generación de la malla.

Una vez que el usuario hace clic en la opción *Force Mesh Recomputation* (Figura 82), el software automáticamente evalúa la malla para encontrar posibles problemas en las celdas. Si se encuentra algún problema, el centro de esa celda adquiere el color rojo y un mensaje de este mismo color aparece en la esquina inferior izquierda de la ventana *Geometric Data*. A continuación, se nombrarán algunos problemas que son posibles de encontrar y cómo arreglarlos:

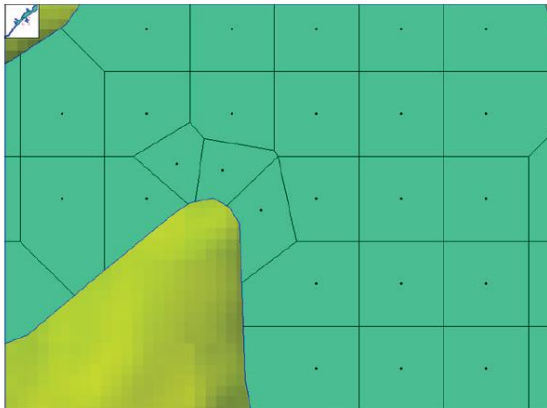
1. Problemas con el contorno de la malla: cuando el usuario dibuja un área de flujo 2D que es muy cóncava y puntiaguda, dependiendo del tamaño de celda escogido, es posible que no se pueda formar correctamente la malla en estos puntos. Para arreglar este problema, el usuario puede agregar más celdas alrededor de la parte cóncava del contorno 2D por medio de la herramienta *Add Points* de la opción *Edit*, o puede suavizar el contorno 2D, agregando más puntos a este por medio de la misma herramienta, o puede realizar ambos procedimientos. A continuación, se muestra un error presentado debido a un contorno puntiagudo:

Figura 88. Demostración del error 1.



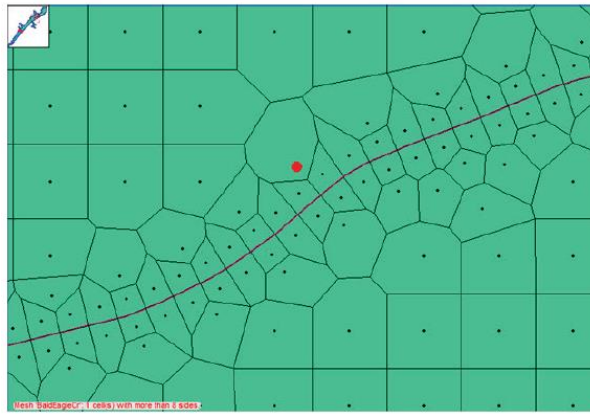
El problema se soluciona suavizando la zona puntiaguda y agregando otras celdas alrededor de esta, quedando así:

Figura 89. Solución al error 1.



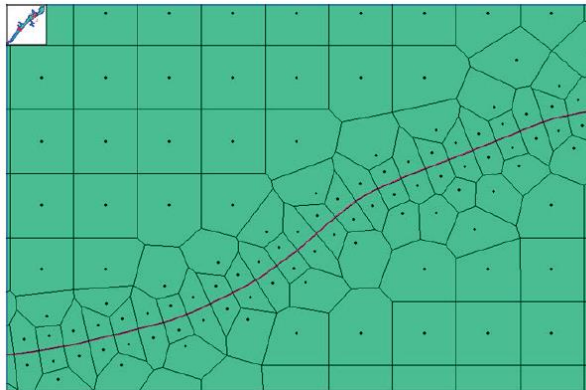
2. Demasiadas caras en una celda: todas las celdas están limitadas a tener máximo 8 caras. Si una celda tiene más de 8 lados, el centro de esta adquiere un color rojo. La solución a este problema es editar esa celda y/o las celdas que lo rodean. Para realizar esta edición se pueden usar cualquiera de las herramientas usadas en la opción *Edit* para solucionar el problema. A continuación, se presenta un problema debido a que se tienen más de 8 lados:

Figura 90. Demostración del error 2.



El problema se soluciona agregando celdas en el área de la celda, lo que hace que la celda se vuelva cada vez más pequeña y reduce el número de las caras de esta. Al solucionar el problema, se obtiene lo siguiente:

Figura 91. Solución al error 2.

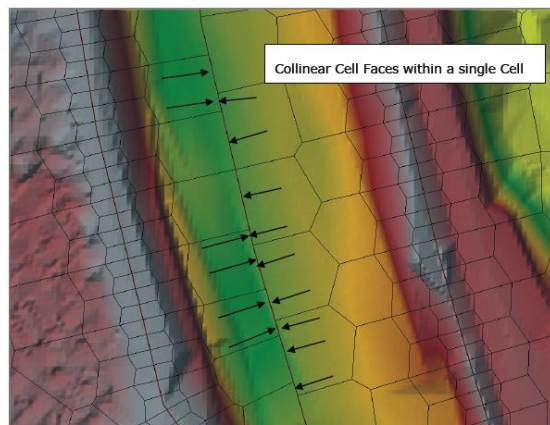


3. Centros de celda duplicados: si el usuario accidentalmente coloca un punto sobre un centro de celda o muy cercano a este por medio de la herramienta *Add Points*, esto causa un error en la malla. La solución a este problema es eliminar uno de los centros de celda.

4. Centros de celda por fuera del área 2D: si el usuario accidentalmente coloca un punto por fuera del polígono 2D por medio de la herramienta *Add Points*, o se mueve el polígono y quedan centros de celda por fuera de este por medio de la herramienta *Move Points/Objects*, el software presenta un error. La solución a este problema es eliminar los puntos que se encuentran por fuera del polígono 2D.

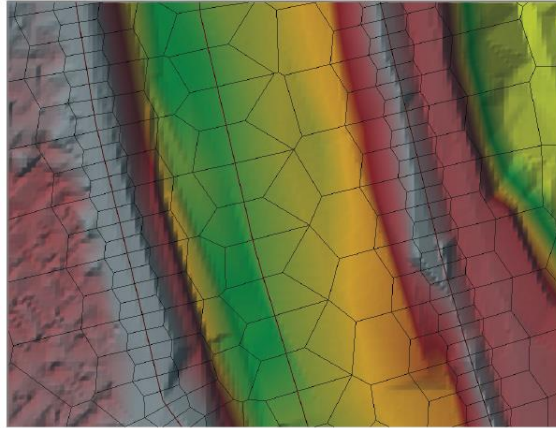
5. Celdas con caras colineales (Líneas de ruptura muy cercanas entre sí): esto sucede cuando hay líneas de ruptura muy cercanas, por ejemplo, a continuación, se muestra un caso en el que se usaron líneas de ruptura para los bancos del canal y para la línea central del canal. En este caso, todas las líneas de ruptura están transitando hacia el tamaño máximo de celda, lo que causa el problema. Las celdas alrededor de las líneas de ruptura de los bancos se formaron correctamente, pero las celdas alrededor de la línea de ruptura central no:

Figura 92. Demostración del error 5.



La solución a este problema es ingresar un valor máximo de celda o se puede corregir el problema a mano, controlando el orden en que fueron formadas las celdas.

Figura 93. Solución al error 5.



5. DIBUJAR ÁREAS DE ALMACENAMIENTO.

Las áreas de almacenamiento son usadas para representar zonas donde se encuentra el agua almacenada y pueden recibir o brindar flujo. Estas áreas pueden ser importadas al igual que las zonas 2D junto con las secciones transversales. Para poder dibujarlas se debe usar la herramienta *Add New Storage Area* ubicada en la parte superior de la ventana del *Geometric Data*. El procedimiento para dibujar es igual al explicado con las zonas de flujo 2D.

Una vez se haya dibujado el área de almacenamiento, se debe hacer clic sobre esta y seleccionar la opción *Edit Storage Area*, la cual abre la ventana que se puede observar a continuación:

Figura 94. Información de entrada para las áreas de almacenamiento

Elevation Volume Curve	
First elevation must have zero volume	
Elevation	Volume (1000 m3)
1	0
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	

El software permite tres opciones para el ingreso de datos del área de almacenamiento. La primera opción consiste en ingresar el área de la zona de almacenamiento y la elevación mínima en los campos *Area* y *Min Flow* respectivamente, con lo cual el software asume que esta posee la misma área para

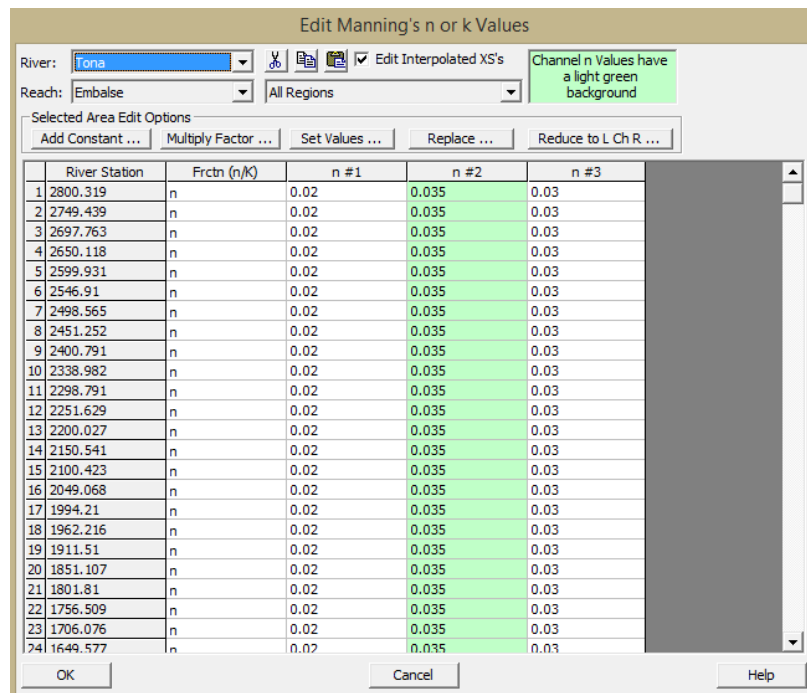
cualquier elevación. La segunda opción consiste en que el usuario ingrese datos correspondientes a la elevación versus el volumen del área de almacenamiento, lo cual brinda mayor precisión para el modelamiento. La última opción solo es posible usarla si se cuenta con un DEM y no únicamente con secciones transversales, debido a que por medio del botón *Compute E-V Table from Terrain* le permite al software tomar los datos del terreno que compone el DEM y obtener la curva de elevación versus volumen que representa dicha área de almacenamiento.

Como se puede observar en las ventanas del editor de áreas de almacenamiento y el editor de áreas 2D, se puede convertir de una a otra simplemente haciendo clic en el botón que se encuentra en la parte derecha superior de cada ventana. Así, un área 2D se puede convertir en un área de almacenamiento y viceversa sin tener que dibujarse de nuevo.

6. INGRESAR COEFICIENTE DE MANNING.

El procedimiento usado en las versiones anteriores del software para asignar el coeficiente de Manning consistía en ingresar los valores para el lecho del río y sus bancos derecho e izquierdo para cada sección transversal en una tabla, como se muestra en la Figura 95. A esta ventana se accede por medio de la opción *Tables* de la ventana *Geometric Data* y posteriormente seleccionando la opción *Manning's n or K Values*.

Figura 95. Ingreso de coeficientes de Manning



	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	2800.319	n	0.02	0.035	0.03
2	2749.439	n	0.02	0.035	0.03
3	2697.763	n	0.02	0.035	0.03
4	2650.118	n	0.02	0.035	0.03
5	2599.931	n	0.02	0.035	0.03
6	2546.91	n	0.02	0.035	0.03
7	2498.565	n	0.02	0.035	0.03
8	2451.252	n	0.02	0.035	0.03
9	2400.791	n	0.02	0.035	0.03
10	2338.982	n	0.02	0.035	0.03
11	2298.791	n	0.02	0.035	0.03
12	2251.629	n	0.02	0.035	0.03
13	2200.027	n	0.02	0.035	0.03
14	2150.541	n	0.02	0.035	0.03
15	2100.423	n	0.02	0.035	0.03
16	2049.068	n	0.02	0.035	0.03
17	1994.21	n	0.02	0.035	0.03
18	1962.216	n	0.02	0.035	0.03
19	1911.51	n	0.02	0.035	0.03
20	1851.107	n	0.02	0.035	0.03
21	1801.81	n	0.02	0.035	0.03
22	1756.509	n	0.02	0.035	0.03
23	1706.076	n	0.02	0.035	0.03
24	1649.577	n	0.02	0.035	0.03

En la nueva versión del software se incorpora la opción de añadir un layer de Manning asociado al uso de suelo, de tal forma que la variación de este no esté limitada a los bancos y al lecho el río sino a zonas distribuidas a lo largo y ancho del terreno, dando un gran nivel de descripción para esta variable. Por medio de la opción *Tables* del menú de la ventana *Geometric Data* se puede acceder a la opción

Manning's n by Land Classification la cual permite ver la tabla de la clasificación del terreno en la cual el usuario puede ingresar los valores de Manning correspondientes a cada tipo de uso del suelo.

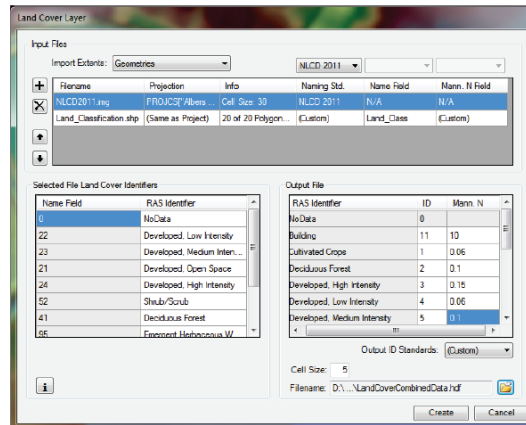
El layer de variación de Manning puede ser creado en *RAS Mapper* y luego asociarse a la geometría. Una vez que se han asociado el layer y la geometría, el usuario puede especificar los valores de Manning para cada tipo de cobertura vegetal, como se mencionó anteriormente.

Los archivos de entrada para el layer pueden estar en formato ShapeFile o en formato tipo GRID. Los ShapeFile pueden ser creados por el usuario por fuera de HEC-RAS, por ejemplo, en ArcGIS y luego pueden ser importados al *RAS Mapper*. Los datos de terreno en formato grid pueden ser obtenidos de sitios de internet como USGS (NLCD 1022 y USGS LULC), así como de otras fuentes. *RAS Mapper* le permite al usuario usar múltiples archivos de usos del suelo para crear una sola capa de cobertura, es decir, el usuario puede usar un archivo en formato grid como layer base de cobertura del suelo, pero si este cuenta con un polígono de cobertura en formato ShapeFile, que sea más preciso para muchas otras áreas dentro de la región de estudio, por ejemplo, el canal principal, los edificios, etc, también lo puede usar. De esta forma, al establecer el archivo ShapeFile como de mayor prioridad que archivo grid, se tomará como uso de la tierra el del primero en todas las zonas que cubra del terreno y en las zonas que no cubra, se tomará el uso de la tierra del archivo grid. De esta forma, *RAS Mapper* procesa los diferentes tipos de información de cobertura y crea un layer de cobertura combinado y lo almacena como un archivo GeoTIFF.

Para ingresar el layer de Manning a *RAS Mapper*, se debe acceder a la herramienta *Tools* del menú y posteriormente ingresar a la opción *New Land Cover* o se puede acceder haciendo clic derecho en la opción *Map Layers* que se encuentra a la izquierda de la ventana de *RAS Mapper* y seleccionar la opción *Add New Land*

Cover Layer, con cualquiera de las dos opciones de ruta se abrirá la ventana que se muestra en la Figura 96.

Figura 96. Land cover layer.



Esta ventana está dividida en tres secciones, i). *Input Files*, ii). *Selected File Land Cover Identifiers* y iii). *Output File*. La sección *Input Files* es para seleccionar los archivos en formato *ShapeFile* y *Grid* que quieren ser ingresados, así mismo, permite seleccionar la prioridad de cada uno. La sección *Selected File Land Cover identifiers* es para asignar un número entero y una etiqueta de texto para cada tipo de cobertura vegetal para el archivo que está actualmente seleccionado en la sección i. La sección *output files* es usada para mostrar lo que el software usará para los identificadores del uso del suelo, sus ID y opcionalmente el número de Manning ingresado por el usuario correspondiente a cada tipo de cobertura.

El ingreso de los layer de Manning se realiza por medio del ícono (+), el cual le permite al usuario seleccionar el archivo de cobertura vegetal. En caso tal de que se seleccione más de un archivo, se deben usar las flechas de arriba y abajo para fijar la prioridad de estos, así, el archivo que quede de primero en la lista tendrá la mayor prioridad y así sucesivamente. Hay tres opciones para definir los nombres de los tipos de uso de tierra: NLCD 2011 (la cual es para la información de cobertura

de USGS 2011); Anderson II (Para la información de cobertura de USGS en 1976) y personalizado, la cual es la opción definida por el usuario.

Una vez que el usuario ingrese el layer de cobertura vegetal, la sección *Selected File Land Cover Identifiers* muestra lo que está contenido dentro del archivo, así mismo como el identificador para ese tipo de cobertura vegetal. Debido a que diferentes fuentes de datos sobre la cubierta vegetal usan diferentes convenciones de nombres, si el usuario tiene más de un archivo de entrada, el software debe llegar a una convención de nomenclatura única para usarla en todos los datos. La sección *Output File* muestra la convención final de nomenclatura que se usará, así como el ID y el valor del n de Manning. Los valores de Manning pueden ser seleccionados desde un ShapeFile, o el usuario los puede ingresar o editar directamente en esta tabla.

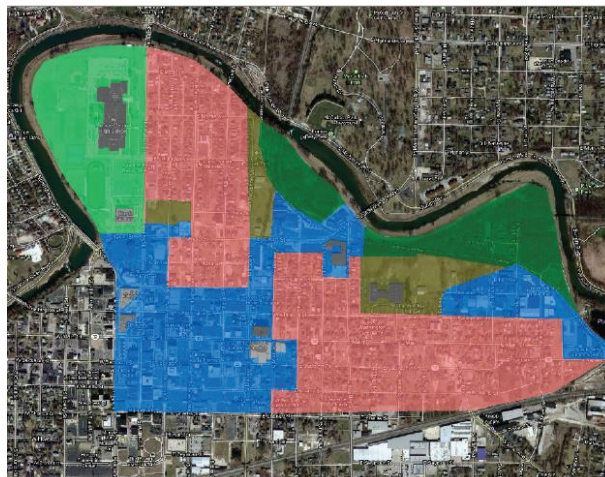
El usuario puede escoger un *Output ID Standard*, que se encuentra en la lista desplegable debajo de la tabla de *Output File*. Esto se usa generalmente cuando el usuario guarda un *ShapeFile* y quiere aplicar una de las nomenclaturas estándar de USGS al archivo. Si se tiene más que un archivo de entrada de cobertura vegetal, la única opción disponible es '*Custom*', debido a que un solo estándar no funcionará para varios archivos. Así mismo, si se tiene más de un tipo de archivo de cobertura vegetal, habrá diferentes convenciones de nomenclatura en cada tipo de archivo para un mismo tipo de cobertura. La convención de nomenclatura de USGS usa ID's específicos para cada tipo de cobertura, mientras que a los ShapeFiles se les asignan. Si se le asigna el mismo ID a dos tipos de cobertura diferente, el software muestra un error en rojo debajo de la tabla de archivos de salida con las palabras 'Duplicate IDs'. El usuario tendrá que cambiar uno o más de los ID's duplicados a un ID único y entero que no haya sido usado en la tabla.

El último paso antes de crear el layer de clasificación de cobertura vegetal es ingresar el tamaño de la celda, teniendo en cuenta que concuerde con el tamaño

de celda usado o a usar para la zona 2D. Después de que toda la información es ingresada, se debe presionar el botón 'Create'. *RAS Mapper* transforma los archivos de entrada al formato *GeoTIFF* y los ubica en el directorio que el usuario especificó.

El usuario puede controlar el color de los diferentes tipos de cobertura vegetal, así como su transparencia, dando clic derecho sobre el layer que queda guardado en la carpeta *Map Layers* ubicada en la columna izquierda de la ventana *RAS Mapper* y seleccionando la opción '*Land Cover Colors (and defaults)*', esto abre la ventana donde se podrán realizar todos los cambios deseados. Al realizar los cambios en los colores, se puede observar el layer de Manning como se observa en la Figura 97.

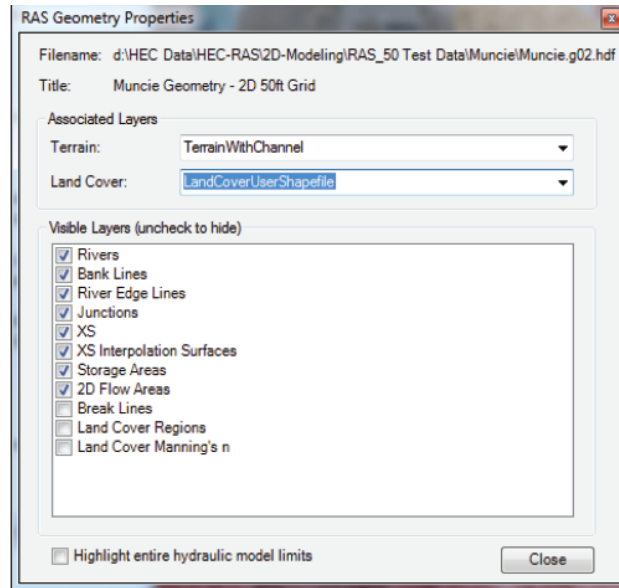
Figura 97. Mapa de cobertura vegetal.



El layer de Manning debe ser asociado con la geometría del terreno, para lo cual se debe dar clic derecho en la última opción de la carpeta *Geometries* que se encuentra en la parte izquierda de la ventana de *RAS Mapper* y seleccionar la única opción disponible *View Available Layers*. Esto abre una ventana que le permite al usuario seleccionar tanto el layer de Manning como el layer del terreno para asociarlos con el archivo de geometría, como se muestra en la Figura 98, escogiendo en las

opciones *Terrain* y *Land Cover*, el layer del terreno (DEM) y el layer de Manning que se deseen asociar.

Figura 98. Asociar Manning y geometría del terreno



Una vez que el layer de Manning sea asociado con un archivo de geometría, el usuario puede abrir la tabla que asocia las coberturas vegetales con los valores correspondientes de coeficiente de Manning, en la cual se pueden observar dichos valores si el ShapeFile los contenía, o ingresarlos. Esta tabla se encuentra dentro de la ventana *Geometric Editor* y se accede a esta por medio de la opción *Tables* del menú y posteriormente seleccionando *Manning's n by land cover*, permitiendo observar la tabla que se encuentra a continuación:

Figura 99. Coeficientes de Manning asociados a los respectivos usos de suelo.

Land Cover Layer		Geometry Overrides (Blank for Default Values)	
Name	Default Mann n	Base Mann n (blank for default)	MainChannel
1	nodata		0.06
2	barren land rock/sand/clay	0.04	0.04
3	cultivated crops	0.06	0.06
4	deciduous forest	0.1	0.1
5	developed, high intensity	0.15	0.15
6	developed, low intensity	0.1	0.1
7	developed, medium intensity	0.08	0.08
8	developed, open space	0.04	0.04
9	emergent herbaceous wetlands	0.08	0.08
10	evergreen forest	0.12	0.12
11	grassland/herbaceous	0.045	0.045
12	mixed forest	0.08	0.08
13	open water	0.035	0.035
14	pasture/hay	0.06	0.06
15	shrub/scrub	0.08	0.08
16	woody wetlands	0.12	0.12

Las primeras dos columnas son para el nombre de la cobertura y el valor de Manning al que está asociado desde el archivo del cual se importó o los que se asignaron durante la creación del layer, la tercera columna le permite al usuario re escribir los valores de Manning y la cuarta columna muestra el valor del coeficiente de Manning para el lecho del río.

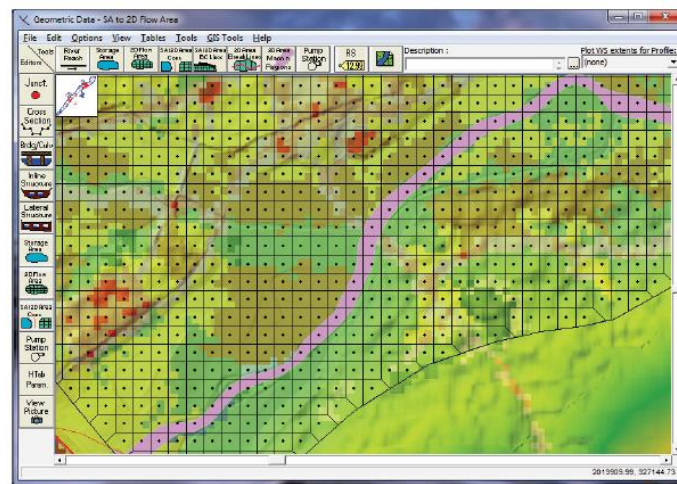
La columna *Name* contiene todas las clasificaciones que se encontraron en el layer de Manning. Cada tipo de cobertura vegetal aparece solo una vez en la tabla aunque haya muchos polígonos con ese tipo de cobertura. Si el usuario define valores de cobertura vegetal durante la creación del layer, estos deben aparecer en la segunda columna y el software los toma como valores definitivos a menos que en la tercera columna se ingrese un valor distinto, por lo cual se tomará este nuevo valor como el definitivo para la cobertura.

6.1. Dibujar polígonos de coeficiente de Manning.

El usuario tiene la opción de crear regiones de valores de Manning en el área 2D dibujándolas sobre el terreno. Con el fin de dibujar las secciones, el usuario debe dar clic en el botón que la herramienta ubicada en la ventana *Geometric Data* llamada *2D Area Mann n Regions*. Una vez el usuario haya seleccionado esta

herramienta, puede comenzar a dibujar la zona 2D, para esto debe dar un clic sobre el terreno e ir haciendo clic para finalizar línea cortas y poder comenzar la siguiente, de tal manera que se forme un polígono que describa la zona 2D que se desea dibujar. Cuando el usuario haya terminado de dibujar el polígono, debe hacer doble clic en el punto donde se una con el primer punto creado. Una vez que el usuario ha terminado de dibujar el polígono, el software le permite asignarle un nombre a esta región. Cada región debe tener un nombre único y el usuario puede crear tantas regiones como lo desee. Cuando ya haya ingresado todas las regiones que desee, debe ir a la opción *Tables* de la misma ventana donde se encuentra y seleccionar la opción *Manning's n by Land Cover*. En esta tabla puede observar que se han creado tantas columnas adicionales como regiones de Manning hayan sido creadas. En la Figura 100 se muestra un terreno con un layer de Manning asignado para todo el terreno y un polígono dentro del área 2D dibujado con un valor de Manning definido para el río.

Figura 100. Ejemplo de dibujo de coeficientes de Manning



El usuario debe tener en cuenta que el software solo seleccionara un valor de Manning por cada celda, lo cual es un limitante para los modelos en los cuales se

cuenta con tamaños de celda grandes, en las cuales se pueden presentar dos valores de Manning.

7. TIPOS DE ANÁLISIS DE FLUJO PARA INUNDACIONES.

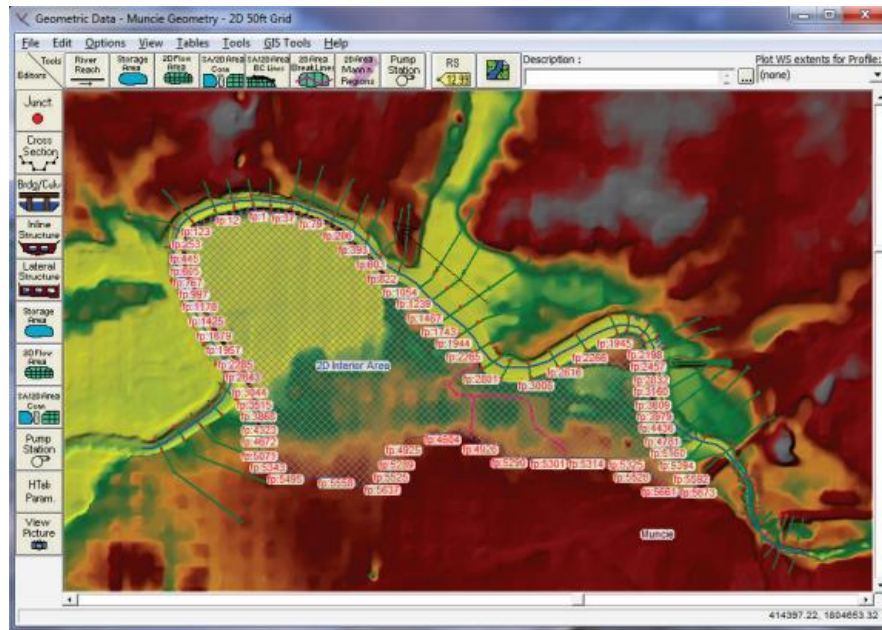
Con el fin de conocer qué tipo de modelamiento es más adecuado para determinado proyecto, es decir, combinación 1D/2D o únicamente 2D, a continuación se nombran algunas recomendaciones a tener en cuenta:

- Si la zona de estudio es una llanura, cuando la corriente de agua que esté transitando por el río sobrepase la altura de los bancos, el agua se expandirá hacia las zonas inundables. En este caso se recomienda usar el análisis en una dimensión sobre el río y el análisis en dos dimensiones sobre las zonas inundables, debido a que allí el flujo de agua no correrá únicamente en el sentido del río, sino que lo hará de tal forma que ocupe todos los espacios con alturas inferiores a las que tome la superficie del agua, recorriendo varios caminos posibles y presentándose variaciones de velocidad a lo largo de la simulación.
- Si la zona de estudio consta de un río cuyas laderas poseen pendientes altas, cuando la corriente de agua esté transitando por este, se generará una acumulación del flujo sobre sí mismo, por lo tanto, su crecimiento vertical será mayor que su crecimiento horizontal. En este caso se recomienda usar análisis en dos dimensiones que cubra el río y las zonas posiblemente inundables.
- Si se cuenta con estructuras laterales o presas con compuertas en las cuales el agua sobrepasará o incluso se podría presentar su ruptura, el flujo tomará varias direcciones aguas debajo de estas. En este caso se aconseja el uso del análisis en dos dimensiones para conocer el comportamiento de la corriente detrás de la estructura.

7.1. Combinación del análisis 1D/2D.

Si se desea desarrollar un modelamiento que combine el análisis 1D para el río y 2D para las llanuras de inundación, se deben tener en cuenta los tipos de conexiones que se pueden realizar entre estos y los casos en los cuales cada una debe ser usada. Una vez se haya ingresado la geometría del río, esta se puede conectar a las zonas de inundación de acuerdo a características como la inclinación del terreno (Figura 101).

Figura 101. Combinación del análisis 1D/2D.

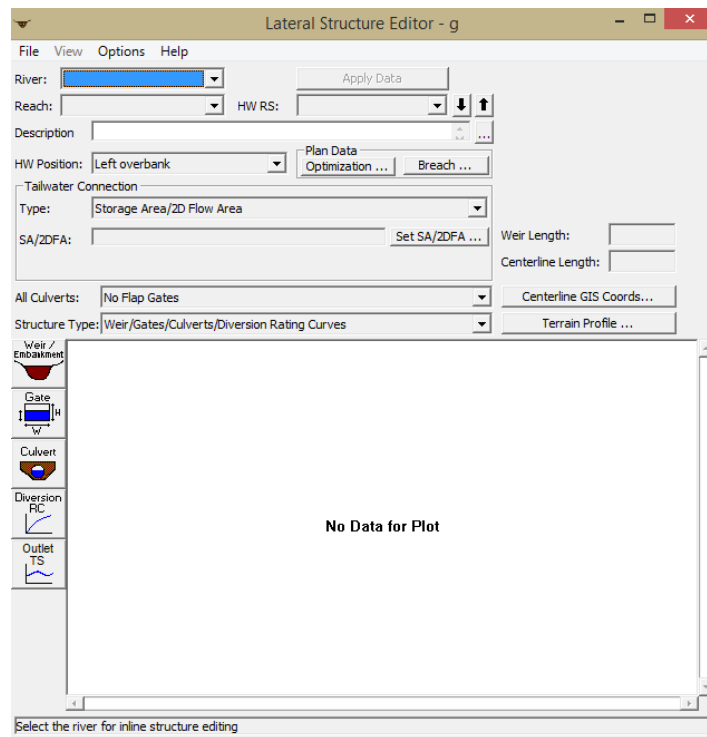


Conectar un área 2D lateralmente a secciones transversales: El usuario debe tener en cuenta que para este tipo de conexión debe contar tanto con DEM como con secciones transversales. Este tipo de conexión se realiza en zonas de llanura en las cuales se cuenta con diques o aquellas donde el flujo del río sobrepase los bancos. Para realizar esta conexión que seguirán los siguientes pasos:

1. Agregar la estructura lateral por medio de la herramienta *Lateral Structure* ubicada en la columna izquierda de la ventana *Geometric Data*.

2. Definir la sección transversal justo aguas arriba de la estructura lateral.
3. En la opción *Type* se debe seleccionar la opción *Storage Area/2D Flow Area*, que es a lo cual se desean conectar las secciones transversales. Además, en la opción *SA/2DFA*, el usuario debe seleccionar el nombre del área 2D a la cual quiere conectarse.
4. En la Figura 102 se puede observar que cuenta con tres tipos de estructuras para ser ingresadas, dichas estructuras y su ingreso de información es descrito a continuación:

Figura 102. Editor de la estructura lateral.



- *Weir*: En esta opción se debe ingresar la información referente al dique o cualquiera estructura lateral que se desee modelar. En el campo *Weir Width*, el usuario debe ingresar el valor del ancho de la parte superior de la estructura, sin tener en cuenta el ancho ocupado por sus laderas en caso tal que las tenga. En *Weir Computations* se debe escoger entre dos tipos de

ecuaciones disponibles, las cuales son la ecuación estándar y la ecuación Hager. Si el usuario escoge la primera, debe ingresar los datos únicamente los datos correspondientes al flujo de referencia (energía o superficie del agua) y al coeficiente C_d ; si selecciona la ecuación Hager, el usuario tiene que ingresar otra cantidad de variables más relacionadas con la geometría de la estructura, tales como la altura promedio de esta, la pendiente promedio del terreno que la rodea y por último el coeficiente C_d . El usuario debe tener en cuenta que este coeficiente es usado cuando el flujo sobrepasa la estructura, así como la forma de la cresta que debe ser definida en la opción *Weir Crest Shape*. Las opciones de cresta disponibles son *Broad Crested*, *Ogee*, *Sharp Crested* y *Zero Height*. Para el tipo de cresta *Ogee*, el usuario debe ingresar la altura del vertedero y la cabeza de energía, de esta forma el software calcula el valor del coeficiente C_d . Para los otros tipos de cresta, el usuario debe ingresar el valor del coeficiente C_d , el cual se puede obtener de la Figura 104.

Además de todas las herramientas anteriormente mostradas, se puede observar que se requiere que el usuario ingrese en la casilla *HW Distance to Upstream XS* que el usuario ingrese la distancia entre el extremo superior de la estructura lateral y la sección transversal que se encuentra justo aguas arriba de este. En la opción *TW flow goes*, se requiere que el usuario decida si el flujo, luego de sobrepasar la altura de la estructura lateral, llegará a un solo punto entre dos secciones transversales o se esparcirá entre muchas secciones. Por último, en la parte derecha de la Figura 103, se pide al usuario que ingrese la información respectiva a la geometría de la estructura.

Figura 103. Ingreso de datos de la estructura lateral

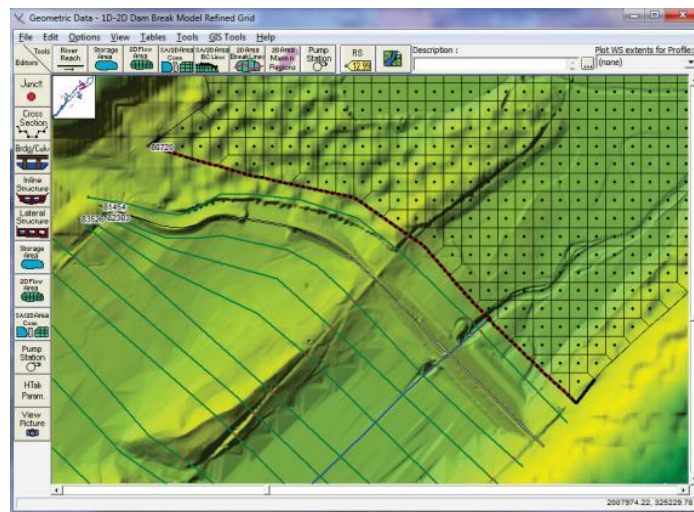
Figura 104. Valores del coeficiente Cd para estructuras laterales.

What is being modeled with the Lateral Structure	Description	Range of Weir Coefficients
Levee/Roadway – 3ft or higher above natural ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow	1.5 to 2.6 (2.0 default) SI Units: 0.83 to 1.43
Levee/Roadway – 1 to 3 ft elevated above ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow, but becomes submerged easily.	1.0 to 2.0 SI Units: 0.55 to 1.1
Natural high ground barrier – 1 to 3 ft high	Does not really act like a weir, but water must flow over high ground to get into 2D flow area.	0.5 to 1.0 SI Units: 0.28 to 0.55
Non elevated overbank terrain. Lat Structure not elevated above ground	Overland flow escaping the main river.	0.2 to 0.5 SI Units: 0.11 to 0.28

- Conectar un área 2D con la sección transversal aguas abajo del río: Este tipo de conexión es usado cuando el río posee pendientes muy altas, las cuales

permiten que el flujo esté en continuo movimiento debido a la fuerza de la gravedad y solo recorra el eje del río, es decir, que la zona de estudio posea un flujo naturalmente en una sola dimensión. Así, se busca analizar el comportamiento en dos dimensiones del flujo que llega a un punto donde puede tomar distintos rumbos. Al usar esta conexión, se debe tener en cuenta que la última sección transversal del río debe estar alineada con el contorno de la zona de flujo 2D dibujada debajo de este, es decir, se deben encontrar exactamente a la misma altura, por lo tanto, el terreno sobre el que se encuentre y el coeficiente de Manning, deben ser los mismos para los dos elementos (Figura 105).

Figura 105. Conexión de un área 2D con un río en la zona aguas abajo.



Con el fin de realizar dicha conexión se tienen que seguir los siguientes pasos:

- a. Ir a la ventana *Geometric Data Editor*
- b. Dibujar la zona 2D de tal forma que su contorno aguas arriba quede justo encima de la última sección aguas abajo del río.
- c. Ir a la opción *Edit* del menú y seleccionar *Move Points/Objects*

- d. Llevar el último nodo del eje del río dentro del área de flujo 2D. De esta forma el software preguntará si se desean conectar el río y la zona 2D.

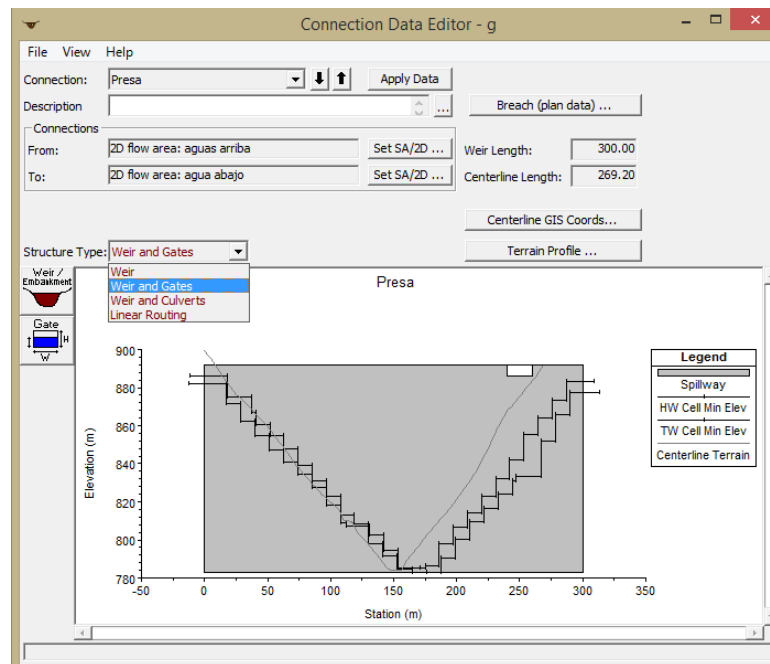
De esta misma forma se realiza la conexión cuando se cuenta con la zona 2D aguas arriba de las secciones transversales.

7.2. Análisis de flujo 2D.

Si se desea desarrollar un modelamiento que sea únicamente en dos dimensiones, se debe tener presente si este cuenta con estructuras tales como un azud o una presa. En caso tal de que la zona de estudio solo conste de un río con laderas de alta pendiente, el usuario solo debe dibujar la zona 2D y aplicar las condiciones de contorno nombradas en el numeral 6.1 del presente manual. Por otra parte, si el modelo cuenta con estructuras como las anteriormente nombradas, se busca que estas estructuras se encuentren entre dos zonas 2D o una zona 2D y un área de almacenamiento. Para esto se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Ir a la ventana *Geometric data*.
2. Dibujar las zonas 2D o áreas de almacenamiento que desee conectar.
3. Seleccionar la herramienta *SA/2D Area Conn* y dibujar una línea que simule la estructura entre las áreas que se quieren conectar, al finalizar de dibujar la línea se debe realizar doble clic, con lo cual aparece una ventana en donde se solicita un nombre para dicha estructura.
4. Hacer clic sobre la línea y escoger la opción *Edit Connection*
5. En la sección *Connections* se puede observar que aparecen las dos zonas que se conectaron y en *Structure Type* el usuario puede escoger los tipos de estructuras que se encuentran en dicha ubicación (Figura 106).

Figura 106. Editor de la estructura.



El ingreso de la información requerida para cada tipo de estructura se explica a continuación:

- *Weir*: en esta opción se debe ingresar la información referente a estructuras como presas o azud, dependiendo de cuál sea el caso. En la casilla *Weir Width* se debe ingresar el ancho de la parte superior de la estructura sin tener en cuenta el ancho ocupado por sus laderas. La opción *Weir Coefficient (Cd)* solo es usada si la estructura es un azud, es decir, el flujo de la zona aguas arriba sobrepasa la estructura y llega a la zona aguas abajo, dicho valor depende del material de la estructura y la forma de la cresta. La opción *Weir Crest Shape* hace referencia a la forma de la cresta de la estructura y al igual que el coeficiente, solo se tiene en cuenta si se trata de una estructura en la cual se presenta paso del flujo por encima de esta. Las opciones disponibles en esta casilla son *Broad Crested* y *Ogee*. Para la primera el usuario debe ingresar el valor del coeficiente C_d de acuerdo a estudios basados en esta,

para la segunda el usuario debe ingresar la altura del vertedero y la cabeza de energía, de esta forma el software calcula el valor del coeficiente C_d (Figura 107).

Figura 107. Editor de la presa/azud.

	Station	Elevation
1	0.	891.6
2	300.	891.6
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		

En la parte derecha del editor se encuentra una tabla de distancias horizontales versus elevación, por lo tanto, aquí se define la geometría de la estructura, teniendo en cuenta el ancho que posee el terreno en donde se ubicó esta. Aunque el usuario ingrese en la columna *Station* valores horizontales que se encuentren por fuera de la sección del terreno, el software omite esos espacios y no genera errores.

En los botones *HW Connections* y *TW Conecctions* se pueden observar las conexiones que se presentaron entre las caras de celdas de las zonas 2D y las estaciones de la estructura.

8. ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE.

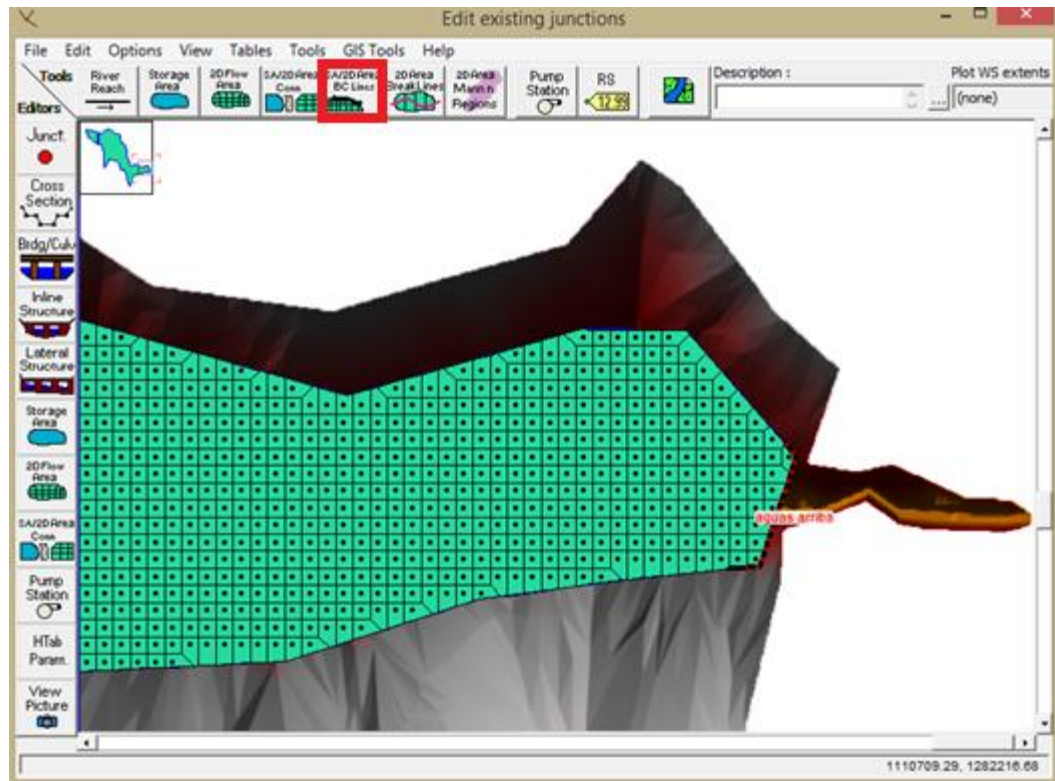
Para poder realizar un modelamiento con flujo inestable, el usuario debe ingresar condiciones de contorno y condiciones iniciales para la simulación y el procedimiento para su ingreso se describe a lo largo del presente capítulo.

8.1. Condiciones de contorno.

El ingreso de las condiciones de contorno depende del tipo de análisis que se requiera hacer en el terreno, es decir, si todo el terreno se trabaja como una zona de análisis en dos dimensiones o como una combinación 1D/2D.

- 1 Condiciones de contorno para análisis 2D: las condiciones de contorno a definir en este caso se ubican en el extremo superior de la zona de estudio y en el extremo inferior de esta, teniendo en cuenta que solo hay entrada y salida de flujo. Para dibujar las líneas de contorno se usa la herramienta *SA/2D Area BC Lines* ubicada en la parte superior de la ventana el editor de geometría. Con el fin de dibujar el contorno se debe trazar una línea de tal forma que esté por dentro de la zona 2D, así cuando el usuario finalice el trazo de la línea y haga doble clic, esta se acople a la forma que tiene la zona 2D en ese extremo como se muestra en la Figura 108.

Figura 108. Dibujo de las condiciones de contorno.

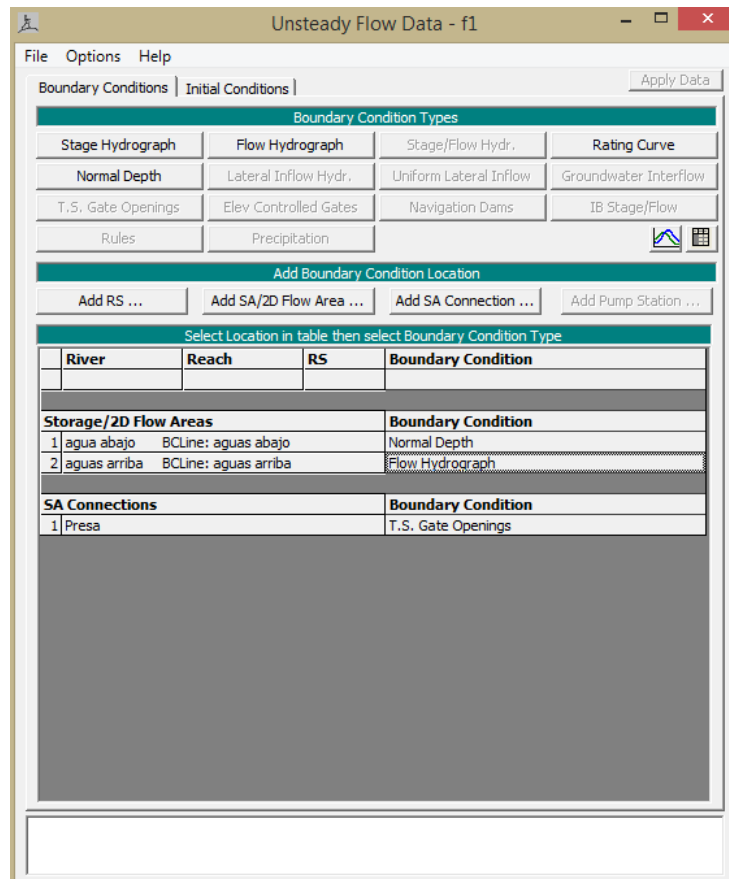


- 2 Condiciones de contorno para análisis combinado 1D/2D: debido a que en este tipo de modelamiento se encuentran secciones transversales a lo largo del tramo del río trabajando como análisis en una dimensión y zonas 2D conectadas a estas mientras trabajan como análisis en dos dimensiones, las condiciones de contorno se definen para las secciones transversales, específicamente, para la primera sección transversal del tramo ubicada aguas arriba y para la última ubicada aguas abajo, teniendo en cuenta que solo hay entrada y salida de flujo. Este proceso de escoger dichas secciones transversales es realizado automáticamente por el software.

Existen varios tipos de condiciones de contorno que pueden ser utilizados y que se pueden observar en la opción *View* del menú principal del software y seleccionando *Edit Unsteady Flow Data* (Figura 109), a la cual se accede por medio de la opción *Edit* de la ventana principal del software. El usuario debe seleccionar la casilla que

se encuentra debajo de *Boundary Condition* y al frente de la sección transversal o línea de contorno que desee y de esta forma se activan las condiciones de contorno disponibles de las cuales se escoge de acuerdo al caso.

Figura 109. Ingreso de las condiciones de contorno.



A continuación se explica la función de los distintos botones presentes en la ventana de edición de las condiciones de contorno:

No. Ordinates: en este campo se pueden cambiar el número de filas para los datos del hidrograma, teniendo 100 como el número mínimo permitido.

Interpolate Missing Values: interpola los valores de caudal para dos valores de este ingresados en distintos tiempos

Del Row: permite eliminar filas

Ins Row: permite agregar filas

Use Simulation Time: los valores de caudal del hidrograma comienzan a ingresar al modelo al comenzar la simulación.

Fixed Start Time: los valores del caudal del hidrograma comienzan a ingresar al modelo en un tiempo distinto al inicio de la simulación pero posterior a este. Esta opción se usa principalmente cuando existen varios hidrogramas de entrada y se quiere que inicien en tiempos distintos.

Data Time Interval: intervalo de tiempo para el hidrograma

Min Flow: el usuario puede ingresar un valor de caudal para ser usado como el mínimo en el hidrograma. Esto es muy útil cuando se están presentando problemas de estabilidad en la simulación debido a la presencia de flujos muy bajos, por lo tanto, al ingresar un valor en esta casilla, todos los valores de caudal menores a este que se encuentren en el hidrograma, serán reemplazados por dicho valor.

Multiplier: permite multiplicar todos los valores de las ordenadas por el valor ingresado en esta casilla. Este factor se aplica tanto para el hidrograma ingresado manualmente como para el ingresado por medio de un archivo .DSS

Critical Boundary Condition: si se selecciona esta opción, el software revisa el hidrograma de entrada tratando de encontrar si entre un tiempo y otro existe un cambio de caudal mayor al que se encuentra en el hidrograma, debido a que esto puede causar inestabilidades.

Cada uno de los tipos de condición de contorno que pueden ser usados y sus limitaciones, son explicados a continuación:

- *Flow Hydrograph*: esta opción puede ser escogida tanto para secciones transversales como para zonas 2D, es usada para ingresar flujo o en algunos casos para extraerlo, es decir, puede ser usado como condición de contorno aguas arriba o aguas abajo. Requiere un hidrograma de entrada y la pendiente de energía. Una vez el usuario escoge esta opción, la ventana para su edición aparece (Figura 110).

Figura 110. Ingreso de datos para la opción de contorno Flow Hydrograph.

	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	31Aug2008 2400	00:00	1.11
2	01Sep2008 0015	00:15	22.491
3	01Sep2008 0030	00:30	30.94
4	01Sep2008 0045	00:45	46.141
5	01Sep2008 0100	01:00	61.453
6	01Sep2008 0115	01:15	77.208
7	01Sep2008 0130	01:30	100.
8	01Sep2008 0145	01:45	130.235
9	01Sep2008 0200	02:00	153.532
10	01Sep2008 0215	02:15	191.815
11	01Sep2008 0230	02:30	222.535
12	01Sep2008 0245	02:45	260.817
13	01Sep2008 0300	03:00	291.084

Se puede observar que los valores del hidrograma pueden ser ingresados por medio de un archivo .DSS, el cual pertenece al software HEC-DSS (Data Storage System) que consiste en un sistema de almacenamiento de información, o pueden ser ingresados manualmente en la tabla llamada *Hydrograph Data*.

- *Stage Hydrograph*: esta opción puede ser escogida tanto para secciones transversales como para zonas 2D. La plataforma para el ingreso de datos

es similar a la presentaba en la Figura 110, esta opción puede ser usada tanto para ingreso de flujo como para salida de este. El ingreso de datos se realiza por medio de elevaciones de la superficie del agua para cada intervalo de tiempo, de esta forma, si la elevación de la superficie del agua en el hidrograma es mayor a la elevación de la superficie del agua en las celdas (o la elevación del terreno si allí se encuentra en condición seca), el flujo entrará a la sección transversal o zona 2D. Si la elevación de la superficie del agua en el hidrograma es menor a la elevación de la superficie del agua en las celdas, el flujo saldrá de la sección transversal o zona 2D (Figura 111).

Figura 111. Ingreso de datos para la opción de contorno Stage Hydrograph.

The screenshot shows the 'Stage Hydrograph' dialog box. The 'Enter Table' section is active, with 'Use Simulation Time' selected. The 'Data time interval' is set to '1 Hour'. The table below has the following structure:

No. Ordinates	Date	Simulation Time (hours)	Stage (m)
1		00:00	
2		01:00	
3		02:00	
4		03:00	
5		04:00	
6		05:00	
7		06:00	
8		07:00	
9		08:00	
10		09:00	
11		10:00	
12		11:00	
13		12:00	
14		13:00	
15		14:00	
16		15:00	
17		16:00	
18		17:00	

La opción *Use Initial Stage* siempre debe estar seleccionada a menos que se desee que cuando la simulación comience, el terreno se encuentre en estado seco o si se tiene este mismo tipo de contorno tanto en el extremo aguas arriba como en el extremo aguas abajo, se debe deseleccionar la opción.

- *Stage and Flow Hydrograph*: esta opción puede ser usada tanto para entrada como para salida de flujo únicamente en secciones transversales. Su función

consiste en que es un contorno mixto, es decir, cuando la simulación comienza, el tipo de contorno *Stage Hydrograph* inicia su ingreso de información al modelo hasta que ha ingresado todos sus datos, entonces comienza a procesarse la información proveniente del tipo de contorno *Flow Hydrograph* (Figura 112). Este tipo de condición de contorno es principalmente usada para los modelos de pronóstico.

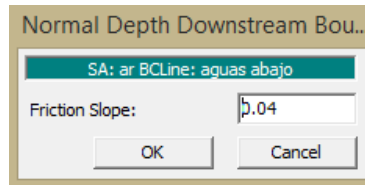
Figura 112. Ingreso de datos para la opción de contorno S/F Hydrograph.

The screenshot shows a software dialog box titled "Stage and Flow Hydrograph" for a specific river reach. It allows users to input hydrograph data either from a DSS file or by manually entering a table. The "Enter Table" section is selected, showing a 15-minute data interval and a table with 17 rows of simulation time intervals. The table columns are Date, Simulation Time (hours), Stage (m), and Flow (m3/s). The simulation times range from 00:00 to 04:00 in 15-minute increments.

No. Ordinates	Date	Simulation Time (hours)	Stage (m)	Flow (m3/s)
1		00:00		
2		00:15		
3		00:30		
4		00:45		
5		01:00		
6		01:15		
7		01:30		
8		01:45		
9		02:00		
10		02:15		
11		02:30		
12		02:45		
13		03:00		
14		03:15		
15		03:30		
16		03:45		
17		04:00		

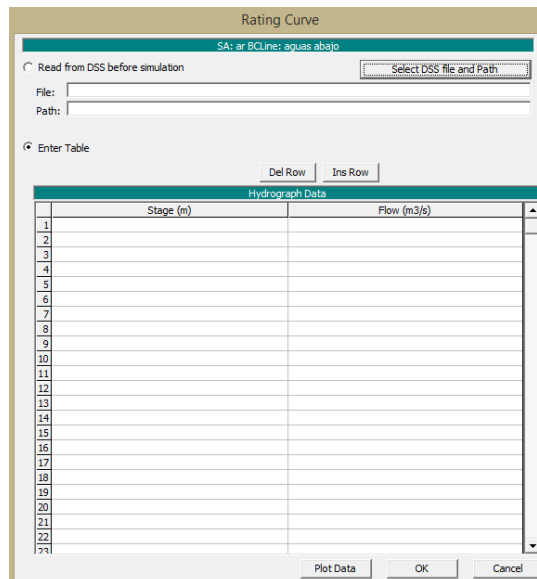
- *Normal Depth*: esta opción puede ser escogida para secciones transversales o zonas 2D y es usada únicamente para la salida del flujo, es decir, solo se ubica en la última sección aguas abajo, si se está trabajando con secciones transversales o en el borde aguas abajo, si se está trabajando con zonas 2D. Su ingreso depende de un solo valor, el cual está basado en la pendiente del terreno que se encuentra cercano a la ubicación de este tipo de contorno (Figura 113).

Figura 113. Ingreso de datos para la opción de contorno Normal Depth.



- *Rating Curve*: esta opción es usada únicamente para la salida del flujo, de la misma forma que *Normal Depth*. Para el ingreso de la información se requiere que el usuario cuente con una tabla para la relación entre la elevación de la superficie del agua y el caudal (Figura 114)

Figura 114. Ingreso de datos para la opción de contorno Rating Curve



- *Precipitation*: esta opción es usada para aplicar el exceso de la lluvia, es decir, la cantidad total de lluvia menos las pérdidas por infiltración, directamente a la zona 2D o a un área de almacenamiento. Con el fin de usar este tipo de contorno, se debe agregar la zona 2D o el área de almacenamiento sobre el cual se quiere aplicar, por medio de la herramienta *Add SA/2D Flow Area* que se encuentra en la Figura 109. Una vez se tenga agregada la zona 2D o el área de almacenamiento, se puede seleccionar el tipo de contorno. Los datos de entrada corresponden a la precipitación en

milímetros para cada intervalo de tiempo. Dicha precipitación se aplicará igualmente para todas las celdas dentro del área seleccionada (Figura 115).

Figura 115. Ingreso de datos para la opción de contorno Precipitation.

	Date	Simulation Time (hours)	Precipitation (mm)
1		00:00	
2		01:00	
3		02:00	
4		03:00	
5		04:00	
6		05:00	
7		06:00	
8		07:00	
9		08:00	
10		09:00	
11		10:00	
12		11:00	
13		12:00	
14		13:00	
15		14:00	
16		15:00	
17		16:00	
18		17:00	

- *Lateral Inflow Hydrograph*: esta opción de contorno es usada cuando se requiere traer flujo al modelo en un punto específico a lo largo del río y solo puede aplicarse en secciones transversales intermedias o áreas de almacenamiento, de tal forma que se debe ingresar en la sección transversal justo aguas arriba de la que se desea que posea la entrada de flujo lateral o el área de almacenamiento determinada. Para escoger la sección transversal se debe usar la herramienta *Add RS* de la Figura 109 y una vez se haya ingresado en la tabla, se puede escoger la condición de contorno para esta, así mismo, para escoger el área de almacenamiento se debe usar la herramienta *Add SA/2D Flow Area* de la misma ventana (Figura 116).

Figura 116. Ingreso de datos para la opción de contorno Lateral Inflow Hydrograph.

The screenshot shows a software dialog box titled "Lateral Inflow Hydrograph". At the top, it specifies "River: Tona Reach: Embalse RS: 2338.982 to 2298.791". Below this, there are two main sections:

- Read from DSS before simulation:** Includes a "Select DSS file and Path" button and fields for "File:" and "Path:".
- Enter Table:** Includes a "Data time interval:" dropdown set to "1 Hour". It has radio buttons for "Use Simulation Time:" (selected) and "Fixed Start Time:". The "Use Simulation Time:" option has "Date:" and "Time:" input fields.

Below the "Enter Table" section are buttons for "No. Ordinates", "Interpolate Missing Values", "Del Row", and "Ins Row". The main data entry area is a table titled "Hydrograph Data" with the following structure:

	Date	Simulation Time (hours)	Lateral Inflow (m3/s)
1		00:00	
2		01:00	
3		02:00	
4		03:00	
5		04:00	
6		05:00	
7		06:00	
8		07:00	
9		08:00	
10		09:00	
11		10:00	
12		11:00	
13		12:00	

At the bottom, there are "Time Step Adjustment Options ('Critical' boundary conditions)" with a checkbox for "Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step" and a "Max Change in Flow (without changing time step):" input field. Below that are "Min Flow:" and "Multiplier:" input fields, and "Plot Data", "OK", and "Cancel" buttons.

- *Uniform Lateral Inflow Hydrograph:* esta opción solo puede ser usada en secciones transversales intermedias y le permite al usuario ingresar flujo en una zona específica a lo largo del río, de tal forma que se distribuya uniformemente entre dos secciones de este. Para ingresar las secciones transversales, primero se agrega la que se encuentra aguas arriba por medio de la herramienta *Add RS* de la Figura 109 y se selecciona el tipo de contorno. Posteriormente se abre el editor de datos y en la parte superior de este se puede observar que le permite al usuario escoger la sección transversal aguas abajo hasta donde se quiere distribuir el flujo de entrada (Figura 117).

Figura 117. Ingreso de datos para la condición de contorno UL Inflow Hydrograph.

Uniform Lateral Inflow Hydrograph

River: Tona Reach: Embalse RS: 2338.982

Inflow will be evenly distributed from RS: "2338.982" to RS: 2298.791

Read from DSS before simulation

File: Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: Time:

Fixed Start Time: Date: Time:

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Date	Simulation Time (hours)	Lateral Inflow (m3/s)
1	00:00	
2	01:00	
3	02:00	
4	03:00	
5	04:00	
6	05:00	
7	06:00	
8	07:00	
9	08:00	
10	09:00	
11	10:00	

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier:

Plot Data OK Cancel

- *Groundwater Interflow*: esta opción se puede usar tanto para secciones transversales intermedias como para áreas de almacenamiento y consiste en un depósito de agua subterránea y su uso es similar al que se presenta con el tipo de contorno *Uniform Lateral Inflow Hydrograph*. Si se desea usar en secciones transversales, se debe seleccionar la sección aguas arriba y aguas abajo entre las cuales se desea que se produzca el paso de flujo o seleccionar el área de almacenamiento que se desee (Figura 118).

Figura 118. Ingreso de datos para la condición de contorno Groundwater Interflow.

La selección de las secciones transversales se realiza de la misma manera que en *Uniform Lateral Inflow Hydrograph*. Si lo que se desea es usar un área de almacenamiento, al agregarse esta por medio de la herramienta *Add SA/2D Flow Area*, se puede seleccionar el tipo de contorno y se aplicará sobre toda esta.

El usuario debe ingresar el valor del coeficiente de permeabilidad K, una serie de datos para el estado del acuífero respecto al intervalo de tiempo. Si el usuario cuenta con estudios de variación del coeficiente de permeabilidad respecto al tiempo, los puede ingresar en la ventana *K Time Series*.

- *Time Series of Gate Openings*: esta opción es usada para ingresar series de tiempo en las cuales las compuertas presentes en estructuras como presas o diques se abrirán al paso del flujo. Se debe tener presente que si se ingresan series en las cuales se realizan aperturas rápidamente, esto puede generar inestabilidades en la simulación, las cuales se pueden revolver

disminuyendo el intervalo computacional o disminuyendo la variación en las aperturas de la compuerta (Figura 119).

Figura 119. Ingreso de datos para la condición de contorno Gate Openings.

No.	Ordinates	Interpolate Missing Values	Del Row	Ins Row
Hydrograph Data				
	Date	Simulation Time (hours)	Gate Opening Height (m)	
1	31Aug2008 2400	00:00	5.8	
2	01Sep2008 0015	00:15	5.8	
3	01Sep2008 0030	00:30	5.8	
4	01Sep2008 0045	00:45	5.8	
5	01Sep2008 0100	01:00	5.8	
6	01Sep2008 0115	01:15	5.8	
7	01Sep2008 0130	01:30	5.8	
8	01Sep2008 0145	01:45	5.8	
9	01Sep2008 0200	02:00	5.8	

El usuario debe tener en cuenta que el tiempo de inicio del cambio en la apertura de la compuerta debe ser mayor o igual al tiempo de inicio de la simulación.

- *Elevation Controlled Gate*: esta opción le permite al usuario controlar las aperturas y cierres de la compuerta teniendo en cuenta la elevación de la superficie del agua justo en la sección transversal aguas arriba de la estructura o en cualquier sección. De esta manera, cuando la elevación de la superficie del agua es mayor a la establecida en la tabla, la compuerta comienza a abrirse y cuando la elevación disminuye, la compuerta se va cerrando (Figura 120).

Figura 120. Ingreso de datos para la condición de contorno EG Gates.

The image shows a software dialog box titled "Elevation Controlled Gates" with a subtitle "SA Conn: Presa". The dialog contains the following elements:

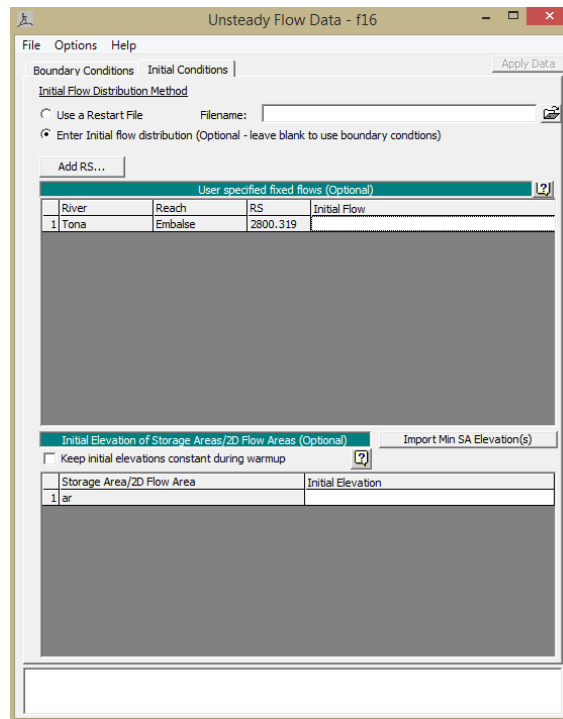
- Gate Group:** A dropdown menu currently set to "Gate #1".
- Reference:** A dropdown menu currently set to "Based on upstream WS".
- Upstream WS Elevation Reference:** A checkbox that is currently unchecked.
- Upstream WS elevation at which gate begins to open:** An empty text input field.
- Upstream WS elevation at which gate begins to close:** An empty text input field.
- Gate Opening Rate:(m/min):** An empty text input field.
- Gate Closing Rate:(m/min):** An empty text input field.
- Maximum Gate Opening:** An empty text input field.
- Minimum Gate Opening:** An empty text input field.
- Initial Gate Opening (Optional):** An empty text input field.
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons at the bottom right.

El usuario debe ingresar un valor mínimo y uno máximo para la apertura de la compuerta en las opciones *Maximum - Minimun Gate Opening*, así como la velocidad a la cual se realizarán los cambios en la apertura y el cierre en pies/minuto en las opciones *Gate Closing – Opening Rate*. Si el usuario desea iniciar la simulación con una compuerta parcialmente abierta, lo puede hacer ingresando la altura de esta en la opción *Initial Gate Opening*.

8.2. Condiciones iniciales.

El ingreso de las condiciones iniciales de la simulación se realiza por medio de la segunda pestaña que aparece en el editor del flujo inestable. En esta pestaña se puede encontrar que la simulación puede comenzar justo donde terminó otra, la cual puede ser ingresada seleccionando la opción *Use a Restart File* y posteriormente escogiendo el archivo en el directorio del computador. Por otra parte, la opción *Enter Initial Flow Distribution* es usada para poder ingresar los datos de condición inicial manualmente (Figura 121).

Figura 121. Ingreso de condiciones de contorno.



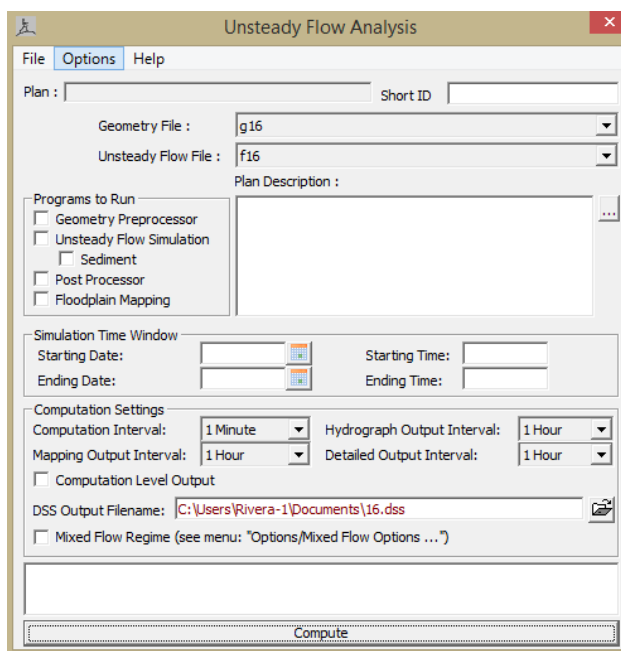
El ingreso de las condiciones iniciales se encuentra dividido en dos secciones, la primera consiste en el ingreso de un caudal inicial para la primera sección transversal aguas arriba del modelo, la cual aparece en esa lista automáticamente. El usuario puede agregar otra sección transversal y asignarle flujo como condición inicial. La segunda sección consiste en las zonas 2D y las áreas de almacenamiento, en las cuales el usuario puede definir una altura de la superficie del agua inicial para cada una de estas, es decir, cuando inicie la simulación, la zona 2D o el área de almacenamiento seleccionada, tendrá la altura ingresada en este campo. La casilla *Keep Initial Elevations Constant During Warmup* es usada para impedir que la elevación de la superficie del agua ingresada cambie durante la simulación o, en el caso donde no se haya ingresado elevación de la superficie del agua y la simulación comience con la zona 2D o el área de almacenamiento en estado seco, estas permanecerán así durante toda la simulación.

9. EJECUTAR EL ANÁLISIS DE FLUJO INESTABLE.

Para ejecutar la simulación se puede acceder por medio del ícono de la ventana principal del software llamado *Perform an Unsteady Flow Simulation* o por medio de la opción del menú *Run* y posteriormente seleccionando *Unsteady Flow Analysis* (Figura 122).

Las opciones disponibles en la ventana *Programs to Run* permiten la visualización de determinados resultados dependiendo de las opciones que el usuario escoja.

Figura 122. Ejecución del modelo de flujo inestable.



En la ventana del editor se pueden observar varios campos para seleccionar y para ingresar información. La función de cada uno de estos campos se explica a continuación:

- *Short ID*: en este recuadro se muestra el identificador corto asignado por el usuario al crear un nuevo plan por medio de la opción *File*. El nombre que se

decida dar al plan está limitado a 12 caracteres.

- *Geometry Preprocessor*: esta opción es usada principalmente para acelerar el proceso de simulación, debido a que procesa la información referente a la geometría en curvas y tablas de propiedades hidráulicas. Así, durante la simulación el software no debe calcular las propiedades hidráulicas en cada intervalo de tiempo para las secciones transversales, sino que toma la información de las tablas pre procesadas. Estas tablas se encuentran en la herramienta *HTab* ubicada en la barra izquierda del editor de geometría.

Se genera una tabla con información sobre la altura del agua para cada sección transversal. Esta información puede ser visualizada en gráficas por medio de la opción *View* del menú principal del software y escogiendo la opción *Hydraulic Property Plots*, en la cual se muestra la elevación de la superficie del agua versus el caudal para cada sección transversal. En la opción *Riv. Sta* el usuario puede escoger la sección transversal de la cual desea ver la información, así como en la opción *River* puede escoger el nombre del río sobre el cual se encuentra la sección transversal en caso tal de que se tengan varios en el modelo.

En el caso de las celdas que conforman el área 2D, su pre procesamiento se encuentra en tablas y gráficas que muestran la relación entre la elevación y distintas propiedades geométricas para las celdas y las caras de las celdas. Esta información es encontrada en la ventana *RAS Mapper* y en el numeral 9.3 del presente manual se explica cómo obtenerlas.

- *Unsteady Flow Simulation*: esta opción es usada para que el software tome la información encontrada en *HTab* y en las condiciones de contorno ingresadas y la procese, generando un archivo de salida *.DSS*, en el cual se

encuentran los hidrogramas de entrada y salida de acuerdo a la opción de contorno escogida. Si en el modelo se cuenta con una presa con vertedero de excesos, dando clic derecho sobre la estructura en el editor de geometría y seleccionando la opción *Plot Stage and Flow Hydrograph*, el usuario puede observar el hidrograma de salida por el vertedero y la lámina de agua generada aguas arriba y aguas abajo de este.

- *Post Processor*: esta opción es usada para generar información acerca de las secciones transversales o celdas, que no se generan durante la simulación. La información brindada por el software consta únicamente de hidrogramas de salida y de mapas de inundación, por lo tanto, si no se realiza el post procesamiento, no se podrá contar con información detallada acerca de las propiedades hidráulicas en las celdas o secciones transversales tales como profundidad, velocidad, entre otros. En el caso de las secciones transversales, también se pueden observar perfiles de inundación para cada sección en determinado tiempo.
- *Floodplain Mapping*: esta opción es usada para indicarle al software que se desea visualizar en la ventana *RAS Mapper* el mapa de inundaciones de forma dinámica. Si el usuario no selecciona esta opción, tiene la alternativa de generar mapas estáticos de la inundación máxima por medio de mapas que se guardan en la memoria del computador, contrario a los mapas dinámicos que se guardan en la memoria del software.
- *Starting Date*: en esta casilla el usuario puede seleccionar la fecha de inicio de la simulación, la cual debe coincidir con el tiempo de inicio del primer hidrograma que se ejecuta. Si en el hidrograma se usó la opción *Use Start Time*, este comenzará a ingresar al software al mismo tiempo que comience la simulación en la fecha aquí ingresada. En el recuadro que se encuentra al

frente de esta opción, se ingresa la hora a la cual se desea que inicie la simulación.

- *Ending Date:* en esta casilla el usuario puede seleccionar la fecha de finalización de la simulación, la cual debe coincidir con el tiempo de finalización del hidrograma más extenso. En el recuadro que se encuentra al frente de esta opción, se ingresa la hora a la cual se desea que termine la simulación.
- *Computation Interval:* en esta opción el usuario puede seleccionar el valor del intervalo computacional de los que se encuentran disponibles en la lista. Este intervalo es considerado uno de los datos más importantes para resolver de forma precisa el modelo, debido a que debe describir el aumento y la caída del hidrograma o los hidrogramas que se estén modelando. El valor del intervalo computacional depende del tipo de ecuación que se use para resolver la simulación si el modelamiento es únicamente en dos dimensiones, las cuales son Saint Venant u Onda Difusa. Para escoger su valor se debe revisar el 8 del presente manual.

El usuario debe tener presente que si el modelo cuenta con estructuras hidráulicas tales como puentes, presas, spillways o culverts, el valor del intervalo computacional será mucho menor al escogido, con el fin de evitar errores de estabilidad en la simulación.

- *Hydrograph Output interval:* esta opción hace referencia al intervalo de tiempo que el usuario desea que tengan los hidrogramas de salida generados por el software. Se recomienda no escoger intervalos muy grandes, debido a que si no se tienen los suficientes puntos, se podría perder el valor del caudal pico del hidrograma. Estos hidrogramas de salida guardan su información en

archivos .DSS o si se tienen compuertas, la información es guardada en la estructura donde esta se encuentra como se explicó previamente. Este intervalo debe tener un valor mayor o igual al valor del intervalo computacional.

- *Detailed Output Interval:* debido a que el software genera perfiles de elevación de la superficie del agua, velocidad y profundidad para cada celda y únicamente de profundidad para las secciones transversales, estos no pueden ser procesados para cada intervalo computacional escogido, debido a que creará archivos muy grandes y se necesitará mucho espacio para poder almacenarlos. Además, cuando el pre procesamiento es ejecutado, el software computará la información referente a los perfiles creados, por lo tanto, se recomienda escoger este intervalo lo suficientemente grande para que no existan demoras en la simulación, por ejemplo, si la simulación total demora 72 horas, se debe escoger un intervalo cercano a cinco horas.
- *Mapping Output Interval:* esta opción hace referencia al intervalo de tiempo en el cual el usuario puede observar la simulación completa de forma dinámica en *RAS Mapper*. Los datos generados para cada celda, cara de celda y nodos, son exportados al software HDF view, en el cual se cuentan con tablas para cada uno de estos elementos.
- *Computation Level Output:* esta opción le indica al software que debe transcribir una cantidad de variables para cada sección transversal y en cada intervalo computacional ingresado. Las variables usadas son elevación de la superficie del agua, caudal, máxima profundidad del agua en el canal principal, errores de cálculo en estas variables, entre otros. Para poder observar los resultados obtenidos, se debe ingresar por medio de la opción *View* del menú principal del software y posteriormente escoger cualquiera de

las siguientes opciones: *Unsteady Flow Spatial Plot* o *Unsteady Flow Time Series Plot*. El usuario debe tener en cuenta que al seleccionar esta opción creará archivos muy grandes.

- *DSS Output Filename*: en esta casilla se debe seleccionar el archivo .DSS al cual se exportan los hidrogramas de salida.
- *Mixed Flow Regime*: esta opción debe ser seleccionada cuando el usuario haya tenido errores previamente en la ventana de la simulación debido al cambio de flujo subcrítico a supercrítico, por lo tanto, al seleccionar esta casilla, el software permite dichos cambios.

Para realizar la simulación 2D se cuenta con dos tipos de ecuaciones, Saint Venant y Onda Difusa. Los criterios para escoger cualquier de estas se encuentran en el capítulo 10 del presente manual. Una vez se haya escogido la ecuación, el usuario debe ir a la opción *Options* y posteriormente seleccionar *Computation Options and Tolerances*. En la file número seis de la ventana *2D Flow Options* se puede escoger entre la ecuación Onda Difusa y Saint Venant (Full Momentum).

10.ECUACIÓN DE SAINT VENANT Y ONDA DIFUSA PARA EL MODELAMIENTO 2D.

El software cuenta con dos tipos de ecuaciones para realizar el modelamiento cuando toda la simulación es en dos dimensiones, el uso de cualquiera de estas depende de ciertas características y limitaciones que serán descritas a lo largo del presente capítulo.

En general las ecuaciones de Onda difusa otorgan una solución más rápida, debido a que requieren intervalos computacionales más grandes y tienen mayor estabilidad, mientras que las ecuaciones de Saint Venant requieren intervalos computacionales menores pero deben ser usadas obligatoriamente para determinados casos de estudio.

Existen una serie de situaciones en las que la ecuación de Saint Venant debe ser usada, estas se enumeran a continuación:

- Onda de inundación altamente dinámica: Si se está modelando la rotura de una presa o inundaciones repentinas, la onda de inundación se alzaré y caerá extremadamente rápido.
- Expansiones y contracciones abruptas: La ecuación de Saint Venant será más precisa puesto que tiene en cuenta las fuerzas asociadas en la contracción y expansión del fluido.
- Si se modela una bahía, estuario o río que sea altamente influenciado por marea.
- Si se necesita modelar propagación de onda alrededor de un objeto (puentes, construcciones etc.), análisis de la onda al abrir o cerrar repentinamente una compuerta.
- Si se tiene una curva cerrada y se busca conocer si hay alguna sobre elevación.

- Si necesita calcular una distribución de velocidad o elevación detallada alrededor de una estructura hidráulica.

En caso tal de que el proyecto no encaje en alguna de las condiciones previamente descritas, la solución consiste en modelar tanto con Saint Venant como con Onda difusa y si los resultados de las dos simulaciones dan muy distintos, se tomará el de la ecuación Saint Venant como el más preciso.

10.1. Intervalo computacional.

El intervalo de computación es usado en las simulaciones en condición de flujo inestable o no permanente. Este es uno de los parámetros más importantes a ingresar al modelo, por lo tanto, su selección debe hacerse con precaución debido a que puede afectar el resultado de la simulación.

El intervalo computacional debe ser tan pequeño como para que describa con precisión los cambios en el hidrograma de entrada al modelo, por lo tanto existe un método para poder calcularlo con base en este. Como regla general, el intervalo de computación debe ser menor que el tiempo que se demora el hidrograma en llegar desde el valor mínimo de caudal hasta el máximo que se presentará dividido en 20.

El valor para el intervalo computacional se seleccionará por comparación dependiendo de las ecuaciones empleadas, Saint Venant u Onda difusa, consecuentemente esta se compara con el valor obtenido de la regla general procurando el cumplimiento de la última.

- Regla general:

$$\Delta T \leq \frac{t_{CMP} - t_{min}}{20}$$

Donde:

t_{CMP} = Tiempo en que ocurre el valor máximo del hidrograma.

t_{CMP} = Tiempo en que ocurre el valor mínimo del hidrograma.

- Ecuación de Saint Venant:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq (1). \text{ Con un } C \text{ máximo} = 3.$$

Donde:

C = Número de courant.

V = Velocidad de la onda. (ft/s)


ΔT = Intervalo de computación. (s)

ΔX = Tamaño promedio de las celdas (ft)

- Ecuación de onda difusa:

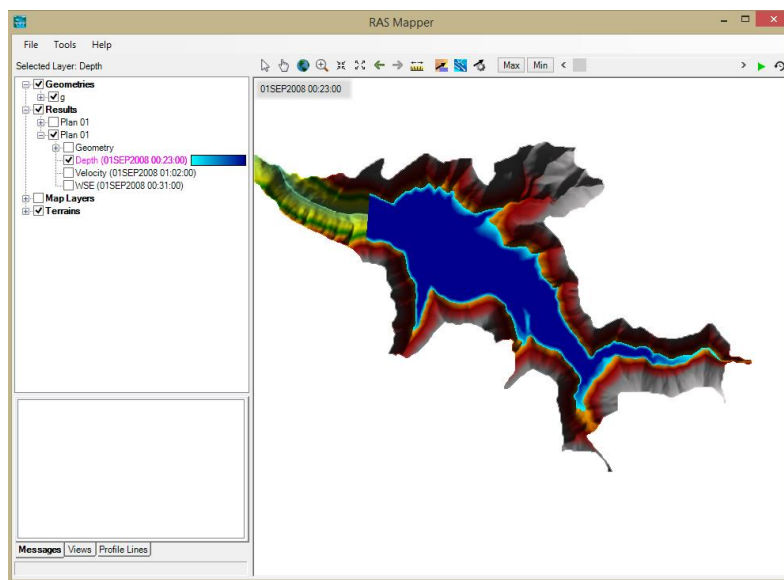
$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 2. \text{ (Con un } C \text{ máximo} = 5).$$

11. VISUALIZACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN EN *RAS Mapper*.

Para poder visualizar los resultados de la inundación, el usuario debe dar clic a la herramienta *RAS Mapper* que se encuentra en el menú como . En la ventana de la herramienta *RAS Mapper*, el usuario puede ver a la izquierda los mapas que se encuentran disponibles por defecto para visualización, los cuales son el de profundidad, velocidad y elevación de la superficie del agua.

El usuario debe seleccionar el mapa que desee ver de tal forma que en la casilla aparezca la anotación, a continuación tiene que seleccionar el ícono de reproducir y así puede ver la inundación a lo largo del tiempo (Figura 123). En caso tal de que el usuario desee observar la inundación máxima o mínimo que se presentaría, lo puede hacer por medio de los botones nombrados *Max* y *Min*, que se encuentran al lado izquierdo de la barra de reproducción.

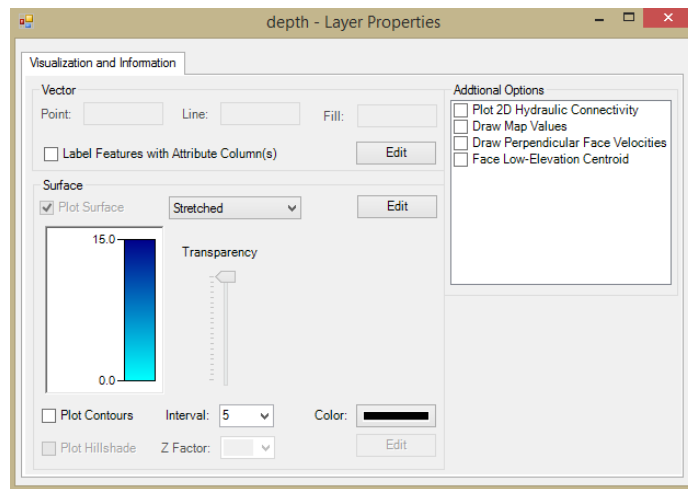
Figura 123. Mapa de inundaciones.



Así mismo, si desea ajustar los intervalos para los cuales los mapas muestran determinados colores, lo puede realizar haciendo clic derecho sobre el nombre del

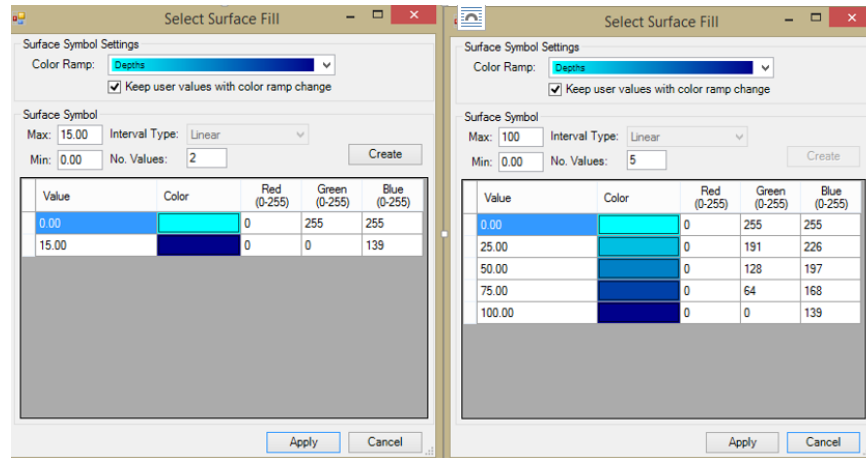
mapa y luego yendo a la opción *Layer Properties*, por medio de la cual aparece la ventana de propiedades del mapa, en la cual se puede observar que el intervalo definitivo automáticamente se encuentra de 0 a 15 metros. Para cambiar estos valores, se debe dar clic al botón *Edit* que se encuentra en la opción *Surface* (Figura 124).

Figura 124. Propiedades de visualización de los mapas de inundación.



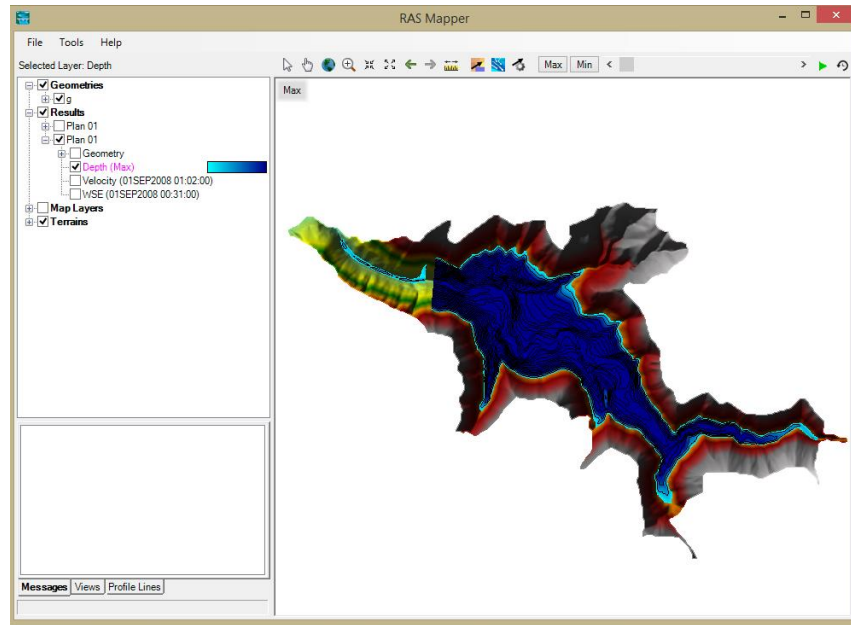
Posteriormente el usuario tiene la opción de elegir el conjunto de colores que desea para el mapa dinámico, aunque el que trae por defecto sea la gama de azules. Además, puede ingresar el valor mínimo, máximo y el número de intervalos para la división de colores en el mapa. Una vez ingresados estos valores y dando clic a los botones *Create* y *Apply*, el usuario puede ver la nueva división de colores en el mapa dinámico (Figura 125).

Figura 125. Cambios en los rangos de visualización de los mapas de inundación.



Entre las otras herramientas que se pueden encontrar en la ventana de propiedades del mapa, se puede encontrar la opción *Plot contours*, cuyo objetivo es mostrar la geometría del terreno que se encuentra debajo de la zona inundada (Figura 126). Así mismo se pueden encontrar en la ventana de opciones adicionales algunas alternativas para poder ver durante la simulación la información numérica que esta ofrece para cada celda, por ejemplo, para el caso del mapa de profundidad, se debe seleccionar la opción *Draw Map Values* (Figura 124).

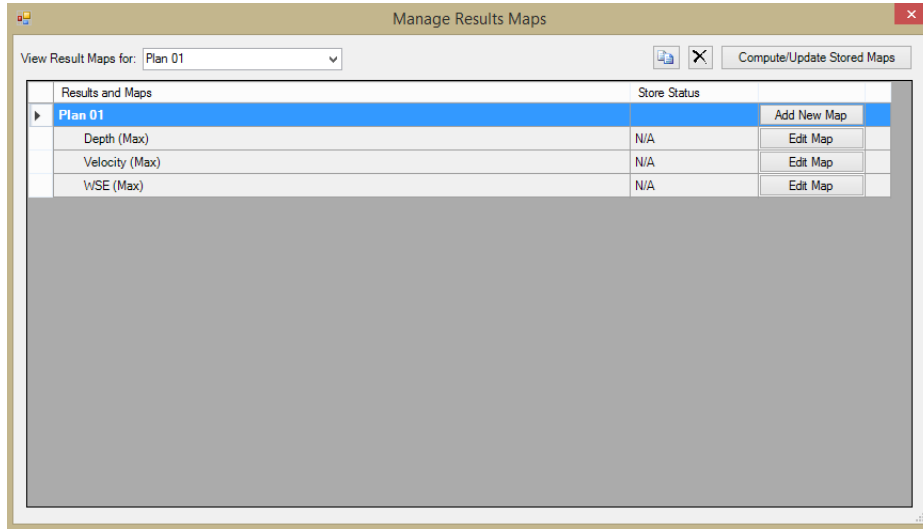
Figura 126. Contornos del terreno generados para el mapa de inundación.



11.1. Agregar mapas a *RAS Mapper*.

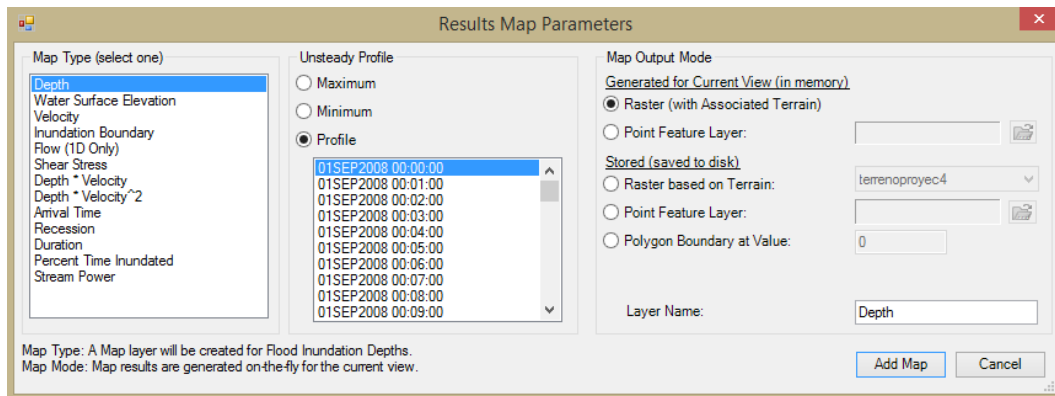
Si el usuario desea agregar un mapa de resultados diferente a los que el software presenta por defecto, puede realizar el procedimiento por medio de la opción *Tools>Manage Results Maps*, la cual abre la ventana, en la cual, por medio de la opción *Add New Map*, el usuario puede ver todos los mapas de resultados que ofrece el software y escoger uno de ellos. Posteriormente, debe revisar que se encuentre seleccionada la opción *Profile*, con el fin de poder ver el mapa de inundación dinámico y no estático (Figura 127).

Figura 127. Agregar mapas a *RAS Mapper*.



Una vez el usuario haya escogido el mapa que desea agregar, puede asignarle un nombre o no cambiar el que trae por defecto y por último dar clic al botón *Add Map* (Figura 128). Al ser agregado el mapa se puede ver en la ventana de *RAS Mapper* junto con los mapas que el software traía por defecto.

Figura 128. Ventana para agregar mapas a *RAS Mapper*.



11.2. Agregar imágenes satelitales a *RAS Mapper*.

Con el fin de poder agregar una imagen satelital como mapa de fondo en la simulación de la inundación, el DEM ingresado debe contar con una proyección

asociada a este, como se indica en el numeral 2.1 del presente manual. Si el usuario cuenta con dicha proyección, puede dar clic a *Tools>Web Imagery*, lo cual lo lleva a la ventana en la cual le muestra todas las imágenes satelitales disponibles en el software y el usuario puede escoger la que desee seleccionándola (Figura 129). Las imágenes satelitales se almacenan en la carpeta *Map Layers* ubicada en la columna izquierda de *RAS Mapper* con el fin de que el usuario pueda activarla o desactivarla cuando lo desee (Figura 130).

Figura 129. Agregar mapas satelitales a *RAS Mapper*.

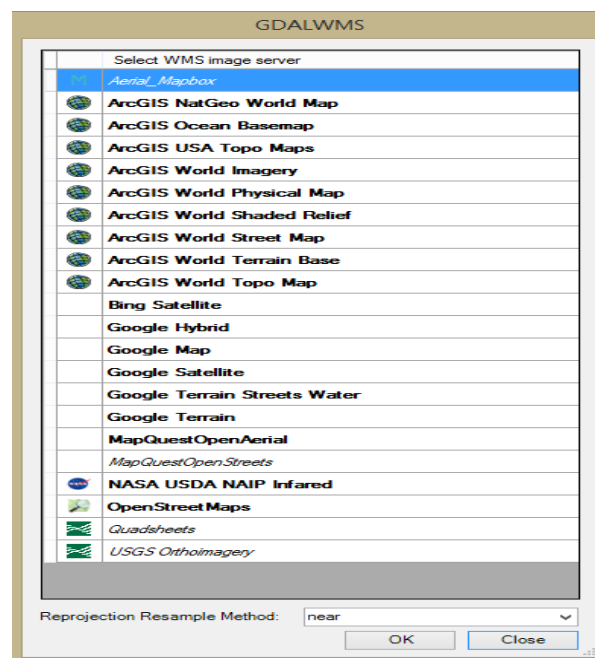
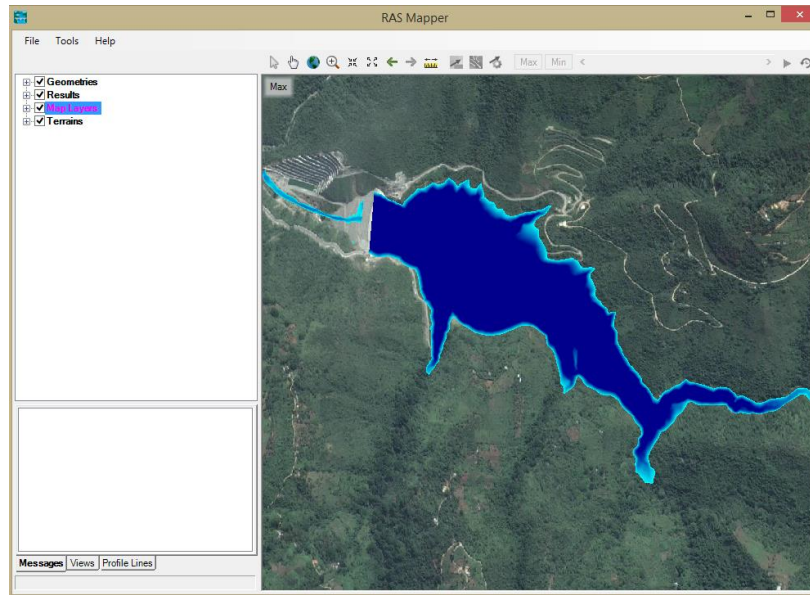


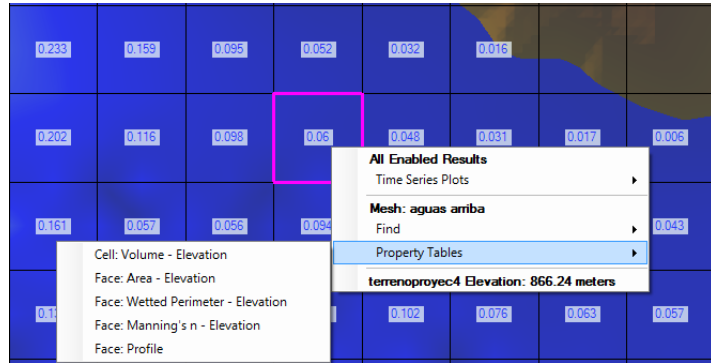
Figura 130. Imagen satelital combinada con el mapa de inundación.



11.3. Obtener tablas de propiedades por celdas.

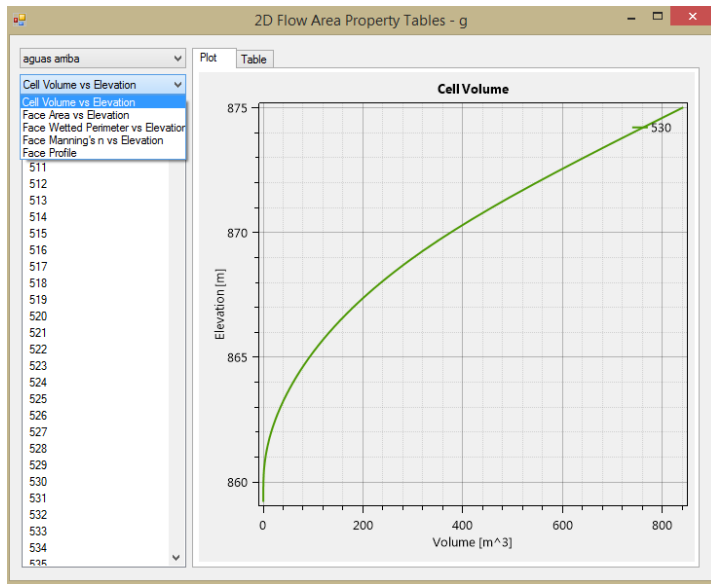
El software cuenta con la opción de generar tablas de propiedades geométricas por celdas, por ejemplo, permite generar tablas de elevación versus volumen, área, perímetro mojado, perfil del terreno o valores de Manning. Para poder ver dichas gráficas, el usuario debe hacer clic derecho sobre la celda de la cual desee obtener la información y seleccionar la opción *Property Tables* como se muestra en la Figura 131, posteriormente el usuario puede seleccionar el tipo de tabla que quiere ver.

Figura 131. Procedimiento para obtener tablas de propiedades hidráulicas.



Las tablas de propiedades vienen acompañadas de gráficas como se muestra en la Figura 132 con el fin de poder observar el cambio en los valores brindados por el software durante la simulación para cada celda.

Figura 132. Gráfica de propiedades hidráulicas.

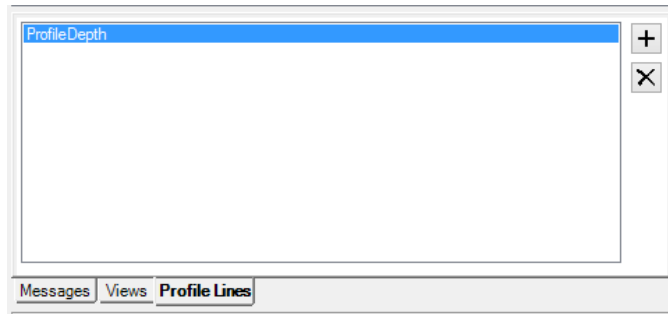


11.4. Obtener perfiles en *RAS Mapper*.

Si el usuario desea obtener un perfil que muestre el cambio de velocidad, profundidad o elevación de la superficie del agua a lo largo el tramo que requiera,

esto puede ser realizado por medio de la opción *Profile Lines* que se encuentra en la ventana inferior izquierda de *RAS Mapper* (Figura 133).

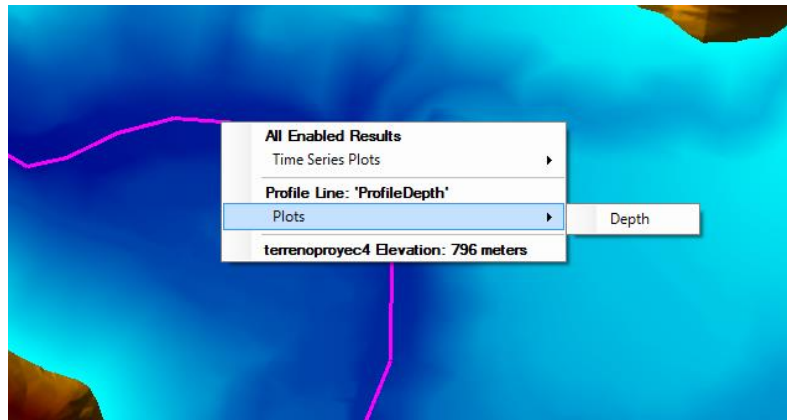
Figura 133. Ventana de creación de perfiles.



Para dibujar la línea de estudio, el usuario debe hacer clic en el ícono de agregar (+) y dibujar sobre el DEM la trayectoria que desea que tenga el perfil, al finalizar de dibujar la línea se debe hacer doble clic, con lo cual el software pregunta si desea guardar o cancelar el perfil creado y brinda la longitud de este. Al seleccionar guardar, el usuario debe asignar un nombre al perfil.

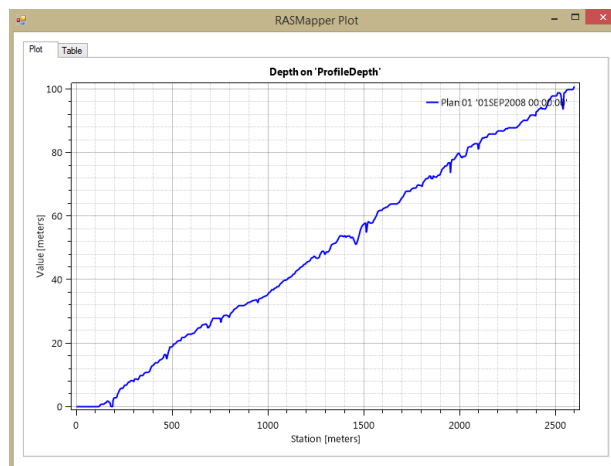
Los perfiles que se generan para cada línea creada dependen del mapa sobre el que se encuentre en el momento de la selección, por ejemplo, en la Figura 134, el mapa sobre el que se encuentra la línea es el de profundidades, por lo tanto, al escogerse la opción *Plots*, la única opción disponible es la de generar el perfil de profundidad versus distancia. De esta manera, dependiendo del perfil que el usuario quiera generar, debe activar el mapa correspondiente a este para que sea la base de la línea dibujada.

Figura 134. Generación del perfil.



Estos perfiles cuentan con la ventaja de que pueden ser dinámicos si se visualizan en el momento en que se esté realizando la simulación en *RAS Mapper*. Los perfiles obtenidos son como el mostrado en la Figura 135.

Figura 135. Perfil generado en *RAS Mapper*.



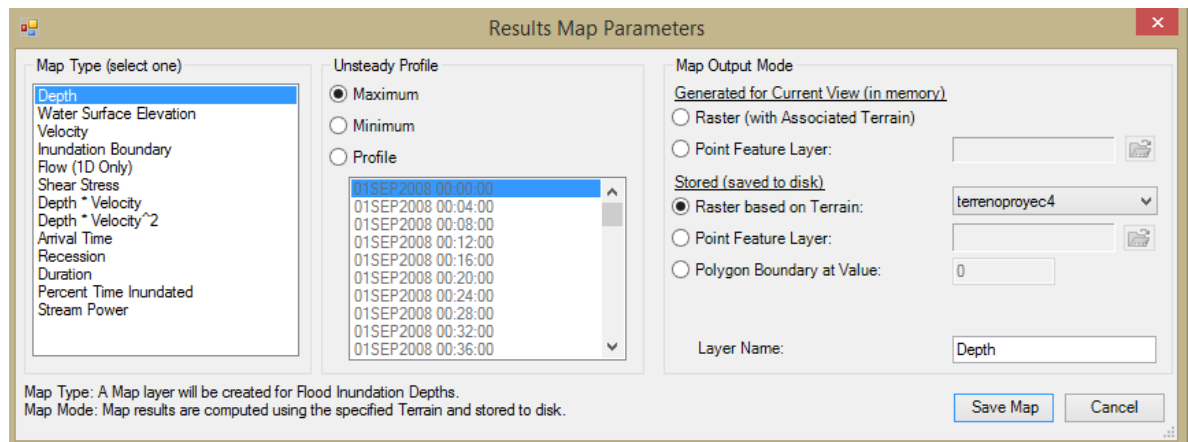
11.5. Guardar mapas de inundación

La herramienta *RAS Mapper* cuenta con la opción de guardar los mapas de inundación dinámicos generados de forma estática. Esto es usado principalmente para poder cargar dichos mapas de inundación en otros software, por ejemplo, ArcGIS. Para poder guardar el mapa, el usuario debe hacer clic derecho en el mapa

que desea guardar en la columna izquierda de la ventana *RAS Mapper*. Posteriormente se debe seleccionar la opción *Edit Map Parameters* con lo cual se puede observar la ventana de la Figura 136.

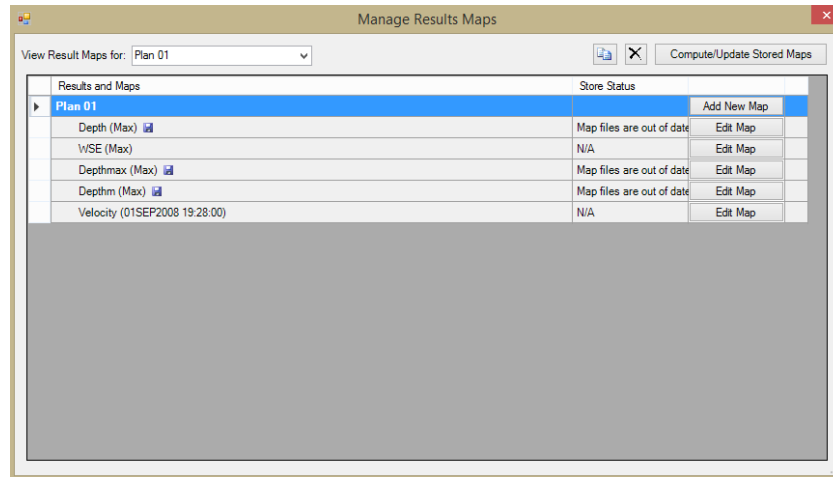
En esta ventana se debe selección en la columna *Unsteady Profile* la opción *Maximum* si se desea guardar un mapa del valor máximo de la inundación o *Minimum* si se desea guardar un mapa del valor mínimo de la inundación. Posteriormente, el usuario debe seleccionar la opción *Raster based on Terrain* y escoger el terreno sobre el cual se tiene el mapa de inundación en caso tal de que cuente con varios y por último debe asignarle un nombre al mapa en la casilla *Layer Name* (Figura 136).

Figura 136. Guardar mapas.



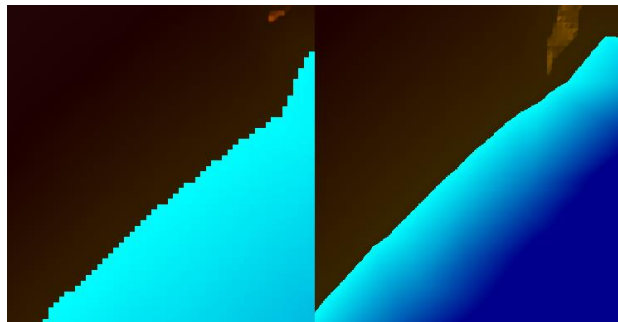
Una vez el usuario seleccione la opción *Save Map*, esto lo lleva a otra ventana en la cual debe seleccionar el mapa que desea guardar y por último dar clic a la opción *Compute/Update Stored Maps*, por medio de la cual se guarda el mapa o, en el caso de que se haya guardado previamente, se actualiza (Figura 137).

Figura 137. Generar el mapa.



Existe una diferencia de visualización en cuando al mapa estático y al mapa dinámico y consiste en los bordes suavizados con los que cuenta este último y de los cuales carece el mapa estático. Como se puede observar en la Figura 138, la imagen de la derecha muestra el contorno del mapa dinámico y la imagen de la izquierda muestra el contorno de un mapa guardado en el computador.

Figura 138. Diferencias de visualización entre los mapas estáticos (izquierda) y los dinámicos (derecha).

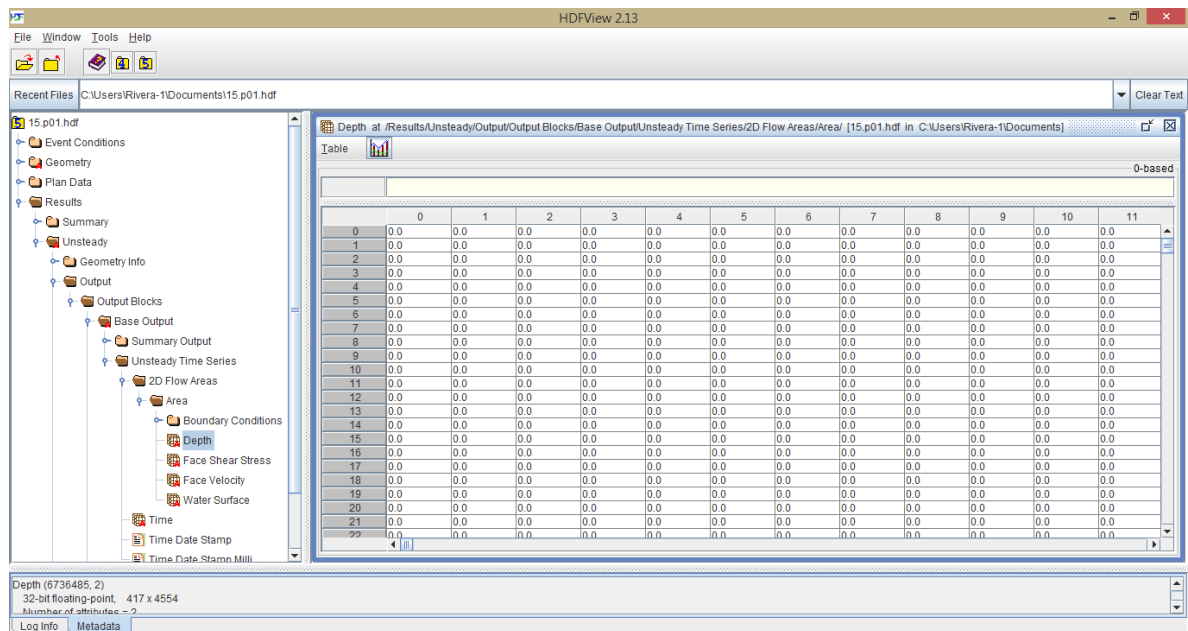


12. USO DEL SOFTWARE HDF VIEW PARA LOS ARCHIVOS DE SALIDA.

Gracias al software HDF view del grupo HDF, es posible obtener información numérica acerca de las profundidades por celda, velocidades por caras de celda, velocidades en dirección X y Y por cada nodo y esfuerzo cortante generado en cada cara, esta información se obtiene un número de veces igual a la duración de la simulación dividido entre el tiempo seleccionado para *Mapping Output Interval*.

El software se puede obtener por medio de la página web oficial del grupo HDF <https://www.hdfgroup.org/> y cuenta con la interfaz mostrada en la Figura 139, en la cual se puede observar en la izquierda de la pantalla la ruta para encontrar las tablas de resultados en el software.

Figura 139. Resultados mostrados en HDF view.



The screenshot shows the HDFView 2.13 application window. The left sidebar displays a tree view of the data structure, with 'Depth' selected under '2D Flow Areas' > 'Area'. The main window displays a table with 12 columns (0-11) and 22 rows (0-21). The table contains numerical data, with most cells showing '0.0'. The status bar at the bottom indicates 'Depth (6726485.2)' with '32-bit floating-point, 417 x 4554' and 'Number of attributes = 2'.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

HEC-RAS al finalizar la simulación genera archivos con distintas extensiones, una de estas extensiones es la respectiva al software HDF, la cual presenta el archivo

con el nombre “nombre_del_archivo.p01”, lo cual hace referencia al ID dado para el plan del que se obtuvo la simulación.

Para exportar los datos a formato .txt es necesario que el usuario se dirija a la opción *Table* y seleccione *Export Data to Text File*, posteriormente aparece la ventana en la cual se le debe dar un nombre al archivo y de esta forma queda guardado.

13. BIBLIOGRAFÍA.

U.S. Army Corps of Engineers, «HEC-RAS. River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0», 2016.

U.S. Army Corps of Engineers, «HEC-RAS. River Analysis System User's Manual, Version 5.0», 2016.

U.S Army Corps of Engineers, «HEC-RAS. River Analysis System. Applications Guide», 2016.