UNIVERSIDAD DEL AZUAY.

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA EN CONSTRUCCIONES.

Modelación Hidráulica en 2D del Tramo Calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) – Av. De las Américas, del Río Yanuncay.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Autor

JAIME LEONARDO CAIVINAGUA ARÉVALO.

Director

CARLOS JAVIER FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA WEBSTER

CUENCA – ECUADOR

2020

DEDICATORIA.

Quiero dedicar este trabajo a toda mi familia, especialmente para mis padres Gerardo y Rosa, por cada uno de los consejos y todo el esfuerzo, a mi hermana María; quienes siempre han sido los principales motivadores y sobre todo por el apoyo incondicional durante todo este tiempo.

AGRADECIMIENTO.

Me iré eternamente agradecido por todo el proceso formativo y cada uno de los responsables que fueron clave y necesario para la realización de este proyecto. A mi tutor al ingeniero Javier Fernández de Córdova, quien me apoyo e instruyo con su gran capacidad técnica y su calidad humana.

Al Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) de la Universidad del Azuay, por el apoyo y asesoramiento.

A cada uno de los profesores de la Universidad del Azuay por todos los conocimientos impartidos tanto dentro como fuera de las aulas.

A toda mi familia por el apoyo incondicional, durante toda esta etapa formativa, brindándome todo su apoyo y cariño.

"MODELACIÓN HIDRÁULICA EN 2D DEL TRAMO CALLE CIUDAD DE CUENCA (PUENTE DE MISICATA) – AV. DE LAS AMÉRICAS, DEL RÍO YANUNCAY."

RESUMEN

En este trabajo se realiza la modelación hidráulica en dos dimensiones de un tramo del río Yanuncay comprendido entre la calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) y Av. de las Américas empleando el programa IBER. Se parte de la información obtenida mediante fotogrametría, logrando una resolución de 6 centímetros, esta información fue depurada, para eliminar los pixeles correspondientes a las copas de los árboles existentes especialmente sobre el cauce natural del río. Después se generó un modelo digital de elevaciones (MDE), con el cual se ejecutaron varias simulaciones con diferentes caudales para obtener manchas de inundación y velocidades de flujo.

Palabras clave: dos dimensiones, Iber, modelo digital de elevaciones, modelación hidráulica.

Javier Fernández de Córdova Webster.

Director del Trabajo de Titulación.

José Fernando Vásquez Calero.

Director de Escuela.

Jaime Leonardo Caivinagua Arévalo.

Autor.

"2D HYDRAULIC MODELING OF THE YANUNCAY RIVER IN THE SECTION BETWEEN THE CIUDAD DE CUENCA STREET (MISICATA BRIDGE) AND DE LAS AMERICAS AVENUE"

ABSTRACT

In this work, two-dimensional hydraulic modeling of a section of the Yanuncay River between the Ciudad de Cuenca street (Misicata Bridge) and De las Américas avenue was carried out using the IBER software. It was based on the information obtained by photogrammetry, achieving a resolution of 6 centimeters. This information was filtered to eliminate the pixels corresponding to the tops of the existing trees, especially on the riverbed. Then a digital elevation model (DEM) was generated. With this model, several simulations with different flows were executed, flood spots and flow rates were also obtained.

Keywords: two dimensions, Iber, digital elevation model, hydraulic modeling.

Javier Fernández de Córdova Webster.

Thesis Director

José Fernando Vásquez Calero.

Faculty Director

Jaime Leonardo Caivinagua Arévalo.

Author

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
Dpto. Idiomas

Translated by
Ing. Paúl Arpi

INDICE DE CONTENIDOS.

DEDICATORIA. ii
AGRADECIMIENTO. iii
RESUMEN ..... **¡Error! Marcador no definido.**
ABSTRACT ..... **¡Error! Marcador no definido.**
INDICE DE CONTENIDOS.....vi
INDICE DE FIGURAS viii
INDICE DE TABLAS. xiv
INDICE DE ANEXOS.....xv
Introducción.....1
Antecedentes.....3
Justificación.....5
OBJETIVOS.....6
Objetivo general 6
Objetivos específicos.....6
CAPÍTULO I 7
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO 7
1.1 Estado del Arte.....7
1.2 Marco Teórico.....8
1.2.1 Modelación.....9
1.2.2 Modelo hidrológico 9
1.2.3 Modelo hidráulico.....9
1.2.4 Modelos utilizados en la modelación hidráulica 10
1.2.5 Modelos en 1D, 2D y 3D 10
1.2.6 Softwares para modelar.....11
1.2.7 Sotfware IBER 12
1.2.8 Tipos de Flujo.....13
1.2.9 Estados de flujo. 14
1.2.10 Calibración 15
CAPITULO II 17
CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y MODELACION EN EL SOFTWARE IBER 2D......17
2.1 Área de Estudio.....17
2.2 Construcción del modelo 18

2.3 Toma de la información en campo. 19
2.3.1 Vuelo de Dron. 19
2.3.2 Puntos de referencia. 19
2.4 Generación del MDE en el software AGISOFT PHOTOSCAN. 21
2.5 Generación del MDE de un tramo crítico en el Software HEC-RAS 22
2.6 Generación de un MDE final. 24
2.7 Modelación hidráulica en IBER 2D 28
2.7.1 Preproceso. 29
2.7.2 Proceso. 37
2.7.3 Postproceso. 38
CAPITULO III. 41
CALIBRACION Y RESULTADOS DEL MODELO. 41
3.1 Calibración del modelo. 41
3.2 Resultados 43
3.2.1 Calados máximos. 44
3.2.2 Velocidades máximas. 50
3.2.3 Cotas máximas 57
3.2.4 Comparación de las modelaciones con un MDE antiguo. 57
3.2.5 Análisis de las zonas más afectadas 64
CONCLUSIONES 65
RECOMENDACIONES 67
BIBLIOGRAFÍA 68
ANEXOS 70

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Zona de estudio. 17
Figura 2. 2. Vista en planta del tramo de análisis. 18
Figura 2.3.Ubicación de cada una de las fotos capturadas por el dron. 19
Figura 2. 4. Toma de puntos de referencia con el GPS diferencial Trimble. 20
Figura 2. 5. Ubicación de puntos de referencia tomados con GPS diferencial. 21
Figura 2.6. Vista en planta de la zona de estudio después de eliminar la vegetación.22
Figura 2. 7. Secciones elegidas para generar un nuevo MDE del tramo. 23
Figura 2. 8. Secciones Interpoladas en el software Hec-Ras. 23
Figura 2. 9. Comandos que generan un nuevo MDE a partir de secciones. 24
Figura 2. 10. MDE de un tramo crítico generado en el software HEC-RAS. 24
Figura 2. 11. Ventana para la generación de un nuevo MDE en ArcGis. 25
Figura 2. 12. Ventana para recortar un tramo de la zona de análisis. 26
Figura 2. 13. Vista en planta del tramo más crítico (zona verde). 26
Figura 2.14. Ventana para convertir un archivo en formato RASTER a formato ASCII. 27
Figura 2. 15. Polígono con las diferentes áreas de los usos de suelo generado en ARC GIS. 27
Figura 2. 16. Condiciones de IBER para generar una geometría. 29
Figura 2. 17. Malla obtenida en el IBER. 30
Figura 2. 18. Ventana emergente con la que se asigna el calado inicial a la geometría. 31
Figura 2.19. Flujo permanente y no permanente representados por sus diversas formas. 32
Figura 2. 20. Ventana con las condiciones de salida para el caso de estudio. 33
Figura 2. 21. Cuadro resumen de las condiciones de contorno. 34
Figura 2.22. Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018. ...35
Figura 2. 23. Caudales registrados durante el evento del día 14 de mayo del 2017. ..35
Figura 2.24. Vista Isométrica de malla estructura generada por el software IBER. ..36
Figura 2. 25. Coeficiente de Manning integrada a la malla generada por IBER. 37
Figura 2.26. Proceso de solución de las ecuaciones de Saint Venant en el software IBER. 38
Figura 2. 27. Ventana Emergente para exportar resultados en formato ASCII. 39
Figura 3. 1. Vista en planta de la mancha de inundación real (rayada) y la generada por el modelo (verde). 42
Figura 3. 2. Vista en planta de la mancha generada con el modelo antiguo (amarillo), modelo de estudio (morado). 43
Figura 3.3. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). 44
Figura 3. 4. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s). 44
Figura 3. 5. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s). 45
Figura 3.6. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s). 45

Figura 3. 7. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s). 46
Figura 3. 8. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s). 46
Figura 3. 9. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma: Validación 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s). 47
Figura 3.10. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s). 47
Figura 3. 11. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma: Validación 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s). 48
Figura 3. 12. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s). 48
Figura 3. 13. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s). 49
Figura 3. 14. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s). 49
Figura 3. 15. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s). 50
Figura 3. 16. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). 51
Figura 3. 17. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s). 51
Figura 3. 18. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s). 52
Figura 3. 19. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s). 52
Figura 3. 20. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s). 53
Figura 3. 21. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s). 53
Figura 3. 22. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma: Validación 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s). 54
Figura 3. 23. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s). 54
Figura 3. 24. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma: Validación 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s). 55
Figura 3. 25. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 8. (Caudal punta = 273 m3/s). 55
Figura 3. 26. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s). 56
Figura 3. 27. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s). 56
Figura 3. 28. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s). 57
Figura 3. 29. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). 58

Figura 3. 30. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3) con el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s).....58
Figura 3. 31. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s). 59
Figura 3. 32. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s). 59
Figura 3. 33. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s). 60
Figura 3. 34. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s). 60
Figura 3. 35. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma del evento del 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s). 61
Figura 3. 36. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s). 61
Figura 3. 37. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma del evento del 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s). 62
Figura 3. 38. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s). 62
Figura 3. 39. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s). 63
Figura 3. 40. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s). 63
Figura 3. 41. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s). 64
Figura 3. 42. Comparación de la mancha de inundación de la zona crítica cercana a la Av. De las Américas con tres caudales diferentes, rojo (100 m3/s), azul (250 m3/s) y amarillo (350 m3/s).....64
Figura A1. 1. Interfaz del software PhotoScan.....70
Figura A1. 2. Comandos para duplicar el chunk. 71
Figura A1. 3. Ventana emergente para duplicar el chunk.....71
Figura A1. 4. Tipos de selecciones 71
Figura A1. 5. Esfera central con la que se logra rotar alrededor de los ejes X,Y, Z. .72
Figura A1. 6. Comandos para redimensionar el volumen de trabajo. 72
Figura A1. 7. Redimensionando la caja de trabajo.....72

Figura A1. 8. Vista en planta de la zona de estudio después de eliminar la vegetación. 73
Figura A1. 9. Vista lateral del proyecto antes de eliminar la vegetación. 73
Figura A1. 10. Vista lateral del proyecto después de eliminar la vegetación. 73
Figura A1. 11. Ventana emergente con la que se obtiene el MDE.....74
Figura A1. 12. MDE generado. 74
Figura A2. 1. Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018. .75
Figura A2. 2. Caudales registrados durante el evento del día 14 de mayo del 2017. .75
Figura A2. 3. Hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). 76
Figura A2. 4. Hidrograma 2 (caudal punta = 126.4 m3/s). 76
Figura A2. 5. Hidrograma 3 (caudal punta = 153.9 m3/s). 77
Figura A2. 6. A2.6. Hidrograma 4 (caudal punta = 176.2 m3/s).....77
Figura A2. 7. Hidrograma 5 (caudal punta =202.6 m3/s). 78
Figura A2. 8. Hidrograma 6 (caudal punta = 227.1 m3/s). 78
Figura A2. 9. Hidrograma 7 (caudal punta = 258 m3/s). 79
Figura A2. 10. Hidrograma 8 (caudal punta = 273 m3/s). 79
Figura A2. 11. Hidrograma 9 (caudal punta = 300.3 m3/s). 80
Figura A2. 12. Hidrograma 10 (caudal punta = 324.3 m3/s). 80
Figura A2. 13. Hidrograma 11 (caudal punta = 351.3 m3/s). 81
Figura A3. 1. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). 82
Figura A3. 2. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s). 82
Figura A3. 3. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s). 83
Figura A3. 4. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s). 83
Figura A3. 5. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s). 84
Figura A3. 6. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s). 84
Figura A3. 7. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el evento producido el 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s). 85
Figura A3. 8. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s). 85
Figura A3. 9. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el evento del 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s). 86
Figura A3. 10. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s). 86
Figura A3. 11. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s). 87
Figura A3. 12. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s). 87
Figura A3. 13. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s). 88

Figura A4. 1. Ventana emergente, para ingresar la geometría 89
Figura A4. 2. Ventana emergente 1 en el proceso de importación de la Geometría. .89
Figura A4. 3. Ventana emergente 2 en el proceso de importación de la Geometría. .90
Figura A4. 4. Ventana emergente, en la que se selecciona la imagen. 90
Figura A4. 5. Ventana emergente en la que se ingresa el valor de los caudales y la parte de la geometría por la que ingresa este. 91
Figura A4. 6. Ventana emergente de las configuraciones de contorno salida.....91
Figura A4. 7. Ventana emergente que ayuda a seleccionar. 92
Figura A4. 8. Ventana emergente con la que se asigna el calado inicial a la geometría. 92
Figura A4. 9. Ingreso de caudal en las condiciones de contorno de Entrada.....93
Figura A4. 10. Asignación de las líneas de la geometría por las que ingresa el caudal. 93
Figura A4. 11. Ventana emergente con la que se elimina las líneas duplicadas de los triángulos, al momento de generar la malla. 94
Figura A4. 12. Ventana emergente que se obtiene al momento de la generación de la malla.....94
Figura A4. 13. Ventana automática que aparece al finalizar la construcción de la malla. 95
Figura A4. 14. Ventana en la que puede editar los valores del coeficiente de rugosidad. 95
Figura A4. 15. Ventana emergente para seleccionar el archivo del coeficiente de Manning. 96
Figura A4. 16. Ventana automática que aparece después de leer el documento del coeficiente de Manning.....96
Figura A4. 17. Ventana emergente en la que se describe los intervalos de tiempo de la modelación. 96
Figura A4. 18. Ventana emergente para lograr el proceso de la modelación. 97
Figura A4. 19. Ventana emergente en la que se muestra el avance de la modelación. 97
Figura A4. 20. Ventana emergente en la que se muestra cada uno de los resultados.98
Figura A4. 21. Icono donde muestra como cambiar los valores mínimos que se van a mostrar en los resultados, valor recomendado 0.01.....98
Figura A4. 22. Ventana emergente, con la que se generará una animación.....99
Figura A4. 23. Ventana emergente en la que se selecciona la ubicación de la animación. 99
Figura A5. 1. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s) 100
Figura A5. 2. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s) 100
Figura A5. 3. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s). 101
Figura A5. 4. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta=200 m3/s) 101
Figura A5. 5. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta =200 m3/s). 102

Figura A5. 6. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta =200 m3/s). 102
Figura A5. 7. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s). 103
Figura A5. 8. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s). 103
Figura A5. 9. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s). 104

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. Coordenadas de los puntos de referencia.....20
Tabla 2.2. Coeficientes de Manning. 28
Tabla 2.3. Tipo de Régimen. 32
Tabla 3.1. Nuevos coeficientes de Manning. 42

INDICE DE ANEXOS

Anexo A.1. Uso del Software Agisoft PhotoScan. 70
Anexo A.2. Hidrogramas para la modelación. 75
Anexo A.3. Gráficas de cotas máximas. 82
Anexo A.4. Manejo del software IBER versión 2.5. 89
Anexo A.5. Gráficas del número de Froude.....100

Jaime Leonardo Caivinagua Arévalo
Trabajo de Graduación
Ing. Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, M.Sc.
Enero 2020

Modelación Hidráulica en 2D del Tramo Calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) – Av. De las Américas, del Río Yanuncay.

Introducción.

A lo largo de la historia los ingenieros han buscado soluciones para mejorar las condiciones de vida de sus semejantes, desde la construcción de servicios de alcantarillado y agua potable para garantizar una adecuada salubridad, hasta gigantes rascacielos que en ciertos casos representan la protestad de ciertas ciudades.

Para los ingenieros civiles siempre ha sido un tema primordial el resguardar la seguridad de la población; elaborando elementos estructurales idóneos a cada caso, diseños viales para una movilidad segura, obras para el control de inundación, o implementando metodologías modernas para predecir el comportamiento de ríos y prepararse para las peores situaciones en el caso de presentarse un evento extremo.

El comportamiento hidráulico requiere un estricto control debido a la enorme energía que representa una cantidad significativa de agua fluyendo a gran velocidad. En particular, al generarse un evento extremo en un río y provocarse un desbordamiento, este puede llegar a generar grandes daños. Es por esto, que se pretende obtener un modelo hidráulico para conocer el comportamiento del río Yanuncay en esas condiciones, evitar incidentes mayores y garantizar seguridad para los pobladores cercanos a las riveras.

La evolución de la modelación hidráulica ha dado grandes pasos, existen los modelos unidimensionales (1D) que tienen una geometría básica, basada en una línea principal que representa el cauce y secciones cada cierta distancia. Los resultados que este genera es una velocidad perpendicular a cada sección debido a la suposición de flujo unidimensional. Estos modelos se vuelven inestables cuando el flujo es rápido o se

genera un cambio de régimen; por lo que, en este caso se recomienda acudir a los modelos que tengan una dimensión adicional (Guarniz, 2014).

Después están los modelos bidimensionales (2D), en estos se considera las variaciones de velocidad en las dos direcciones del plano horizontal (x, y) y se asimila en la columna vertical de agua que la velocidad y todos los parámetros se promedian, asumiéndose un solo valor. Estos modelos son muy útiles cuando la geometría del cauce presenta una gran diferencia relacionando el ancho con el fondo, y su principal defecto surge cuando la variación vertical de la velocidad no es despreciable.

Finalmente, están los modelos hidráulicos tridimensionales (3D); en estos se logra calcular cada una de las velocidades en las tres componentes espaciales. Por consecuencia son los modelos más avanzados actualmente y su campo de aplicabilidad es muy extenso. Sin embargo, uno de sus mayores inconvenientes es la resolución completa de las ecuaciones de Reynolds, las mismas que se basan en una discretización de las ecuaciones en 3D, requiriendo una gran capacidad computacional.

El lograr conocer el alcance que puede llegar a tener el desbordamiento de un río se basa en diferentes herramientas, iniciando con el levantamiento de información hidrológica en el cual se logra conocer las precipitaciones, los niveles de agua y los hidrogramas que se dan en una cierta cuenca. Esta información representa un pilar fundamental para las simulaciones matemáticas, como las modelaciones hidráulicas, en las que se observa el comportamiento del fluido a través de la cuenca hidrográfica. Estas herramientas con una adaptación preliminar a su lugar de análisis nos permiten conocer la magnitud del evento, su alcance y de esta forma generar acciones para proteger tanto vidas humanas, como bienes cercanos a la zona. (Fernandez de Cordova, 2019)

Este proyecto propone obtener un modelo hidráulico en dos dimensiones del tramo calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) – Av. de las Américas, usando el software IBER versión 2.5. Se describirá el comportamiento de las aguas al darse un evento extremo, donde se representará las zonas de inundación y las velocidades utilizando esquemas gráficos en forma de mapas de color, logrando una comprensión visual más ágil.

Antecedentes

El río Yanuncay es uno de los más importantes de la ciudad de Cuenca, está ubicado al noroeste de la ciudad, nace al sur del Parque Nacional Cajas a una altura de 4000 m.s.n.m. y desemboca en el río Tomebamba. En este recorrido pasa por varios poblados como: Barabón, San José, La Inmaculada, Minas, cerca del Cuenca Tenis y Golf Club. Circula por la parte urbana de la ciudad: paralelo a toda la Av. Primero de Mayo, a la altura de la Universidad del Azuay es alimentado por el caudal del río Tarqui y finalmente recorre en la dirección de la Av. 24 de mayo hasta el parque El Paraíso.

La Cuenca del río Yanuncay tiene un área de 413.9 km2, con una pendiente promedio de 2.5%. Su cobertura vegetal ha tenido grandes cambios debido a que los pobladores han desaparecido la cobertura nativa (bosques nativos y chaparros) para transformarla en zonas ganaderas, y en los últimos años ha iniciado también la actividad turística y piscícola.

En el año 2017 fue publicada una investigación en la cual se usaron los softwares HEC-HMS y HEC-RAS para conocer los parámetros hidrológicos e hidráulicos del río Yanuncay en el tramo comprendido entre Barabón y los tres puentes. Adicionalmente, los programas computacionales ArcGIS y la extensión HEC-GeoRAS ayudaron a definir las zonas más propensas a inundaciones para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. También se logró definir caudales máximos que van desde 114.3 m3/s a 257 m3/s para el menor y mayor periodo de retorno respectivamente. Otros de los parámetros que se obtuvieron son las alturas de calado máximo que van desde los 2.7 m a 4.8 m, la velocidad de circulación del fluido que va desde 0.7 m/s a 5 m/s, y se determinó que la mayor parte de la extensión del río actúa en un régimen de flujo subcrítico. “El conocimiento de las diferentes zonas potencialmente inundables debe ser considerado al momento de definir Planes de Ordenamiento Territorial (PDOT), procedimientos de gestión y de emergencia para prevenir y evitar los daños debidos a inundaciones” (Sacoto, 2017).

En el año 2019 se generó un modelo hidráulico unidimensional del río Yanuncay con los softwares ArcGIS y HEC-GeoRAS, tomando en cuenta la ubicación de las

estaciones de medición de nivel y caudal, y las franjas más susceptibles a inundación (sector Barabón y la zona urbana de la ciudad de Cuenca). El tramo de análisis tiene una longitud de 25 km, el cual inicia en la estación hidrológica de Pucán y termina justo antes de la intersección con el río Tarqui. (Fernandez de Cordova, 2019)

En el año 2016 se realizó una modelación numérica bidimensional, en un tramo que tenía una pendiente de 1.34% y una longitud de 860 m del río Yanuncay, con la ayuda del software IBER. Se conoció el flujo de transporte de sedimentos de este río utilizando una malla estructura con una arista de 3 m, concluyendo que se requiere de un modelo físico para calibrar el modelo y tener fines aplicativos. (Pesantez & Sanchez, 2016)

Justificación

El río Yanuncay de la ciudad de Cuenca es uno de los afluentes con un caudal importante. Genera grandes preocupaciones e inconvenientes en las temporadas invernales, específicamente cuando se dan precipitaciones prolongadas con altas intensidades, debido a que su alto caudal supera la capacidad del cauce y sus aguas cubren grandes extensiones e impiden las actividades cotidianas de los moradores de la zona.

El río Yanuncay incrementó su caudal y junto con esto la peligrosidad para las personas que habitan cerca de las riveras; uno de los primeros eventos extremos, se dio en el año de 1950, el cual no causó catástrofes; sin embargo, generó gran temor en la población. Más tarde, en 1989 nuevamente se dio una crecida, afectando a varias calles aledañas al cauce del río Yanuncay. Otro registro importante sucedió el 8 de mayo de 1995, en el que se reactivó una alarma de desbordamiento de este afluente. Varios años después reapareció un evento extremo, el día 21 de junio del 2007, se registró un caudal de 240 m3/s, generando varios desbordamientos a lo largo de su cauce. Más tarde en el mes de mayo del 2012 nuevamente el río Yanuncay se desborda luego de una hora de fuertes precipitaciones. (Alvarado, 2015) Finalmente una de las ultimas crecidas se dio el 24 de mayo del 2018 en el tramo calle Carmela Malo - Av. De la Américas, llegando a registrar un flujo de 211 m3/s, (Tiempo, 2018). Al siguiente año, la tarde y noche del martes 5 de febrero nuevamente se desbordó en varios tramos, aunque no existieron víctimas mortales, se inundaron varios parques lineales.

El río Yanuncay carece de un modelo en dos dimensiones que permita conocer el movimiento del agua cuando se desborda del cauce principal y las velocidades críticas que se producen en un evento extremo, información que se usaría para precautelar y resguardar la seguridad de los ciudadanos que viven cerca o concurren a esos lugares.

La modelación hidráulica ha sido uno de los avances más importantes en estos tiempos, debido a que ha generado una optimización de recursos, tiempo, y aporta con datos importantes del comportamiento de afluentes hídricos al momento de presentarse un evento extremo, con los que se pueden generar alarmas tempranas evitando incidentes mayores.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar la modelación hidráulica en dos dimensiones de un tramo del río Yanuncay calle Ciudad de Cuenca – Av. De las Américas.

Objetivos específicos

1. Obtener un modelo digital de elevaciones depurado del tramo analizado.

2. Analizar el modelo en el paquete computacional IBER y obtener cada uno de los escenarios, con los hidrogramas de caudal.

3. Determinar cuáles son las zonas más afectadas por el desbordamiento del rio Yanuncay en el tramo de estudio.

4. Obtener las velocidades del flujo en las zonas más críticas del cauce del tramo de estudio del rio Yanuncay.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1 Estado del Arte

El hombre siempre ha sentido la curiosidad de conocer el comportamiento de todo lo que le rodea, y actualmente continúan las investigaciones que aportan las metodologías para lograr conocer la naturaleza de ciertos eventos (Mesa & Jhony, 2011). La modelación es una de las metodologías más usadas el día de hoy, una de las razones principales es la optimización de recursos.

El uso de elementos finitos dentro de todas las ramas de la ingeniería ha tenido gran importancia en el desarrollo de software y generación de modelos digitales, pues se aprovecha la potencia computacional y se logran cálculos ultraligeros.

IBER se ha desarrollado para dar cobertura a varios temas de la hidráulica, dentro de los cuales están: estudios de inundación, obras hidráulicas, transporte de sedimentos, estudios de canales, etc.

En el 2015 se realizó una tesis de pregrado de la Universidad de Cuenca, con el fin de obtener resultados de forma matemática, y así conocer los niveles de flujo, en estado natural, y después de aplicar las obras hidráulicas que permitan captar el caudal necesario en el río Quevedo, mediante la modelación en 1D y 2D con HEC-RAS e IBER respectivamente, debido a que un modelo real era demasiado costoso. ‘‘De la modelación en 1D y 2D, se obtuvo mapas de inundación semejantes, lo que indica que se puede usar el modelo HEC-RAS para modelar el flujo en este tipo de ríos. De los resultados de la modelación bidimensional en IBER se verificó que las obras de disipación muestran un correcto funcionamiento’’ (Castro, 2015).

En el año 2018 se realizó un estudio técnico, en el que se realizó una caracterización de los principales procesos morfofluviales, de erosión, y un modelado bidimensional con la herramienta computacional IBER, para identificar las zonas críticas y poder dar soluciones de encauzamiento, protección de márgenes y la seguridad de obras existentes de un tramo del río Tarqui en la ciudad de Cuenca. Finalmente entregaron un predimensionamiento a nivel de prefactibilidad para lograr un fortalecimiento de los márgenes. (Rodas, 2018)

En el año 2015 se realizó una investigación de tesis en la Universidad de Cuenca, para el río Calabí, en la provincia de los Ríos, en el cual se pretendía conocer el

comportamiento del flujo y la influencia que generaría la implementación de una bocatoma en el mismo. Se empleó el software bidimensional numérico IBER, logrando identificar y validar los parámetros, para realizar un análisis hidrodinámico y determinar la capacidad de transporte de sedimentos. (Salamea, 2015).

En el año 2016 se realizó una tesis de pregrado en la Universidad de Cuenca, enfocada a las tasas de transporte sedimentos en el río Yanuncay, en la provincia del Azuay, utilizando el software computación IBER. Se usó una malla triangular con una arista de 3 metros y se lo evaluó con varios caudales de crecida. También, se tomaron varios datos de campo como; la rugosidad y la granulometría para obtener el tamaño y tipo de las partículas en 4 puntos del cauce. Con el modelo generado se compararon los resultados obtenidos, con las ecuaciones empíricas de Meyer Peter & Müller, Van Rijin y Engelund and Hansen, llegando a concluir que la tasa de transporte en el fondo del cauce de este río sale mucho más grande con las ecuaciones empíricas, y se necesitará un modelo físico para calibrar los datos, para que el estudio tenga fines aplicativos (Pesantez & Sanchez, 2016).

Existe una rama de la mecánica de fluidos que utiliza softwares computacionales con el fin de simular ciertas situaciones hidráulicas mediante la resolución numérica de las ecuaciones en un dominio discreto en una, dos y tres dimensiones. Por el momento la modelación en tres dimensiones es la más avanzada, y gracias al desarrollo tecnológico que ha venido dándose se pueden simular situaciones muy complejas como la del flujo turbulento. Este es el caso que se aplica en el canal multipropósito del laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos del campus de Balzay de la Universidad de Cuenca, en el que se pretende “caracterizar el desempeño hidráulico, así como la configuración e influencia de las condiciones geomorfológicas del flujo de aproximación a la entrada” (Maurad, 2017) con la ayuda del programa computacional FLOW 3D, para finalmente comparar los resultados obtenidos mediante el software con los que se dan en los diseños, con el propósito de optimizarlos y mejorarlos.

1.2 Marco Teórico.

La investigación y obtención de información mediante un modelo virtual, a resultado un método mediante el cual se puede ahorrar una gran cantidad de recursos, logrando excelentes resultados.

1.2.1 Modelación

La modelación ha tenido gran desarrollo en el campo de la hidráulica. Sus inicios tuvieron lugar hace mucho tiempo, los cuales han servido de base para los principios fundamentales de la hidráulica. Sin embargo, los conceptos de hoy en día recientemente han sido aplicados en modelos en tamaño real. Los modelos hidráulicos existen de varios tipos: están los físicos, análogos y los matemáticos, de estos últimos provienen los modelos de simulación numérica. (Sacoto, 2017). De manera general se puede decir que la modelación es el proceso mediante el cual se genera una representación de una realidad parcial o en su totalidad, en el que se puede intervenir cambiando parámetros y variables para lograr comprender ciertos hechos.

1.2.2 Modelo hidrológico

Ponce (1989) citado por Sacoto (2017) asegura que: un modelo de una cuenca hidrológica es un conjunto de contemplaciones matemáticas que describen ciertas etapas en el proceso de transformación de la precipitación en escorrentía. Las técnicas de modelación son aplicables en cuencas de todos los tamaños, se emplea en cuencas con áreas desde pocas hectáreas hasta las más grandes con miles de kilómetros cuadrados.

1.2.3 Modelo hidráulico

Un modelo hidráulico es un prototipo virtual que representa un campo hidrográfico. Con este se obtiene el comportamiento y se pronostica su labor en condiciones extremas para generar procedimientos de resguardo ante hechos peligrosos.

Es un prototipo que requiere de un modelo digital de elevaciones y un software computacional, este último se solventa de métodos o técnicas numéricas, para resolver las ecuaciones que tratan de representar el fenómeno. Con sus resultados se logrará identificar las extensiones inundadas y las velocidades del flujo en un evento extremo. Según varios autores, los modelos 2D representan la tecnología de punta para la modelación de inundaciones. (Castro & Patrick, 2011).

Un modelo matemático es una representación ligera de un cierto tramo de la naturaleza y de toda la infraestructura existente.

La generación de modelos además de estar aprobada es un método que permite progresar y evolucionar la forma de hacer ciencia. (Rocha, 2003)

1.2.4 Modelos utilizados en la modelación hidráulica

Los modelos utilizados en los softwares de modelación hidráulica en 2D como IBER se basan en las ecuaciones de Saint Venant, estas a su vez, utilizan conceptos de la conservación de la masa y momento para calcular la superficie libre de flujo estacionario y no estacionario. Se basan en una discretización numérica por el método de volúmenes finitos, estos cálculos utilizan metodologías muy simples, pero con resultados bastante buenos. En IBER existe la posibilidad de realizar cambios de régimen, aplicar a cauces con figuras complejas, llanuras de inundación y con obras hidráulicas en el tramo de análisis.

El campo de la modelación hidráulica bidimensional ha llegado a generar un gran impacto en el análisis de los fenómenos hídricos en cuencas hidrográficas. Este método se utiliza cuando las dimensiones horizontales tienen gran relevancia en comparación con la vertical, es decir cuando las llanuras de inundación son importantes. Otra de las razones surge cuando el cauce es demasiado irregular, es decir, tiene ensanchamientos y estrechamientos, situación común en el río Yanuncay.

1.2.5 Modelos en 1D, 2D y 3D

Los modelos unidimensionales en aguas someras son aplicados para ríos con tipologías singularmente unidimensionales. Estos se los podría representar mediante una línea que figure el cauce y asignarle cada cierto intervalo una sección.

Los modelos 1D asumen una velocidad quasi-uniforme en toda la sección. Cuando esta propiedad se va perdiendo en el río analizado, la inefectividad del modelo aumenta, debido a que se ingresan errores importantes en las ecuaciones 1D. Adicionalmente se requiere analizar si existen zonas de recirculación en planta, en tal caso la dirección del flujo ya no sería únicamente en la dirección del cauce. Para modelos bidimensionales la definición de la geometría es uno de los factores más importantes. (Garcia, 2017)

> Ahmad *et al.* Como se citó en Castro & Patrick (2011), afirman que: "Los modelos de hidráulica de ríos usados para la modelación de inundaciones pueden clasificarse como modelos hidrodinámicos 1D o 2D. Los modelos hidrodinámicos 1D están basados en las ecuaciones de Saint Venant (leyes de conservación de la masa y momento) para calcular la superficie libre del agua para flujo estacionario y no estacionario en canales abiertos. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito. Por otra parte, en los modelos hidrodinámicos 2D las ecuaciones de conservación de la masa y momento son expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución. Los modelos 2D pueden resolverse usando el método de los elementos finitos."

Los modelos en 3D muestran un análisis detallado de flujo local, vertederos o pilas de puentes, estos modelos resuelven las ecuaciones promedias de Reynolds en tres dimensiones, usando el método de volúmenes finitos. (Zamorano, 2014). Con una modelación 3D se logra una caracterización de la velocidad, presiones y altura de agua. En este modelo se puede decir que existe una disipación de energía más realista.

1.2.6 Softwares para modelar

Dentro de los softwares de uso libre que sirven para modelar hidráulicamente están; QGIS el cual tiene la mayoría de las herramientas de gis y trabaja con datos vectoriales, crea secciones, planos, realiza análisis espaciales y proyecciones de vuelo. Adicionalmente existe un software con el que se complementa, este es SAGA GIS, el mismo que carece de una interfaz gráfica de alta calidad, sin embargo, tiene un gran potencial dentro de los algoritmos encargados del análisis hídrico, lo mismos que facilitan la creación de superficies de ríos, cuencas, o corrección de superficies hidrológicas e incluso correr algunos modelos hidrológicos. Por otro lado, con iRIC se puede obtener todo el entorno de inundación de un río, el mismo que podría ser extraído para un posterior uso. Este programa de computador puede obtener la erosión o transporte de sedimentos en un cauce, y tiene una interfaz de usuario bastante agradable. Un software que incluye modelación bidimensional en sus últimas

versiones es HEC-RAS, el mismo que es muy conocido debido a su interfaz de uso, bastante fácil y su amplia difusión. Este fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, utiliza la gradiente y la topografía para evaluar el tirante y obtener las velocidades, las zonas de inundación, el transporte de sedimentos y la temperatura del agua. Finalmente, FLOW 3D es uno de los softwares más avanzados en tres dimensiones. Este requiere gran capacidad computacional para operar sin inconvenientes y tiene una variedad de simulaciones desde lo relacionado al agua y medio ambiente, pasando por la aplicación en microfluidos y varias aplicaciones aeroespaciales, generando mallas con un número de hasta 14.6 millones de celdas.

1.2.7 Sotfware IBER

IBER es un paquete computacional desarrollado conjuntamente entre el Instituto Flumen, el grupo GEAMA de la Universidad de la Coruña y CIMNE con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio de Fomento y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España) (Ribé, Blade, & Dolz, 2017). Este software viene con tres módulos principales de cálculo: un módulo hidrodinámico, uno de turbulencia y uno de arrastres de sedimentos, todos estos se combinan y trabajan sobre una malla que puede ser o no estructurada para lograr una modelación de flujo superficial. Y mediante volúmenes finitos resolver las ecuaciones bidimendionales de Saint Venant. (Cueva, Cañón, & Cea, 2019)

Módulo Hidrodinámico.

El módulo Hidrodinámico resuelve las ecuaciones promedias en profundidad de aguas someras conocidas como Shallow Water Equations (2D - SWE) o también como las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones. Estas expresiones matemáticas consideran que la distribución tanto de la presión hidrostática como la velocidad sea relativamente uniforme en función de la profundidad. Tomando en cuenta que estos conceptos se cumplen en el flujo de ríos y por la corriente generada por la marea en estuarios. Actualmente, para modelos bidimensionales aplicados a dinámica fluvial, litoral y zonas de inundación es muy común el uso de ecuaciones para aguas someras o más conocidas como ecuaciones de Saint Venant. (CEDEX, 2014)

Ecuaciones hidrodinámicas.

Las expresiones matemáticas que se resuelven en el módulo hidrodinámico son las ecuaciones de conservación de masa y momento en dos direcciones, y se las muestra a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial hU_x}{\partial x}+\frac{\partial hU_y}{\partial y}=M_S$$

$$\frac{\partial hU_x}{\partial t}+\frac{\partial hU_x^2}{\partial x}+\frac{\partial hU_xU_y}{\partial y}=-gh\frac{\partial Z_s}{\partial x}+\frac{\tau_{s,x}}{\rho}-\frac{\tau_{b,x}}{\rho}-\frac{g}{\rho}\frac{h^2}{2}\frac{\partial \rho}{\partial x}+2\,\Omega\,\sin\lambda\,U_y+\frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x}+\frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y}+M_X$$

$$\frac{\partial hU_y}{\partial t}+\frac{\partial hU_xU_y}{\partial x}+\frac{\partial hU_y^2}{\partial y}=-gh\frac{\partial Z_s}{\partial y}+\frac{\tau_{s,y}}{\rho}-\frac{\tau_{b,y}}{\rho}-\frac{g}{\rho}\frac{h^2}{2}\frac{\partial \rho}{\partial y}-2\,\Omega\,\sin\lambda\,U_x+\frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial x}+\frac{\partial h\tau_{yy}^e}{\partial y}+M_Y$$

Donde:

h: calado.

U_x U_y: velocidad en la dirección x & y promediadas en profundidad.

g: aceleración de la gravedad.

Z_s: elevación de la lámina libre.

τ_s: rozamiento en la lámina libre con el viento.

τ_b: rozamiento del fondo con el suelo.

ρ: densidad del agua.

Ω: velocidad angular de la rotación de la Tierra.

λ: latitud del punto considerado.

τ_{xx}^e τ_{xy}^e τ_{yy}^e: tensiones tangenciales efectivas horizontales.

Ms Mx My: términos fuente/semidero de masa y momento.

Adicionalmente se incluyen los términos fuente de: presión hidrostática, pendiente de fondo, tensiones tangenciales viscosas y turbulentas, precipitación e infiltración.

1.2.8 Tipos de Flujo.

En canales abiertos el flujo se comporta de diferentes formas y en función de esto, se definirá como un cierto tipo de flujo. La clasificación en este contexto depende de la variación de la altura del flujo con respecto al tiempo y espacio.

***Flujo permanente*:** Es aquel en el que en un canal abierto la altura del agua no varía con respecto al intervalo de tiempo analizado y en el cual se cumple lo siguiente:

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

Donde:

Q: caudal o flujo de agua [m3/s]

A: área de la sección analizada [m2]

V: velocidad del flujo [m/s]

Flujo no permanente: Cuando la altura del agua varia con el tiempo en el tramo analizado

***Flujo espacialmente variado*:** Cuando la cantidad de flujo varía, es decir, existen ingresos o salidas de parte del caudal en el trayecto.

***Flujo uniforme*:** Se produce cuando la altura del agua es constante en todos los puntos de control haciendo referencia al espacio, sin embargo, un flujo uniforme puede ser permanente y no permanente, esta última es imposible que se de en la vida real, por lo que se considerara únicamente flujo uniforme permanente.

***Flujo variado*:** Es aquel en el que la profundidad del agua varía con respecto al espacio, y se subclasifica en: permanente y no permanente. Adicionalmente podemos decir que hay el rápidamente variado y el gradualmente variado.

Finalmente se podría resumir esta clasificación de la siguiente manera:

A. Flujo Permanente
    1. Flujo uniforme
    2. Flujo variado
        a. Flujo gradualmente variado
        b. Flujo rápidamente variado
B. Flujo no permanente
    1. Flujo uniforme no permanente (raro)
    2. Flujo no permanente (es decir flujo variado no permanente)
        a. Flujo gradualmente variado no permanente
        b. Flujo rápidamente variado no permanente

(Chow, 1994).

1.2.9 Estados de flujo.

El flujo en canales abiertos está gobernado por las fuerzas de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales. El flujo es **laminar** si las fuerzas de viscosidad

están muy por encima de las inerciales y el flujo presenta líneas de partículas de agua bien definidas. El flujo es **turbulento** si las fuerzas de viscosidad están muy por debajo de la inerciales y las partículas de agua, muestran un movimiento muy irregular. Existe un estado intermedio entre los dos, el cual es conocido como **estado mixto o transicional.**

La correlación matemática que relaciona las fuerzas de inercia y viscosidad, se la conoce como el número de Reynolds y esta expresada como sigue:

$$Re = \frac{V * 4 * R}{\upsilon}$$

Donde:

V: es la velocidad [m/s]

R: es el radio hidráulico [m]

Re: es el número de Reynolds [adimensional]

υ: es la viscosidad cinemática [m2/s]

El número Reynolds bajo muestra que se trata de un flujo laminar y si es alto, pues entonces es un flujo turbulento. Varios experimentos en tuberías muestran que este puede variar de 2.000 a 50.000.

1.2.10 Calibración

La calibración es un proceso mediante el cual, se realiza una comprobación tratando de que el modelo reproduzca la realidad, caso contrario se realiza la edición de ciertos parámetros como: características físicas e hidráulicas, coeficientes de rugosidad con el objetivo de lograr un modelo con condiciones idóneas. (Rios, 2014)

La calibración del modelo consiste en la identificación de ciertos parámetros, los cuales se someten a un proceso iterativo de graduación, con el objetivo de que el modelo se asemeje lo máximo posible a la realidad y de esta forma obtener resultados correctos. (Ojeda & Tapia, 2011)

En la modelación de cauces naturales, generalmente la calibración consiste en un proceso iterativo, jugando con el coeficiente de Manning y parámetros de turbulencia. Comprobando las curvas: caudal/tirante del prototipo con el modelo, en ciertas secciones preestablecidas. (Rios, 2014)

CAPITULO II

CONSTRUCCION DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y MODELACION EN EL SOFTWARE IBER 2D.

2.1 Área de Estudio.

El tramo analizado del río Yanuncay Figura 2. 2. Vista en planta del tramo de análisis. está ubicado en la cordillera occidental de los Andes, en la provincia del Azuay. Este conforma la parte alta de la cuenca del río Paute. (Sacoto, 2017). El presente estudio abarca el tramo que inicia en la calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) ubicado en la zona 17S con coordenadas 716803 E, 9679216 N con una altura de 2604 msnm y termina en la Av. de las Américas con coordenadas 718594 E, 9678549 N con una altura de 2570 msnm. Figura 2. 1. Zona de estudio.

Figura 2. 1. Zona de estudio.
Fuente: Google Earth.

Las llanuras del río Yanuncay en el tramo de análisis están generalmente cubiertas de pasto natural (kikuyo). También existen pequeñas áreas que bordean el cauce con alta densidad de eucaliptos y con sembríos artesanales. Un poco más alejadas del eje del río existen zonas residenciales con vías totalmente impermeabilizadas y viviendas con modernos materiales de construcción dentro de los cuales predomina el hormigón.

2.2 Construcción del modelo

La generación del modelo digital de elevaciones (MDE) es la parte más importante y la que se debe manejar de una forma estrictamente cautelosa durante todo el proceso; desde la toma de información en campo, el postproceso y depuración de la información en oficina. Esto incluye uso de softwares, introducción de información, correcta configuración en los programas computacionales. Pues una modelación en dos dimensiones tiene alto porcentaje de dependencia de esta información base para lograr resultados satisfactorios, caso contrario se generarán efectos que no se acercan en absoluto a la realidad. Si el técnico encargado de la modelación no conoce en físico la zona de estudio, o no existen datos que ayuden a verificar los resultados, no habrá forma de comprobar si estos tienen sentido o no.

El proyecto inicio generando un modelo digital de elevaciones, con la ayuda de un dron del IERSE (Instituto de Estudio de Régimen Seccional del Ecuador) de la Universidad del Azuay. Este modelo se georreferencio con diez puntos tomados con GPS diferencial. Los detalles se presentan a continuación:

Figura 2. 2. Vista en planta del tramo de análisis.
Fuente: Autor.

2.3 Toma de la información en campo.

2.3.1 Vuelo de Dron.

El vuelo del dron se lo realizó un día que reunía condiciones idóneas; es decir, mañana soleada, con vientos leves y niveles del agua mínimos en el río. La altura de vuelo fue de 117 m, y se capturaron 756 fotografías Figura 2.3.Ubicación de cada una de las fotos capturadas por el dron. con las cuales se logró una resolución de 6 cm tanto en la ortofoto como en el MDE, se cubrió un área de 0.642 km2.

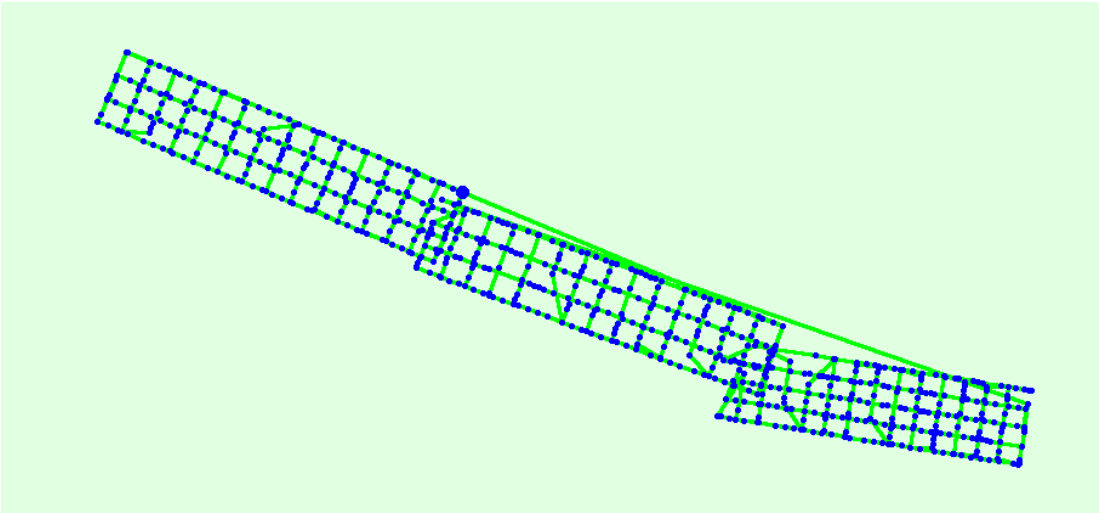

Figura 2.3.Ubicación de cada una de las fotos capturadas por el dron.
Fuente: Autor.

2.3.2 Puntos de referencia.

La toma de puntos Figura 2. 4. Toma de puntos de referencia con el GPS diferencial Trimble.para georreferenciar la información obtenida por el vuelo del dron es uno de los pasos más importantes. Dependiendo de la extensión del tramo de análisis, este va a requerir de un mayor número de puntos de control, y esto se verá reflejado en la calidad del MDE. Para el caso de estudio se realizó la toma de 10 puntos, con un GPS Diferencial marca Trimble Tabla 2.1. Coordenadas de los puntos de referencia., el cual tiene un margen de error de 5 mm en horizontal y 15 mm en vertical. Los puntos están estratégicamente distribuidos por todo el tramo de estudio para lograr una equidad entre Área/Punto. Figura 2. 5. Ubicación de puntos de referencia tomados con GPS diferencial.

Figura 2. *5*. Ubicación de puntos de referencia tomados con GPS diferencial.

Figura 2. 4. Toma de puntos de referencia con el GPS diferencial Trimble.
Fuente: Autor.

Tabla 2.1. Coordenadas de los puntos de referencia.

Punto	Nombre	Este	Norte	Elevación
1	tapa_puente	716805.104	9679232.3	2610.89431
2	tapa_edifiios	717862.824	9678710.21	2585.96829
3	tope_puente	718578.327	9678521.78	2575.30845
4	tapa_antigua	718083.301	9678728.95	2585.79513
5	piedra_blanca	718448.001	9678648.25	2580.12064
6	tapa_redondel	716775.715	9679160.08	2610.04544
7	tapa_escuela	717284.939	9678933.71	2598.11125
8	tapa_parter	718350.025	9678579.21	2576.34217
9	pente_mecanica	718611.994	9678571.45	2575.24143
10	tapa_esquina_1	717626.171	9678954.52	2595.67405

Fuente: Autor.

Figura 2. 5. Ubicación de puntos de referencia tomados con GPS diferencial.
Fuente: Autor.

2.4 Generación del MDE en el software AGISOFT PHOTOSCAN.

Este postproceso inicio importando las 756 fotos capturadas con la ayuda del dron, posteriormente se enlazó los puntos GPS y conjuntamente se generó la nube de puntos densa. Seguidamente se realizó la depuración de la imagen para eliminar cada uno de los pixeles pertenecientes a la cobertura vegetal Figura 2.6. Vista en planta de la zona de estudio después de eliminar la vegetación.*, que impedía la correcta representación del cauce del río y sus orillas, empleando varios comandos de rotación y zoom para seleccionar la información no deseada y descartarla. Mayor detalle de este procedimiento se muestra en el* Anexo A.1. Uso del Software Agisoft PhotoScan.

. Durante este procedimiento se obtuvo un tramo del cauce en el cual la deficiencia de información fue alta, sin embargo, al momento de generar el MDE, el software PhotoScan ejecuta una interpolación con los pixeles que bordean estas zonas para generar nueva información y cubrir estos vacíos. Únicamente que en este caso en particular debido al tamaño del orificio, la información obtenida no resultó ser tan precisa, por lo que se optó por la generación de un nuevo MDE (**2.5 Generación del MDE de un tramo crítico en el Software HEC-RAS** de este tramo para sobreponerlo al modelo digital de elevaciones original y de esta manera solucionar el inconveniente.

Figura 2.6. Vista en planta de la zona de estudio después de eliminar la vegetación.
Fuente: Agisoft PhotoScan.

2.5 Generación del MDE de un tramo crítico en el Software HEC-RAS

En el software HEC-RAS se cargó el MDE que fue generado y depurado en PhotoScan. Para posteriormente en GIS Tools / Ras Mapper que es una de las herramientas de HEC-RAS seleccionar ciertas secciones originales Figura 2. 7. Secciones elegidas para generar un nuevo MDE del tramo. Hecho esto, se procedió a comprobar ciertos detalles en cada una de las secciones; la eliminación de abscisas repetidas, imponer un número de Manning (el valor es irrelevante en esta sección) y adicionalmente se tiene que delimitar el cauce del rio. Cada una de las verificaciones anteriores deberán hacérselas para no tener inconvenientes al momento de la interpolación.

El proceso de la interpolación se lo hace dentro de la herramienta Geometric Data del paquete computacional HEC-RAS, ubicando aquí, en la barra de menú: Tools / XS Interpolation / Between Xs's y en la ventana emergente se escoge la opción "a una distancia constante". Para este caso particular se generó secciones cada 10 m Figura 2. 8. Secciones Interpoladas en el software Hec-Ras.

Finalmente, en la herramienta GIS Tools / Ras Mapper, se puede apreciar que está visible la nueva geometría, en esta se hace clic derecho / Export Layer / Create Terrain Geo Tiff from XS's (Channel Only) como se muestra en la Figura 2. 9. Comandos que generan un nuevo MDE a partir de secciones. Posteriormente se le da el tamaño de la celda,

para el caso de estudio 6 cm y se le asigna la ubicación para el archivo, con esto se obtendrá el MDE de este tramo listo para remplazarlo en el original.

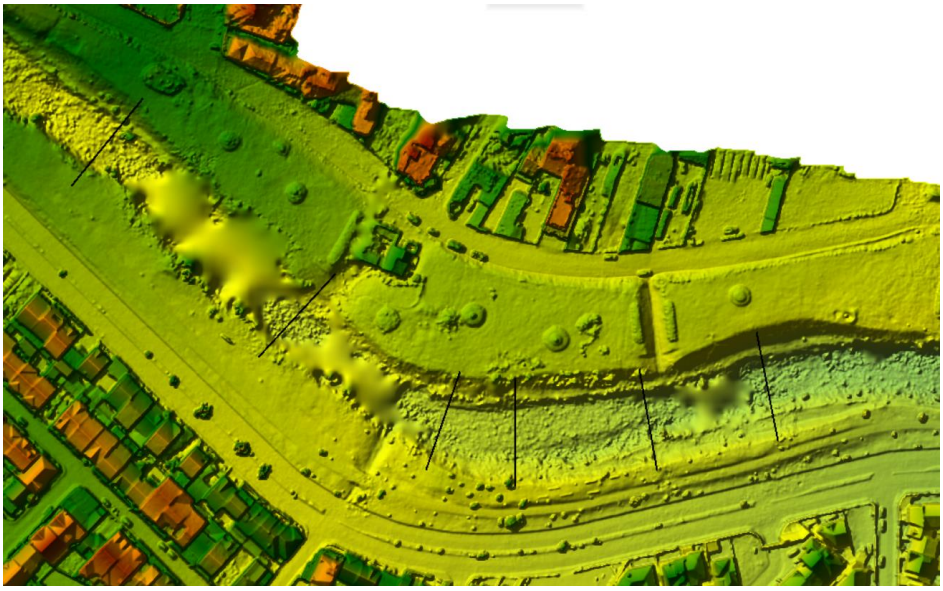

Figura 2. 7. Secciones elegidas para generar un nuevo MDE del tramo.
Fuente: Autor.

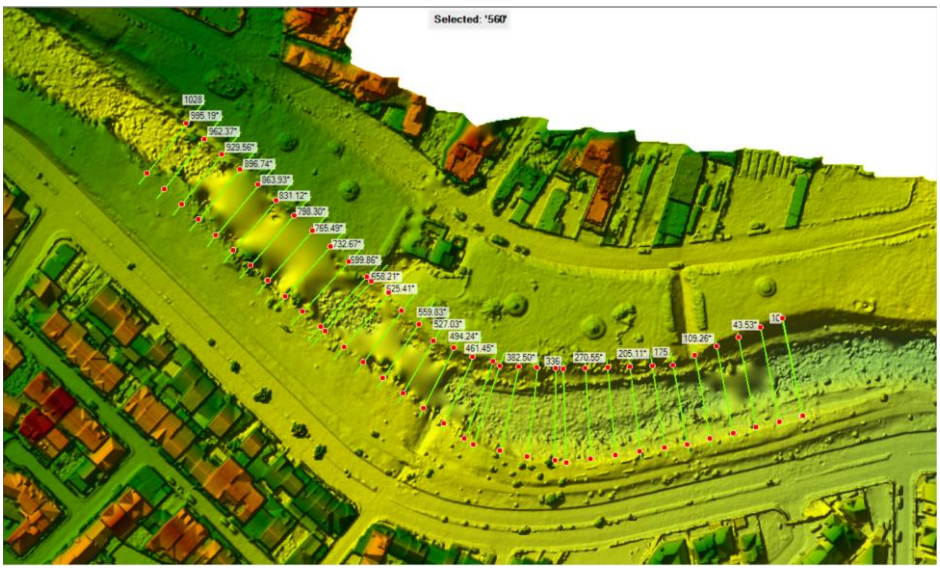

Figura 2. 8. Secciones Interpoladas en el software Hec-Ras.
Fuente: Autor.

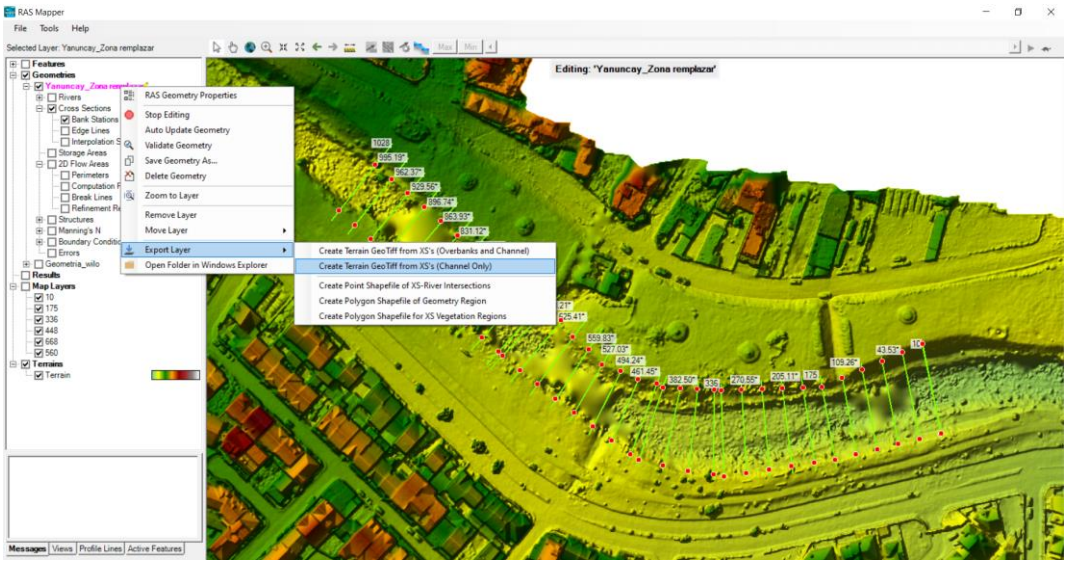

Figura 2. 9. Comandos que generan un nuevo MDE a partir de secciones.
Fuente: Autor.

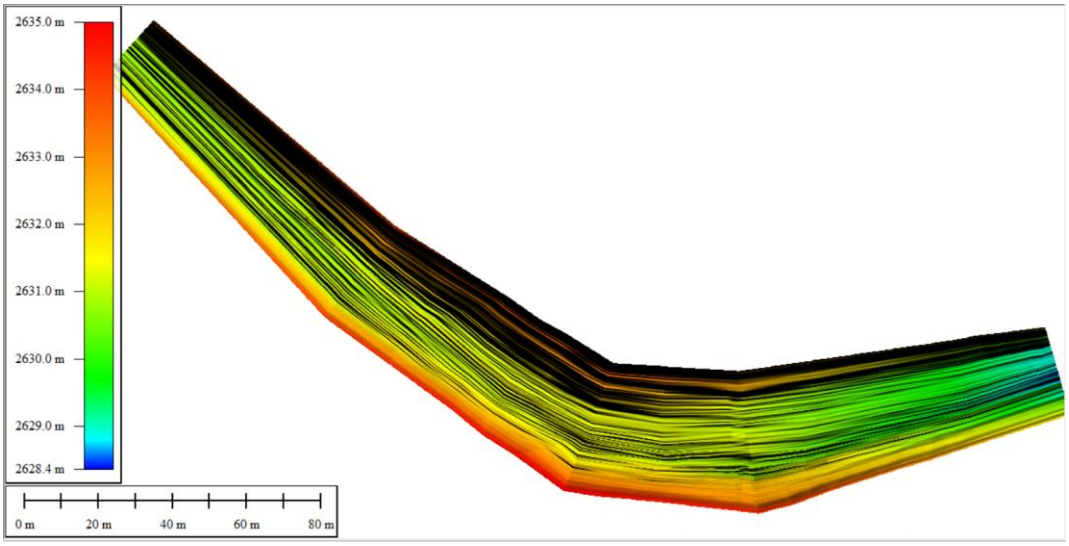

Figura 2. 10. MDE de un tramo crítico generado en el software HEC-RAS.
Fuente: Autor.

2.6 Generación de un MDE final.

El software ARCGIS se utilizó para unir el MDE del tramo crítico que se generó en el HEC-RAS, con el MDE original creado en el programa computacional PHOTOSCAN. Este procedimiento se logró con la herramienta: Mosaic To New Raster. En esta ventana Figura 2. 11. Ventana para la generación de un nuevo MDE en ArcGis. se debe cargar primero el MDE del cauce y después el MDE original, asignarle la ubicación del nuevo archivo, darle un nombre con la extensión, para este caso en particular se utilizó el formato TIFF. Se tiene que asignar la referencia espacial, y finalmente se tiene que comprobar el tipo de pixel y el número de bandas en los MDE originales, debido a que el primero no deberá ser mayor que el de los originales y en lo posible 32 bit float,

pues las otras opciones no admiten decimales, para el segundo deberá ser el mismo que los archivos originales. Por último, en el Mosaic operator deberá ir: First para que remplace los pixeles del MDE del cauce en el original. (Fernandez de Cordova, 2019).

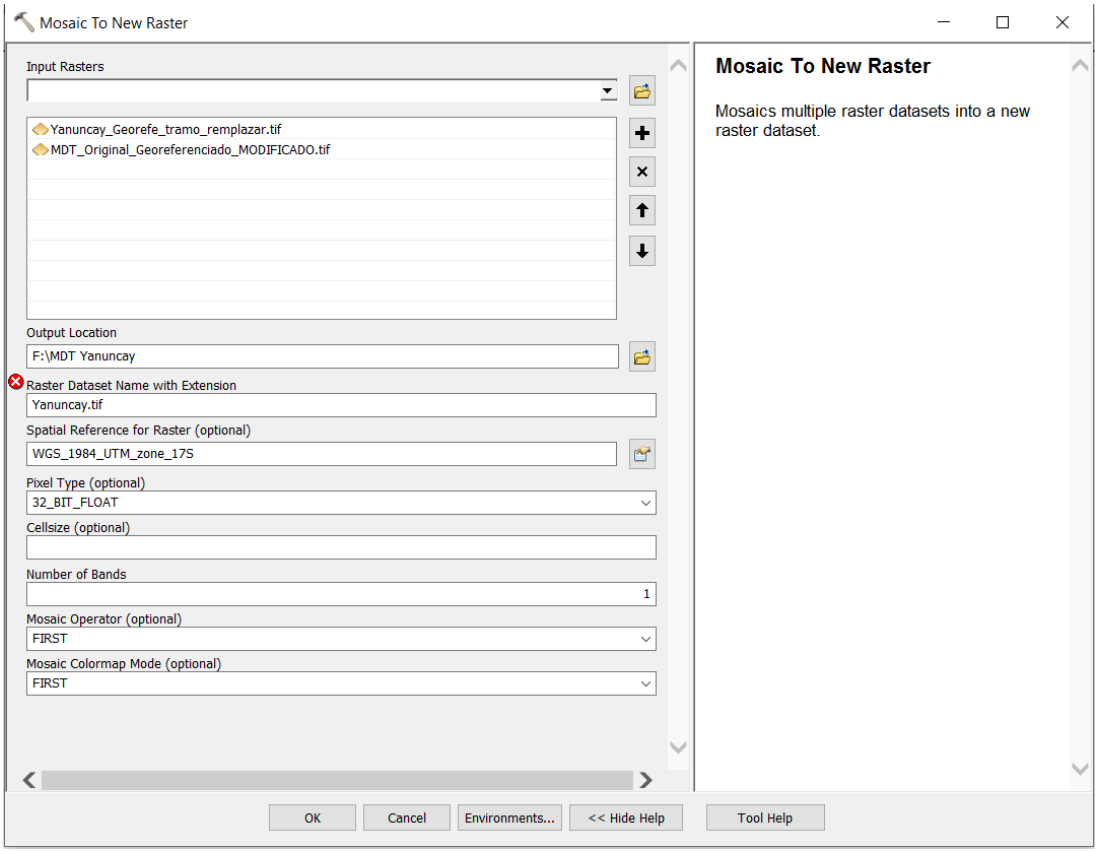

Figura 2. 11. Ventana para la generación de un nuevo MDE en ArcGis.
Fuente: Autor.

El MDE que se obtuvo al final de todos los procedimientos anteriores no se vio afectado en su calidad, manteniéndose la resolución de 6 cm. Debido al tamaño del MDE no fue posible analizar en el IBER todo el tramo y se decidió tomar el tramo final que es considerado el más crítico. Para esto se cortó el segmento mediante la herramienta extracción ubicada en: ArcToolbox / Spatial Analyst Tools / Extraction / Extract by Mask. En la ventana Figura 2. 12. Ventana para recortar un tramo de la zona de análisis.emergente se carga el MDE, y el polígono que servirá de delimitador para generar un nuevo MDE de todo lo que se encuentre dentro de este Figura 2. 13. Vista en planta del tramo más crítico (zona verde).. Finalmente, se le asigna la ubicación y el nombre.

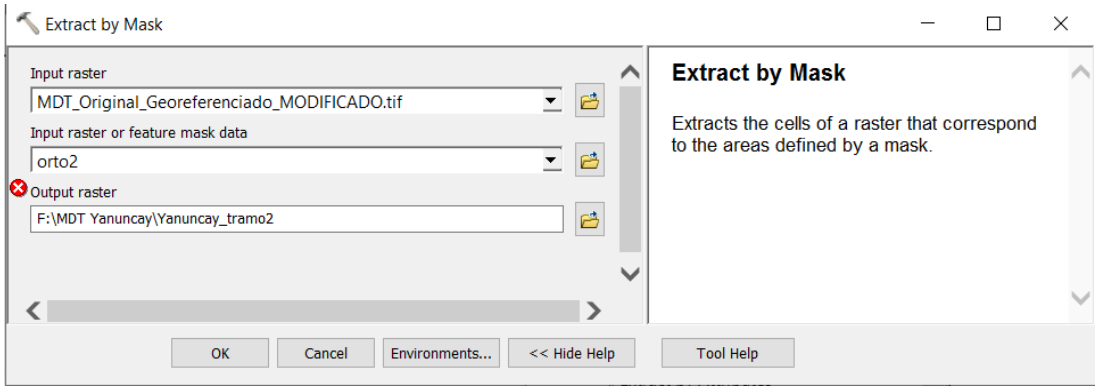

Figura 2. 12. Ventana para recortar un tramo de la zona de análisis.
Fuente: Autor.

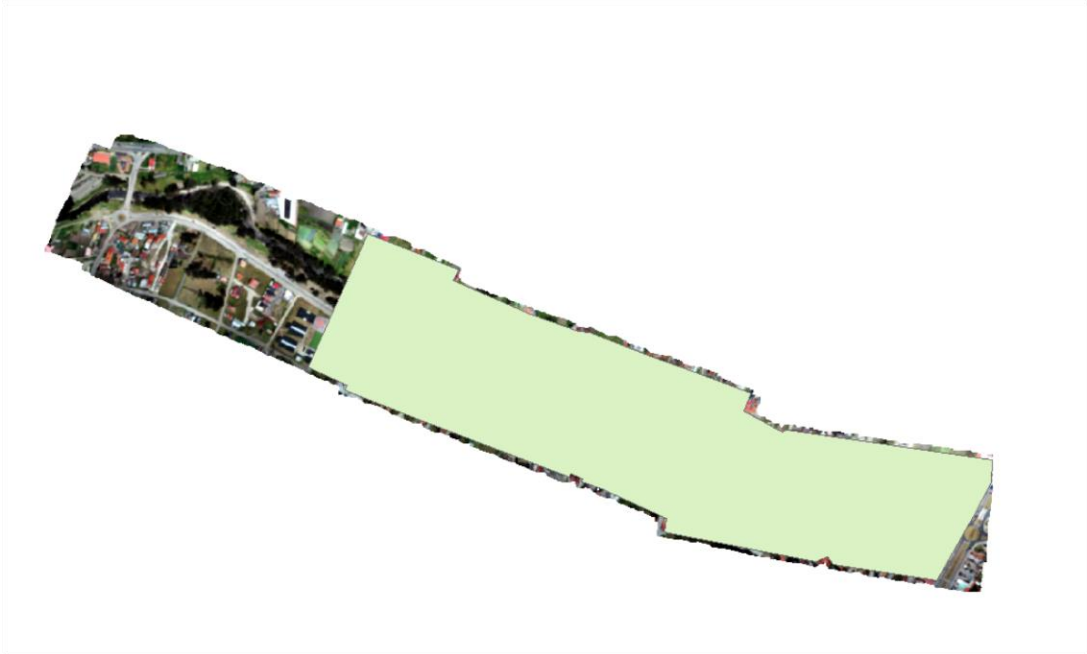

Figura 2. 13. Vista en planta del tramo más crítico (zona verde).
Fuente: Autor.

Con el MDE listo, es necesario transformarlo a formato ASCII para poder importarlo al software IBER. Esto se realizó en ARCGIS con la herramienta: ArcToolbox / Conversion tools / From Raster / Raster to ASCII. Dentro de la ventana Figura 2.14. Ventana para convertir un archivo en formato RASTER a formato ASCII. únicamente se selecciona el archivo Raster y se le determina la ubicación y el nombre del nuevo archivo en formato ASCII.

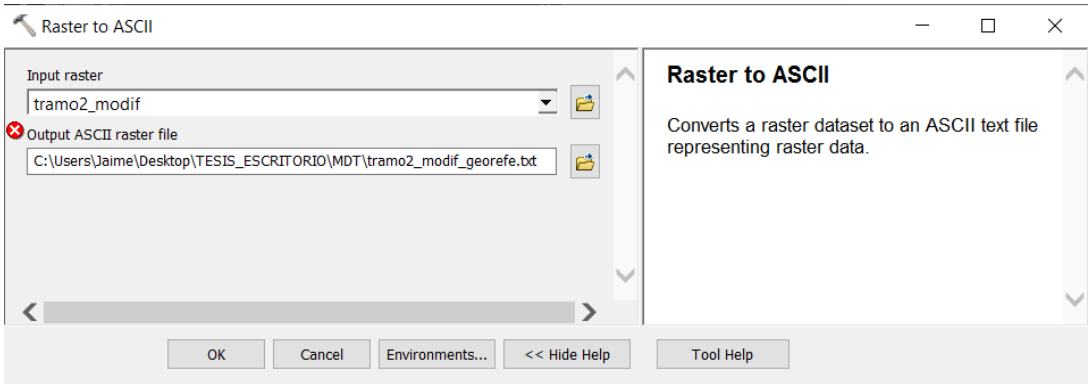

Figura 2.14. Ventana para convertir un archivo en formato RASTER a formato ASCII.
Fuente: Autor.

Para la simulación en el IBER se requiere una delimitación con el número de Manning. Primero se define los diferentes tipos de usos de suelo representados mediante un archivo en formato ASCII. Para lo cual, se parte de una demarcación generada sobre la ortofoto identificando las diferentes áreas con polilíneas. Posteriormente se generó un solo polígono con todas las áreas Figura 2. 15. Polígono con las diferentes áreas de los usos de suelo generado en ARC GIS., este se convirtió en un archivo RASTER y finalmente en un archivo ASCII. Es necesario generar un archivo adicional con el mismo nombre y cada uno de los usos en formato CSV para que el IBER pueda importar estas áreas sin ningún inconveniente

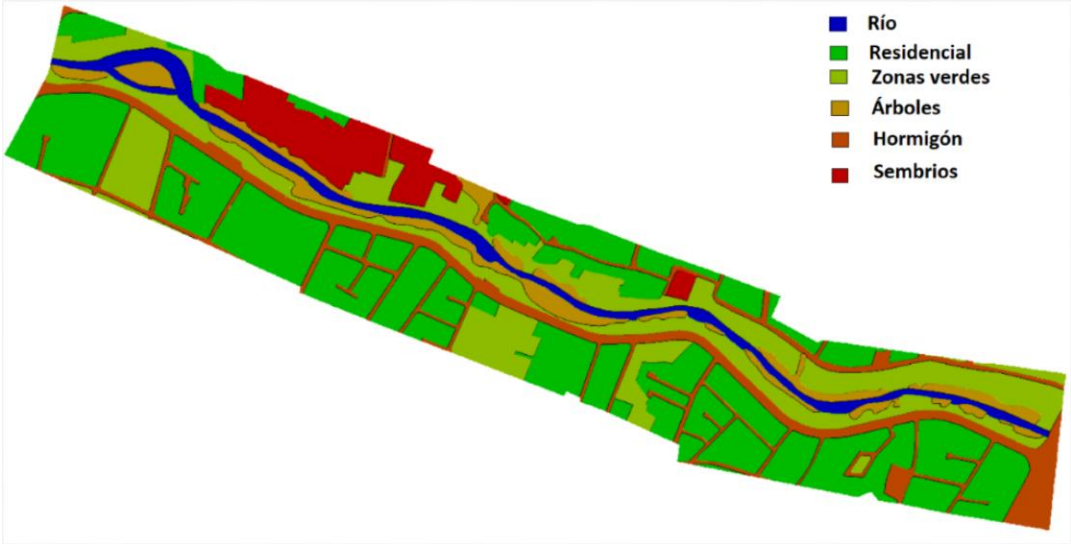

Figura 2. 15. Polígono con las diferentes áreas de los usos de suelo generado en ARC GIS.
Fuente: Autor.

Los valores de los coeficientes de rugosidad fueron seleccionados del texto Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1994). Se seleccionaron los que más se ajusten al uso de

suelo existente en la zona y estos se presentan a continuación. Tabla 2.2. Coeficientes de Manning.

Tabla 2.2. Coeficientes de Manning.

	Descripción	Coeficiente de Manning
0	Río	0.065
1	Residencial	0.15
2	Zonas verdes	0.03
3	Arboles	0.1
4	Hormigón	0.03
5	Sembrios	0.035

Fuente: Autor.

2.7 Modelación hidráulica en IBER 2D

El software computacional IBER es un modelo numérico en dos dimensiones de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente. El cual tiene gran amplitud de aplicaciones dentro de las cuales están: el transporte de sedimentos, la simulación de rotura de presas, el flujo de agua a través de estuarios y el análisis de zonas de inundación. (CEDEX, 2012)

Para el proceso de modelación, con el software IBER versión 2.5 se necesita el MDE del tramo de análisis en formato ASCII, el que cabe mencionar requiere una capacidad computacional elevada. Pues el archivo llego a tener un peso de 8.16 GB, sin embargo, debido a la disposición de equipos de una gama media, se decidió reducir el tramo de modelación, logrando un nuevo MDE con un peso de 2 GB, que representa el tramo final, considerado el más crítico.

Para iniciar la modelación en IBER, se realizan los siguientes pasos:

- **Preproceso:** es aquí donde se importa la geometría, se crea el mallado y cada una de las configuraciones adicionales como rugosidad, condiciones iniciales y condiciones de frontera.
- **Proceso:** en este paso se configuran los parámetros de tiempo y se ejecuta la modelación misma, que hay que mencionar que es uno de los pasos más prolongados.

- **Postproceso:** aquí se recopila, analiza y exporta toda la información que expone el software luego de todo el proceso de cálculo.

2.7.1 Preproceso.

Importación de la geometría.

Para empezar, se necesita crear una geometría, la cual puede tener varios orígenes; se la puede construir desde cero, importar de varios formatos como dxf, ascii, shapefile, klm, etc. Para este caso particular de estudio se lo importó de un formato ASCII que previamente se lo depuro y convirtió al formato mencionado.

La geometría se genera mediante una idealización del MDE basada en una serie de puntos, líneas y superficies cada una de las cuales está sustentada en la anterior (Garcia, 2017). Las mismas que son elaboradas mediante una extensión del software IBER, ubicada en la barra de menús: Herramientas Iber / RTIN / Crear RTIN. En la ventana emergente Figura 2. 16. Condiciones de IBER para generar una geometría., se escoge el archivo que debería estar en formato ASCII y el software procederá a idealizar la superficie mediante un sistema de triángulos, cuyos lados se manejarán dentro de un rango respetando los limites; el **lado mínimo** y **lado máximo** sin sobrepasar la **tolerancia** que significa el margen de error permitido entre el MDE original y la nueva geometría. Para este caso de estudio se utilizaron los siguientes parámetros: lado mínimo será de 2 m, el lado máximo de 20 m y una tolerancia de 0.3 m. Escogiendo estos valores luego de varios ensayos, y a la vez generar un equilibrio entre tiempo de cálculo y resultados óptimos.

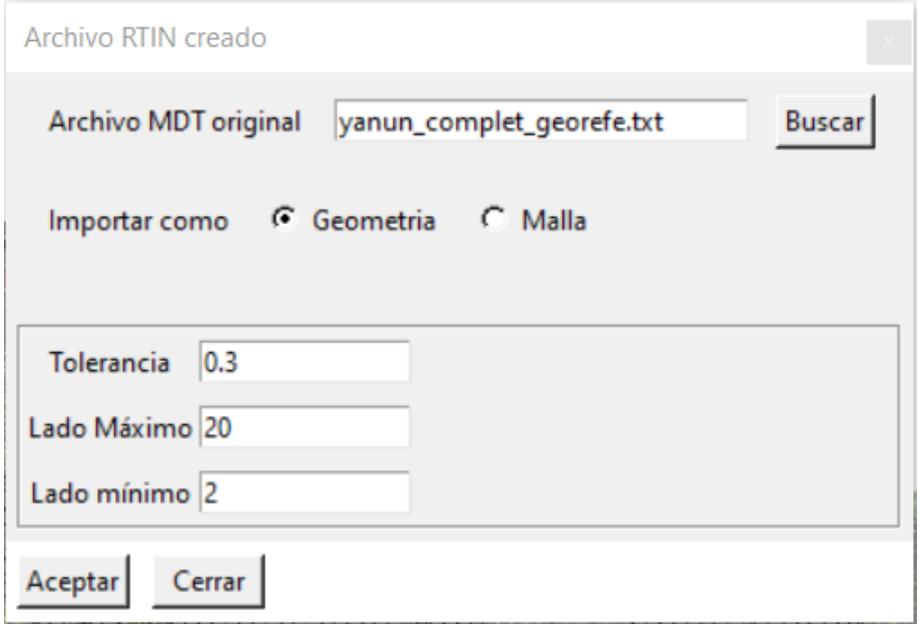

Figura 2. 16. Condiciones de IBER para generar una geometría.
Fuente: Autor.

El IBER tiene una herramienta indispensable, que impide la duplicación de puntos y líneas, las mismas que entorpecerían los cálculos y por lo tanto requerirían de un tiempo mayor de cálculo. Esta herramienta está nombrada como **"colapsar"** y surge automáticamente luego de cargar la geometría, este proceso de depuración es de vital importancia ya que la geometría servirá de base para generar la malla Figura 2. 17. Malla obtenida en el IBER.

Figura 2. 17. Malla obtenida en el IBER.
Fuente: IBER versión 2.5.

Condiciones iniciales.

En el software computacional IBER las condiciones iniciales son; la altura del agua que posee todo el tramo de análisis al iniciar la simulación. Esta puede ser programada de dos formas: la primera es asignarle un calado, este va a representar la altura del agua sobre el nivel del terreno; la otra forma consiste en asignar la cota del agua tomando como punto de referencia el nivel del mar Figura 2. 18. Ventana emergente con la que se asigna el calado inicial a la geometría.

Esta condición representa como constantes tanto el calado como la velocidad en cada uno de los intervalos de tiempo, sin embargo, si permite una variación en función del espacio, es decir a lo largo del cauce estas pueden variar, por lo tanto, en IBER el estado inicial es un estado permanente (Garcia, 2017). Para modelar el río Yanuncay, se utilizó como condición inicial de calado igual a cero, la misma que asimila que todo el tramo de análisis inicialmente está totalmente seco, ya que los hidrogramas que se van a registrar tienen un historial de 147600 segundos (41 horas) o más, lo que nos ayudó a estabilizar la modelación.

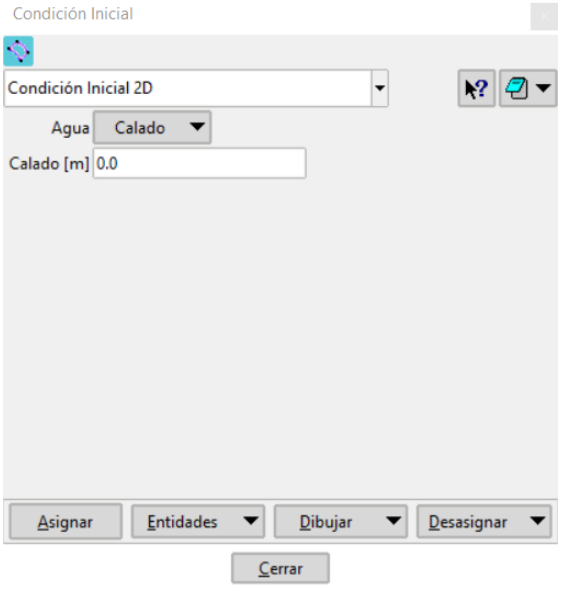

Figura 2. 18. Ventana emergente con la que se asigna el calado inicial a la geometría.
Fuente: Autor.

Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera son muy importantes en un modelo matemático, debido a que estas definen el dominio físico para los cálculos hidráulicos, indicando el origen

para las ecuaciones de cómputo y limitando con las coordenadas finales Figura 2. 21. Cuadro resumen de las condiciones de contorno..

En el paquete computacional IBER, existe la posibilidad de ingresar las condiciones de contorno de entrada Figura 2.19. Flujo permanente y no permanente representados por sus diversas formas. mediante: Flujo no permanente expresado por caudal especifico o caudal total en forma de hidrograma o cota del agua.

Para las condiciones de contorno de salida Figura 2. 20. Ventana con las condiciones de salida para el caso de estudio. además de que se tiene una réplica de las de entrada, se puede elegir una estructura de tipo vertedero la que servirá de control o descarga y adicionalmente se puede describir sí el tipo de flujo es supercrítico/crítico o subcrítico, tomando en cuenta su relación con el número de Froude y el régimen como se muestra en la Tabla 2.3. Tipo de Régimen.

Tabla 2.3. Tipo de Régimen.

Tipo de Régimen		
Froude >1	Flujo Supercrítico	Régimen rápido
Froude =1	Flujo Crítico	
Froude <1	Flujo Subcrítico	Régimen lento

Fuente: Garcia (2017).

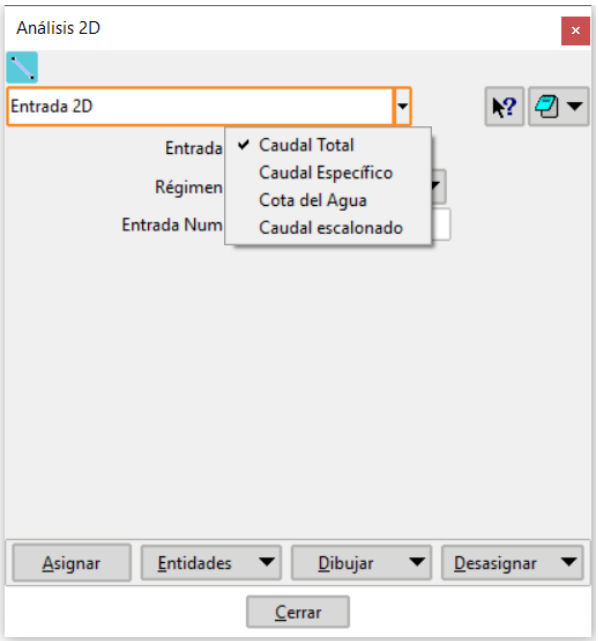

Figura 2.19. Flujo permanente y no permanente representados por sus diversas formas.
Fuente: Autor.

Para el caso de estudio se utilizó: como condiciones de frontera de ingreso, caudal total. En la cual, los datos se ingresan en un par ordenado; una columna con el tiempo y otra con el caudal respectivo, esta información hay que asignar a las líneas de la geometría por la que ingresará.

Las condiciones de salida son muy importantes, pues, si no se lo hace el modelo se comporta internamente como un sistema de almacenamiento. Existen dos formas de configurar, la primera es mediante flujo supercrítico / crítico con el cual, no hace falta agregar más parámetros pues el flujo se comportará en función de lo que suceda aguas arriba, generalmente se supone que existe una sección de control superior.
La segunda es por flujo subcrítico y particularmente es está la que se utiliza en este trabajo de investigación debido a que Sacoto (2017) afirma que el río Yanuncay está mayormente bajo este régimen y se confirmó generando las simulaciones, Anexo A.5. Gráficas del número de Froude.**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Este método genera una repercusión de lo que sucederá aguas abajo es por esto que IBER presenta las opciones:

- Vertedero; cuando se tiene una estructura hidráulica de control, y es la que propicia el pase del fluido.
- Curva de gasto; cuando se posee este tipo de información. (Curvas; caudal específico [m3/s] vs altura del agua [m]). IBER tiene la opción de agregar curvas de gasto total y unitario
- Nivel dado; se la utiliza cuando se va a asignar la porción de la geometría por la cual el agua abandona el tramo de estudio.

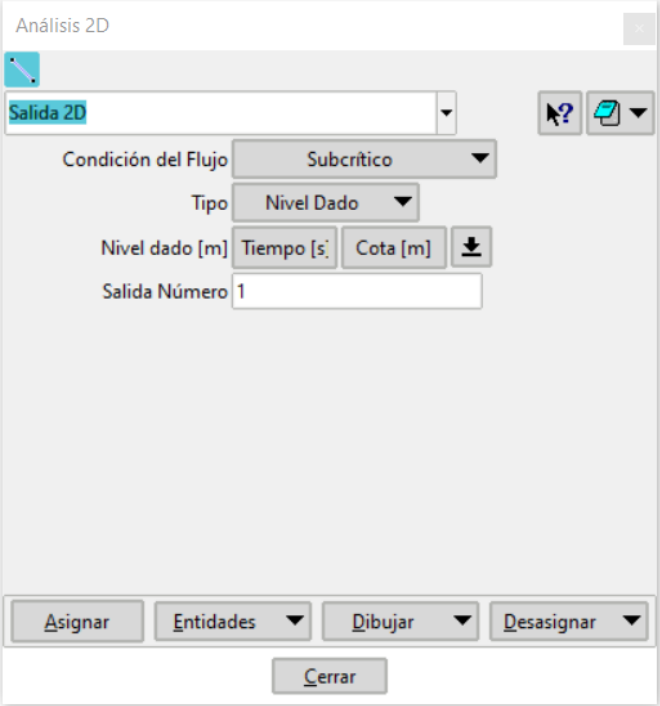

Figura 2. 20. Ventana con las condiciones de salida para el caso de estudio.
Fuente: Autor.

Contorno		Régimen	Condiciones impuestas
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida		Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto
		Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición

Figura 2. 21. Cuadro resumen de las condiciones de contorno.
Fuente: Autor.

A continuación, se presentan las gráficas de algunos de los hidrogramas obtenidos del proyecto de investigación "Propuesta de un sistema de Alerta temprana ante inundaciones por lluvias intensas" Fernandez de Cordova (2019) encabezados por dos eventos reales suscitados el 14 de mayo del 2017 Figura 2.22. Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018. y el 24 de mayo del 2018 Figura 2. 23. Caudales registrados durante el evento del día 14 de mayo del 2017. en el río Yanuncay, los hidrogramas adicionales, se detallan en el anexo 2, son datos representativos de la estación Bomberos y cubren un rango de caudales entre 100 y 350 m3/s que pueden generar problemas de desbordamientos.

Figura 2.22. Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018.
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

Figura 2. 23. Caudales registrados durante el evento del día 14 de mayo del 2017.
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

Mallado de la Geometría.

Para resolver las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, estas se basan en métodos numéricos, los cuales se apoyan en la discretización de una malla bidimensional. Esta malla independientemente del método numérico que se utilice, puede clasificarse en estructurada o no estructurada. Esta última puede estar formada por cualquier tipo de elementos, siendo los más utilizados los triangulares y en zonas más regulares se manejan elementos cuadrangulares. Una de las principales ventajas de estas mallas es la facilidad con la que se adaptan a superficies irregulares, debido a que no siguen ningún orden u organización interna. Una malla estructurada en dos dimensiones está formada por elementos cuadrangulares debidamente ordenados tanto en columnas como en filas lo que hace que se vuelva fácil asignarle un par de subíndices (i,j), los mismos que facilitan la programación de sus algoritmos así como su precisión. (Garcia, 2017).

Para lograr una mayor eficiencia computacional se enfocó en utilizar este último modelo de malla para el caso particular de este proyecto. Con el que se optimiza el tiempo de cálculo debido al menor grado de complejidad en la resolución de las ecuaciones del programa Figura 2.24. Vista Isométrica de malla estructura generada por el software IBER..

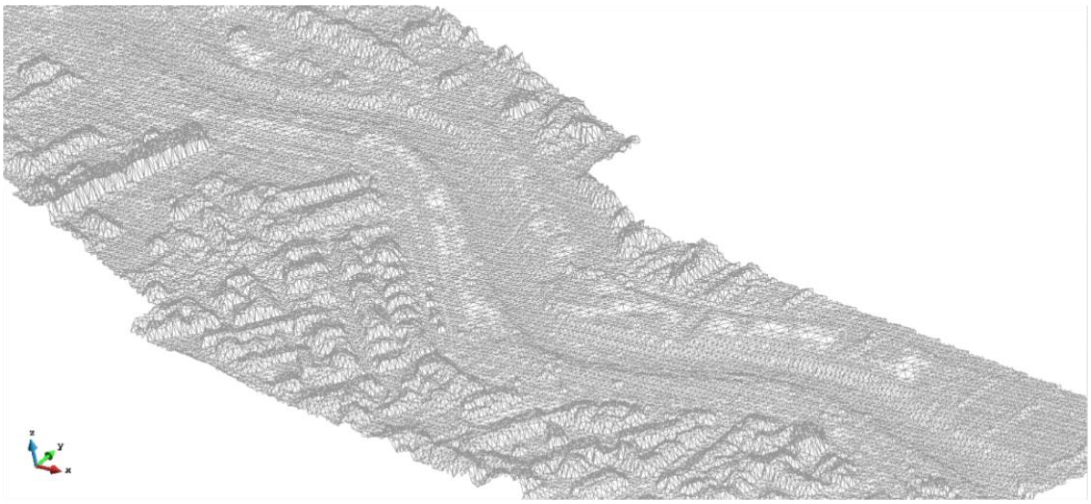

Figura 2.24. Vista Isométrica de malla estructura generada por el software IBER.
Fuente: Autor.

Coeficiente de Manning.

Una vez creada la malla, se requiere asignar un valor del coeficiente de rugosidad para cada uno de los diferentes usos de suelo, los mismos que servirán para los futuros cálculos. El paquete computacional IBER tiene por defecto varios valores del coeficiente de Manning, sin embargo, estos se pueden editar, eliminar y agregar nuevos, para el caso particular de este estudio se utilizaron los valores detallados en la Tabla 2.2. Coeficientes de Manning. Finalmente, Se debe importar el archivo ya creado en el **2.6 Generación de un MDE final.**, mediante la barra de menús: Datos / Rugosidad / Asignación automática: Figura 2. 25. Coeficiente de Manning integrada a la malla generada por IBER.

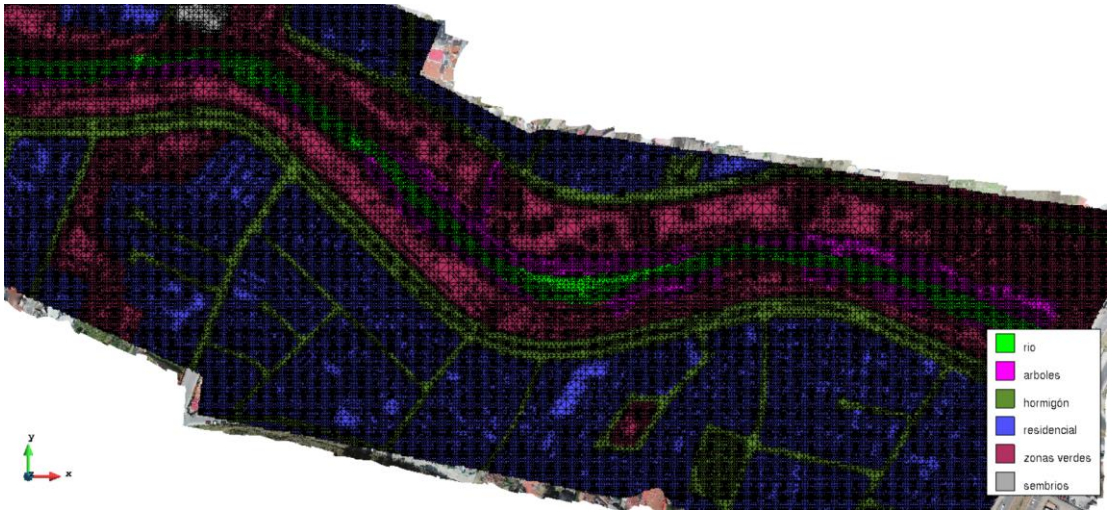

Figura 2. 25. Coeficiente de Manning integrada a la malla generada por IBER.
Fuente: Autor.

2.7.2 **Proceso.**

Condiciones de tiempo.

Dentro de IBER en la barra de herramientas: Datos / Datos del problema, se puede manipular los siguientes parámetros de tiempo:

- el tiempo inicial de la modelación: es el instante en el que se quiere que inicie la simulación.
- el intervalo de tiempo para el cálculo: establece el incremento de tiempo entre cada uno de los cálculos.

- el tiempo máximo de modelación: define el tiempo en el que finalizará la simulación.

Cálculo.

El software realiza la resolución de las ecuaciones de Saint Venant mediante métodos numéricos en cada uno de los nodos de la geometría. Partiendo de las condiciones iniciales, hasta las de frontera y tomando en cuenta cada uno de los valores de rugosidad previamente definida en la malla. (Garcia, 2017)

Esto se logra con los comandos superiores: Calcular / Ventana de cálculo / Inicio Figura 2.26. Proceso de solución de las ecuaciones de Saint Venant en el software IBER.; en este proceso se puede observar el avance, mediante: Ver salida.

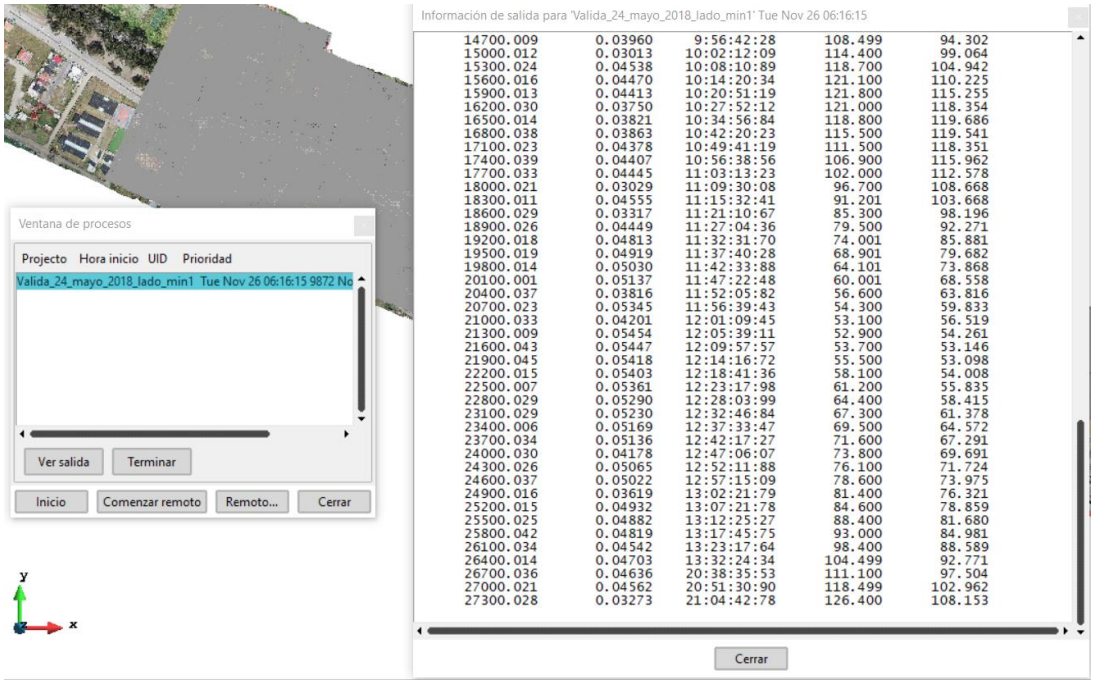

Figura 2.26. Proceso de solución de las ecuaciones de Saint Venant en el software IBER.
Fuente: Autor.

2.7.3 Postproceso.

Una vez finalizado todo el proceso de cálculo, se procede a analizar cada uno de los resultados que facilita el paquete computacional IBER. Estos mejoraran el manejo de la información y la correcta toma de decisiones.

Dentro de la interfaz de IBER, existe una variedad de herramientas que permiten mejorar las condiciones de presentación con cada uno de los resultados, dentro de los cuales destacan:

La generación de gráficos.

Se puede generar una amplia gama de resultados representados por gráficos, con los comandos "ventana / ver resultados". Esto en cada uno de los intervalos de tiempo calculado. Adicionalmente se puede editar: etiquetas, leyendas, color; esta última se puede presentar mediante áreas coloreadas, áreas coloreadas suaves y vectores.

Exportar resultados en formato ASCII.

Una de las herramientas más útiles y que está ubicada en la barra de menú superior: Herramientas Iber / Resultados a Raster: con lo cual se abrirá una ventana Figura 2. 27. Ventana Emergente para exportar resultados en formato ASCII., para escoger el o los resultados a exportar que pueden ser: el calado, número de Froude, velocidad, cota de agua o el caudal específico, con opción a cada uno de los intervalos calculados.

Para este caso de estudio en particular, la información obtenida fue importada al software ARC GIS para visualizar, analizar y compararla en cada uno de los diferentes casos.

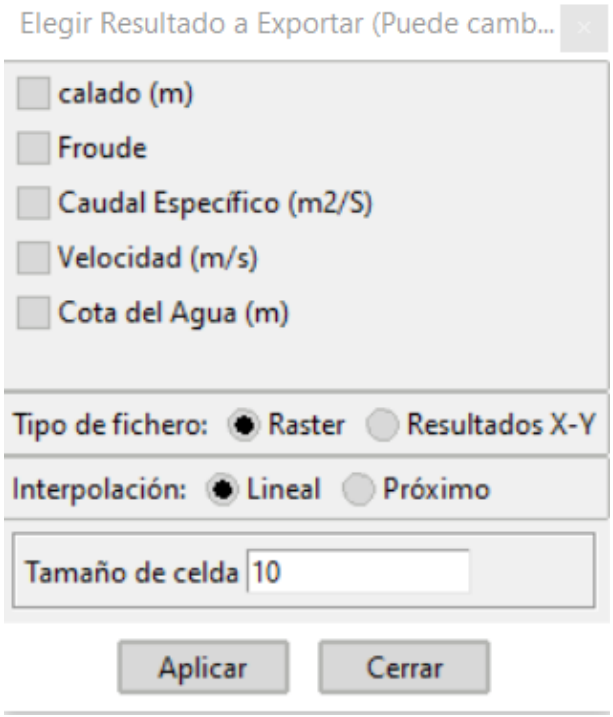

Figura 2. 27. Ventana Emergente para exportar resultados en formato ASCII.

Fuente: Autor.

CAPITULO III.

CALIBRACION Y RESULTADOS DEL MODELO.

3.1 Calibración del modelo.

El objetivo de la calibración se enfoca en que el modelo represente lo que sucede cuando el fluido hace el recorrido por el cauce del río. A medida que los caudales se elevan, represente las zonas de inundación, lo más próximo a la realidad. Para lo cual se utilizó de información base, la tomada en un evento real el día 24 de mayo del 2018. La información que se obtuvo ayudó a generar la mancha de inundación de este evento.

El proceso de calibración se inició con una verificación adicional de todas las áreas por las cuales se iniciaban los desbordes, comprobando que la geometría no presentara ninguna irregularidad. Posteriormente se fue modificando los coeficientes de rugosidad para lograr una mancha de inundación que se asemeje a la real. Luego de generar y analizar las trece modelaciones realizadas más una visita a campo, se concluyó que el proceso de calibración se lo realice en el tramo final del estudio, desde la calle Carmela Malo hasta la Av. De las Américas Figura 3. 1. Vista en planta de la mancha de inundación real (rayada) y la generada por el modelo (verde)., considerando que reunía las condiciones idóneas para realizarlo.

Luego de realizar dieciséis iteraciones aproximadamente variando el coeficiente de Manning y en diferentes combinaciones, se concluye que la mancha de inundación que genera el modelo de estudio se parece bastante a la real Tabla 3.1.

El proceso de calibración se corrobora al realizar modelaciones con un MDE antiguo del Sigtierras, logrando verificar que la mancha de inundación obtenida tiene una gran similitud y se concluye que las leves discrepancias se deben a que el MDE mencionado tienen una resolución de 3 m y el MDE de este documento investigativo tiene una resolución de 6 cm.

Tabla 3.1. Nuevos coeficientes de Manning.

Uso del suelo	Valor del coeficiente de Manning
río	0.062
residencial	0.15
zonas verdes	0.03
árboles	0.1
hormigón	0.03
sembrios	0.035

Fuente: Autor.

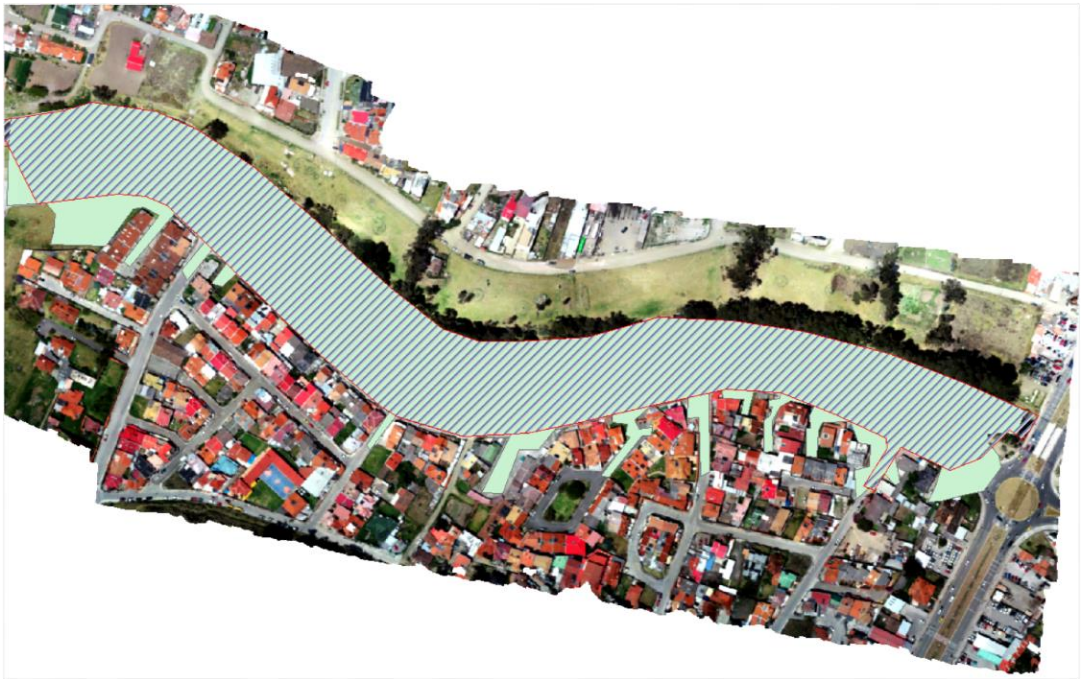

Figura 3. 1. Vista en planta de la mancha de inundación real (rayada) y la generada por el modelo (verde).
Fuente: Autor.

Figura 3. 2. Vista en planta de la mancha generada con el modelo antiguo (amarillo), modelo de estudio (morado).
Fuente: Autor.

3.2 Resultados

Se corrió el modelo por trece ocasiones, empleando cada uno de los hidrogramas indicados en el Anexo A.2. Hidrogramas para la modelación.

En cada una de las modelaciones; se mantuvo el coeficiente de rugosidad, al igual que el tamaño de la geometría, las dimensiones y propiedades de la malla y cada una de las configuraciones en el software que previamente fueron definidas.

Por cada una de las modelaciones se obtuvieron las máximas manchas de inundación, así como las máximas velocidades y cotas del agua en cada uno de los puntos.

3.2.1 Calados máximos.

A continuación (Figura 3.3. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). a la Figura 3. 15. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).), se muestra los calados máximos obtenidos en cada una de las modelaciones ejecutadas. Siguiendo un orden ascendente respecto al caudal, es decir, las primeras gráficas serán las que se les atribuyó un menor caudal y las últimas las de un caudal superior.

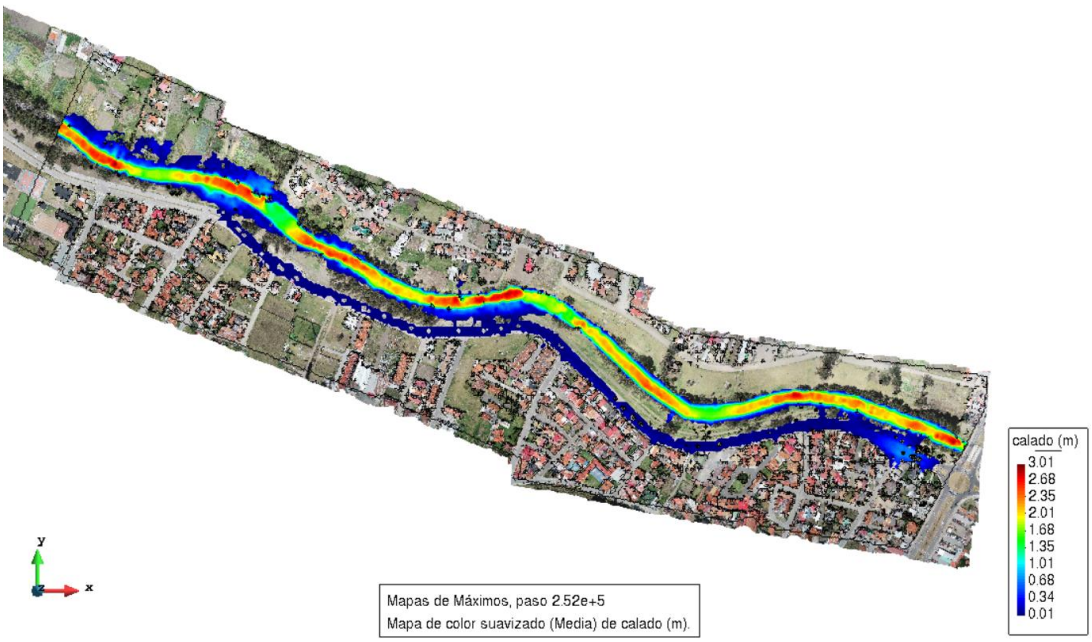

Figura 3.3. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s).
Fuente: Autor.

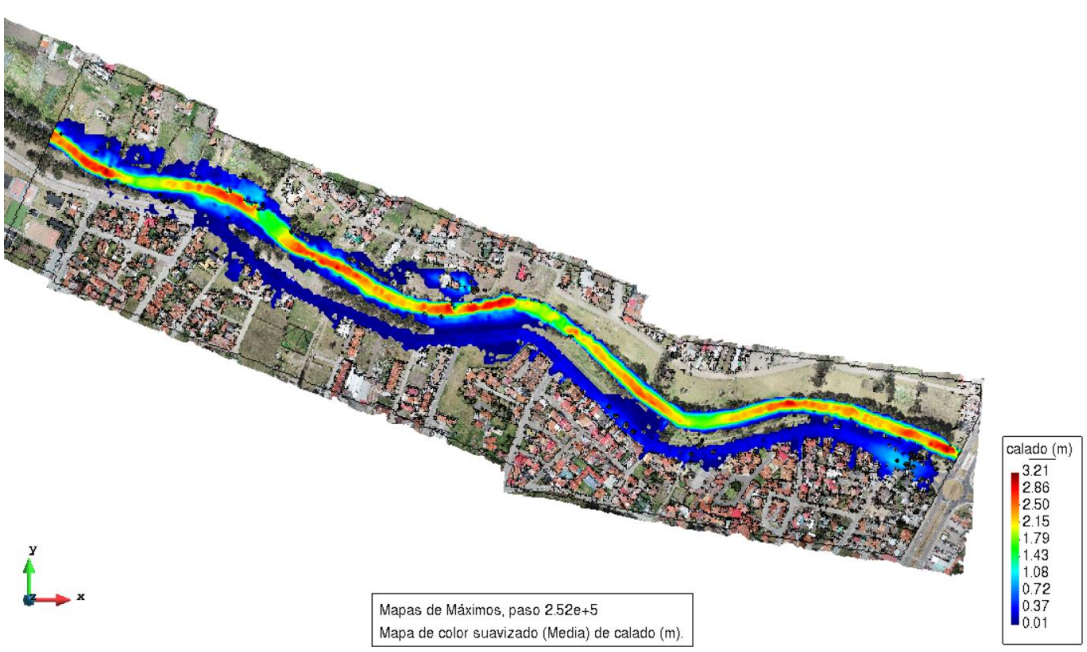

Figura 3. 4. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s).
Fuente: Autor.

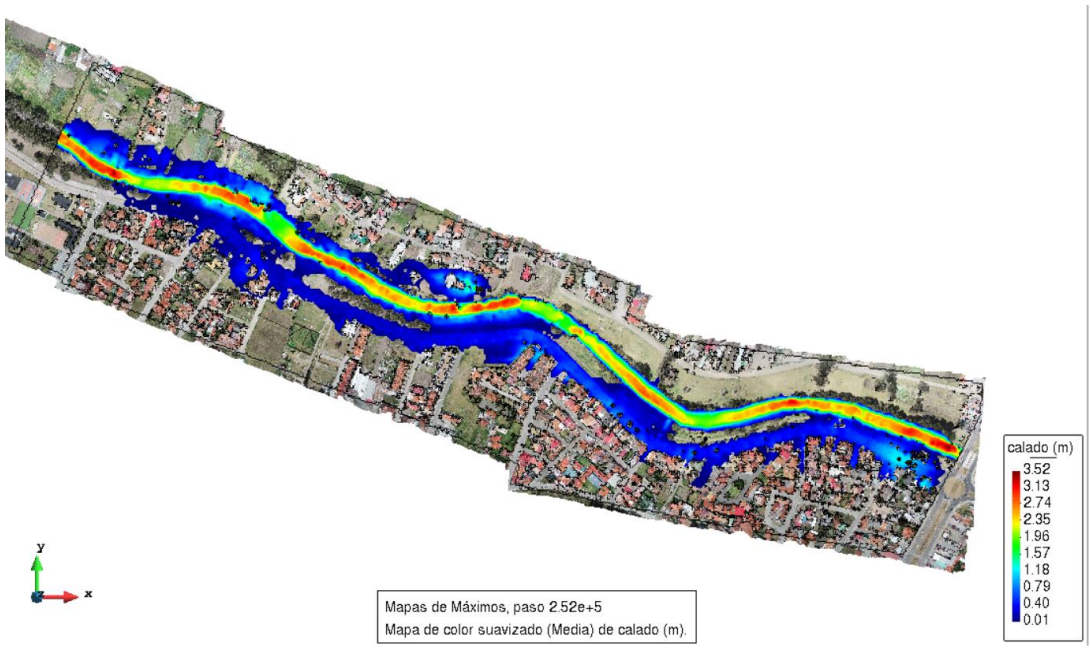

Figura 3. 5. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s).
Fuente: Autor.

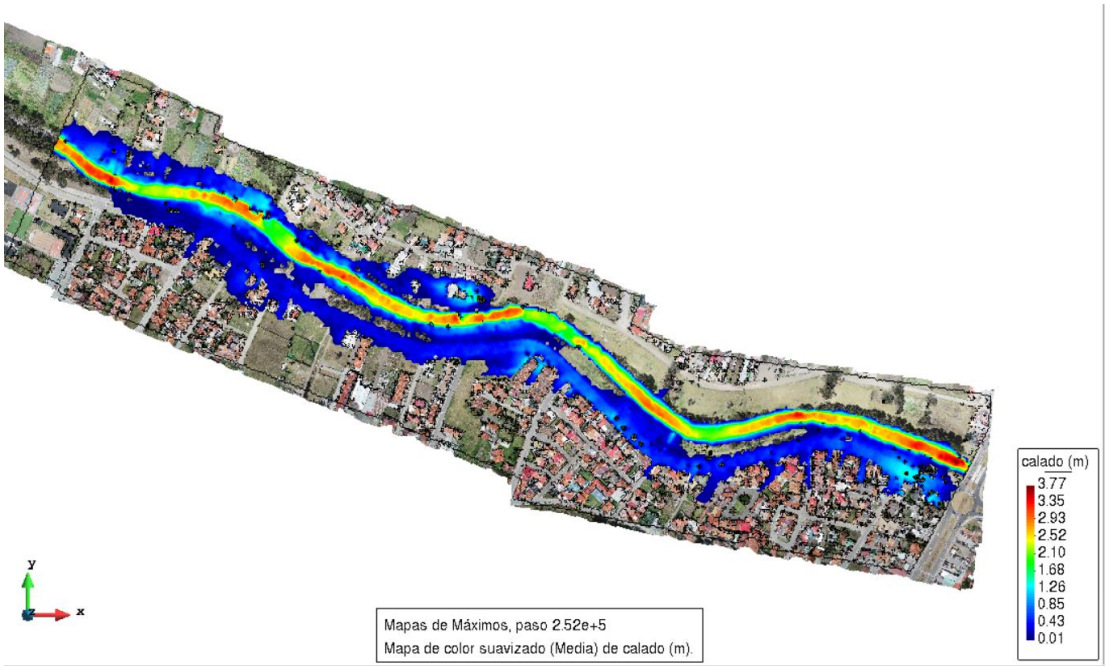

Figura 3.6. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s).
Fuente: Autor.

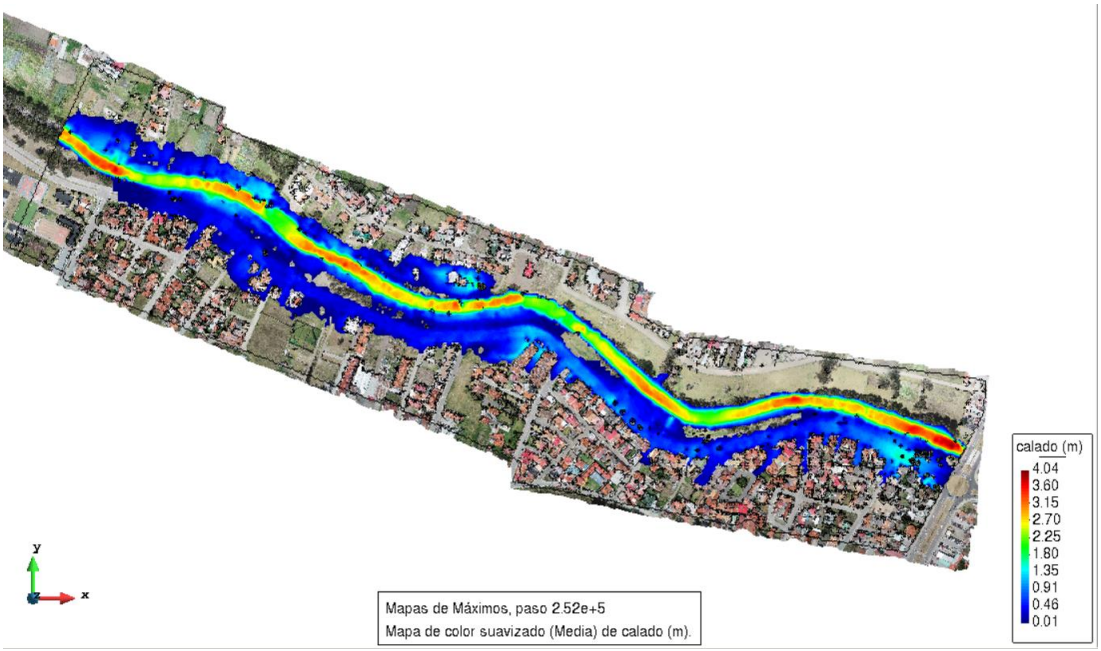

Figura 3. 7. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s).
Fuente: Autor.

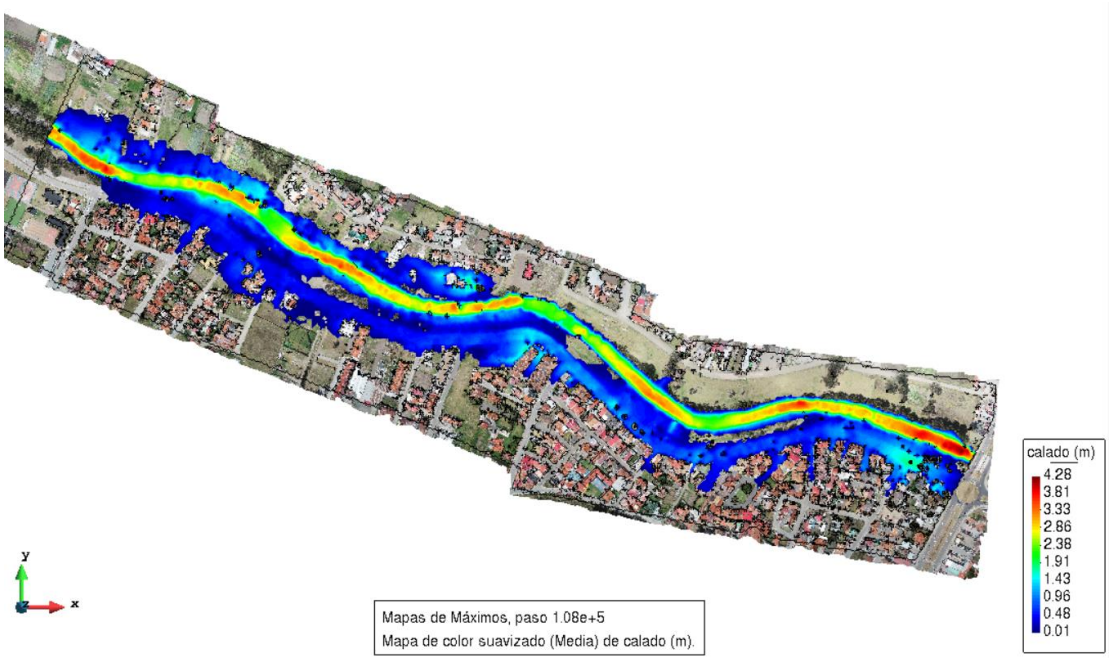

Figura 3. 8. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s).
Fuente: Autor.

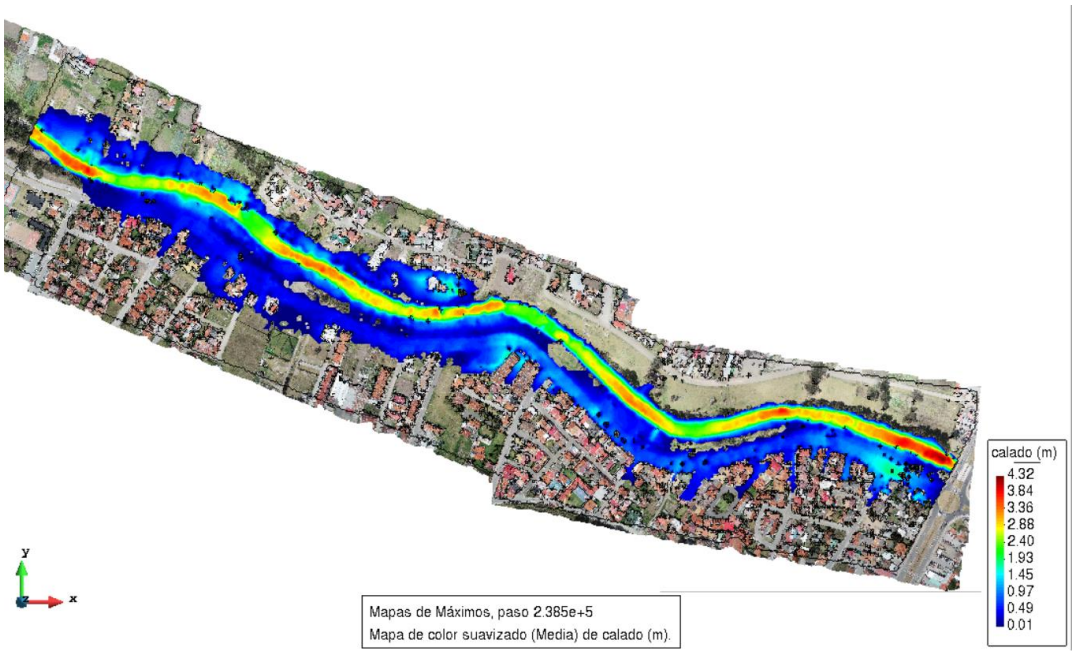

Figura 3. 9. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma: Validación 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s).
Fuente: Autor.

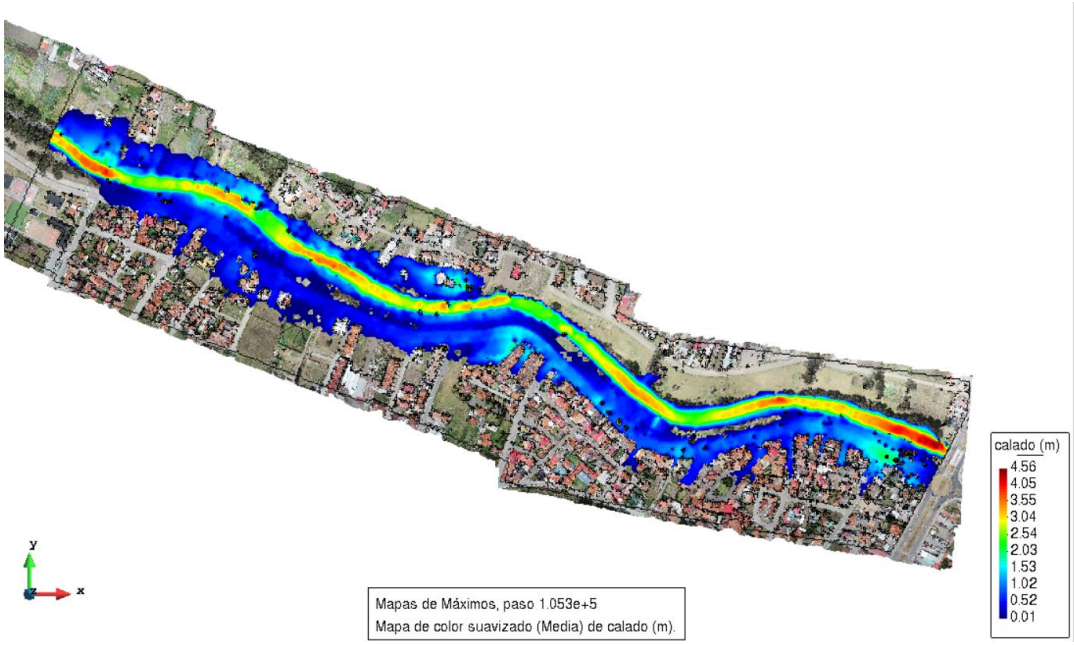

Figura 3.10. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s).
Fuente: Autor.

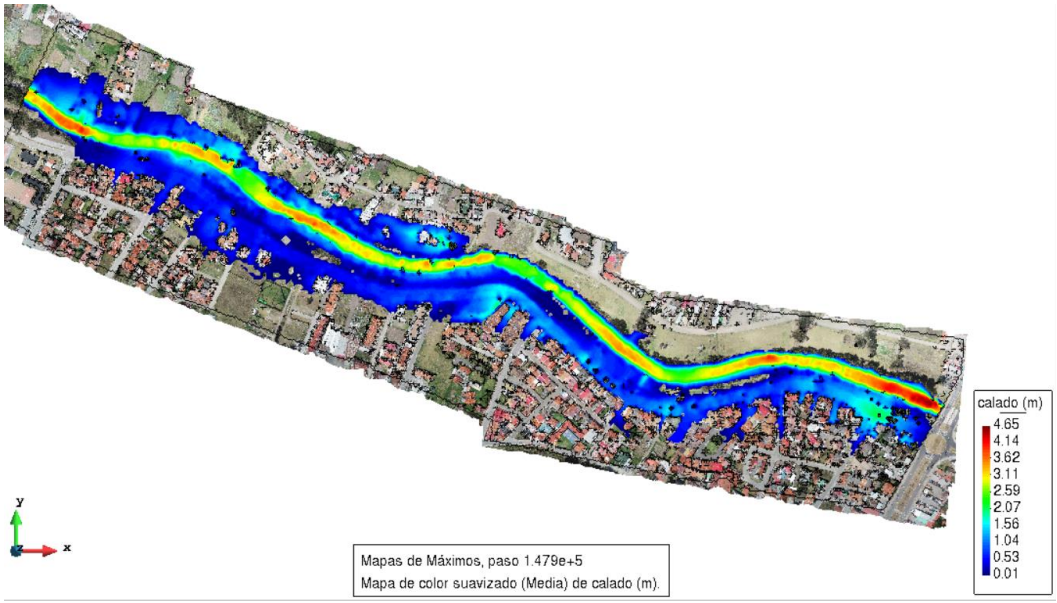

Figura 3. 11. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma: Validación 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s).
Fuente: Autor.

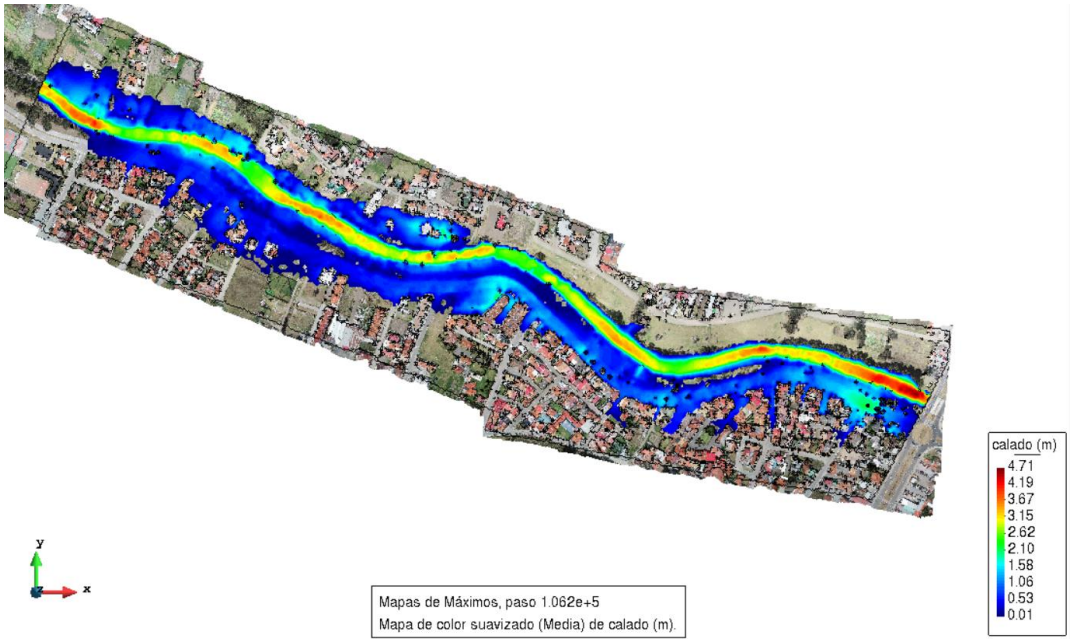

Figura 3. 12. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s).
Fuente: Autor.

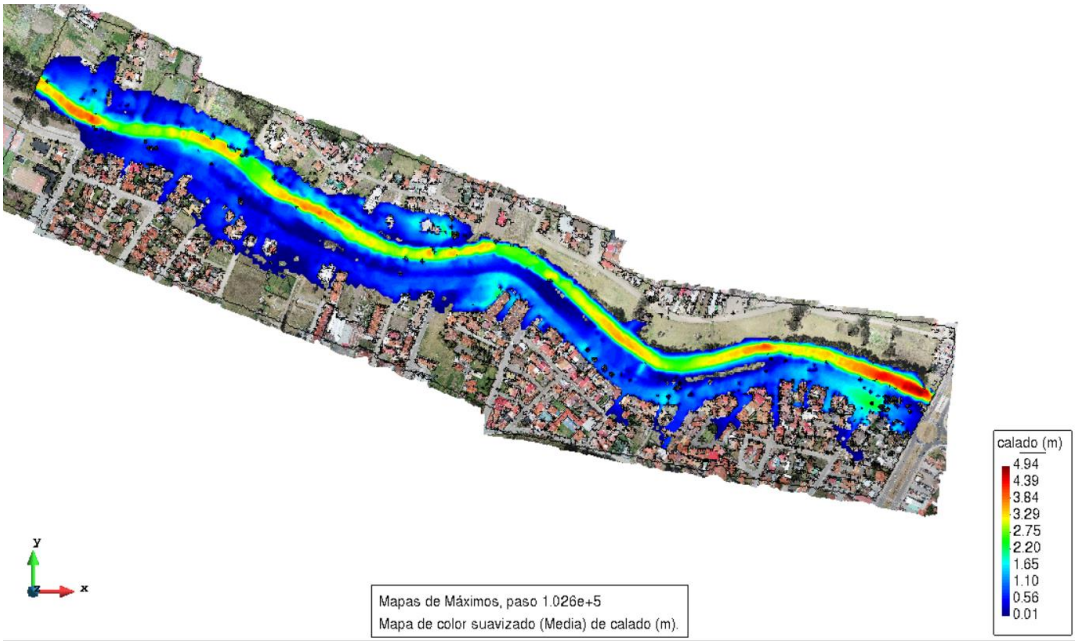

Figura 3. 13. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s).
Fuente: Autor.

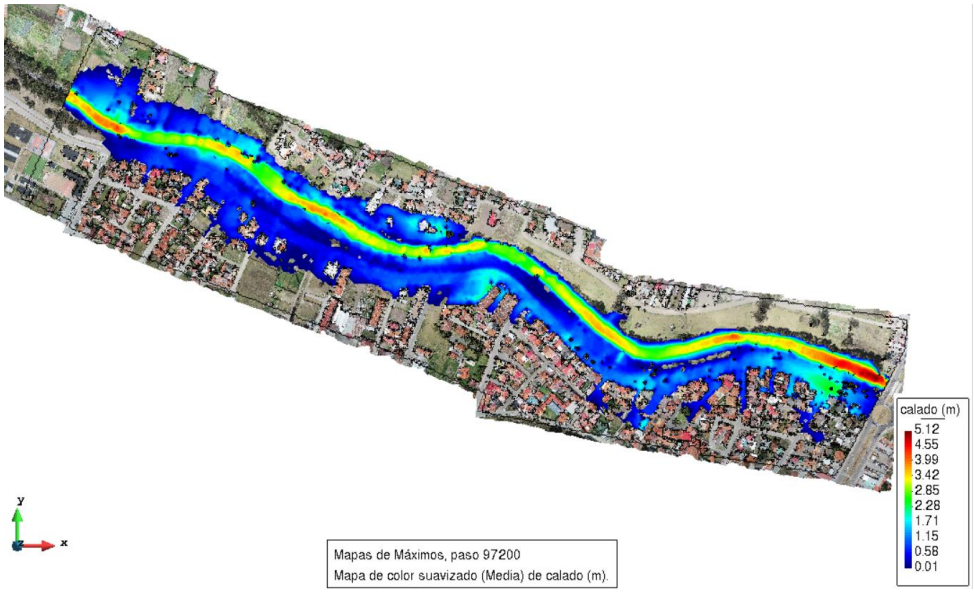

Figura 3. 14. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s).
Fuente: Autor.

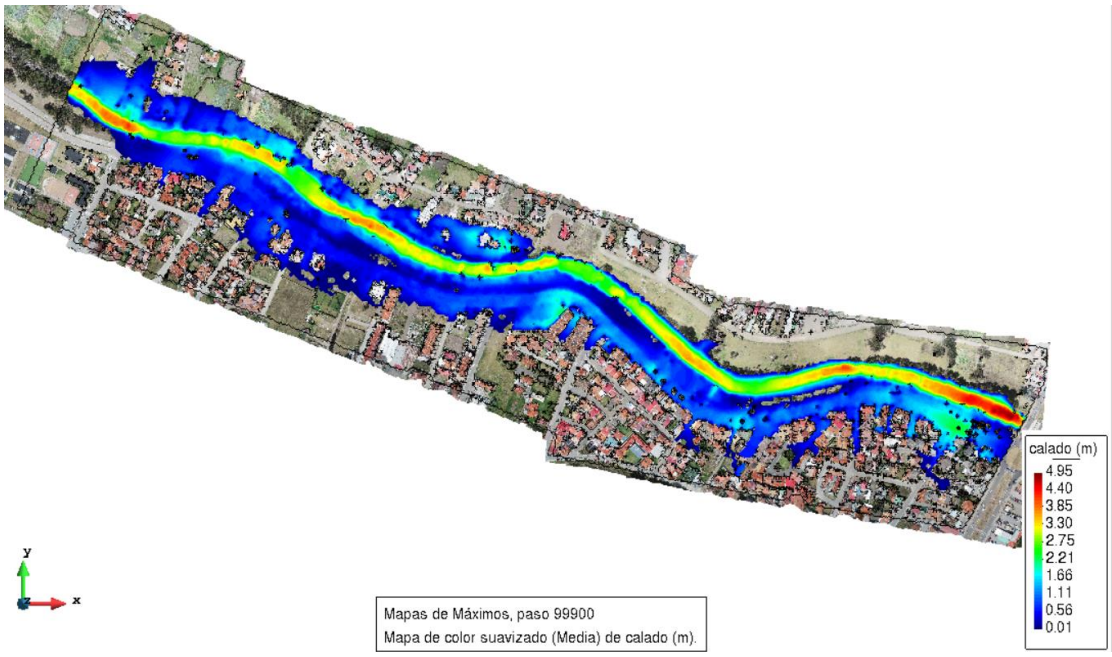

Figura 3. 15. Vista en planta de la mancha de inundación generada por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).
Fuente: Autor.

3.2.2 Velocidades máximas.

Las gráficas (Figura 3. *16.* Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). a la Figura 3. *28.* Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).) muestran las máximas

velocidades que generan cada uno de los hidrogramas, en todos los puntos de la geometría.

El orden de las gráficas de velocidades seguirá la misma secuencia que los calados, los caudales inferiores están al inicio y posteriormente los más grandes. De esta forma se logra una mejor apreciación del efecto a medida que aumenta el caudal.

Figura 3. 16. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s).
Fuente: Autor.

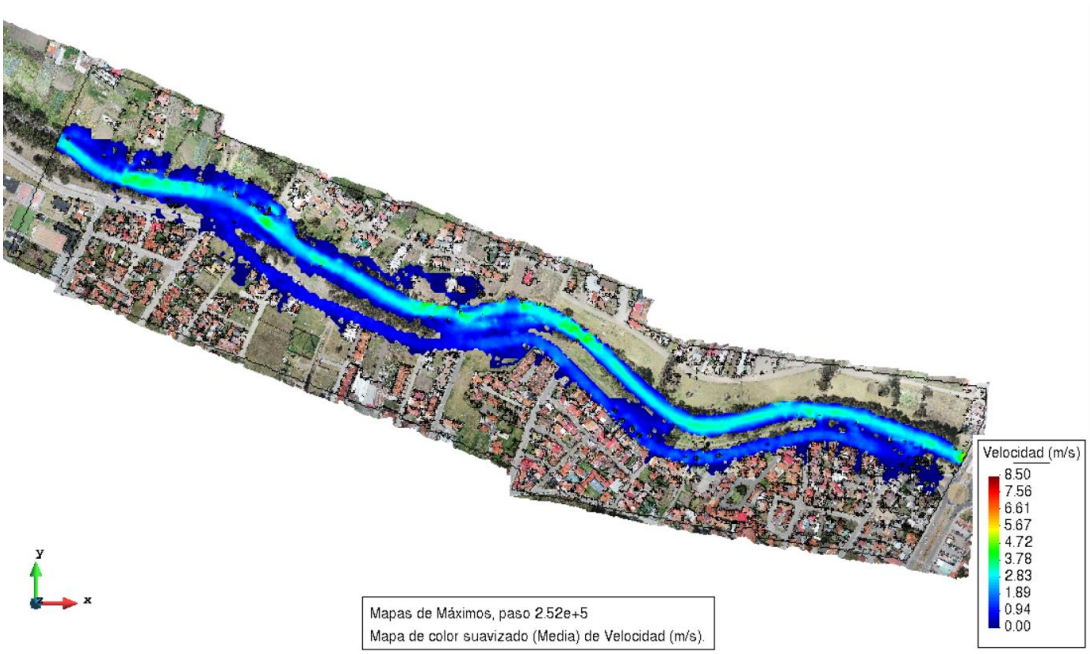

Figura 3. 17. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s).
Fuente: Autor.

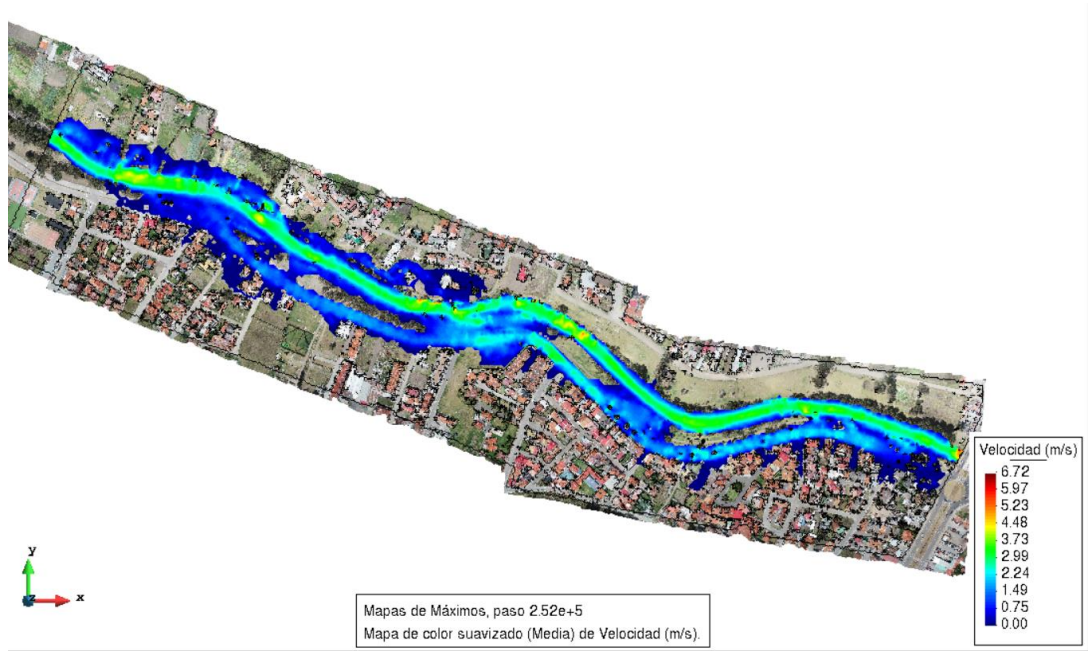

Figura 3. 18. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s).
Fuente: Autor

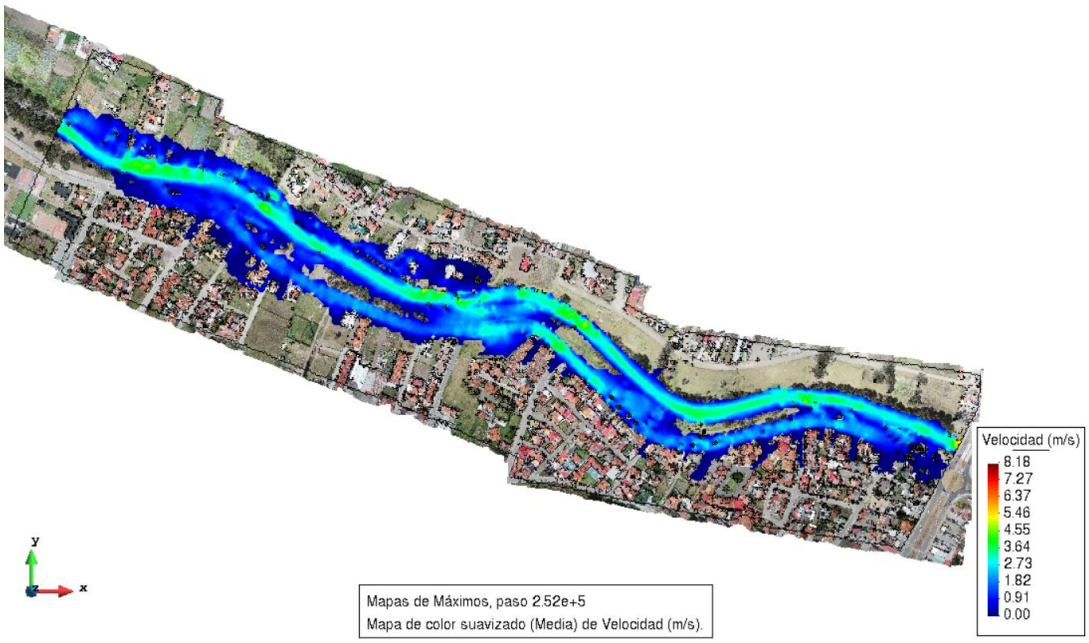

Figura 3. 19. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s).
Fuente: Autor

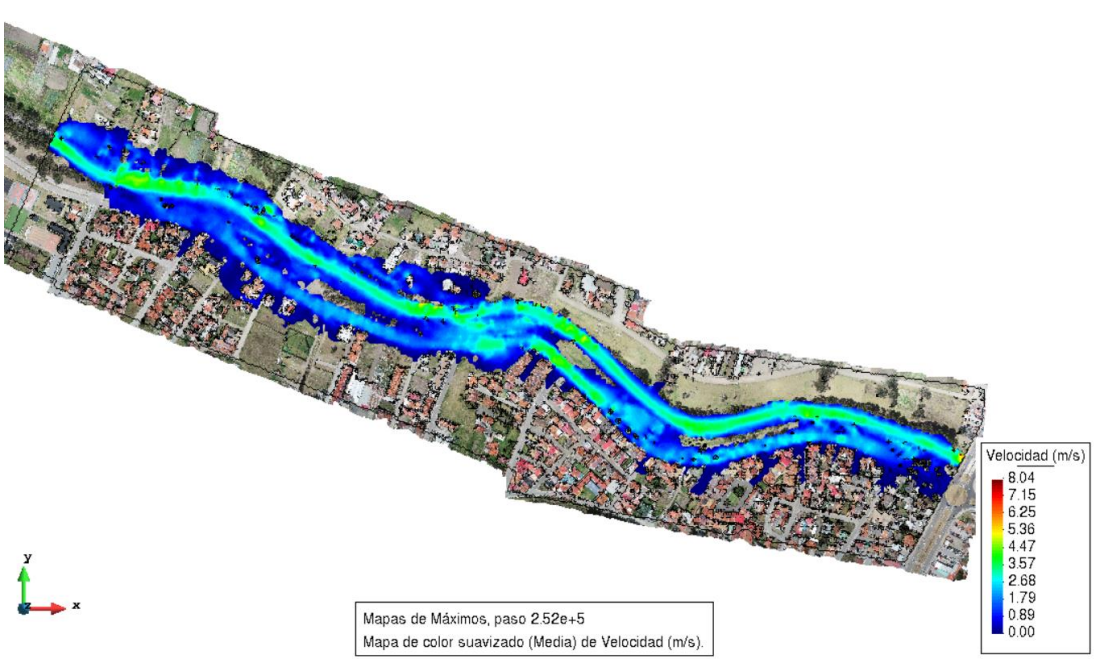

Figura 3. 20. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s).
Fuente: Autor.

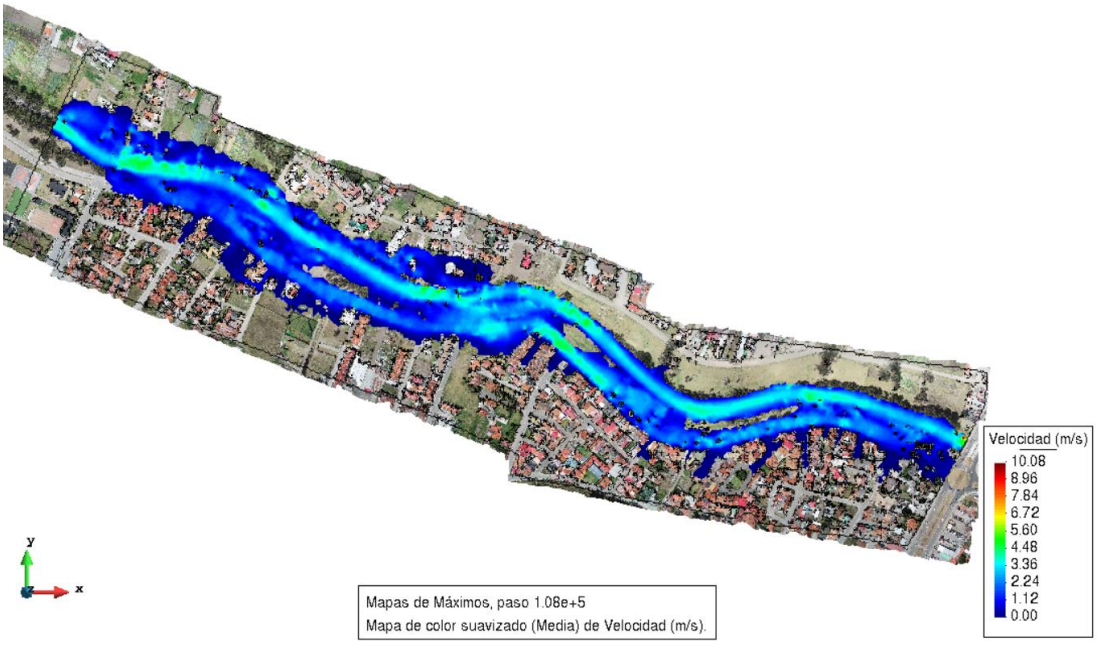

Figura 3. 21. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s).
Fuente: Autor

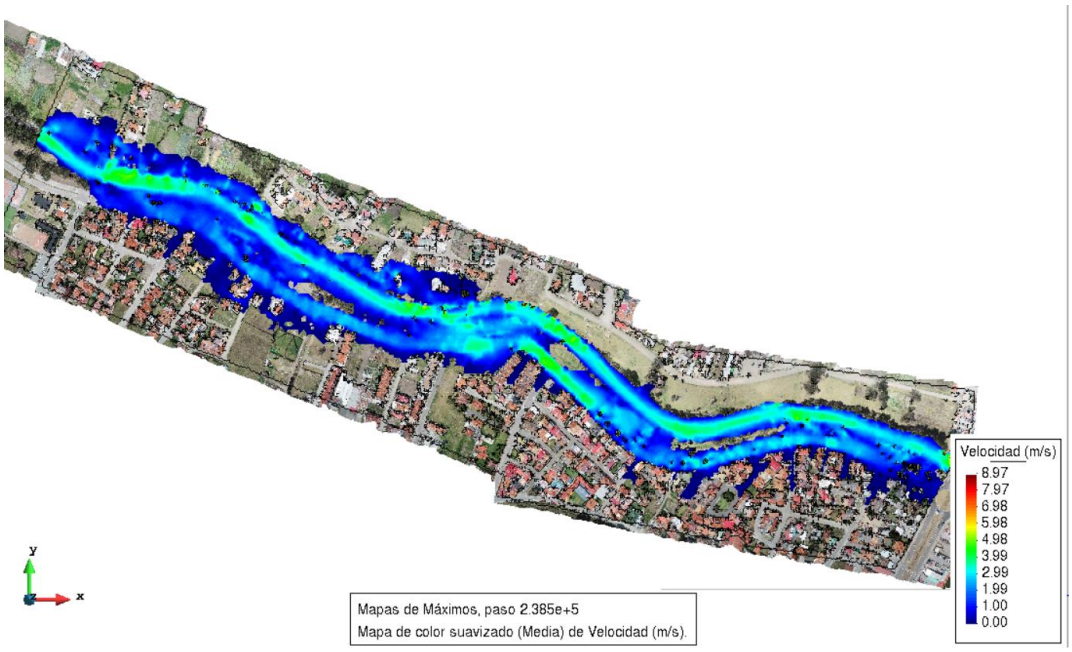

Figura 3. 22. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma: Validación 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s).
Fuente: Autor.

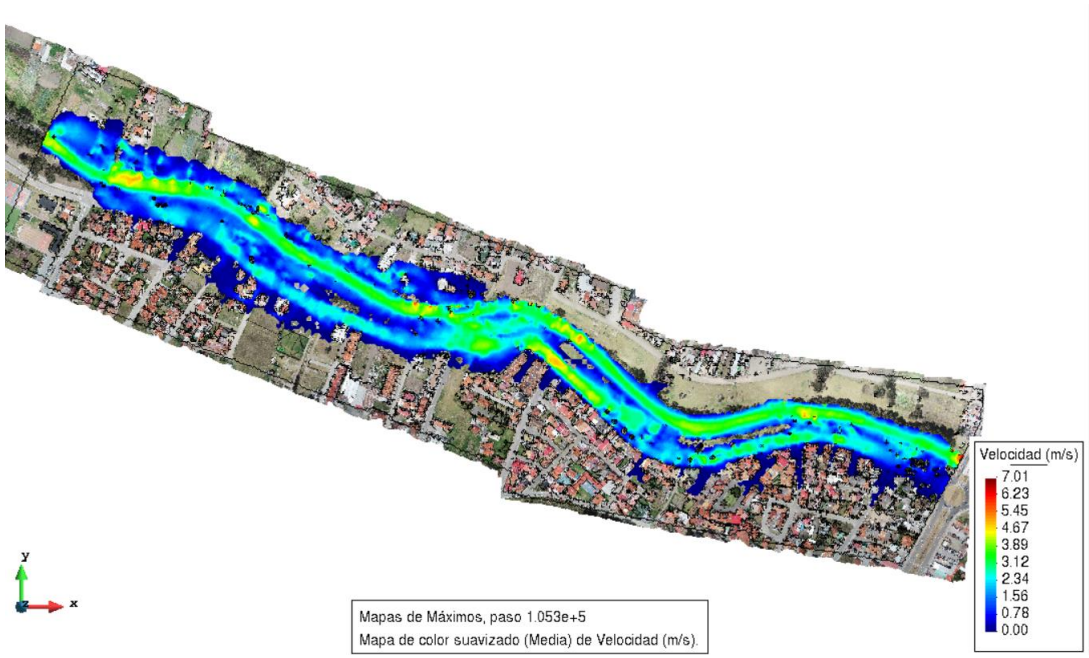

Figura 3. 23. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s).
Fuente: Autor.

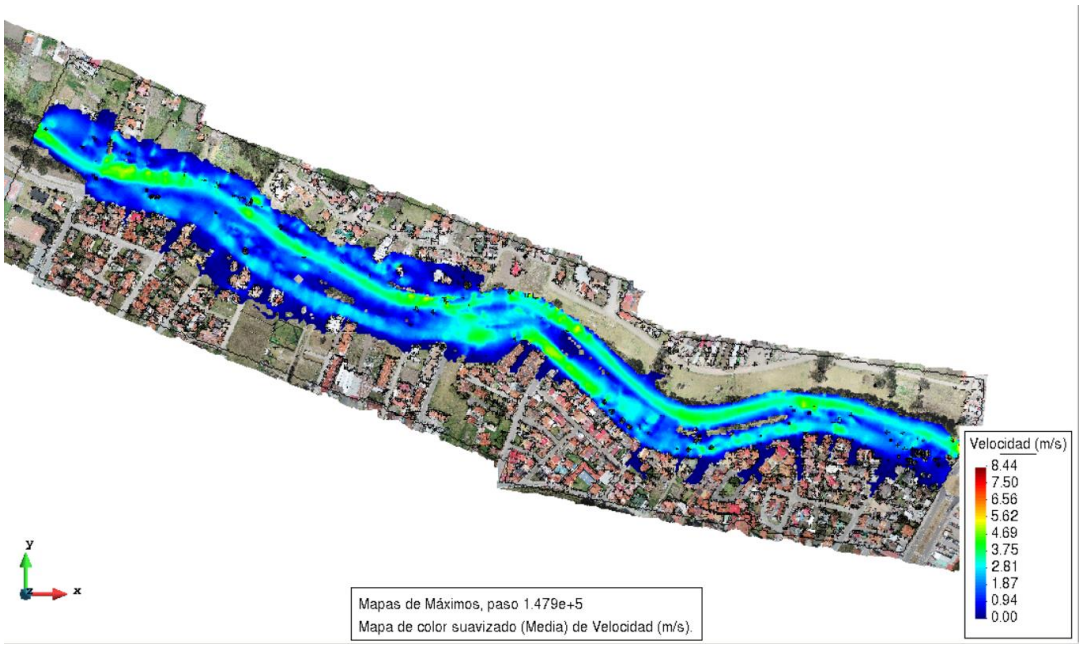

Figura 3. 24. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma: Validación 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s).
Fuente: Autor.

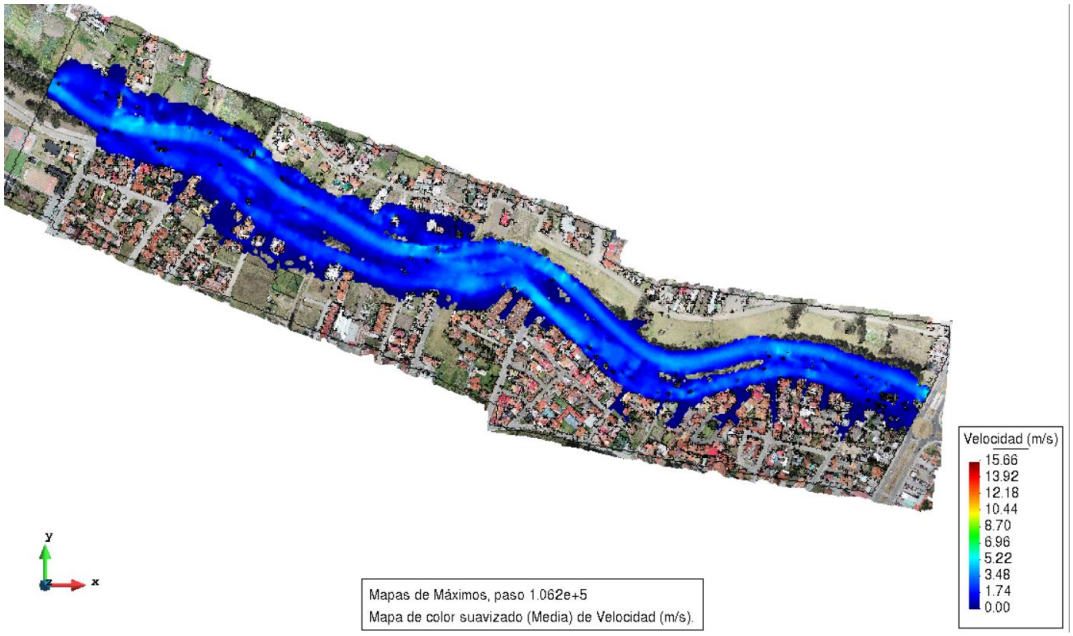

Figura 3. 25. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 8. (Caudal punta = 273 m3/s).
Fuente: Autor.

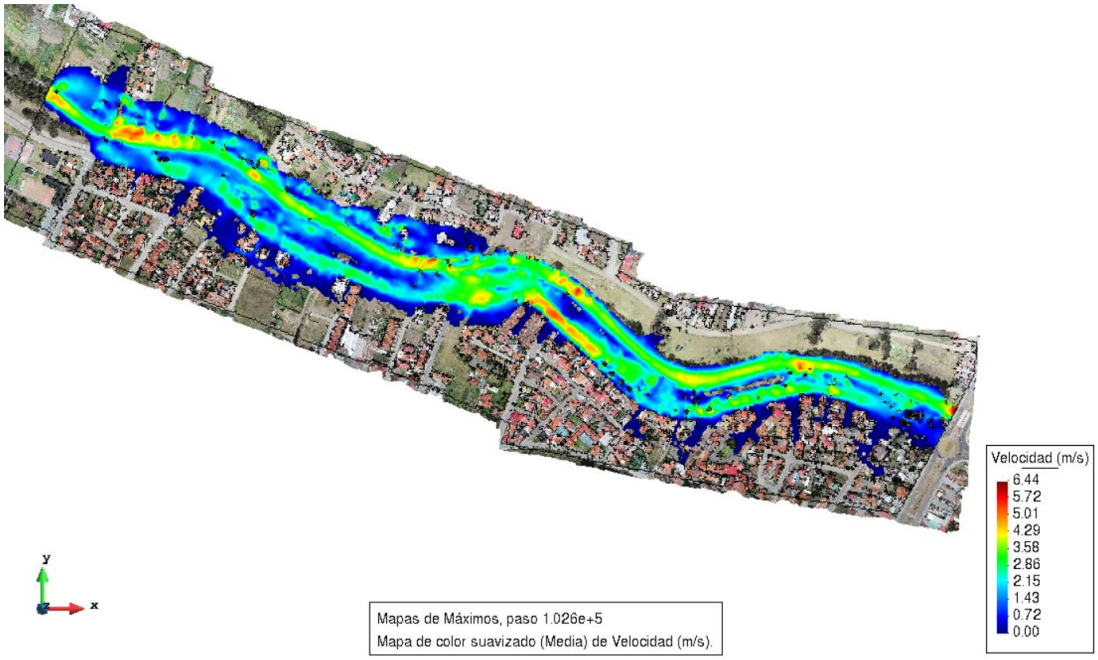

Figura 3. 26. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s).
Fuente: Autor.

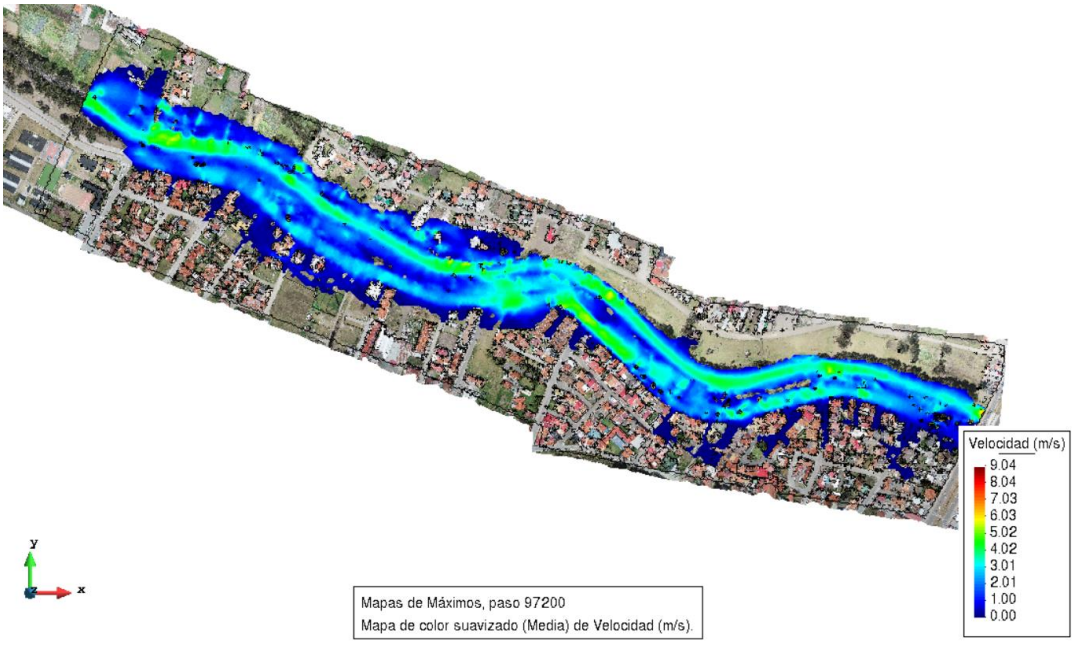

Figura 3. 27. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s).
Fuente: Autor.

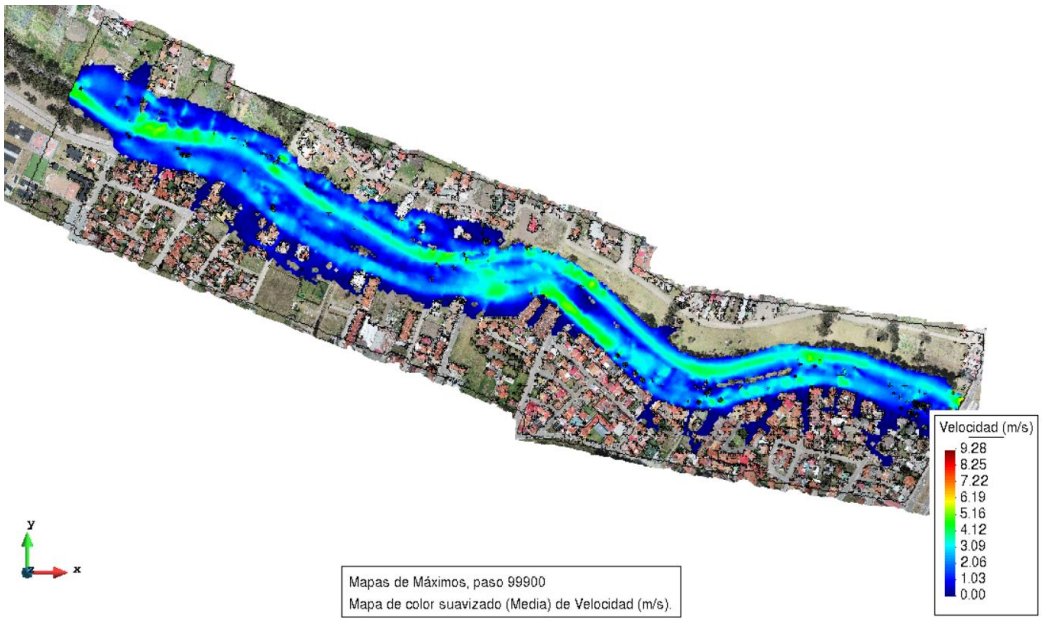

Figura 3. 28. Vista en planta de las máximas velocidades generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).
Fuente: Autor.

3.2.3 Cotas máximas

Las gráficas de cotas máximas se adjuntan en el Anexo A.3. Gráficas de cotas máximas.

3.2.4 Comparación de las modelaciones con un MDE antiguo.

A continuación (Figura 3. *29*. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). a la Figura 3. 41. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).), se presentará una comparación de dos modelaciones, la primera utilizando el MDE que tiene una resolución de 6 cm y la segunda utilizando un MDE obtenido por el SIGTIERRAS que posee una resolución de 3m.

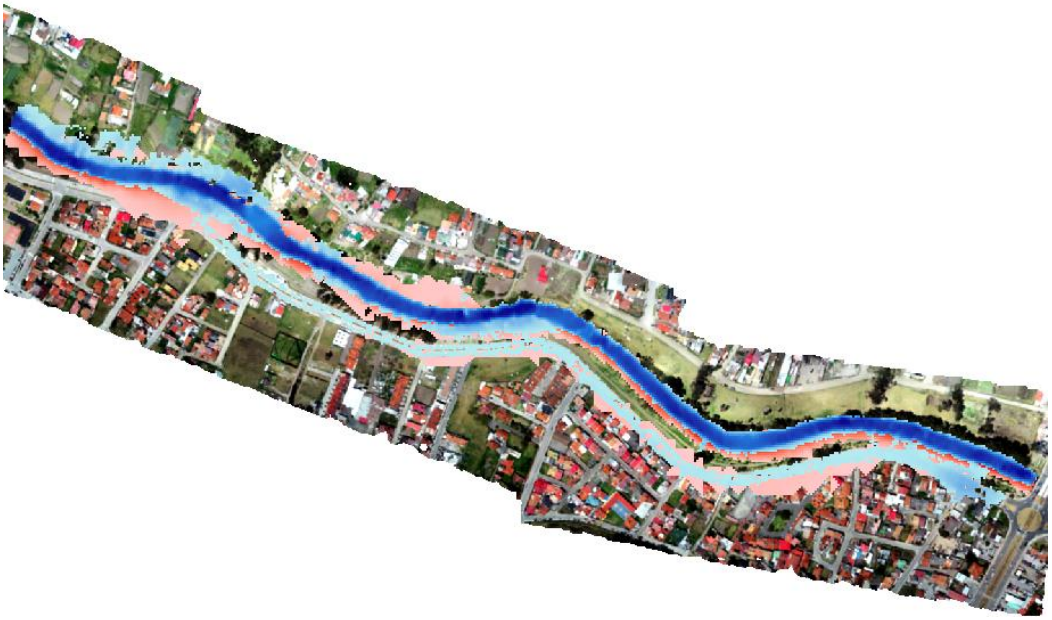

Figura 3. 29. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 30. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3) con el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 31. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 32. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 33. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 34. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 35. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma del evento del 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 36. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 37. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma del evento del 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 38. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 39. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 40. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura 3. 41. Comparación de la mancha de inundación de dos modelaciones con diferentes MDE; azul (MDE 6 cm) y rojo (MDE 3 m) con el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).
Fuente: Autor.

3.2.5 Análisis de las zonas más afectadas

Se realiza un análisis visual enfocándose en las zonas más afectadas con 3 diferentes caudales 100, 250 y 350 m3/s. Se puede apreciar en la Figura 3. 42. Comparación de la mancha de inundación de la zona crítica cercana a la Av. De las Américas con tres caudales diferentes, rojo (100 m3/s), azul (250 m3/s) y amarillo (350 m3/s). que los desbordamientos del margen derecho cubren inicialmente la Av. Primero de mayo y una mínima parte de la calle Alfonso María Mora, al subir el caudal a 250 m3/s la mayoría de las calles cercanas y

paralelas a la Av. de las Américas se ven afectadas. Y finalmente al incrementarse el caudal a 350 m3/s se puede apreciar que las calles que aumentan el área cubierta por agua son la Alfonso María Mora y la Darío Ordoñez.

Figura 3. 42. Comparación de la mancha de inundación de la zona crítica cercana a la Av. De las Américas con tres caudales diferentes, rojo (100 m3/s), azul (250 m3/s) y amarillo (350 m3/s). Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

Un MDE con condiciones idóneas requiere de un estricto control en cada uno de los requerimientos desde su génesis hasta transformarlo en el archivo en formato ASCII para usarlo en el software IBER.

Para lograr un MDE apto se requiere un número prudente de puntos de georreferenciación, esto va a depender del área de estudio. En este caso en particular cada uno de los puntos cubrió 6.42 hectáreas aproximadamente, con un excelente resultado.

Debido a la excelente resolución que posee el MDE (6 cm) y después de varias pruebas al momento de generar la geometría en el IBER, se verificó que las geometrías creadas con triángulos de magnitudes que oscilan en cada una de las opciones: lado mínimo de 0.5 m a 2 m, lado máximo de 10 m a 20 m, con una tolerancia constante de 0.3 m, la diferencia de la calidad de la geometría no es notoria.

Los modelos bidimensionales requieren de una capacidad computacional superior a la de los modelos en 1D y menos que para los modelos 3D, los resultados de la

modelación en 2D realizada en este trabajo se obtuvieron en tiempos que varían entre 3 a 4 horas.

En las gráficas en las que están sobrepuestos los dos modelos se pueden observar diferencias debido a la resolución de los modelos digitales de elevaciones y por la ausencia de la representación de edificaciones, bordillos y veredas en el modelo con resolución de 3 metros.

En un evento extremo las calles que se cubren con agua son la primero de mayo, la Darío Ordoñez Espinoza, Alfonso María Mora, Lizandro Abad, Carmela Malo, Cañuelas, Cantón Sígsig, Cantón Chunchi entre otras calles alcanzando hasta 0.5 m de altura de agua.

En los gráficos de velocidad se puede apreciar que a medida que el caudal va incrementando específicamente al superar los 250 m3/s, se producen ciertas velocidades críticas que están alrededor de 4 m/s en un 80% del tramo de análisis.

Las velocidades varían desde 1 m/s con caudales bajos hasta alcanzar velocidades de 5 m/s con caudales cercanos a los 350 m3/s en el cauce del río, mientras en la avenida más cercana, la primero de mayo, se dan velocidades extremas que rodean los 4 m/s.

RECOMENDACIONES

Una de las principales recomendaciones que se puede hacer para una modelación bidimensional, sin importar el software que se use, es la importancia de partir de una buena geometría. Necesariamente es útil realizar ciertas comprobaciones de cota, pendientes y alturas de los taludes que limitan el cauce del río.

La generación de un MDE a partir de fotogrametría con un vuelo de dron es buena hasta cierto punto cuando la vegetación no es mayormente densa, caso contrario, se recomienda levantar únicamente las llanuras de inundación por fotogrametría mientras que el cauce es recomendable hacerlo con estación total y complementar estas dos técnicas.

Una modelación hidráulica bidimensional en IBER requiere un alto costo computacional, se recomienda un ordenador con una RAM mayor a 8 GB, con una tarjeta de video fuerte, como requisitos mínimos para no tener inconvenientes con la interfaz y todo el procesamiento de información que se requiere hacer.

La georreferenciación es uno de los puntos clave en la creación de un MDE a partir de fotogrametría, el número de puntos dependerá del área de estudio y deberán estar estratégicamente ubicados para lograr una distribución homogénea en todo el modelo,

logrando una relación análoga punto / área, adicionalmente se recomienda que por más pequeño que sea el modelo colocar como mínimo 4 puntos de referencia.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, M. (2015). Analisis de la cobertura periodistica realizada por los diarios EL TIEMPO y EL MERCURIO, durante el periodo febrero-mayo 2012 y 2013, en temas relacionados con la Gestion de Riesgos en Cuenca. Cuenca.

Castro Salinas, S. V. (2015). Evaluación del comportamiento hidráulico de obras de captación mediante modelamiento hidrodinámico del flujo en 1-D y 2-D. Cuenca.

Castro, L., & Patrick, W. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. Maskana.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2012). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2014). Manual de referencia hidráulico.

Cueva, M., Cañón, J., & Cea, L. (2019). El modelo Iber como herramienta docente de ayuda al aprendizaje y análisis de fenómenos de flujo bidimensional.

Fernandez de Cordova, J. (2019). Propuesta de un sistema de alerta temprana ante inundaciones por lluvias intensas. Caso de estudio: río Yanuncay en Cuenca - Ecuador. La Habana.

Garcia, D. (2017). Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D. Bogota.

Guarniz, C. (2014). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis de rotura de presas de materiales sueltos; y aplicación a la presa Palo Redondo . Trujillo.

Martínez, P., & Meneses, D. (2017). Determinación del Coeficiente de Rugosidad del río Yanuncay por las Fórmulas: Meyer-Peter y Möller, Limerinos y HEC-RAS. Cuenca.

Maurad Guncay, K. M. (2017). Estudio de desempeño hidráulico del canal multipropósito del laboratorio de hidráulica y dinámica de fluidos LH&DF del campus Balzay. Cuenca.

Mesa, Y., & Jhony, V. (2011). Modelación Matemática en la Historia de las Matemáticas. Una mirada al concepto de Función cuadrática. Colombia.

Naranjo, D. (2017). Elaboración de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997 - 2017. Cuenca.

Ojeda, A., & Tapia, J. (2011). Estudio en modelo hidráulico de las obras del trasvase del río Daule al río Vinces. Quito.

Pesantez, M., & sanchez, S. (2016). Simulación numérica del Flujo de sedimentos en el río Yanuncay mediante modelación matemática bidimensional. Cuenca.

Ribé, M., Blade, E., & Dolz, J. (2017). Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón.

Rios, D. (2014). Investigación de la disipación de energía en el modelo hidráulico del proyecto Alto Piura. Piura.

Rocha, A. (2003). Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulica.

Rodas, M. (2018). Estudio técnico para rectificación y protección de márgenes del río Tarqui . Cuenca.

Sacoto, D. (2017). Análisis de vulnerabilidad de inundaciones del río Yanuncay y evaluación de estructuras en el tramo comprendido entre Barabón y los Tres Puentes. Cuenca.

Salamea Guillén, T. A. (2015). Modelamiento Bidimensional Hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a tráves del río Calabí y obras hidráulicas. Cuenca.

Tiempo. (25 de Mayo de 2018). Desbordamiento del río Yanuncay causa inundaciones. Obtenido de https://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/desbordamiento-rio-yanuncay-cuenca

Zamorano, R. (2014). Modelación numérica 3D aplicada al diseño de las obras hidráulicas de la Central Baker 1, región de Aysén. Santiago.

ANEXOS

Anexo A.1. Uso del Software Agisoft PhotoScan.

La siguiente información será útil para lograr la depuración de un levantamiento topográfico realizado por fotogrametría. En el cual se requiere eliminar cierto tipo de pixeles que no aporten al propósito de la investigación, esto se logrará con el software Agisoft PhotoScan Professional.

La interfaz de este programa computacional es muy amigable y está bastante bien equipada con varias herramientas, sin embargo, para el procedimiento de eliminación de pixeles únicamente se utilizarán cinco de ellas. Se necesita: redimensionar volumen de trabajo, rotar la zona de trabajo, seleccionar lo que se desea eliminar, borrarlo y finalmente generar el MDE.

En la parte izquierda de la interfaz del software, como se observa en la figura A1.1, está el espacio de trabajo, aquí se muestran cada uno de los archivos que se van creando a lo largo de todo el procedimiento. Generalmente se crea la nube densa de puntos y a partir de este, se obtiene el MDE y la Ortofoto.

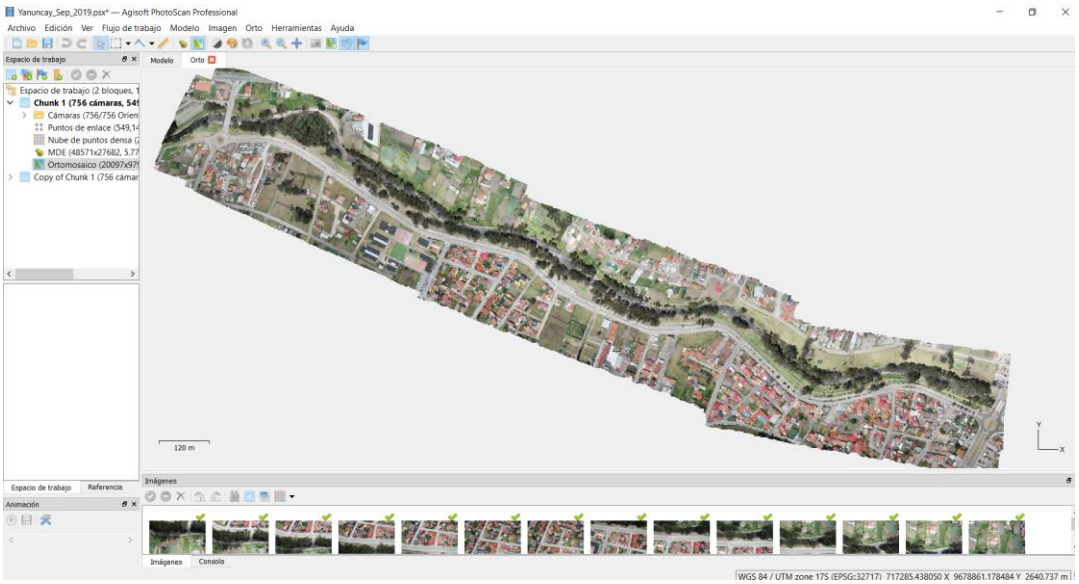

Figura A1. 1. Interfaz del software PhotoScan.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

Como recomendación general, se sugiere que antes de iniciar la edición se realice una copia del chunk (nombre que se le da a la sección del espacio de trabajo donde se guarda cada uno de los archivos). Se genera un respaldo de información ante cualquier situación imprevista, haciendo clic derecho en el Chunk 1, y se selecciona duplicar, como se muestra en la figura A1.2. Seguidamente aparece una ventana similar a la de la figura A1.3 en la que se escoge lo que se quiere copiar, para este trabajo, únicamente serviría la nube de puntos densa.

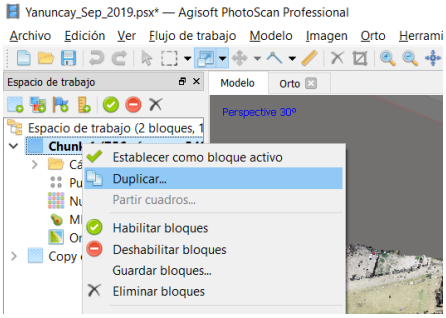

Figura A1. 2. Comandos para duplicar el chunk.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

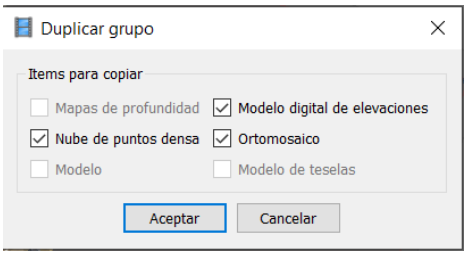

Figura A1. 3. Ventana emergente para duplicar el chunk.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

El procedimiento para depurar la información es el siguiente: inicialmente se puede redimensionar el volumen de trabajo, para lograr optimizar el software con la herramienta que se muestra en la figura A1.6. Seguidamente se arrastran los círculos que están en las esquinas de la caja que rodea la zona de trabajo y de esta forma se puede redimensionar al tamaño requerido según el criterio del usuario, como muestra la figura A1.7. Con la ayuda de la esfera central que se muestra en la figura A1.5, se logra rotar hasta conseguir una vista similar a la figura A1.9, en la que se pueda seleccionar únicamente los pixeles que se van a eliminar, en este caso la vegetación. Para este proceso existen tres formas de realizar la selección: rectangular, circular y de forma libre, esto se muestra en la figura A1.4.

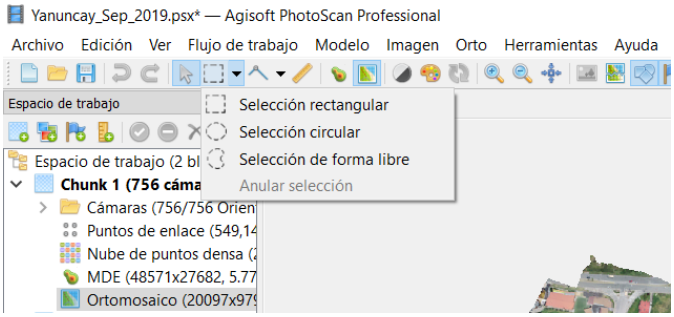

Figura A1. 4. Tipos de selecciones
Fuente: Agisoft Photo Scan.

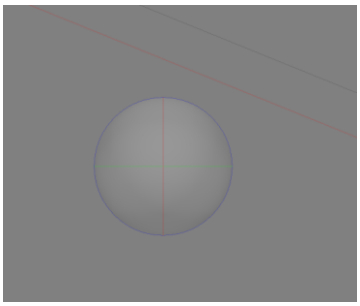

Figura A1. 5. Esfera central con la que se logra rotar alrededor de los ejes X,Y, Z.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

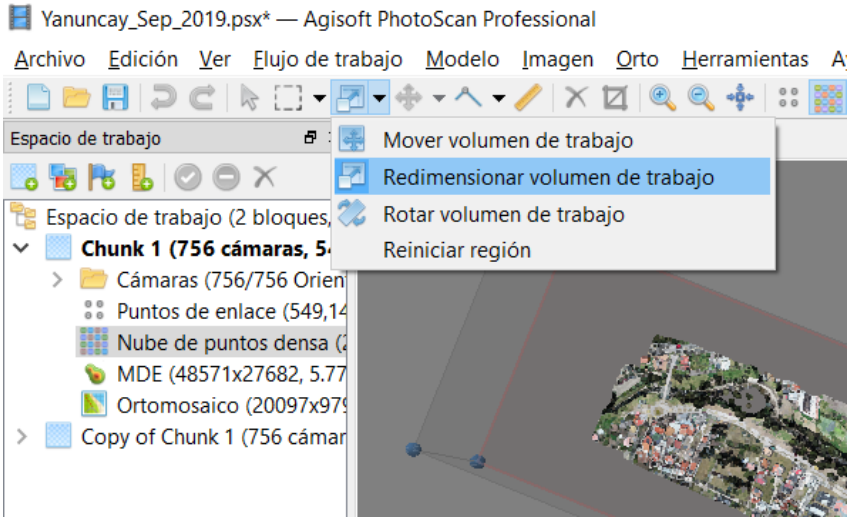

Figura A1. 6. Comandos para redimensionar el volumen de trabajo.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

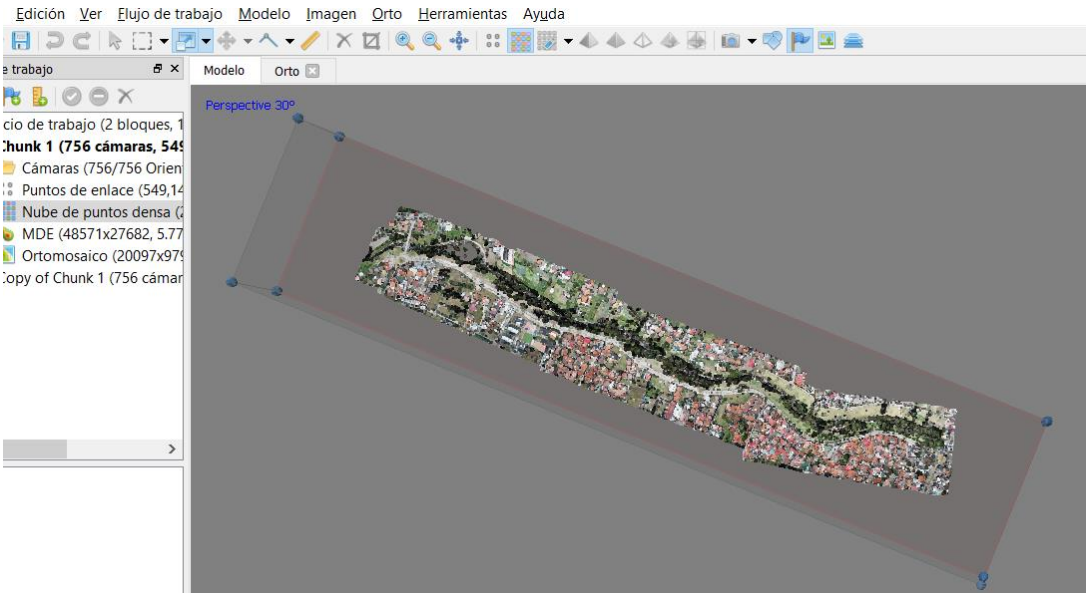

Figura A1. 7. Redimensionando la caja de trabajo.
Fuente: Agisoft PhotoScan.

Una vez seleccionados los pixeles, estos se eliminan con la tecla Delete. Si se seleccionan zonas por error estas se podrían deseleccionar con la tecla escape (Esc). Finalmente borrado todo lo requerido, se observa que ciertos tramos carecerán de información como se muestra en la figura A1.8. Sin embargo, al crear el MDE, el software generará esta información mediante un proceso de interpolación utilizando los pixeles que bordean estas zonas.

Figura A1. 8. Vista en planta de la zona de estudio después de eliminar la vegetación.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

Figura A1. 9. Vista lateral del proyecto antes de eliminar la vegetación.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

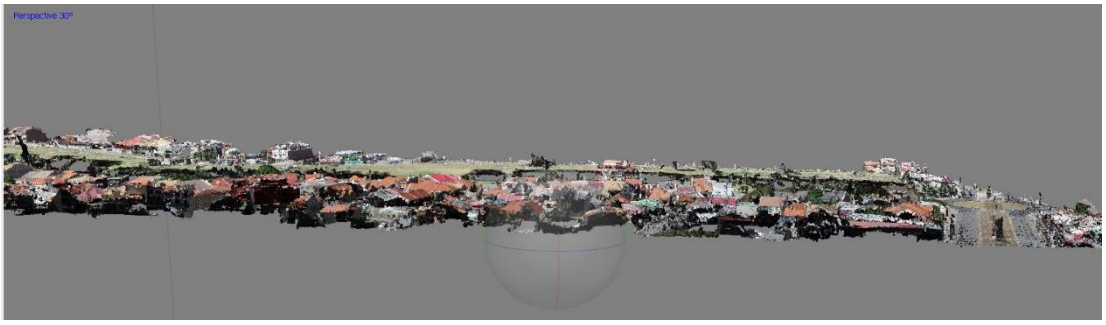

Figura A1. 10. Vista lateral del proyecto después de eliminar la vegetación.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

Para la generación del MDE a partir de la nueva nube de puntos depurada se ubica en la barra de menú: Flujo de trabajo / Crear modelo digital de elevaciones, con esto se obtendrá una ventana, análoga a la de la figura A1.11. En esta se escoge el tipo de georreferenciación conveniente, por ejemplo para Ecuador: WGS 84 / UTM zone 17S, el resto de opciones las dejamos por defecto y se acepta. Aparecerá una barra que mostrara el progreso y su duración que va a depender de la resolución y del tamaño de la zona de estudio.

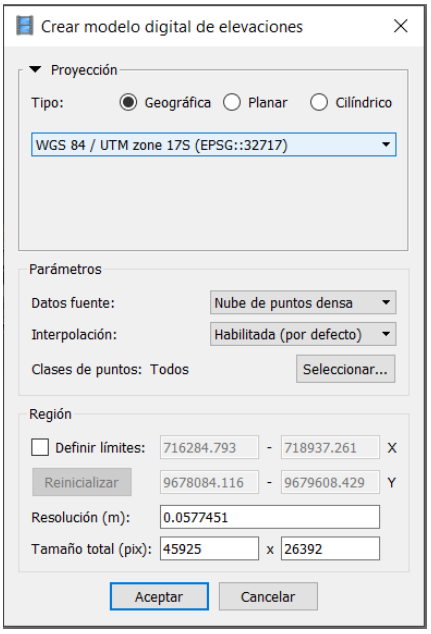

Figura A1. 11. Ventana emergente con la que se obtiene el MDE.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

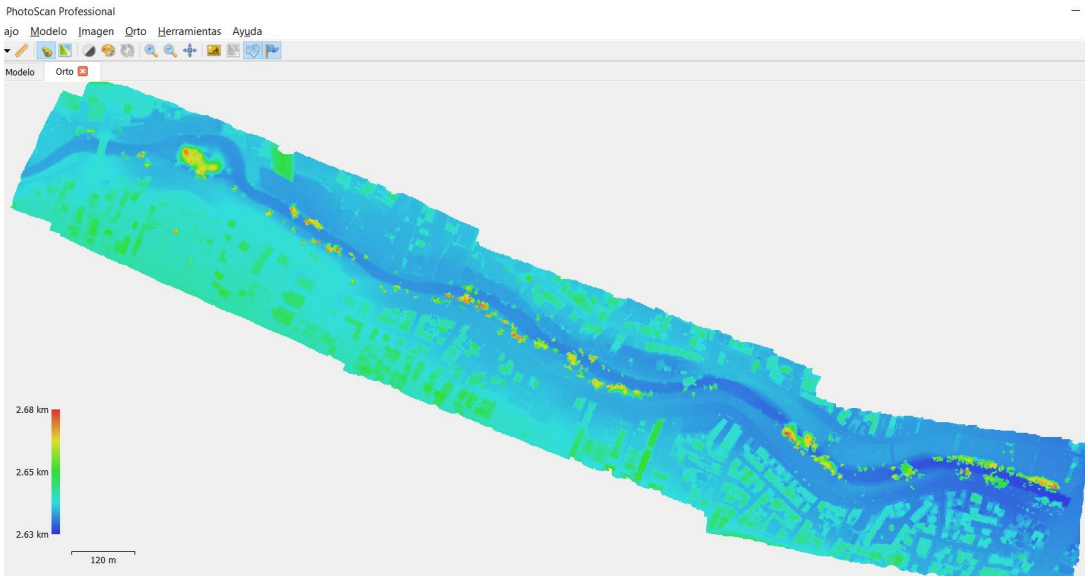

Figura A1. 12. MDE generado.
Fuente: Agisoft Photo Scan.

Anexo A.2. Hidrogramas para la modelación.

A continuación, se presentan varios hidrogramas obtenidos del proyecto de investigación “Propuesta de un sistema de Alerta temprana ante inundaciones por

lluvias intensas" Fernandez de Cordova (2019). Los dos primeros representan eventos reales suscitados el 14 de mayo del 2017 y el 24 de mayo del 2018 respectivamente. Estos, son datos representativos de la estación Bomberos, y cubren un rango de caudales entre 100 y 350 m3/s que pueden generar problemas de desbordamientos Figura A2. *1.* Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018. a la Figura A2. *13.* Hidrograma 11 (caudal punta = 351.3 m3/s).. En las siguientes gráficas se puede observar que se tiene información por un lapso de 147 000 segundos (40 horas) o más.

Figura A2. 1. Caudales registrados durante el evento del día 24 de mayo del 2018.
Fuente: Fernandez de Cordova (2019).

Figura A2. 2. Caudales registrados durante el evento del día 14 de mayo del 2017.
Fuente: Fernandez de Cordova (2019).

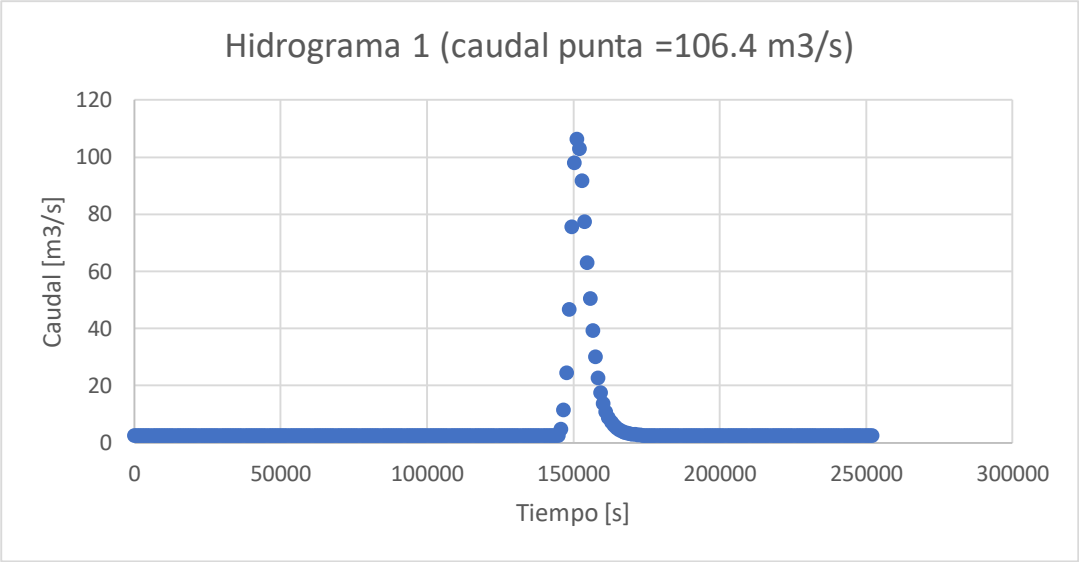

Figura A2. 3. Hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

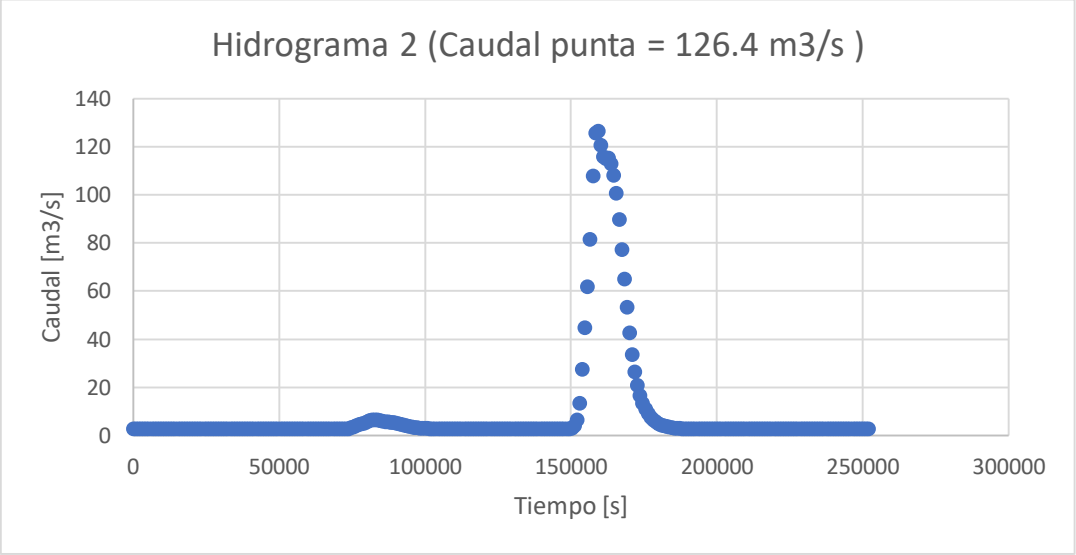

Figura A2. 4. Hidrograma 2 (caudal punta = 126.4 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

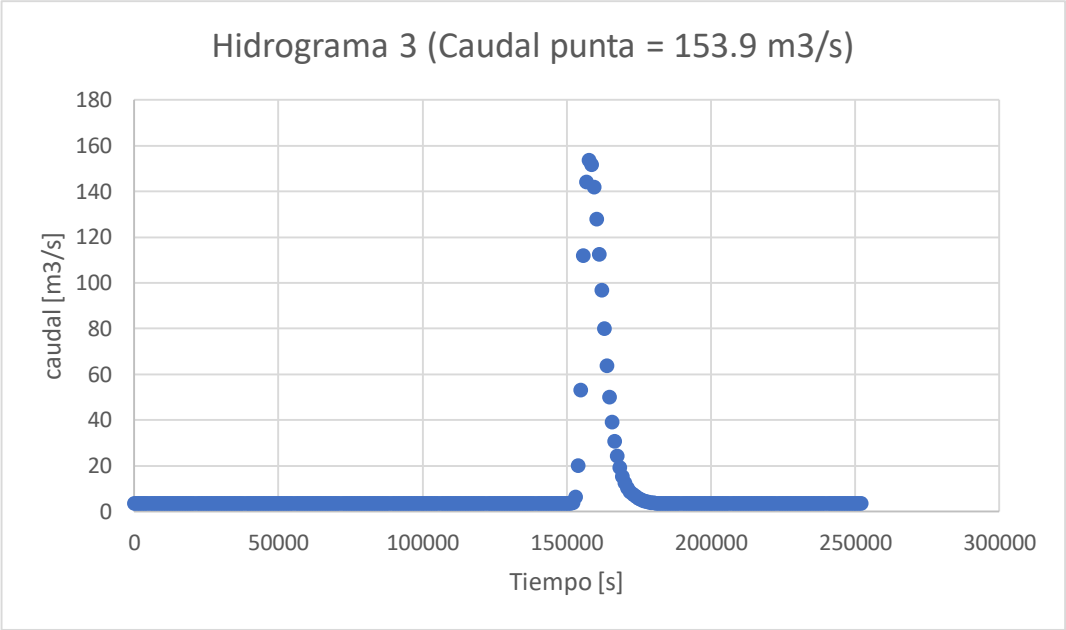

Figura A2. 5. Hidrograma 3 (caudal punta = 153.9 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

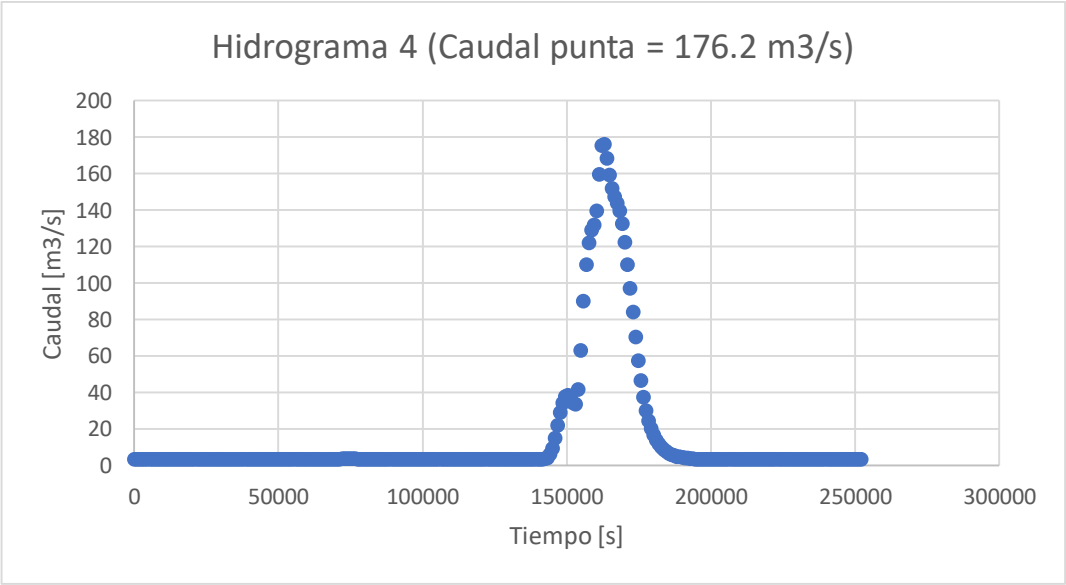

Figura A2. 6. A2.6. Hidrograma 4 (caudal punta = 176.2 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

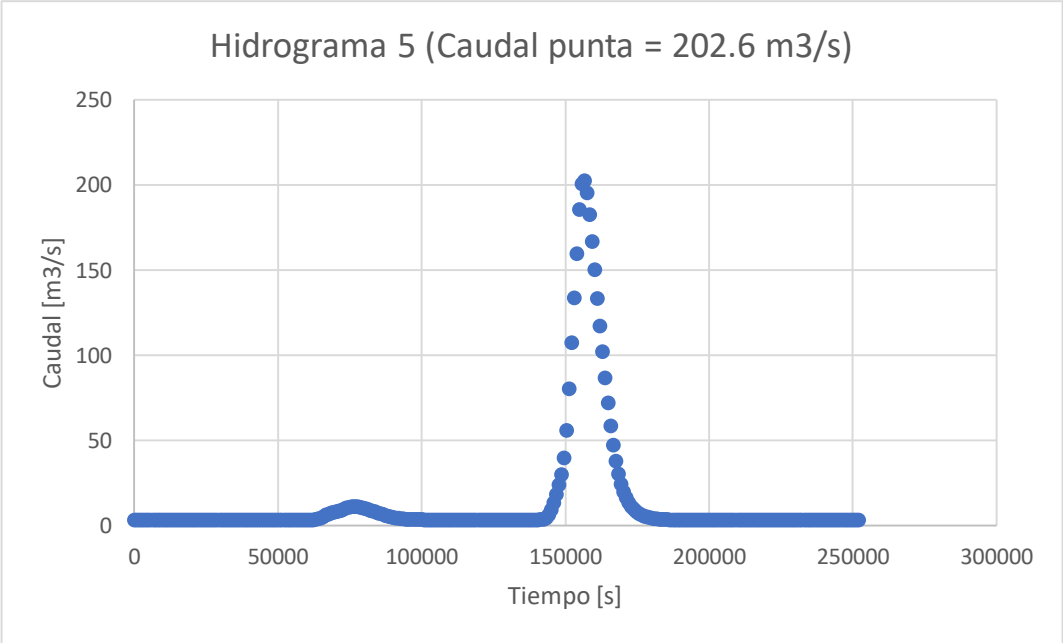

Figura A2. 7. Hidrograma 5 (caudal punta =202.6 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

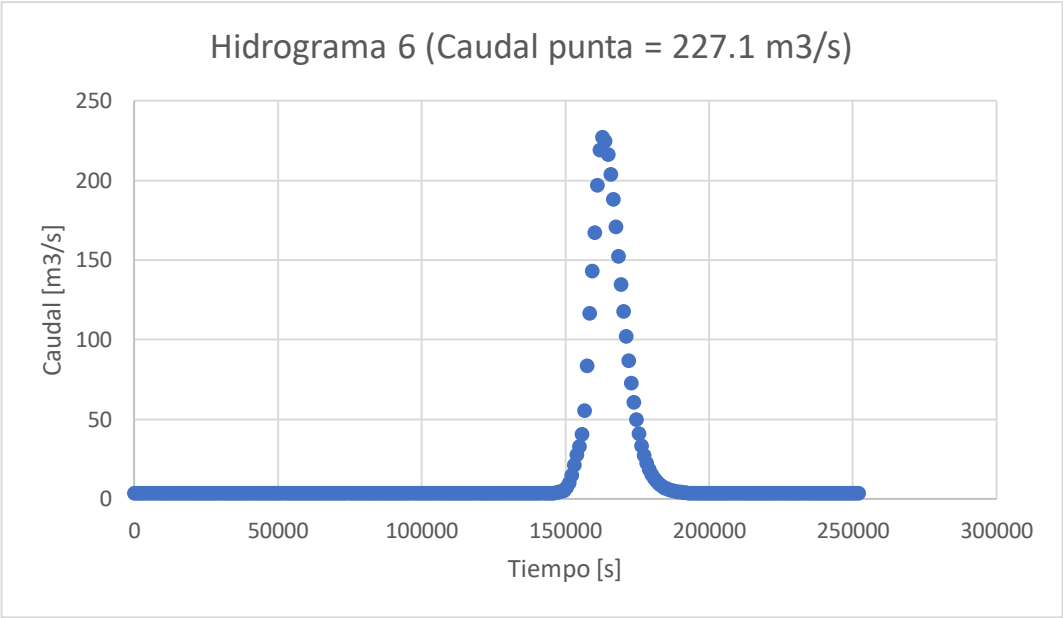

Figura A2. 8. Hidrograma 6 (caudal punta = 227.1 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

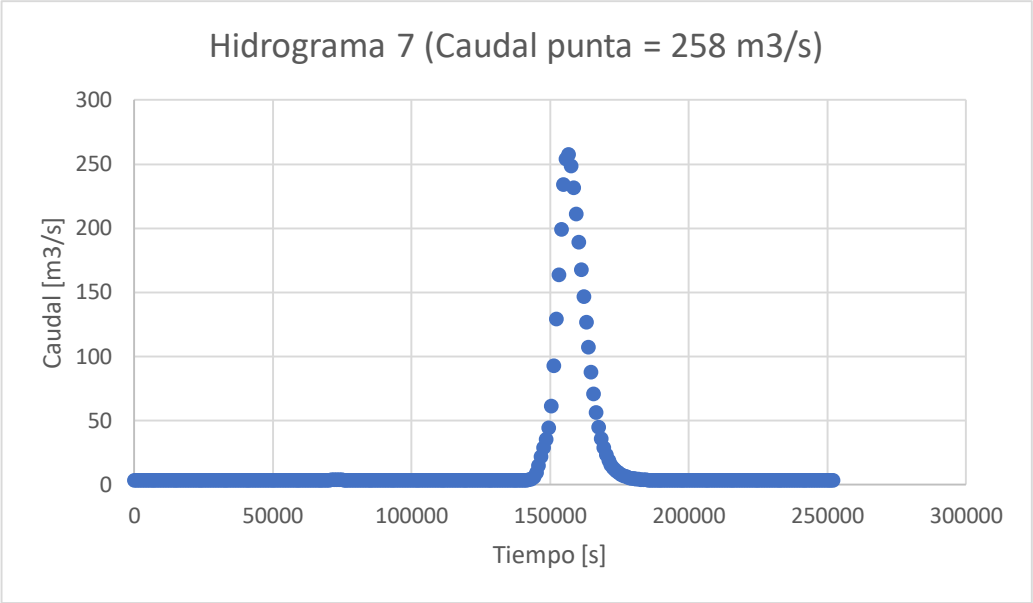

Figura A2. 9. Hidrograma 7 (caudal punta = 258 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

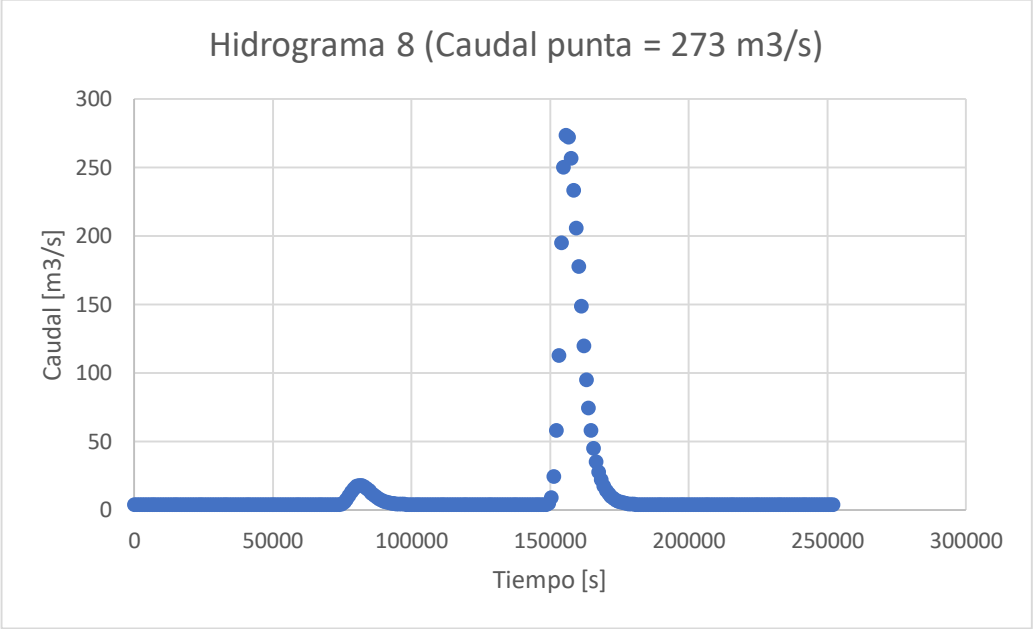

Figura A2. 10. Hidrograma 8 (caudal punta = 273 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

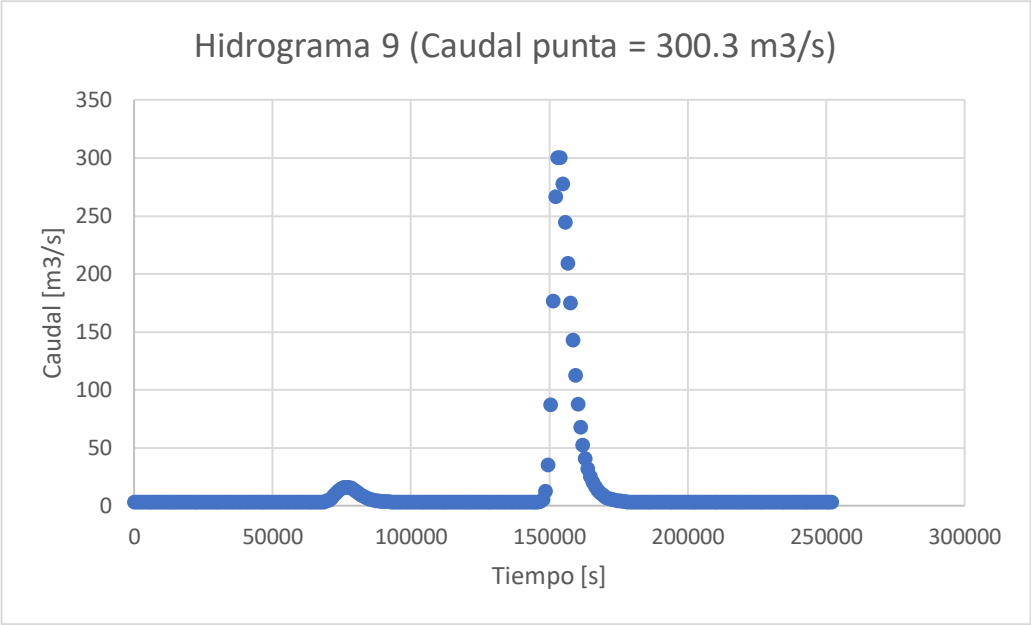

Figura A2. 11. Hidrograma 9 (caudal punta = 300.3 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

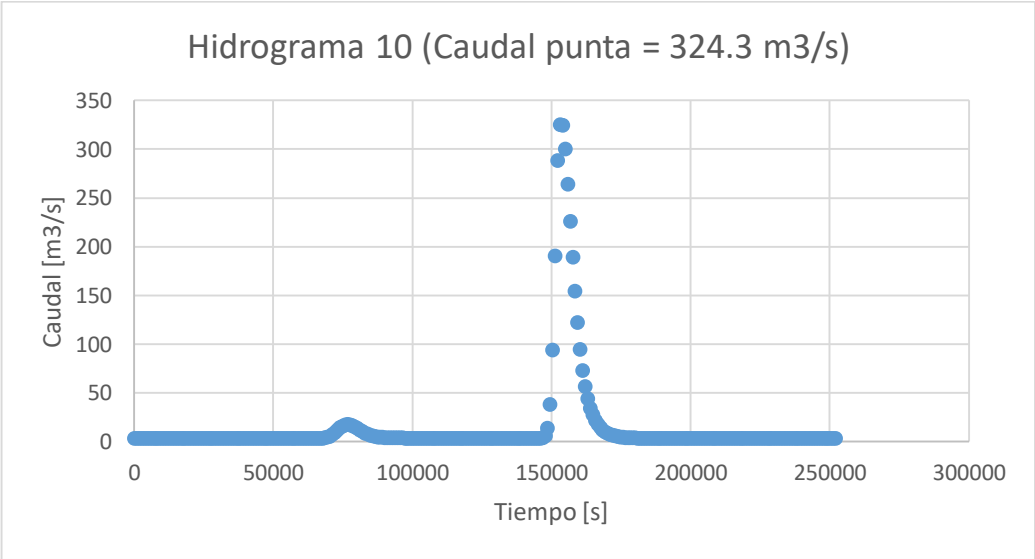

Figura A2. 12. Hidrograma 10 (caudal punta = 324.3 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

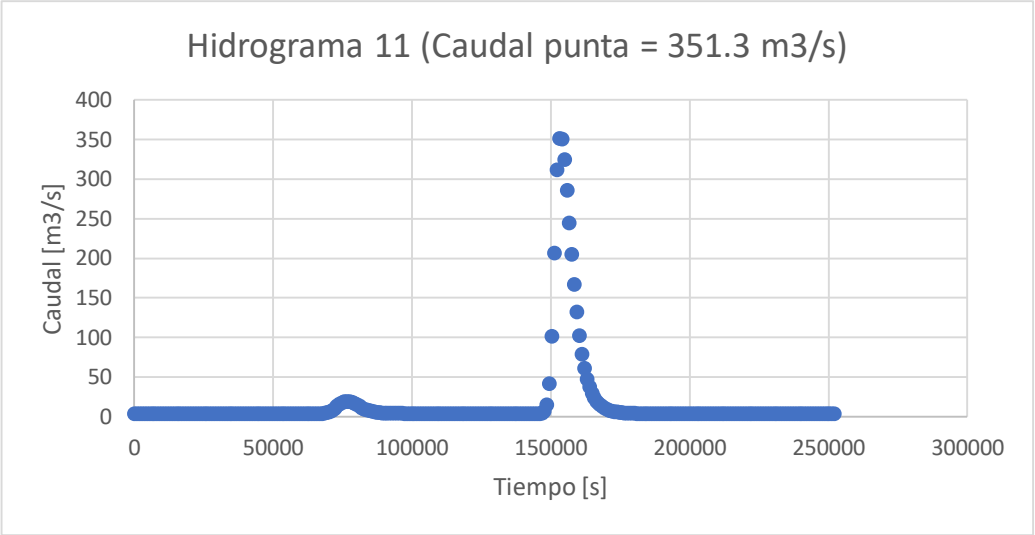

Figura A2. 13. Hidrograma 11 (caudal punta = 351.3 m3/s).
Fuente: (Fernandez de Cordova, 2019).

Anexo A.3. Gráficas de cotas máximas.

Las siguientes gráficas Figura A3. *1*. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s). a la Figura A3. *13*. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).) representaran la cota máxima que el agua va a alcanzar con cada uno de los hidrogramas, por todo el tramo de análisis.

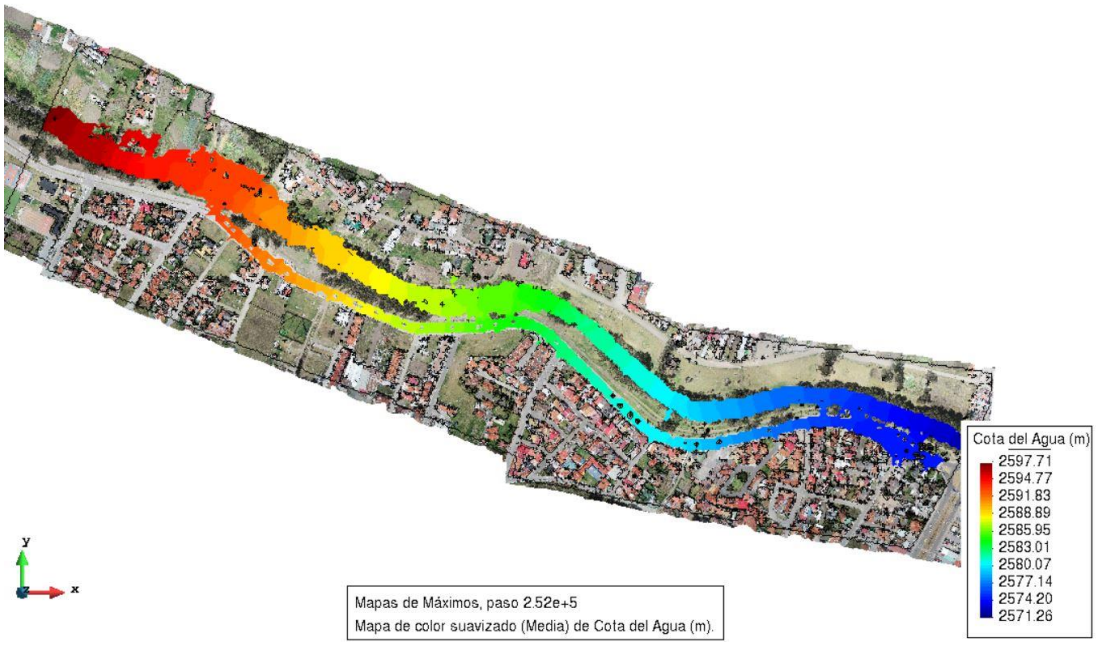

Figura A3. 1. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 1 (Caudal punta = 106.4 m3/s).
Fuente: Autor.

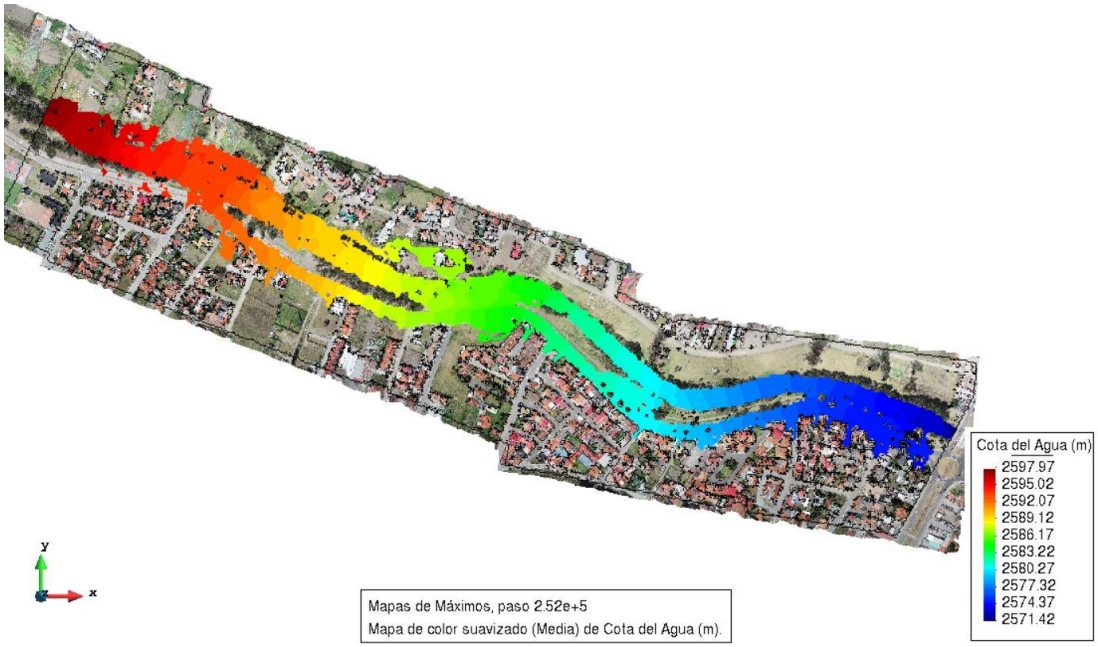

Figura A3. 2. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 2 (Caudal punta = 126.4 m3/s).
Fuente: Autor.

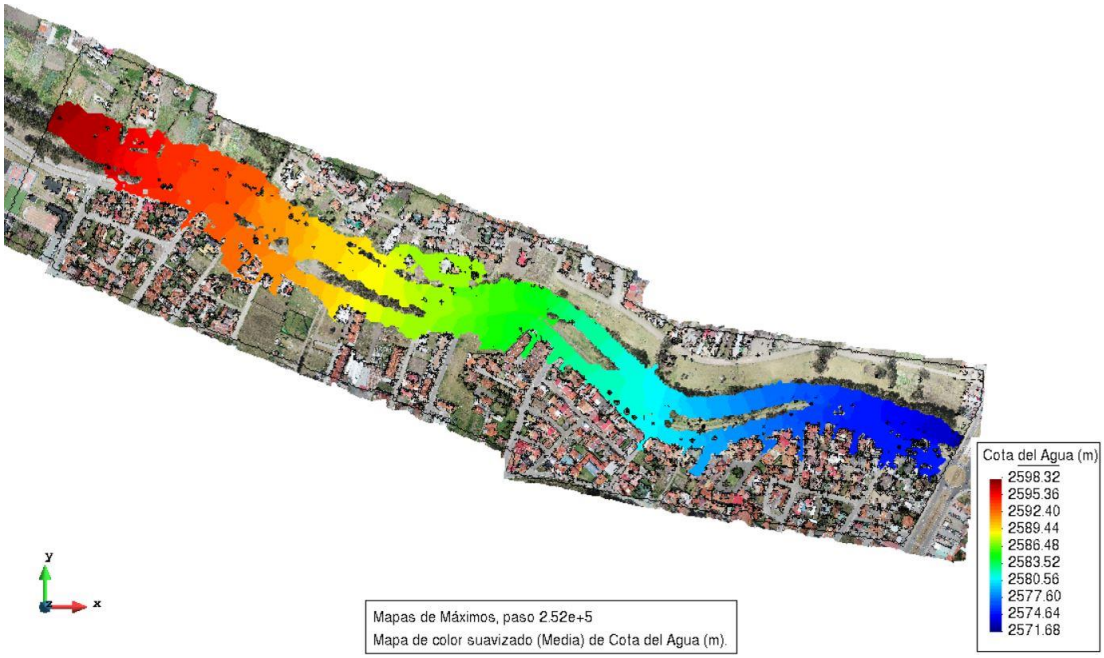

Figura A3. 3. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 3 (Caudal punta = 153.9 m3/s).
Fuente: Autor.

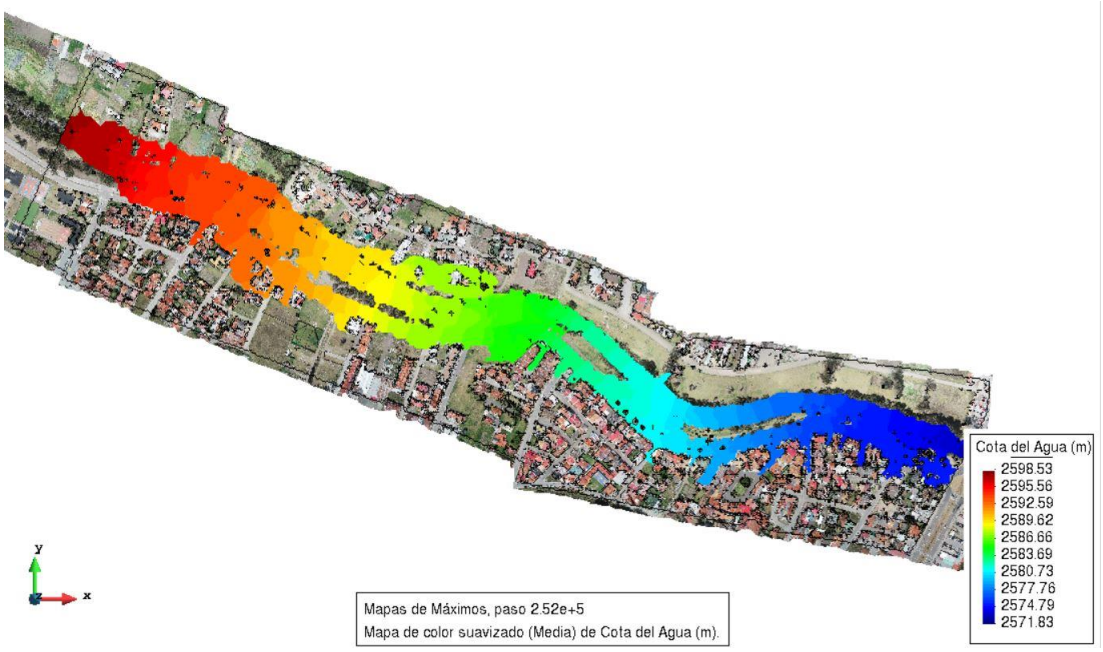

Figura A3. 4. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 4 (Caudal punta = 176.2 m3/s).
Fuente: Autor.

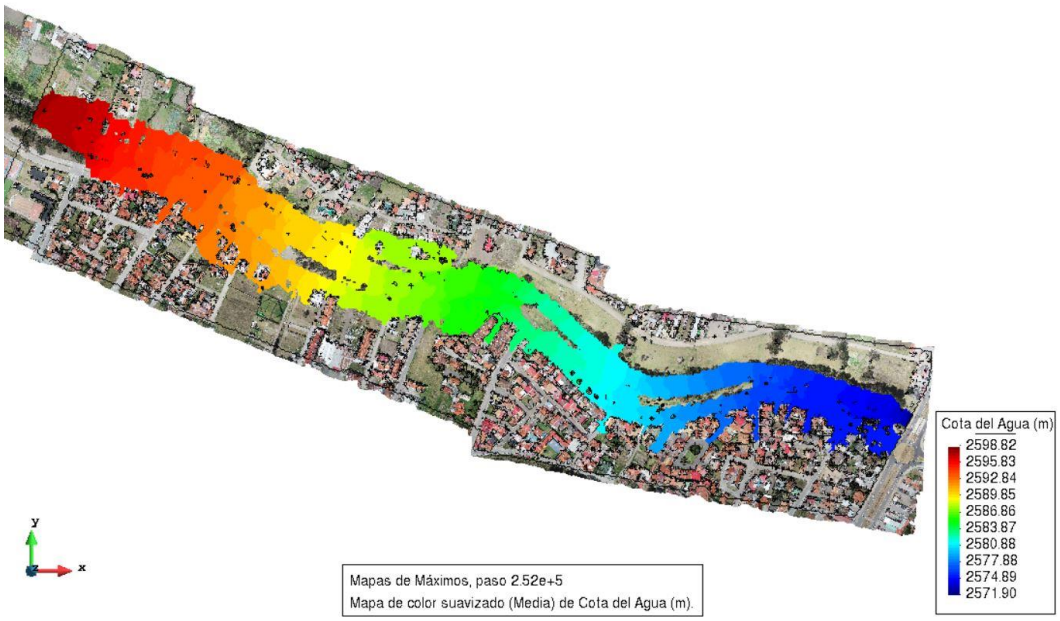

Figura A3. 5. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 5 (Caudal punta = 202.6 m3/s).
Fuente: Autor.

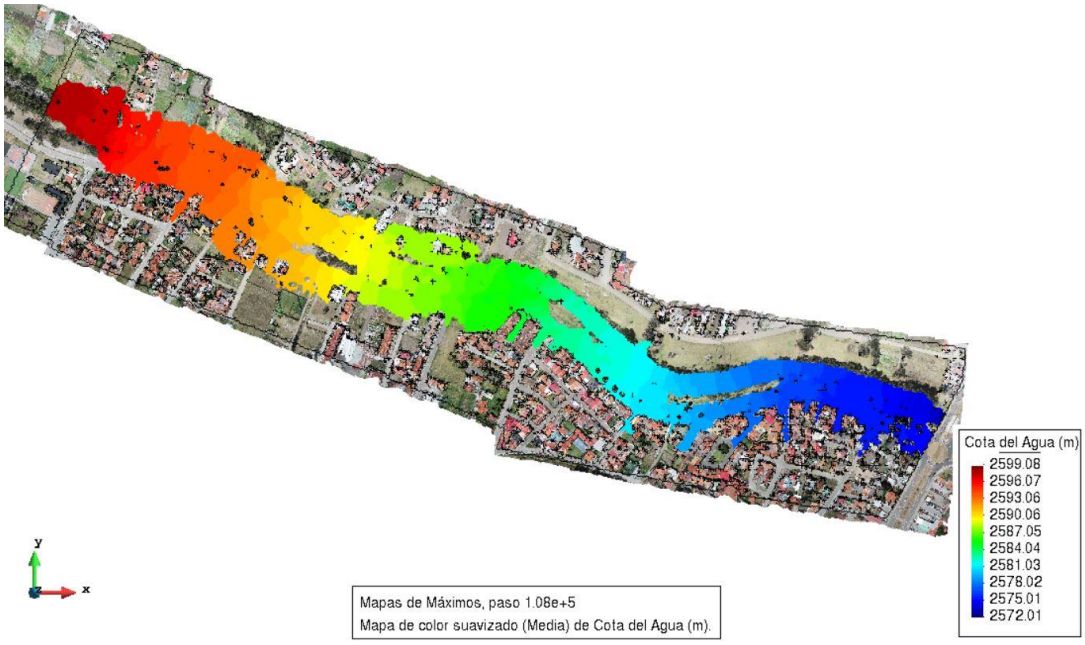

Figura A3. 6. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 6 (Caudal punta = 227.1 m3/s).
Fuente: Autor.

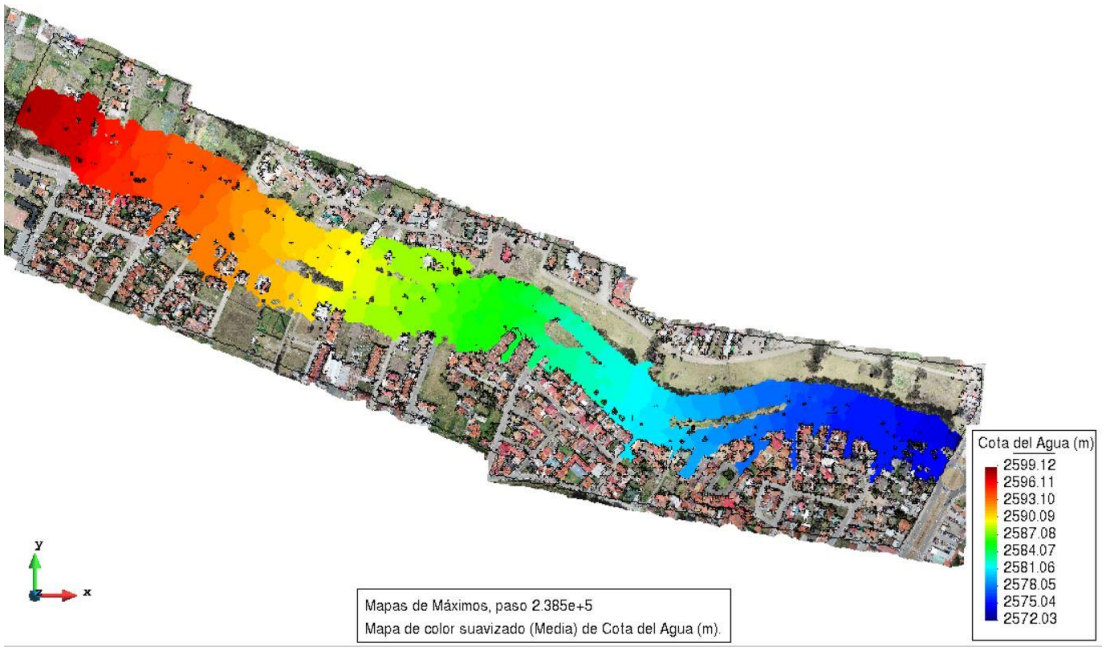

Figura A3. 7. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el evento producido el 24 de mayo del 2018 (Caudal punta = 231 m3/s).
Fuente: Autor.

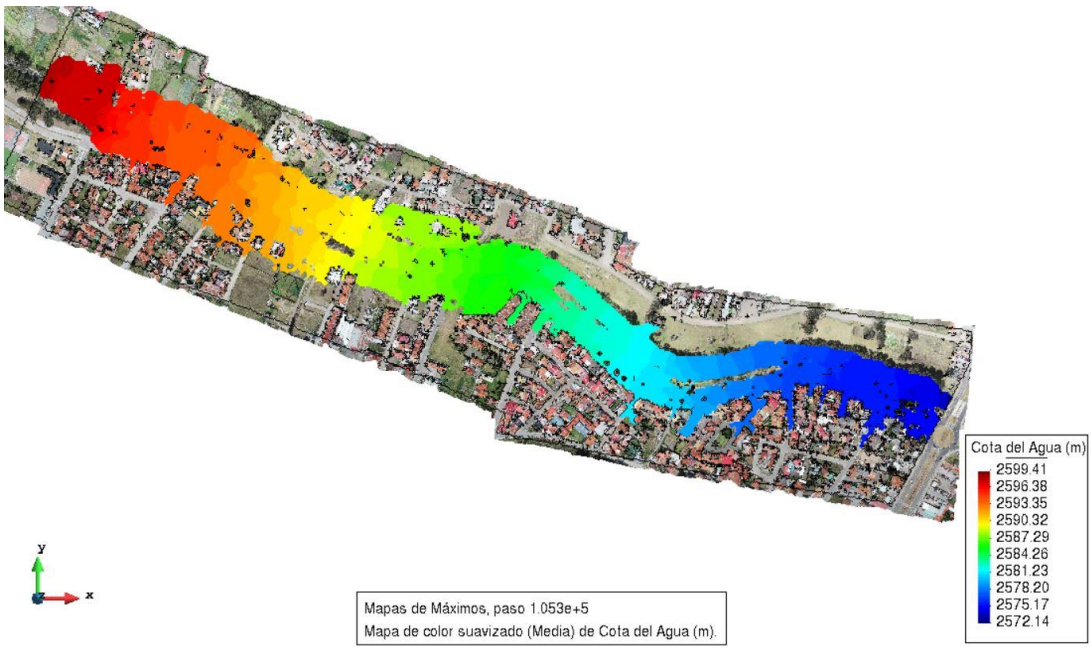

Figura A3. 8. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 7 (Caudal punta = 258 m3/s).
Fuente: Autor.

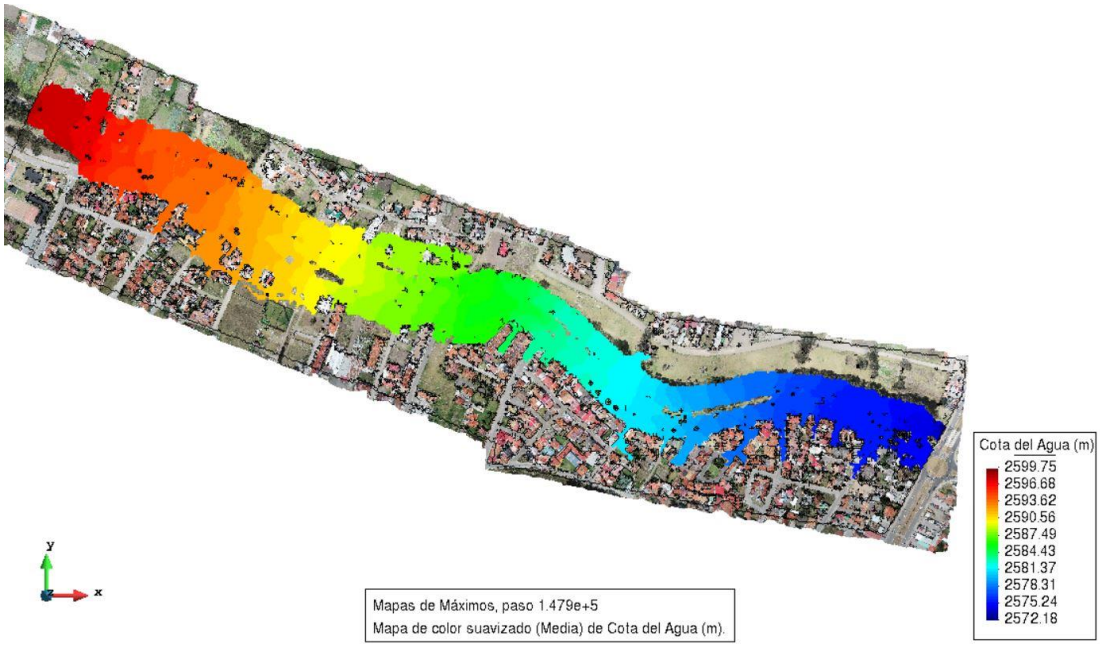

Figura A3. 9. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el evento del 14 de mayo del 2017 (Caudal punta = 269.9 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura A3. 10. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 8 (Caudal punta = 273 m3/s).
Fuente: Autor

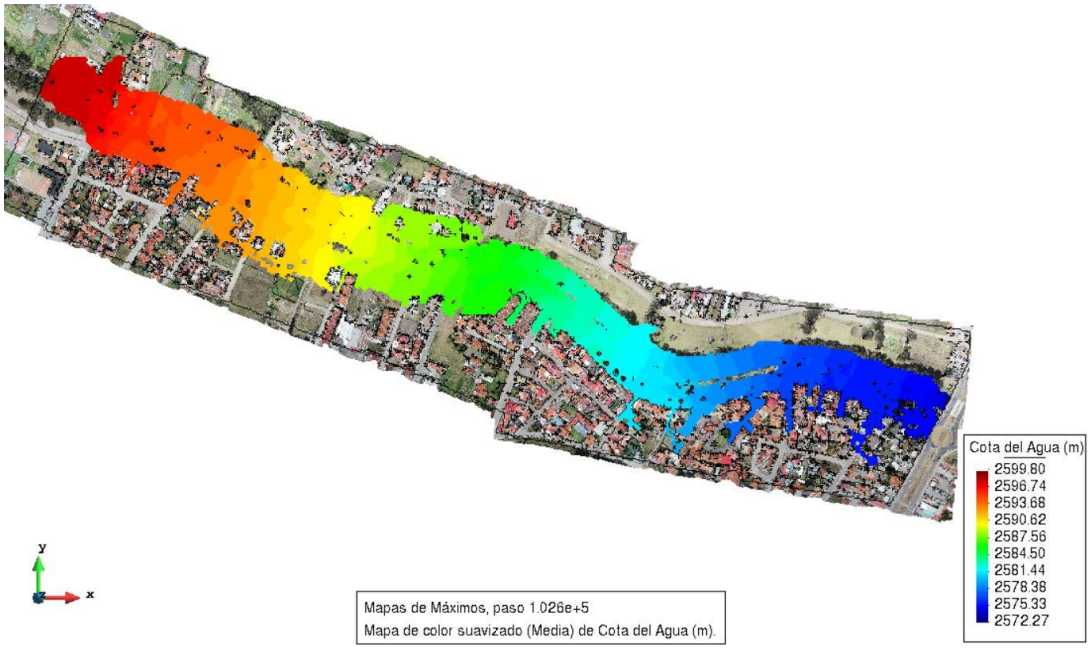

Figura A3. 11. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 9 (Caudal punta = 300.3 m3/s).
Fuente: Autor.

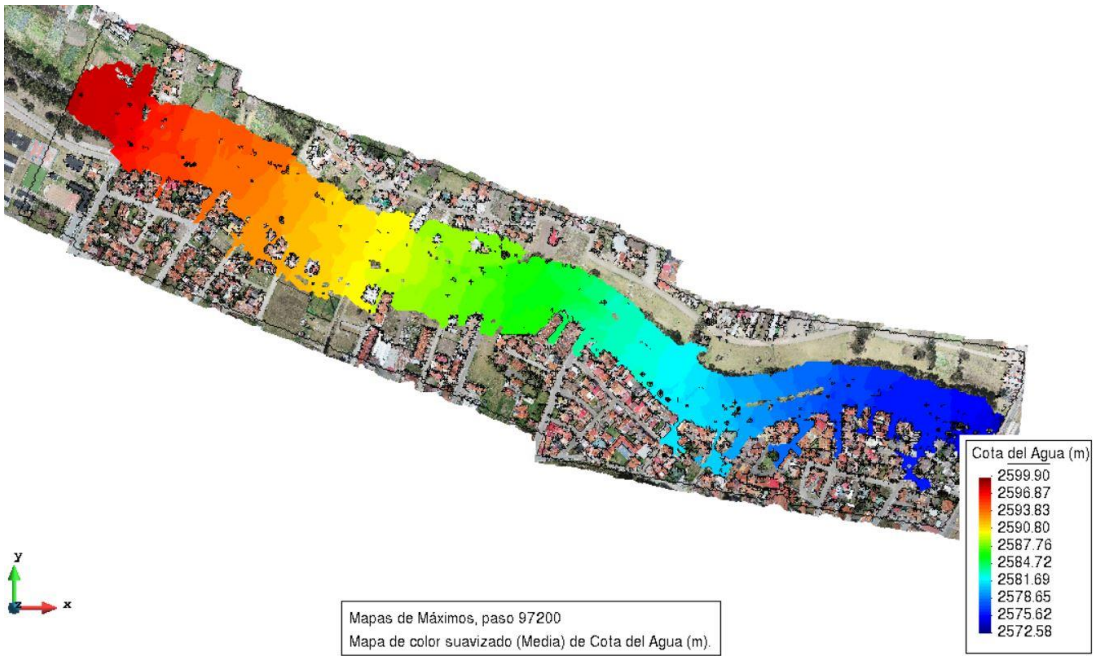

Figura A3. 12. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 10 (Caudal punta = 324.3 m3/s).
Fuente: Autor.

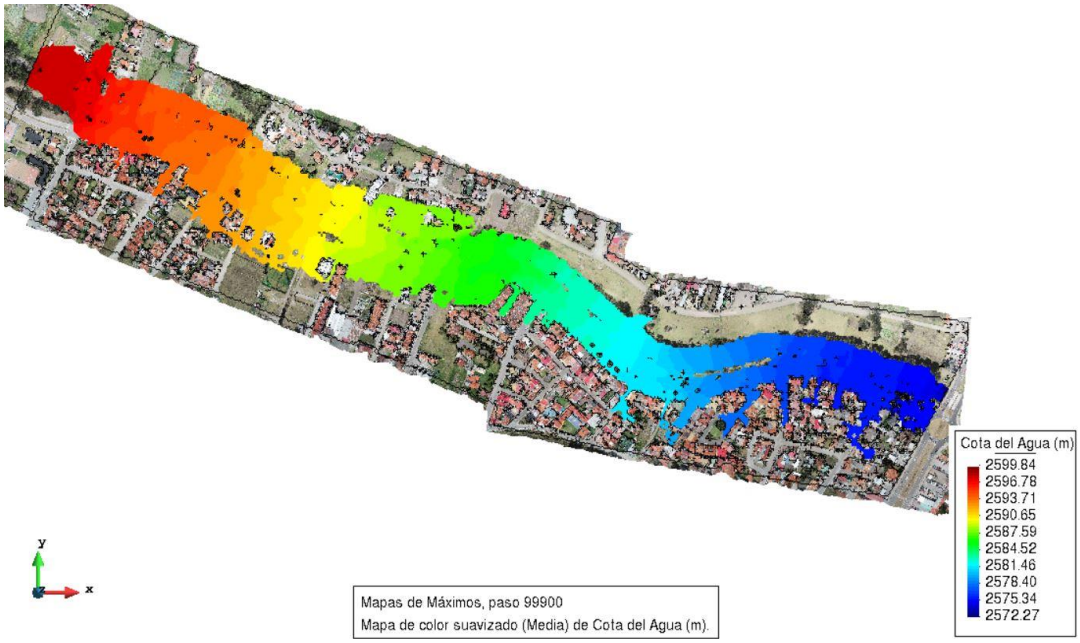

Figura A3. 13. Vista en planta de las máximas cotas generadas por el hidrograma 11 (Caudal punta = 351.3 m3/s).
Fuente: Autor.

Anexo A.4. Manejo del software IBER versión 2.5.

IBER es una plataforma computacional de uso libre con una interfaz muy amigable, y bastante fácil de utilizar, la cual permite modelar fenómenos hidráulicos en dos dimensiones.

Una vez iniciado el programa, se genera un nuevo proyecto y se lo guarda en la ubicación deseada. Seguidamente si el modelo digital de elevaciones está en formato ASCII ya se lo puede importar mediante: Herramientas Iber / crear RTIN, la ventana que aparecerá será análoga a la de la figura A4.1, en la que se selecciona el archivo que como se mencionó deberá estar en formato ASCII. Se completa los espacios correspondientes a lado mínimo, máximo y tolerancia, teniendo en cuenta que la tolerancia representa la distancia máxima vertical entre el MDE y la geometría que se creará, y los lados mínimo y máximo, representa el rango de los triángulos que van a generarse para representar la superficie sin sobrepasar la tolerancia. Al aceptar esta ventana, se creara un archivo con extensión DXF, la cual se autoguardara en la misma dirección del proyecto y a partir de este, se creará la geometría.

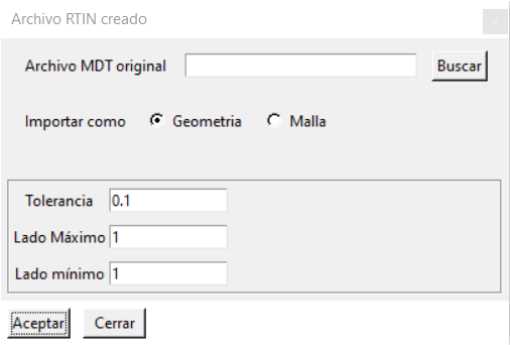

Figura A4. 1. Ventana emergente, para ingresar la geometría
Fuente: Autor.

Una vez importada la geometría, esta hay que colapsarla, y no generar la malla por el momento. Esto se consigue únicamente respondiendo los mensajes que aparecen y serán análogos a los de las figuras A4.2 y A4.3.

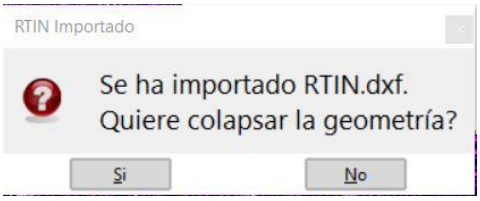

Figura A4. 2. Ventana emergente 1 en el proceso de importación de la Geometría.
Fuente: Autor.

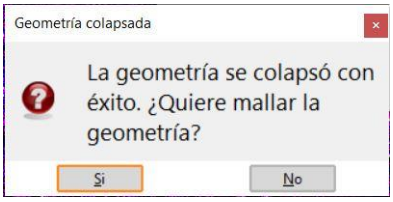

Figura A4. 3. Ventana emergente 2 en el proceso de importación de la Geometría.
Fuente: Autor.

Después se puede añadir una imagen georefenciada en formato JPG de preferencia, la que ayudará a entender espacialmente la geometría. Con los comandos: Vista / Imagen de fondo / Tamaño real, en la cual aparecerá la ventana de diálogo, como la que se muestra en la figura A4.4, en esta se escoge el archivo. Como recomendación general, la imagen no debería ser demasiado pesada para no tener ningún tipo de inconveniente.

Figura A4. 4. Ventana emergente, en la que se selecciona la imagen.
Fuente: Autor.

El siguiente paso es asignar las condiciones de contorno, junto con los caudales respectivos para la ejecución de la modelación, lo cual se logra en la barra de tareas: Datos / Hidrodinámica / condiciones contorno. Se abrirá una ventana como se muestra en la figura A4.5, en la que se llenará primero los datos de Entrada 2D: se debe ingresar los caudales, dando clic en la flecha ubicada a la derecha de: nivel dado, en un formato en 2 columnas una del tiempo [s] y la segunda con los caudales respectivos [m3/s] (figura A4.9). Una vez registrados los caudales, es necesario asignar las líneas de la superficie por las que entrará el fluido, haciendo clic en asignar y luego en cada línea de la superficie (ver figura A4.10). Este es uno de los pasos más importantes, ya que, si la línea asignada no está en el extremo de la geometría, es decir en el borde, esta generará un error en los pasos posteriores, impidiendo que avance el proceso mismo de la modelación. Finalmente hay que configurar la ventana de Salida 2D para que su

configuración se parezca a la de la figura A4.6, por último, clic en asignar y se marca las líneas por las que el fluido abandone la zona de estudio. Para mayor facilidad se realiza una selección general y luego se depura, dejando solo las líneas externas, haciendo clic derecho sobre la selección y luego escogiendo: contextual / ventana de selección, y esta se la configura como muestra la figura A4.7. Finalmente aplicar y cerrar.

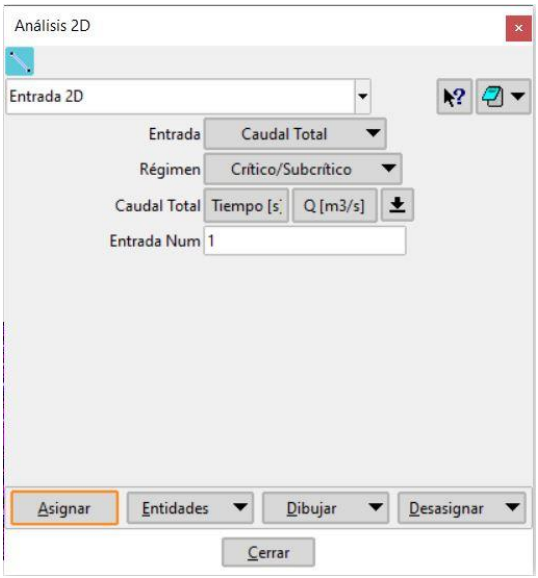

Figura A4. 5. Ventana emergente en la que se ingresa el valor de los caudales y la parte de la geometría por la que ingresa este.
Fuente: Autor.

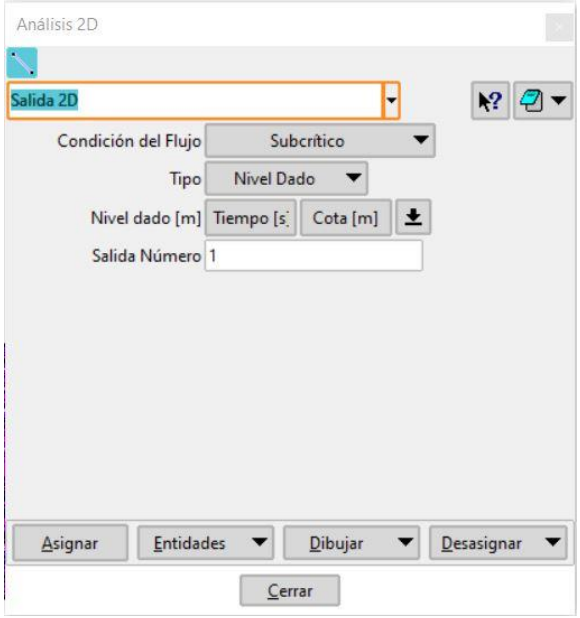

Figura A4. 6. Ventana emergente de las configuraciones de contorno salida.
Fuente: Autor.

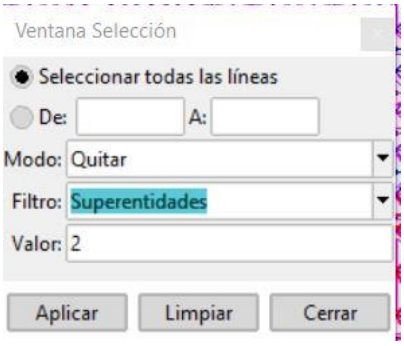

Figura A4. 7. Ventana emergente que ayuda a seleccionar.
Fuente: Autor.

Luego se ejecuta: Datos / Hidrodinámica / Condiciones iniciales, y se obtendrá la ventana de diálogo como la que se muestra en la figura A4.8. En esta se impondrá el calado inicial, el mismo que para una modelación típica, se dejarán con los valores por defecto, únicamente clic en asignar, se señala toda la geometría, terminar y cerrar.

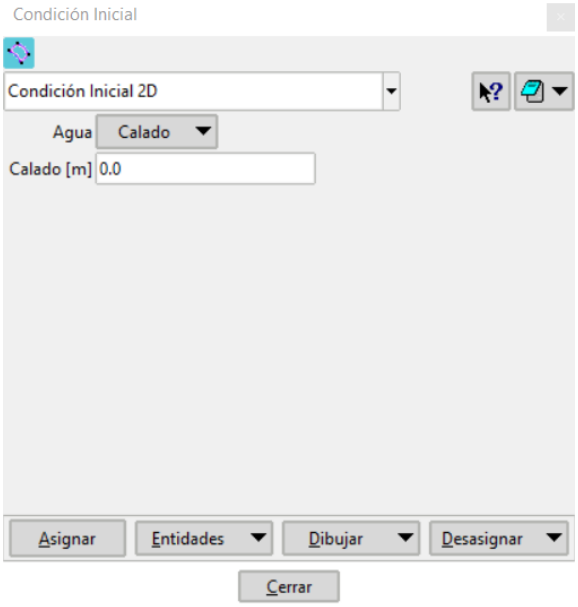

Figura A4. 8. Ventana emergente con la que se asigna el calado inicial a la geometría.
Fuente: Autor

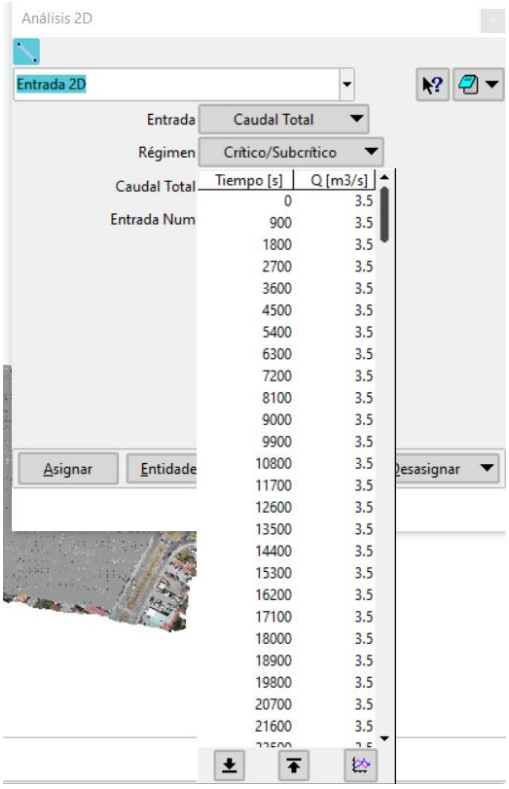

Figura A4. 9. Ingreso de caudal en las condiciones de contorno de Entrada.
Fuente: Autor

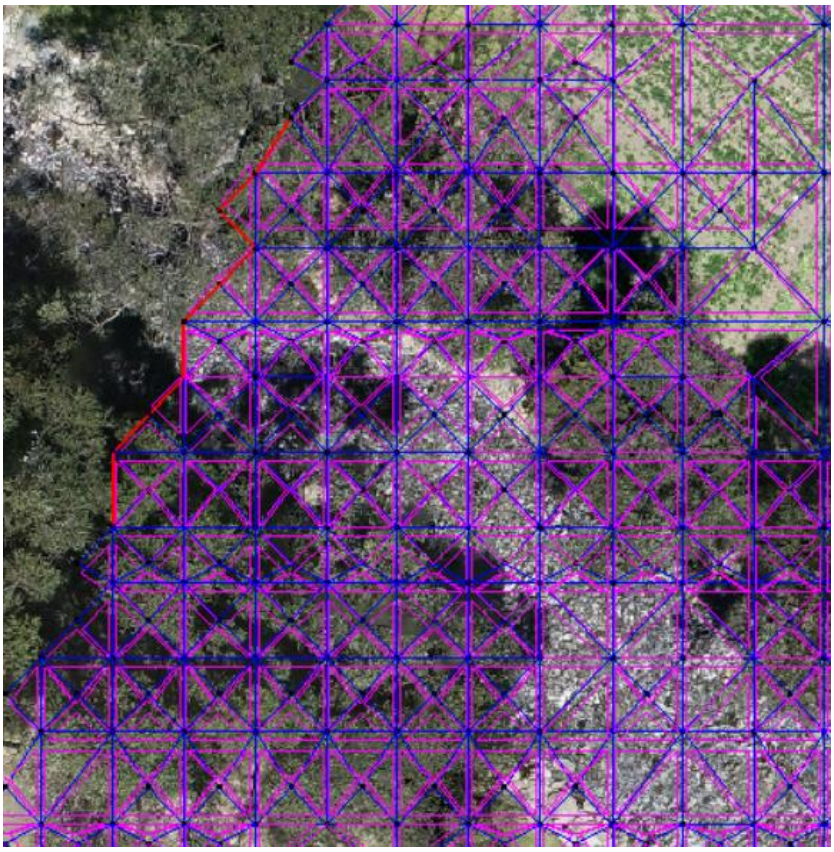

Figura A4. 10. Asignación de las líneas de la geometría por las que ingresa el caudal.
Fuente: Autor

El siguiente paso consiste en la configuración para la creación de la malla, esto se consigue con los comandos: Malla / Estructurada / superficies / asignar número de divisiones. Hecho esto, se selecciona toda la geometría y se presiona la tecla escape (Esc), aparecerá una ventana análoga a la de la figura A4.11. En esta se impondrá el número 1 para que se cree un elemento en cada superficie. Finalmente, clic en asignar y nuevamente se selecciona toda la geometría, seguidamente se presiona la tecla escape (Esc) se verifica que salga el número de asignaciones igual a 1 y clic en cerrar.

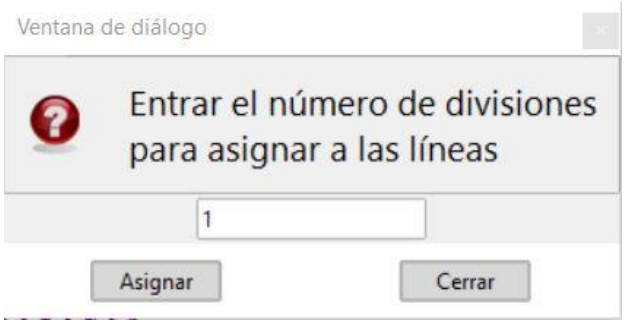

Figura A4. 11. Ventana emergente con la que se elimina las líneas duplicadas de los triángulos, al momento de generar la malla.
Fuente: Autor.

Hecho esto, hay que generar la malla, con los comandos: Malla / Generar malla. En la ventana análoga a la de la figura A4.12, no se modifica las configuraciones de esta debido a que ya se configuro la geometría y la malla es creada en función de esta. Finalmente, se acepta y saldrá una nueva ventana como la que se muestra en la figura A4.13, en la que se selecciona ver malla.

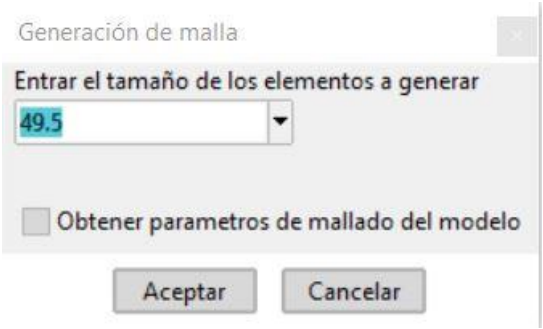

Figura A4. 12. Ventana emergente que se obtiene al momento de la generación de la malla.
Fuente: Autor.

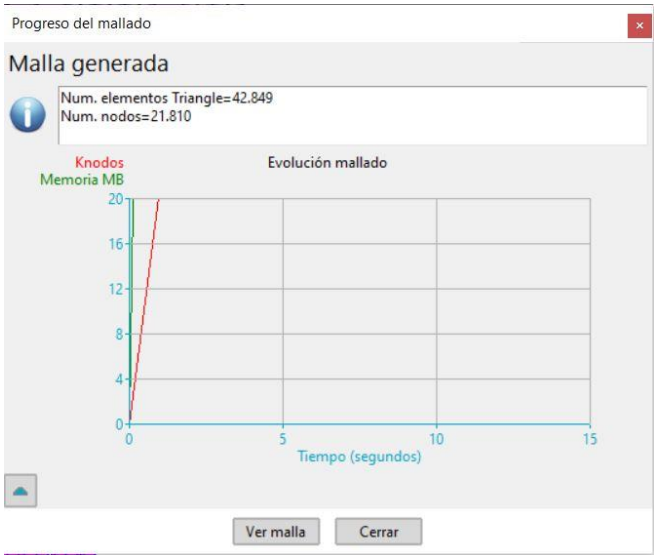

Figura A4. 13. Ventana automática que aparece al finalizar la construcción de la malla.
Fuente: Autor.

Una vez obtenida la malla, hay que asignar los valores de Manning que se van a utilizar, con los siguientes comandos: Datos / Rugosidad / Uso del suelo. En la ventana análoga a la de la figura A4.14, se deberán editar o agregar los valores, para el caso de estudio fueron escogieron del texto Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1994)

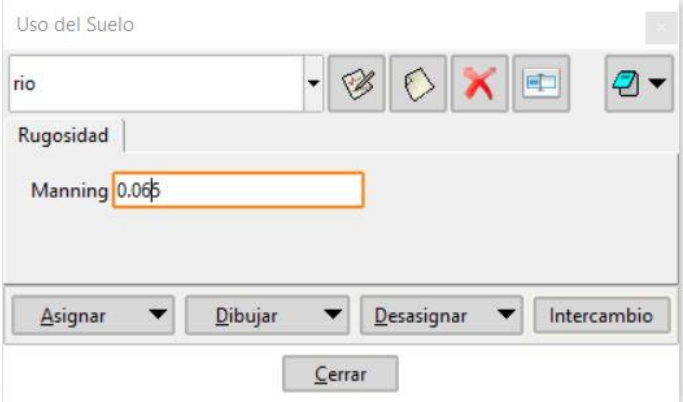

Figura A4. 14. Ventana en la que puede editar los valores del coeficiente de rugosidad.
Fuente: Autor.

Seguidamente se va a realizar la asignación de los coeficientes de Manning a cada uno de los elementos de la malla, con: Datos / Rugosidad / Asignación automática. En la ventana análoga a la de la figura A4.15 se escogerá el archivo respectivo el cual previamente se lo genera en ARCGIS mediante una delimitación poligonal basándose en la ortofoto y varias visitas a campo. Aparece un mensaje con el que se confirma dibujar cada una de las zonas de diferentes colores y comprobar de manera gráfica.

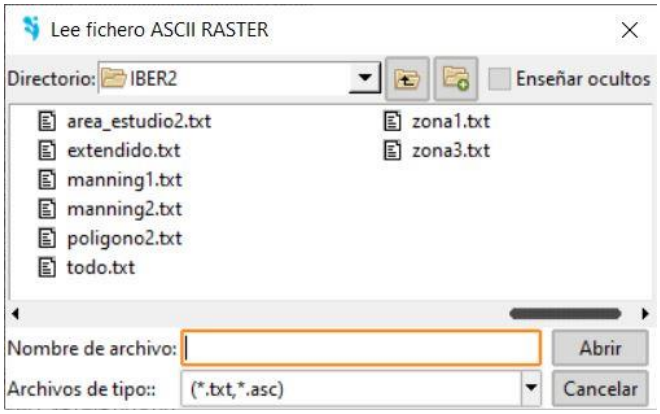

Figura A4. 15. Ventana emergente para seleccionar el archivo del coeficiente de Manning.
Fuente: Autor.

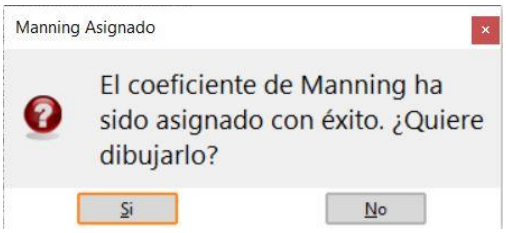

Figura A4. 16. Ventana automática que aparece después de leer el documento del coeficiente de Manning.
Fuente: Autor.

Antes de realizar las simulaciones, hay que configurar el tema de tiempos con: Datos / Datos del problema. Aparecerá una ventana similar a la de la figura A4.17, en la que se configurará los intervalos de cálculo y el tiempo máximo de modelación.

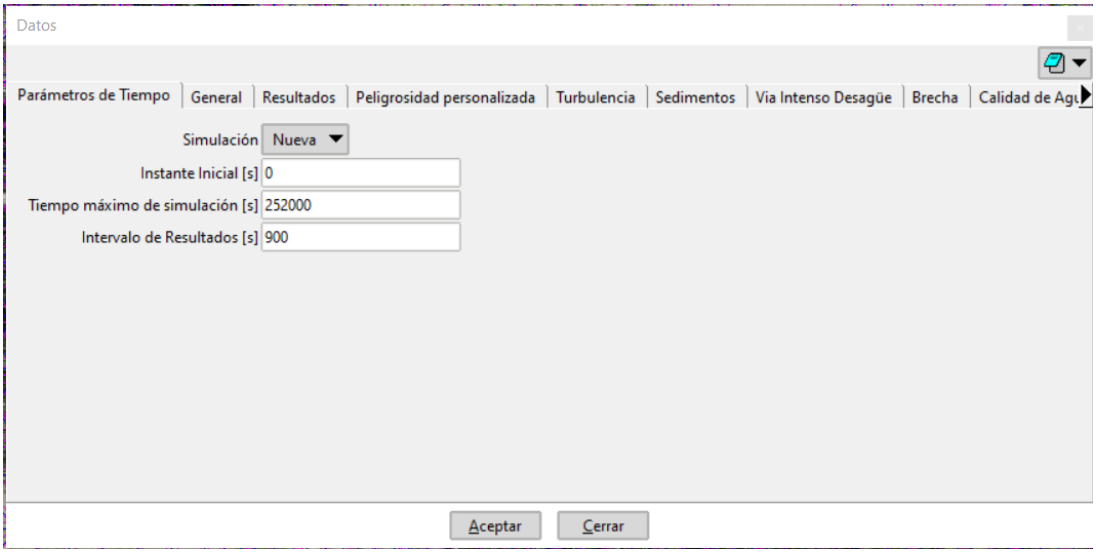

Figura A4. 17. Ventana emergente en la que se describe los intervalos de tiempo de la modelación.
Fuente: Autor.

Hecho esto, se procede a calcular, con: Calcular / ventana de cálculo. Aparecerá una ventana de dialogo como la de la figura A4.18, en la que únicamente hay que hacer

clic en Inicio, si todo está correcto, se ejecutará y el proceso se podría apreciar en: Ver salida

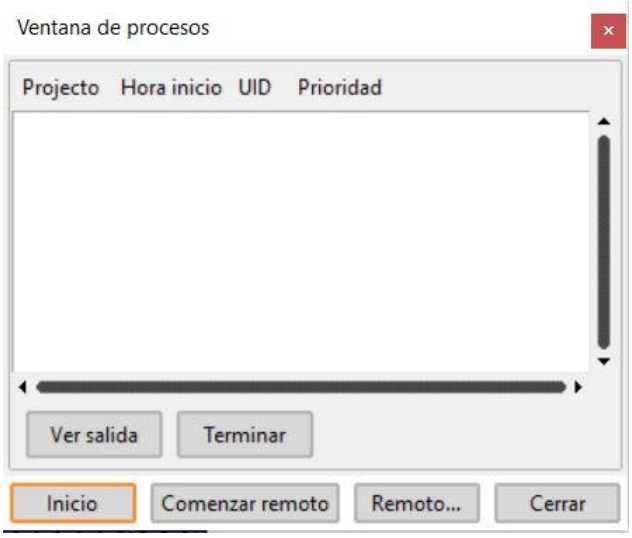

Figura A4. 18. Ventana emergente para lograr el proceso de la modelación.
Fuente: Autor.

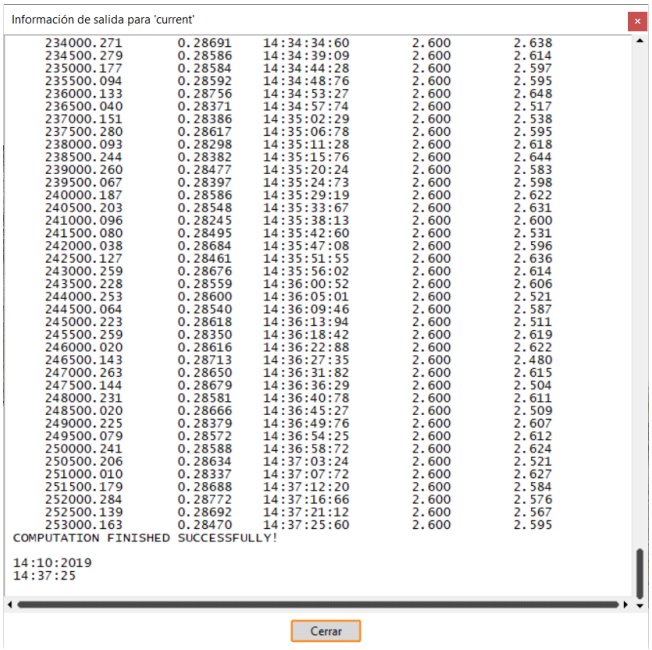

Figura A4. 19. Ventana emergente en la que se muestra el avance de la modelación.
Fuente: Autor.

Terminado el proceso anterior, aparecerá un mensaje con el que se puede ir directamente al postproceso. En la barra de menú se debe ejecutar: Ventana / ver resultados. En la ventana (figura A4.20) se puede configurar para observar el calado, la velocidad, etc. Adicionalmente, se recomienda que el límite inferior para los resultados sea igual a 0.01 con esto se elimina los valores por defecto y se obtiene resultados que estén dentro de este límite, esto se logrará con el comando que se muestra en la figura A4.21.

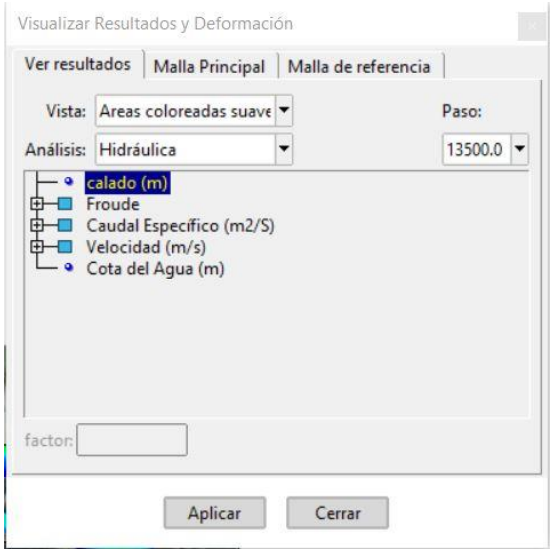

Figura A4. 20. Ventana emergente en la que se muestra cada uno de los resultados.
Fuente: Autor.

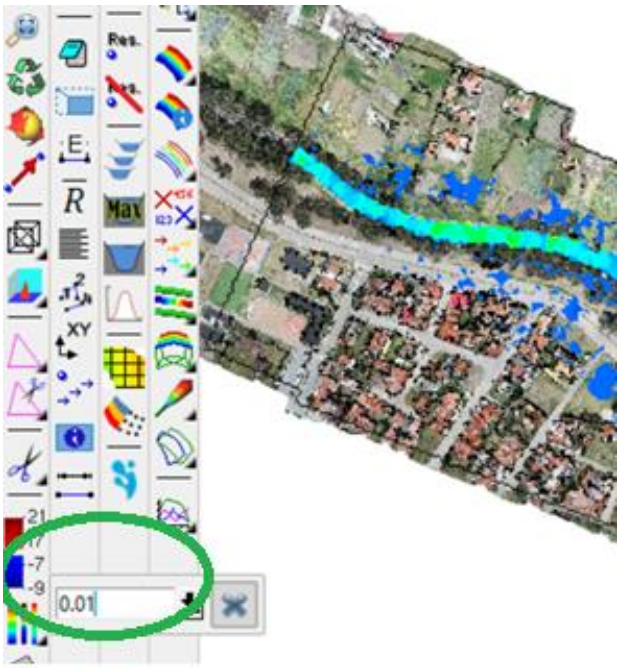

Figura A4. 21. Icono donde muestra como cambiar los valores mínimos que se van a mostrar en los resultados, valor recomendado 0.01.
Fuente: Autor.

Adicionalmente si se desea obtener una animación, se logrará con: Ventana / Animar. Se obtendrá una nueva ventana, tal cual la figura A4.22, en esta hay que configurar el cuadro de duración, en la zona de tiempo total, la misma que hace referencia a el tiempo total de duración de la animación. Hay que activar la opción de **guardar** en el cuadro de salvar animación, adicionalmente darle un destino al archivo y finalmente clic en el play.

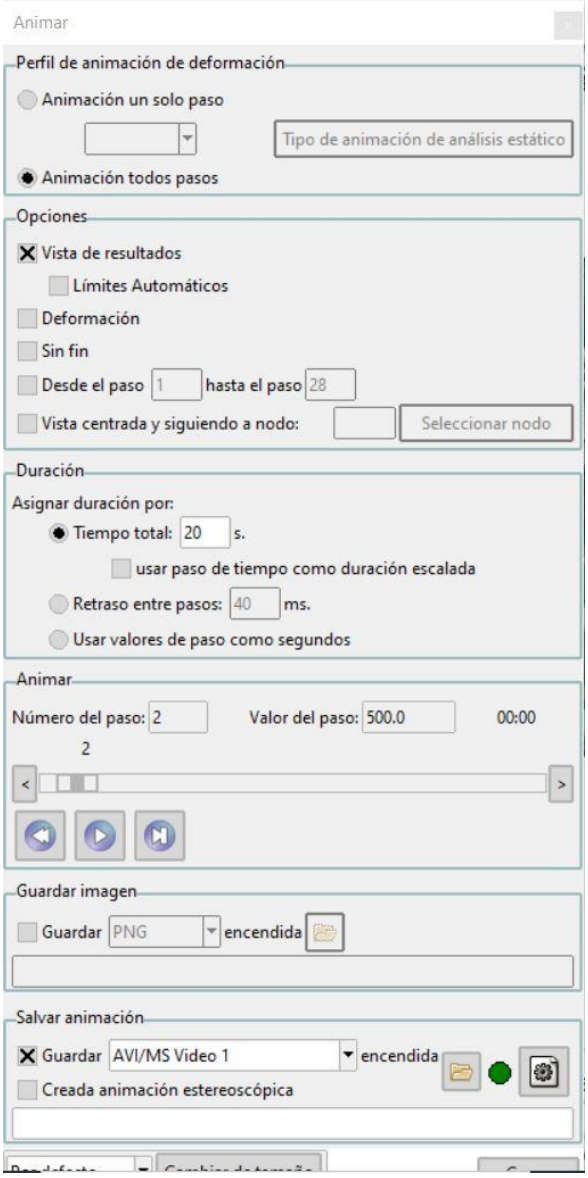

Figura A4. 22. Ventana emergente, con la que se generará una animación.
Fuente: Autor.

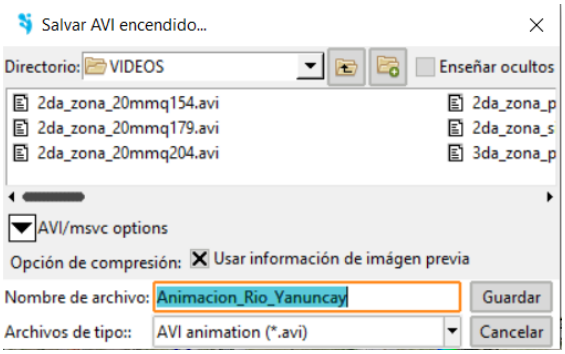

Figura A4. 23. Ventana emergente en la que se selecciona la ubicación de la animación.
Fuente: Autor.

Anexo A.5. Gráficas del número de Froude.

En las siguientes ilustraciones (Figura A5. *1.* Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s) a la Figura A5. 9. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s). se mostrarán los números de Froude que resultan de varias de las modelaciones.

Figura A5. 1. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s)
Fuente: Autor.

Figura A5. 2. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s)

Fuente: Autor.

Figura A5. 3. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 1 (caudal punta =100 m3/s).
Fuente: Autor.

Figura A5. 4. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta=200 m3/s)
Fuente: Autor.

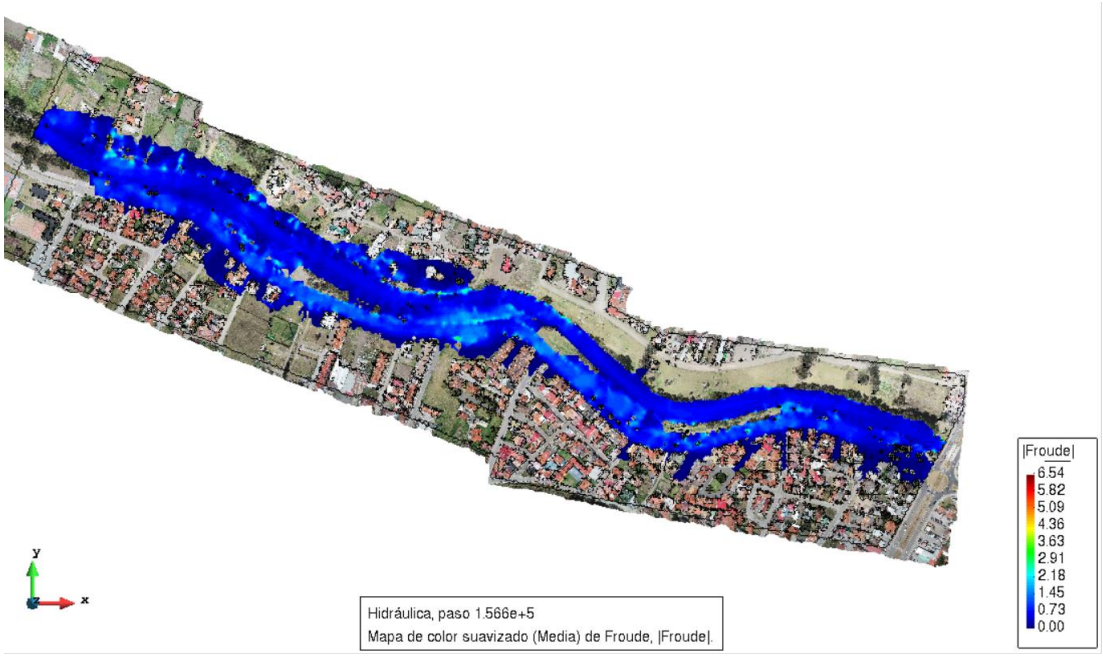

Figura A5. 5. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta =200 m3/s).
Fuente: Autor.

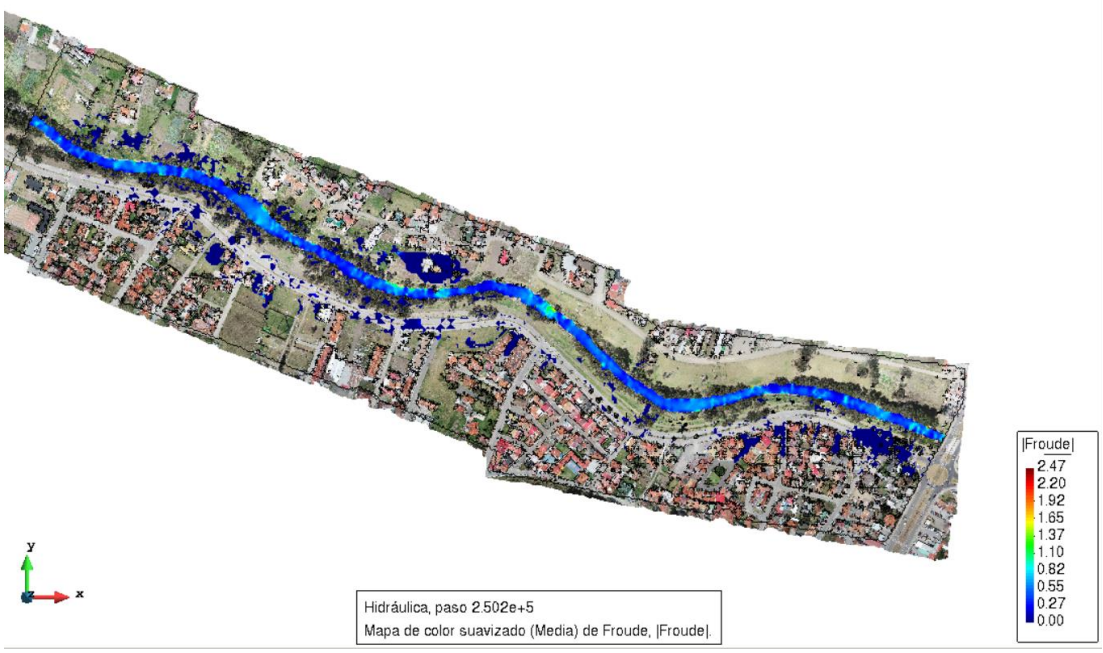

Figura A5. 6. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 5 (caudal punta =200 m3/s).
Fuente: Autor.

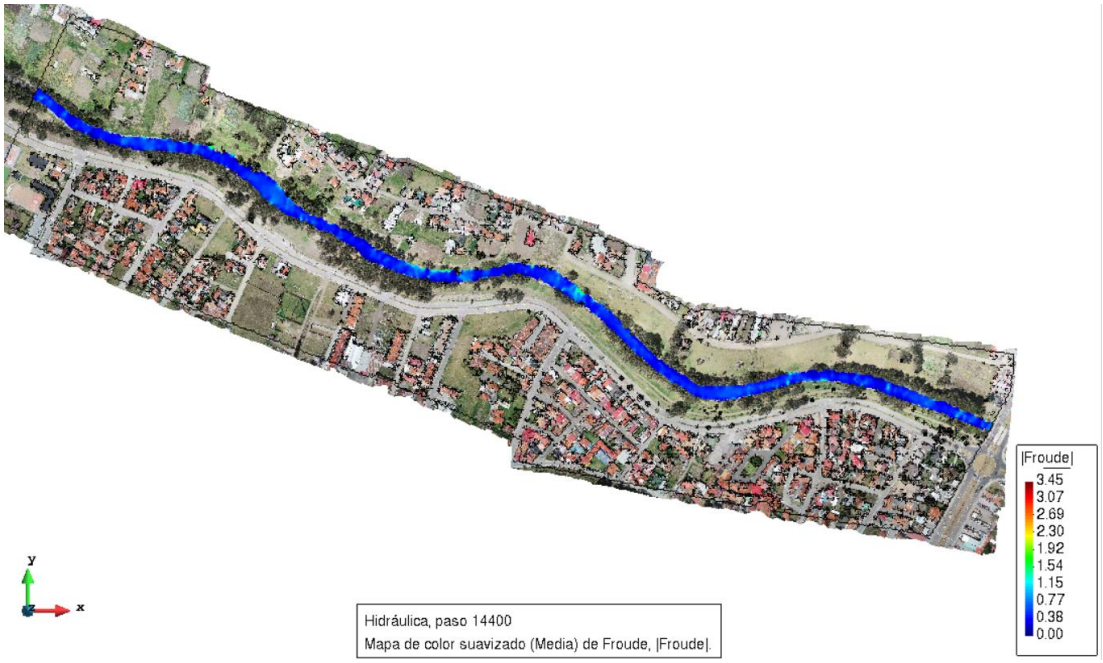

Figura A5. 7. Número de Froude antes del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s).
Fuente: Autor.

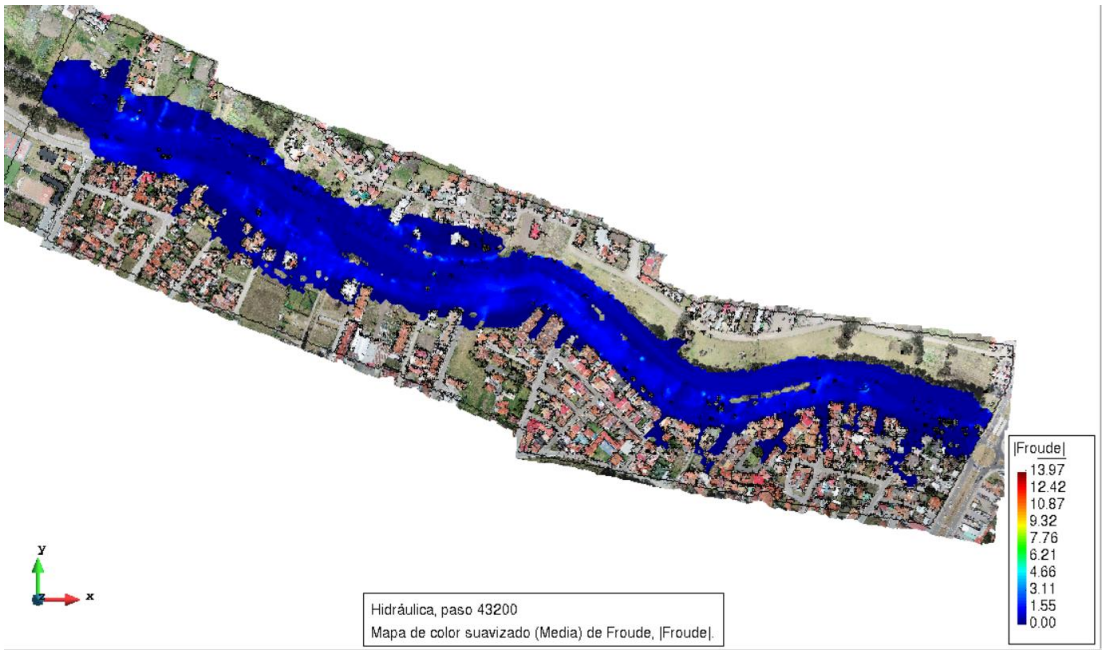

Figura A5. 8. Número de Froude durante el caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s).
Fuente: Autor.

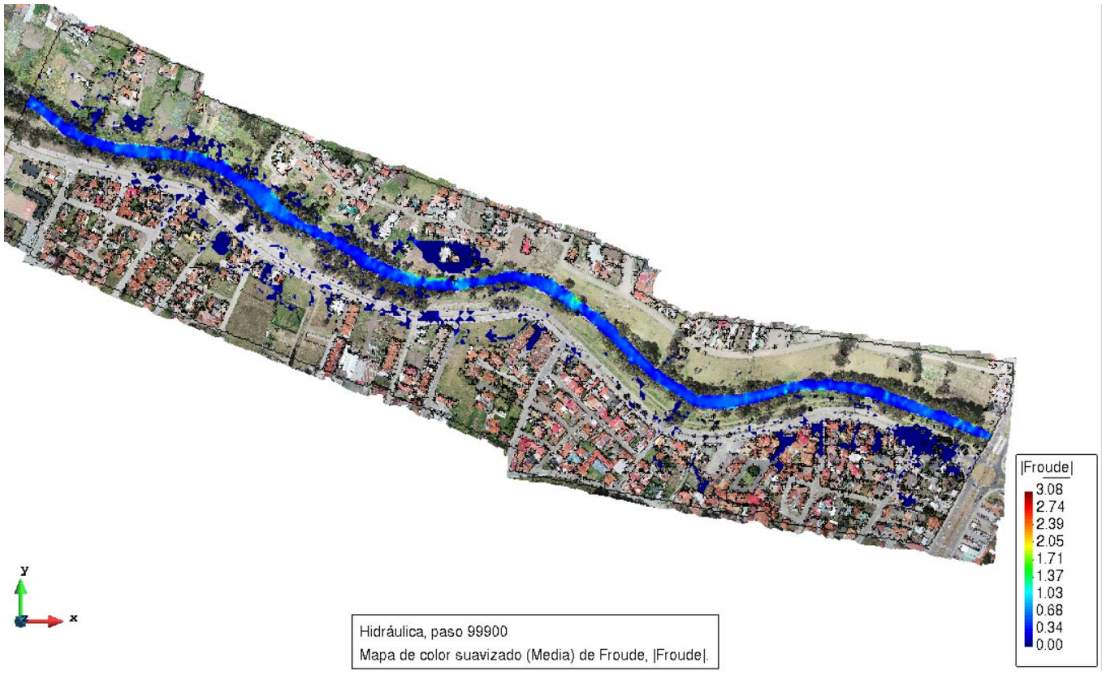

Figura A5. 9. Número de Froude después del caudal máximo en la simulación con el hidrograma 11 (caudal punta =350 m3/s).
Fuente: Autor.