

Pasantía de investigación en el grupo de investigación geomática, con el fin de apoyar el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS; zona de estudio Río de Oro (Nuevo Girón – Café Madrid) y Río Frío (PTAR-Girón)

Angie Paola Silva Pérez

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director:

Jhon Jairo Cáceres Jiménez

PhD. en Ingeniería Civil y Costera

Tutor:

Helmer Cordero Rebolledo

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Descripción del caso de estudio	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. Metodología	18
2.1 Modelo digital de terreno (MDT)	18
2.1.1 Fuentes de información.....	19
2.1.1.1 Fotogrametría aérea (UAV).	19
2.1.1.2 Información recopilada del levantamiento con LÍDAR aéreo realizado por el IDEAM ..	19
2.1.1.3 Escáner Laser Terrestre (TLS).....	20
2.1.1.4 Puntos de control en tierra	20
2.1.2 Procesamiento inicial de la información.....	21
2.1.2.1 Fotogrametría aérea	21
2.1.2.2 Levantamiento escáner láser terrestre	21
2.1.3 Generación MDT	22
2.2 Caracterización de infraestructura del encauzamiento	25
2.2.1 Caracterización de puentes	25
2.2.2 Muros	26

2.3 Modelo Hidráulico Bidimensional.....	28
2.3.1 Software	28
2.3.2 Datos de entrada.....	29
2.3.2.1 Geometría del terreno y pendiente ponderada	29
2.3.2.2 Coeficiente de manning	29
2.3.2.3 Hidrogramas de entrada.	31
2.3.3 Modelamiento bidimensional.....	31
2.3.3.1 Carga de DEM	31
2.3.3.2 Geometría del estudio	32
2.3.3.2.1 Áreas de flujo 2D	33
2.3.3.2.2 Condiciones de contorno.....	34
2.3.3.3 Carga de Shapefile de Coeficiente de manning.	37
2.3.3.4 Simulación	37
3. Resultados	38
4. Conclusiones	42
Referencias Bibliográficas	47
Apéndices.....	50

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Consolidado de Modelos digitales de elevaciones UAV de la zona de estudio.	19
<i>Figura 2.</i> Vista de la nube de puntos a partir de los datos del escáner láser terrestre.	20
<i>Figura 3.</i> Errores comunes encontrados en las curvas de nivel.....	21
<i>Figura 4.</i> Vista de la nube de puntos filtrada a partir de los datos del escáner láser terrestre.....	22
<i>Figura 5.</i> Vista áreas depuradas a partir de cada tecnología.	23
<i>Figura 6.</i> Vista del Modelo Digital del Terreno consolidado.....	24
<i>Figura 7.</i> Localización de puentes a partir de las imágenes UAV.	25
<i>Figura 8.</i> Ejemplo de perfil, sección transversal y longitudinal del puente café Madrid vista de nube de puntos en AUTOCAD CIVIL.	26
<i>Figura 9.</i> Vista tridimensional muro en gaviones presentes en el Río de Oro y Río Frio, tramo de estudio.	27
<i>Figura 10.</i> Sección típica muro en gaviones presentes en el Río de Oro y Río Frio, tramo de estudio.	27
<i>Figura 11.</i> Localización de muros a partir de las imágenes UAV y nube de puntos TLS.	28
<i>Figura 12.</i> Shape de coeficiente de manning.....	31
<i>Figura 13.</i> Modelo Digital de Terreno cargado.....	32
<i>Figura 14.</i> Ingreso de datos de Geometría.....	33
<i>Figura 15.</i> Asignación de tamaños de celdas.	34

<i>Figura 16.</i> Carga de Hidrograma para cada tramo con su respectivo periodo de retorno.	36
<i>Figura 17.</i> Carga de pendiente media para cada tramo.	36
<i>Figura 18.</i> Hidrogramas según el periodo de retorno.	37
<i>Figura 19.</i> Shapefile de coeficiente de manning cargado.	37
<i>Figura 20.</i> Datos utilizados para la simulación del modelo.	38
<i>Figura 21.</i> Resultado de la simulación periodo de retorno 500 años, profundidad máxima, tramo típico.	40
<i>Figura 22.</i> Resultado de la simulación obtenida para la velocidad máxima	40
<i>Figura 23.</i> Discontinuidad entre modelos por efecto de hidrogramas acumulativos.	43
<i>Figura 24.</i> Zoom de zona donde la inundación es provocada por falta de unión de los muros de contención.	44
<i>Figura 25.</i> Cobertura y puntos de vuelos UAV <i>Figura 26.</i> Líneas de vuelos UAV en zona de estudio	53
<i>Figura 27.</i> Errores comunes encontrados en las curvas de nivel. Nota. S.....	56
<i>Figura 28.</i> Errores comunes encontrados en las curvas de nivel.....	56
<i>Figura 29.</i> Depuración curva UAV, antes y después.	57
<i>Figura 30.</i> Ejemplo vista de los vídeos tomados sobre el cauce.	57
<i>Figura 31.</i> Vista depuración curvas generadas a partir del levantamiento UAV.	58
<i>Figura 32.</i> Estudio Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano.....	60
<i>Figura 33.</i> Curvas de nivel suministradas por el IDEAM.	60
<i>Figura 34.</i> Errores y correcciones, información LiDAR – IDEAM 2013. S.....	61
<i>Figura 35.</i> Levantamiento en campo con sistema RTK.	65

<i>Figura 36.</i> Levantamientos en campo con TLS.....	65
<i>Figura 37.</i> Levantamiento de información batimétrica.	66
<i>Figura 38.</i> Software RISCAN PRO.....	67
<i>Figura 39.</i> Desviación estándar nubes de puntos.	68
<i>Figura 40.</i> Parámetro multi-station adjustment.	69
<i>Figura 41.</i> Vista de la nube de puntos registrada.	70
<i>Figura 42.</i> Vista de la nube de puntos filtrada.....	71
<i>Figura 43.</i> Vista perfil de muros en el software AutoCAD civil.....	76
<i>Figura 44.</i> Áreas de Hidrogramas.	79
<i>Figura 45.</i> Shapefile para hallar pendientes de cada tramo.....	80
<i>Figura 46.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de dos (2) años.....	83
<i>Figura 47.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de cinco (5) años.....	84
<i>Figura 48.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de diez (10) años.....	84
<i>Figura 49.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de veinticinco (25) años.....	85
<i>Figura 50.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de cincuenta (50) años.	85
<i>Figura 51.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de cien (100) años.....	86
<i>Figura 52.</i> Hidrogramas para periodo de retorno de quinientos (500) años.....	86
<i>Figura 53.</i> Nueva capa de terreno.....	87
<i>Figura 54.</i> DEM cargado en RAS Mapper.....	88
<i>Figura 55.</i> Imagen de DEM listo para la Geometría.	89
<i>Figura 56.</i> 2D Flow Área de todos los tramos.....	90
<i>Figura 57.</i> Geometría del terreno.	90
<i>Figura 58.</i> Punto de velocidad máxima modelo unidimensional.	92

<i>Figura 59.</i> Factor de multiplicación para la velocidad.	93
<i>Figura 60.</i> 2D Flow Area.....	96
<i>Figura 61.</i> 2D Flow Area Generate Points..	97
<i>Figura 62.</i> Land Cover Layer.	98

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tipo de suelo y numero de manning.</i>	29
Tabla 2. <i>Tamaños de celdas para cada área de flujo</i>	34
Tabla 3. <i>Pendiente para cada tramo.</i>	35
Tabla 4. <i>Profundidad máxima.</i>	39
Tabla 5. <i>Velocidad máxima.</i>	39
Tabla 6. <i>Área del drenaje normal.</i>	41
Tabla 7. <i>Tamaños de áreas para cada tramo.</i>	42
Tabla 8. <i>Características del sistema UAV empleado.</i>	51
Tabla 9. <i>Lista de las coordenadas de los sitios en donde se realizaron los vuelos</i>	52
Tabla 10. <i>Parámetros de vuelo de levantamientos de fotogrametría aérea con UAV.</i>	53
Tabla 11. <i>Características escáner láser terrestre.</i>	63
Tabla 12. <i>Características del Patrón de Escaneo Panorama 80.</i>	64
Tabla 13. <i>Dimensiones, ubicaciones, material y datos generales de los puentes.</i>	73
Tabla 14. <i>Dimensiones de los muros.</i>	77
Tabla 15. <i>Pendientes para cada tramo.</i>	81
Tabla 16. <i>Coeficientes de Manning según Ven te Chow en Hidráulica de canales abiertos.</i>	82
Tabla 17. <i>Velocidad máxima para cada tramo.</i>	92
Tabla 18. <i>Variables para hallar tiempo computacional.</i>	94

Tabla 19. <i>Variables para hallar dimensión de la celda para cada malla.</i>	95
---	----

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. UAV.....	50
Apéndice B. Curvas de nivel IDEAM	59
Apéndice C. Levantamiento con escáner láser terrestre – TLS	62
Apéndice D. Puentes.....	72
Apéndice E. Muros	76
Apéndice F. Pendientes.....	78
Apéndice G. Coeficiente de maning	82
Apéndice H. Hidrogramas	83
Apéndice I. Carga de modelo digital	87
Apéndice J. Pasos para crear geometria.....	89
Apéndice K. Calculo de tamaño de celda para las mallas.	91
Apéndice L. Pasos para agregar tamaños de celdas.....	96
Apéndice M. Pasos para cargar Shapefile de coeficiente de Maning	98

Ver Apéndice Adjunto en el CD y puede visualizarlo en la base de datos de Biblioteca UIS

Apéndice N. Mapas

Resumen

Título: Pasantía de investigación en el grupo de investigación geomática, con el fin de apoyar el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS; zona de estudio Río de Oro (Nuevo Girón – Café Madrid) y Río Frío (PTAR-Girón)*

Autor: Angie Paola Silva Pérez**

Palabras clave: Modelo digital de terreno, Modelo hidráulico bidimensional, HEC-ras.

En este artículo se describe la elaboración de un modelo hidráulico bidimensional mediante el software HEC-RAS 5.0.5., del Río de Oro en el tramo comprendido entre la ciudadela Nuevo Girón y el Café Madrid (20 km aprox.) y del Río Frío desde sector PTAR hasta Girón (6km aprox.) en el área metropolitana de Bucaramanga (Colombia). El presente artículo se divide principalmente en tres (3) partes: primero, la elaboración del modelo digital de terreno (MDT) con un formato de píxeles – ráster con tamaño de celda de 0,25 x 0,25 metros, integrando y combinando diferentes tecnologías nuevas como lo son LiDAR aéreo, vehículo aéreo no tripulado (UAV) y escáner láser terrestre (TLS) que permiten obtener una restitución planimétrica y altimétrica de alta precisión de la totalidad de las áreas inundables de los tramos de las corrientes de interés; seguido de la caracterización geométrica y geoespacial física básica tal como las dimensiones y materiales a escala real de las obras de infraestructura como lo son los muros de contención y puentes que se encuentran ubicados a lo largo del cauce estudiado para finalmente simular y construir el modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS 5.0.5 que, como resultado, genera la actualización de las cotas de inundación para periodos de retorno de 2, 5, 25, 50, 100 y 500 años.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez PhD. en Ingeniería Civil y Costera Tutor: Helmer Cordero Rebolledo Ingeniero Civil

Abstract

Título: Pasantía de investigación en el grupo de investigación geomática, con el fin de apoyar el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS; zona de estudio Río de Oro (Nuevo Girón – Café Madrid) y Río Frío (PTAR-Girón)*

Autor: Angie Paola Silva Pérez**

Keywords: Digital terrain model, two-dimensional hydraulic model, HEC-ras.

This article describes the development of a two-dimensional hydraulic model using the software HEC-RAS 5.0.5., Of the Oro river in the stretch between the Nuevo Girón citadel and the Café Madrid (20 km approx.) And the Frio river from the PTAR sector to Girón (6km aprox.) in the metropolitan area of Bucaramanga (Colombia). This article is mainly divided into three (3) parts: first, the development of the digital terrain model (MDT) with a pixel - raster format with a cell size of 0.25 x 0.25 meters, integrating and combining different new technologies such as air LiDAR, unmanned aerial vehicle (UAV) and terrestrial laser scanner (TLS) that allow obtaining a high precision planimetric and altimetric restitution of all the flood areas of the sections of the currents of interest; followed by basic geometric and geospatial physical characterization such as the dimensions and materials at real scale of the infrastructure works such as the retaining walls and bridges that are located along the studied channel to finally simulate and build the hydraulic model Two-dimensional in the software HEC-RAS 5.0.5 that, as a result, generates the update of the flood levels for return periods of 2, 5, 25, 50, 100 and 500 years.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecanicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez PhD. en Ingeniería Civil y Costera Tutor: Helmer Cordero Rebolledo Ingeniero Civil

Introducción

El recurso hídrico es el principal constituyente de todos los seres vivos y su dinámica se convierte en una fuerza importante que ofrece constantemente grandes beneficios, aunque existen épocas y sitios en los cuales se pueden generar fenómenos adversos como son las inundaciones que traen como consecuencias pérdidas económicas, ambientales y sociales en las poblaciones ubicadas próximas a los cauces (Torres & González, 2008). Estos fenómenos hidrológicos presentan características recurrentes, los cuales constituyen y hacen parte del proceso de evolución de una corriente, como resultado de lluvias persistentes o generalizadas que ocasionan un aumento progresivo del nivel de agua transportado, superando el relieve normal del cauce u obras hidráulicas establecidas, para posteriormente como efecto del desbordamiento, ocupar llanuras de inundación y zonas aledañas.

En la actualidad los modelos numéricos, ayudados con la capacidad de procesamiento de los ordenadores, permiten adecuarse a un esquema en dos dimensiones (2D), superando los modelos 1D, y ayudando a cuantificar parámetros hidráulicos; sobre todo cuando se trata de simulaciones hechas sobre grandes extensiones de terrenos afectados por el paso del agua (Lluén Chero, 2011). El modelamiento de inundaciones ha tenido gran avance mejorando su precisión y confiabilidad en los últimos años debido a la llegada de los sistemas geográficos (GIS) y a los modelos de elevación digital de alta definición (DEM) (Yang & Hutchison, 2005).

En las últimas décadas se han observado variaciones considerables en el régimen de lluvias en todo el territorio nacional, que han desencadenado veranos muy extensos, y eventos de

precipitación que superan los registros históricos. Es ampliamente conocido que los márgenes del Río de Oro, y especialmente en el área urbana del municipio de Girón, presentan una amenaza por inundación recurrente, que han ocasionado múltiples afectaciones a las viviendas y bienes públicos trayendo consigo impactos sociales y económicos (Quijano Quiroga, 2015).

Ante esta situación y teniendo en cuenta que a lo largo de margen del Río de Oro y del Río Frio, se han venido construyendo estructuras de contención y protección del cauce por parte de entidades públicas y particulares, que generan un cambio en las condiciones físicas y topográficas; el área metropolitana de Bucaramanga y el grupo de investigación Geomática realizó la actualización de los estudios de amenaza por inundación en el sector de mayor presión urbanística sobre el Río de Oro entre el barrio Nuevo Girón hasta el Café Madrid de la ciudad de Bucaramanga y sobre el Río Frio entre la Planta de Tratamiento de Aguas residuales de Río Frio, hasta su desembocadura en el Río de Oro.

Por este motivo y para usarlo como punto de control del modelo unidimensional generado paralelamente por los especialistas, se optó por la creación de un modelo bidimensional utilizando la versión 5.0 de HEC-RAS que permite simular el flujo de agua totalmente en 2D (dos dimensiones) que permitió la actualización de la cota de inundación del Río de Oro (nuevo Girón –café Madrid) y Río Frío, teniendo en cuenta distintos periodos de retorno para condiciones críticas de precipitación.

1. Descripción del caso de estudio

1.1 Objetivo General

Realizar la pasantía de investigación en el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, con el fin de apoyar la generación de un modelo hidráulico bidimensional en el Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frio (PTAR-Girón).

1.2 Objetivos específicos

- Apoyar en la generación del modelo de terreno a partir de nuevas tecnologías (UAV, Escáner láser terrestre y LiDAR aéreo).
- Apoyar la localización geoespacial y caracterización física básica (dimensiones, material) de la infraestructura de encauzamiento como lo son muros y puentes que se encuentran ubicados a lo largo del Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frio (PTAR-Girón).
- Apoyo al modelamiento hidráulico bidimensional utilizando el software HEC-RAS para la actualización de la cota de inundación del Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frio (PTAR-Girón).

2. Metodología

2.1 Modelo digital de terreno (MDT)

Como parte de los estudios de actualización de la cota de inundación del Río de Oro en el tramo comprendido entre la ciudadela Nuevo Girón y el Café Madrid, 20 km aprox. y del Río Frío (sector PTAR - Girón, 6km aprox.), estudios desarrollados por el grupo de investigación Geomática, fue necesario actualizar la topografía y cartografía de la zona de estudio en su situación actual, se adoptó el uso combinado de diferentes tecnologías que permiten obtener una restitución planimétrica y altimétrica de alta precisión (Hernández, s.f.) de la totalidad de las áreas inundables de los tramos de las corrientes de interés, que satisface plenamente las necesidades del estudio para fines del modelado hidráulico y de zonificación de la amenaza.

El modelo digital del terreno integral de las áreas inundables de los tramos de interés de los Ríos de Oro y Frío se generó a partir del procesamiento de la información levantada en campo mediante escáner láser Terrestre (TLS), fotogrametría aérea (Unmanned Aerial Vehicle – UAV), GPS de precisión submétrica e información recopilada del levantamiento con LiDAR aéreo realizado por el IDEAM en el año 2013, como parte del estudio de zonificación de amenaza por inundación en el área urbana del municipio de Girón, desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM (Contrato No. 408-2013) en los años 2012-2013.

2.1.1 Fuentes de información

2.1.1.1 Fotogrametría aérea (UAV). Para obtener el modelo digital de terreno de la zona de estudio, se realizaron levantamientos de fotogrametría aérea con sistema UAV, que consiste en el registro fotográfico desde una plataforma aérea con el fin de obtener una secuencia de imágenes a lo largo de una ruta de vuelo previamente establecida que cubra toda la zona de interés (Santos Clavero, 2014). (Ver Apéndice A para ampliar información.)

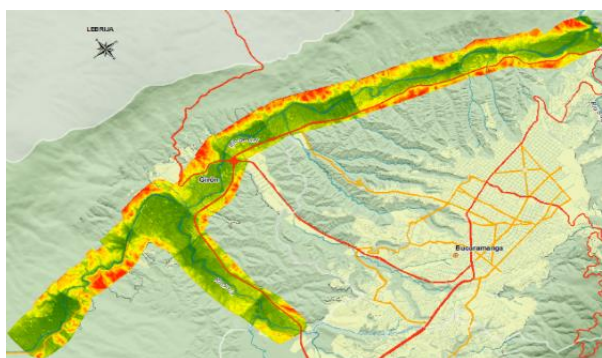


Figura 1. Consolidado de Modelos digitales de elevaciones UAV de la zona de estudio. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS.

2.1.1.2 Información recopilada del levantamiento con LÍDAR aéreo realizado por el IDEAM Además del registro fotográfico aéreo se recopiló la información levantada en el estudio desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM (Contrato No. 408-2013) en los años 2012-2013, para el aporte de información de la zona que abarcara el Río de Oro y Frío. La información suministrada por la entidad contiene curvas de nivel cada 0,25 metros de una amplia zona urbana del municipio de Girón, con esta se consolidó la precisión submétrica con bases topográficas y cartográficas ya actualizadas, ver ANEXO B para más información

2.1.1.3 Escáner Laser Terrestre (TLS). Para actualizar la topografía de las zonas aledañas al cauce de los Ríos objeto de estudio se recopiló información en campo de la zona usando la metodología del escáner laser terrestre (TLS). El levantamiento de nubes de puntos con el escáner láser terrestre, consiste en realizar múltiples estaciones, como si de una estación topográfica se tratara, con el fin de representar fielmente todos los detalles del elemento escaneado (Revuelto, Arguedas, & Serreta, 2013). En cada una de las estaciones que se hacen con el escáner laser terrestre son tomados millones de puntos que representan fielmente al objeto escaneado, ofreciendo una vista de 360° del entorno en el que se realice el escaneo (García-Gómez, Fernández, & Moraza, 2011). Normalmente el área que se necesita escanear es muy grande como para ser cubierto por un solo escaneo, por lo que se hace necesario realizar varias posiciones de escaneo que luego son integradas en un solo modelo mediante diversas técnicas de registro y procesamiento en oficina. (ver Apéndice C para más información.)



Figura 2. Vista de la nube de puntos a partir de los datos del escáner láser terrestre. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS.

2.1.1.4 Puntos de control en tierra Para que toda la información obtenida por diferentes técnicas se encuentre en el mismo sistema de coordenadas, y posteriormente poder hacer el proceso

de unión de la información. Se realizó una red de puntos de control en tierra, combinando topografía tradicional y levantamiento con equipos GNSS de doble frecuencia.

2.1.2 Procesamiento inicial de la información Inicialmente la información proveniente de cada tecnología es procesada de forma individual, como parte del equipo encargado de generar el modelo digital de terreno, fueron apoyadas diversas tareas de depuración, registro y verificación para cada tecnología

2.1.2.1 Fotogrametría aérea La primera información en ser depurada fue la generada a partir del levantamiento de fotogrametría aérea, inicialmente se tienen unas curvas de nivel que pueden contener una serie de errores como son falta de continuidad entre curvas, como se observa en la Figura 3; la principal tarea apoyada durante esta fase fue la identificación y corrección de las inconsistencias encontradas.

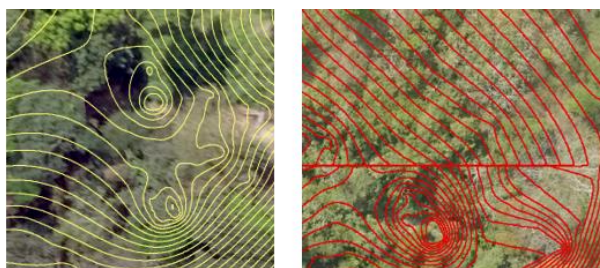


Figura 3. Errores comunes encontrados en las curvas de nivel. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

2.1.2.2 Levantamiento escáner láser terrestre Durante el levantamiento en campo con el escáner láser terrestre se tomaron 1360 posiciones de escaneo a lo largo del tramo de estudio, en oficina cada una de estas estaciones debe ser relacionadas unas con otra con el fin de obtener un

modelo general de todo el tramo escaneado. Posterior al registro y georreferenciación de la nube de puntos se debe hacer un filtro de vegetación, con el fin de dejar solo lo correspondiente al terreno natural.

Durante estas actividades y junto al grupo de profesionales y auxiliares encargados, se apoyó el registro y posterior filtrado de la información proveniente del escáner láser terrestre. En la Figura 4 se observa un tramo de Río escaneado ya registrado y filtrado.

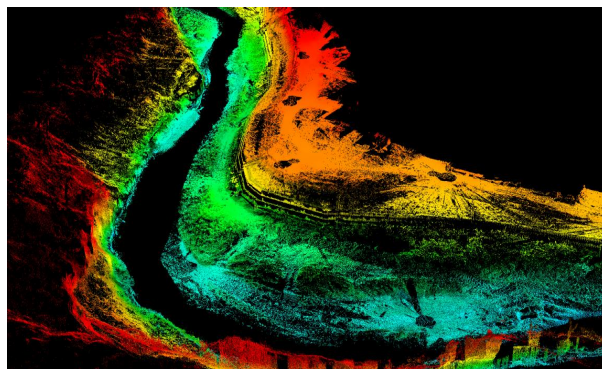


Figura 4. Vista de la nube de puntos filtrada a partir de los datos del escáner láser terrestre. Nota. Tomado de: Equipo Técnico UIS.

2.1.3 Generación MDT Finalizado el procesamiento georreferenciación y depuración de la información obtenida de las diferentes tecnologías empleadas para la consolidación del Modelo Digital del Terreno de las planicies de inundación, se procedió al empalme teniendo como insumos para la generación del modelo digital del terreno:

- ♦ Modelo digital del terreno obtenido de la depuración de las curvas generadas a partir de técnicas de fotogrametría y depuración manual.
- ♦ Curvas de nivel generadas por el IDEAM del año 2013 obtenidas mediante la técnica de LiDAR aéreo.
- ♦ Nube de puntos obtenida a partir del levantamiento realizado con el escáner láser terrestre.

En la Figura 5, se observa el área cubierta por cada una de las tecnologías utilizadas.

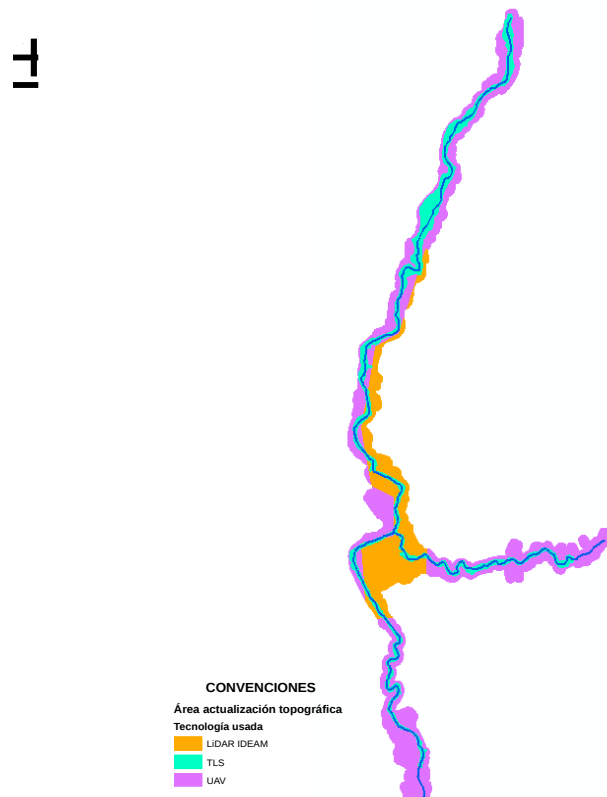


Figura 5. Vista áreas depuradas a partir de cada tecnología. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS.

Posteriormente, junto al grupo de profesionales del grupo de investigación Geomática, se procedió al ensamble de la información mediante la fusión y verificación de los distintos empalmes; este procedimiento se llevó a cabo en software SIG apoyándose en las diversas herramientas de geo procesamiento con las que cuentan este tipo de software. Para facilitar la articulación del modelo, la información proveniente de cada tecnología se procesó en formato de píxeles – ráster, con tamaño de celda de 0,25 x 0,25 metros, resolución que permite obtener mejor detalle del relieve en cada zona.

Durante el proceso de integración se verificó a cada instancia la veracidad de la cota obtenida, comparándola con los puntos de control tomados con precisión submétrica para garantizar que los errores se mantuviesen por debajo de los esperados y pactados en el convenio interadministrativo.

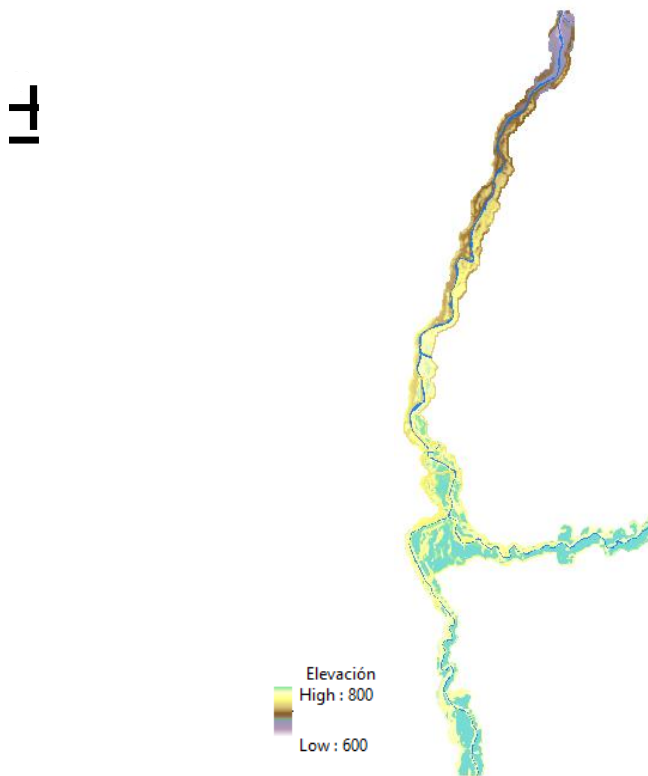


Figura 6. Vista del Modelo Digital del Terreno consolidado. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS Caracterización básica infraestructura existente

Tomando la información obtenida con el escáner laser terrestre (TLS), se procedió a identificar cada uno de los puentes y muros existentes en el encausamiento ubicados a lo largo del Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frio (PTAR-Girón).

2.2 Caracterización de infraestructura del encauzamiento

2.2.1 Caracterización de puentes Mediante los ortofotomosaicos generados con el sistema UAV se ubicaron los puentes para identificarlos, y localizarlos como se muestra en la Figura 5.

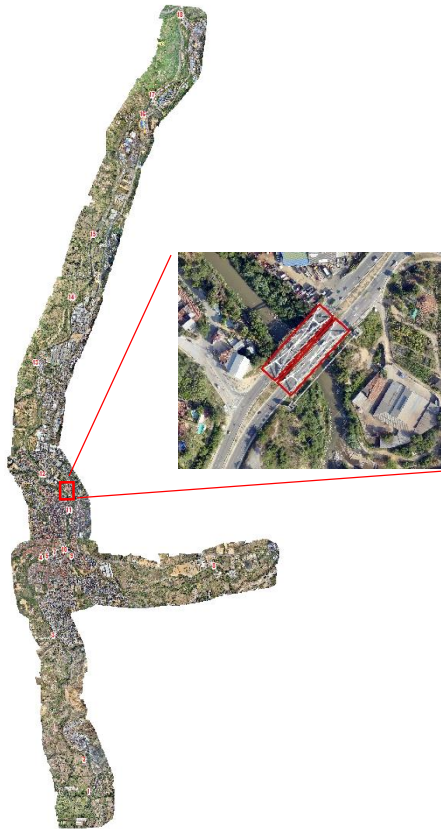


Figura 7. Localización de puentes a partir de las imágenes UAV.

Tomando la información generada por las nubes de puntos del escáner láser terrestre fueron extraídas las zonas donde se encuentran ubicados los puentes en el software RISCAN PRO, que es software nativo para el procesamiento de nubes de puntos provenientes del TLS, Riegl-VZ400. Posteriormente esta información es exportada en .DXF formato que puede ser abierto en cualquier software CAD.

En total se identificaron 18 puentes en el área de estudio, entre vehiculares y peatonales, de los cuales 9 son vehiculares y 9 peatonales. De los puentes peatonales 8 son en madera y solo 1 es en concreto, de los vehiculares todos son en concreto.

Otras variables que se identificaron: el número de carriles, ancho de calzada, ancho de carriles, longitud total del puente.

La tabla con el consolidado de todas las variables obtenidas se puede observar en el anexo D.



Figura 8. Ejemplo de perfil, sección transversal y longitudinal del puente café Madrid vista de nube de puntos en AUTOCAD CIVIL.

2.2.2 Muros Tomando la información de la nube de puntos del escáner láser terrestre y el ortofotomosaico generado a partir de imágenes UAV, se procedió a realizar la restitución de los muros presentes a lo largo del Río de Oro y Río Frío en el tramo de estudio Río de Oro (sector Nuevo Girón - Café Madrid) y del Río Frío (sector PTAR - Girón).

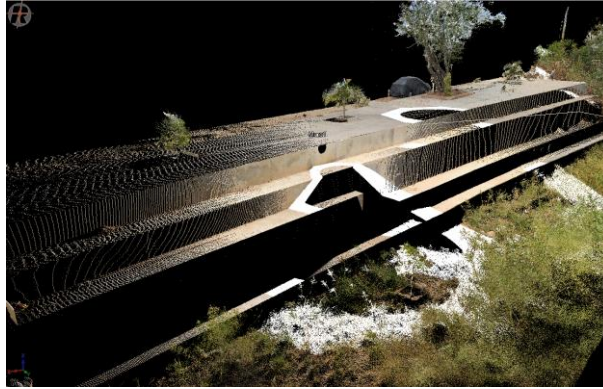


Figura 9. Vista tridimensional muro en gaviones presentes en el Río de Oro y Río Frio, tramo de estudio.

En total se identificaron quince mil doscientos siete metros lineales (15.207) de muro a lo largo del Río de Oro y Río Frio en el tramo de estudio de los cuales el 100% son gaviones con un recubrimiento de concreto, para la verificación de los materiales se realizaron visitas a campo con el fin de validar la información extraída.

La sección típica es como la observada en la Figura 10 con escalones de 1 metro aproximadamente y alturas que varían entre 2 y 5 metros.



Figura 10. Sección típica muro en gaviones presentes en el Río de Oro y Río Frio, tramo de estudio.



Figura 11. Localización de muros a partir de las imágenes UAV y nube de puntos TLS.

2.3 Modelo Hidráulico Bidimensional

2.3.1 Software HEC-RAS 5.0 consiste en un software de uso libre elaborado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) de la U.S Army Corps of Engineers (USACE), el cual, a partir de su primera versión, HEC-RAS 1.0, lanzada en agosto de 1995, ha evolucionado vertiginosamente hasta la última versión, HEC-RAS 5.0.5, estrenada en junio de 2018. Entre sus capacidades generales se encuentra el modelamiento de calidad del agua, sedimentos y flujo estable e inestable, tomando este último para la modelación de inundaciones.

2.3.2 Datos de entrada Para iniciar el modelado se debe tener la información básica como es: la geometría del terreno, ya sea mediante secciones transversales al cauce o mediante el DEM (modelo digital del terreno); pendiente media ponderada del tramo de Río en estudio; coeficiente de Manning, condiciones de frontera e hidrogramas de entradas.

2.3.2.1 Geometría del terreno y pendiente ponderada Para la geometría del terreno se ingresó el MDT (modelo digital de terreno) obtenido de las diferentes tecnologías empleadas (UAV, LiDAR y TLS). Para calcular la pendiente de cada tramo se utilizó el MDT, dividiendo el tramo objeto de estudio en 14 tramos de acuerdo con el estudio hidrológico previamente realizado (Ver ANEXO F.)

2.3.2.2 Coeficiente de manning Teniendo como base el estudio de uso y cobertura realizado por el método de la *corine land cover adaptada para Colombia*, que fue elaborado por el grupo de investigación Geomática, se realizó una correlación entre el estudio de uso y cobertura con las tablas ya existentes con números de manning, como se indica en el ANEXO G.

En la tabla 1 se encuentran los números de manning utilizados para el modelamiento bidimensional

Tabla 1.

Tipo de suelo y numero de manning.

Tipo de suelo	Manning
Arbusto denso	0.1
Arbustos escasos mucho pasto	0.05
Asfalto rugoso	0.02
Asfalto rugoso min	0.016

Tipo de suelo	Manning
Cultivos maduros alineados	0.035
Grupos Grandes de madera	0.1
Pastos Altos	0.035
Pastos Cortos	0.03
Pastos cortos mínimo	0.025
Pequeños arbustos y arboles	0.04
Pequeños arbustos y árboles Max	0.05
Pequeños arbustos y árboles min	0.035
Piedra partida suelta Max	0.035
Piedra partida suelta min	0.033
Ríos sección regular	0.025
sección irregular	0.035

En la Figura 12 se observa el número de manning que fue asignado para cada zona del tramo objeto de estudio

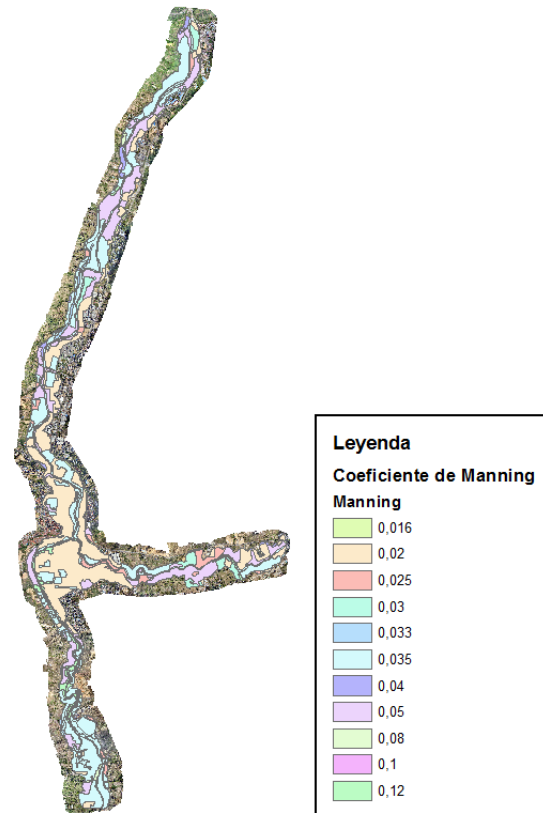


Figura 12. Shape de coeficiente de manning.

2.3.2.3 Hidrogramas de entrada. Los hidrogramas fueron tomados del resultado del estudio hidrológico realizado por la empresa CIIO INGENIERIA SAS en el que se realizó el análisis para diferentes periodos de retorno como son: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. (Ver ANEXO H.)

2.3.3 Modelamiento bidimensional

2.3.3.1 Carga de DEM Por medio de la herramienta RAS Mapper se cargó el DEM (Brunner, HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User Manual, 2016) como se muestra en la Figura 13 y se indica en el ANEXO I.

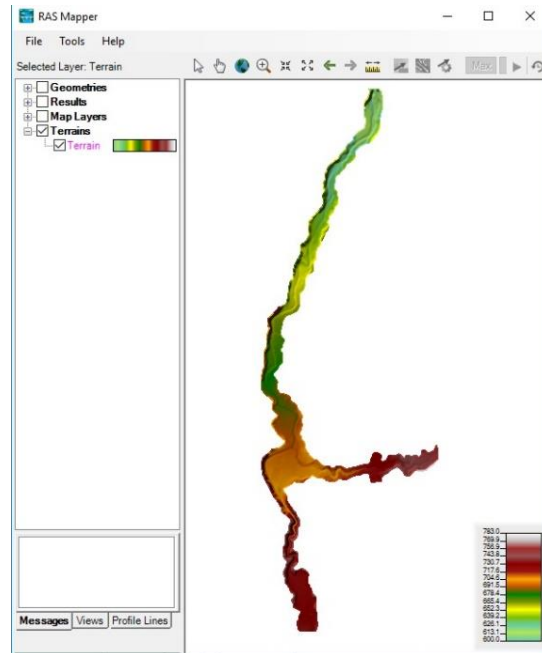


Figura 13. Modelo Digital de Terreno cargado.

2.3.3.2 Geometría del estudio Al tener catorce (14) tramos diferentes, de acuerdo con el estudio hidrológico, se deben dibujar cada una de estas zonas mediante la Herramienta Geometry Data (editor de Geometría) con la opción SA/2D Flow Area (área de flujo 2D) se dibujaron las respectivas Zonas de estudio para los catorce (14) tramos estudiados. Posteriormente trazan las condiciones de contorno aguas arriba y abajo de los tramos en la zona de estudio como se indica en el ANEXO J.

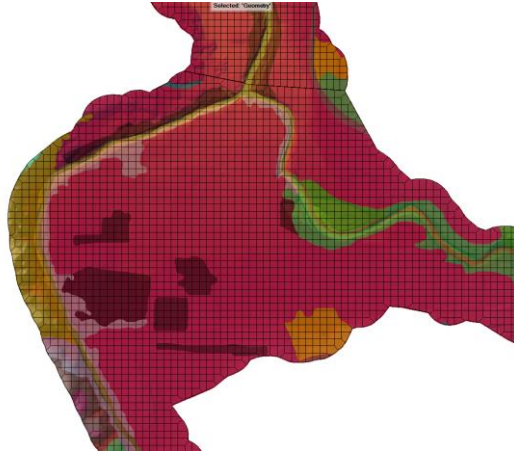


Figura 14. Ingreso de datos de Geometría

2.3.3.2.1 Áreas de flujo 2D Para cada área 2D se calculó su respectivo tamaño de malla utilizando la ecuación onda difusa ya que otorgan una solución más rápida, debido a que requieren intervalos computacionales más grandes y tienen mayor estabilidad. (Castañeda Torres & and Rivera Rangel, 2017). Por lo mencionado anteriormente se modela con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 2 \quad (1)$$

Donde;

C: Numero de Courant.

V: velocidad de onda.

Δt : Paso del tiempo computacional.

Δx : Tamaño de celda.

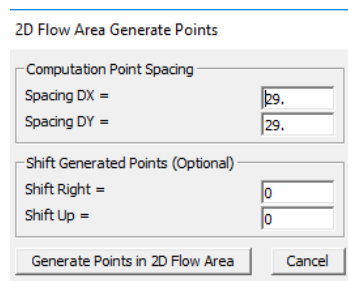
Para cada tramo se halló su respectivo tamaño de celda como se indica en el ANEXO K.

Con la herramienta Edit 2D Flow Area/Generate Computation Point son Regular Interval with All Breaklines (Editar área de flujo 2D / Generar punto de cálculo en el intervalo regular con todas las líneas de corte).

Tabla 2.

Tamaños de celdas para cada área de flujo

Tramo	Tamaño de celda(m)
1	21
2	24
3	29
4	28
5	26
6	17
7	17
8	24
9	24
10	18
11	26
12	23
13	26
14	24

*Figura 15. Asignación de tamaños de celdas.*

2.3.3.2.2 Condiciones de contorno. Las condiciones de contorno fueron asignadas a cada tramo en la posición aguas arriba y abajo como entrada y salida del hidrograma respectivamente como lo recomienda el centro de ingeniería hidrología en su manual (Brunner, HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User Manual, 2016).

Para el ingreso de los datos de las condiciones de contorno se utilizó la herramienta Unsteady Flow data (datos de flujo inestable) en el cual las posiciones de aguas arriba se les asignó su respectivo hidrograma en la opción Flow Hydrograph donde el intervalo de tiempo es de tres (3) minutos para 961 datos de entrada como se muestra en la Figura 16 y para aguas abajo la pendiente media del tramo siguiente calculada con la opción Normal Depth como se muestra en la Figura 17. La pendiente media fue hallada con las cotas de los tramos como se muestra en el ANEXO F.

Tabla 3.

Pendiente para cada tramo

Tramo	Pendiente
1	0.003248
2	0.005191
3	0.009830
4	0.005372
5	0.006164
6	0.007351
7	0.002923
8	0.008065
9	0.005100
10	0.005410
11	0.007136
12	0.012351
13	0.004875
14	0.002937

Fuente: Elaboración propia

Flow Hydrograph

SA: TRAMO 1 BCLine: AGUAS ARRIBA T1

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:
 Path:

☒ Enter Table Data time interval: 3 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 02NOV2017 Time: 00:00

☒ Fixed Start Time: Date: 02NOV2017 Time: 00:00

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	01nov2017 2400	00:00	0.
2	02nov2017 0003	00:03	0.
3	02nov2017 0006	00:06	0.
4	02nov2017 0009	00:09	0.
5	02nov2017 0012	00:12	0.
6	02nov2017 0015	00:15	0.
7	02nov2017 0018	00:18	0.
8	02nov2017 0021	00:21	0.
9	02nov2017 0024	00:24	0.
10	02nov2017 0027	00:27	0.
11	02nov2017 0030	00:30	0.
12	02nov2017 0033	00:33	0.
13	02nov2017 0036	00:36	0.

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.05

Plot Data OK Cancel

Figura 16. Carga de Hidrograma para cada tramo con su respectivo periodo de retorno.

Normal Depth Downstream Boundary

SA: TRAMO 1 BCLine: AGUAS ABAJO T1

Friction Slope: 5.190569E-03

OK Cancel

Figura 17. Carga de pendiente media para cada tramo.

Los datos tomados para los valores requeridos en la pestaña Flow Hydrograph se asignaron como lo aconseja el centro de ingeniería hidrología en su manual (Brunner, HEC-RAS River Analysis System User Manual, 2016).

Debido a que fueron hallados siete (7) hidrogramas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años se ingresaron siete (7) diferentes datos de flujos como se muestra en la Figura 18.

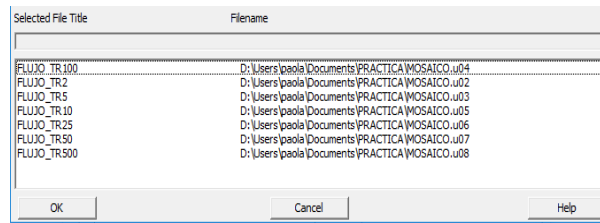


Figura 18. Hidrogramas según el periodo de retorno.

2.3.3.3 Carga de Shapefile de Coeficiente de manning. Con la herramienta RAS mapper y como lo indica el ANEXO M se carga el shapefile de coeficiente de manning.



Figura 19. Shapefile de coeficiente de manning cargado.

2.3.3.4 Simulación Con la herramienta Unsteady Flow Simulation (simular flujo inestable) que se encuentra en la pestaña de Run (Correr) se establecieron los parámetros de tiempo de simulación e intervalos computacionales como lo indica el centro de ingeniería hidrología en su manual (Brunner, HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User Manual, 2016).

La simulación se realizó desde las 00:00 del día 1 hasta las 24:00 del día 2 como lo muestran los hidrogramas.

Para el intervalo computacional se tomó un valor de dos (2) segundos, el intervalo de visualización del mapa, el intervalo de tiempo del hidrograma de salida y el intervalo de tiempo con el que se crearan perfiles sobre la elevación de la superficie del agua se tomaron de tres (3) minutos con el objetivo que tenga la misma cantidad de datos de hidrograma de entrada como se muestra en la Figura 20.

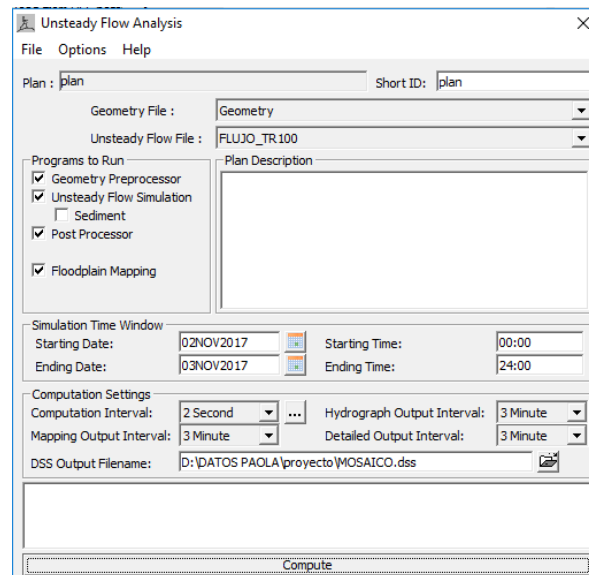


Figura 20. Datos utilizados para la simulación del modelo.

3. Resultados

Como resultados del modelo simulado en dos (2) dimensiones para los 14 tramos estudiados en los siete (7) periodos de retorno mencionados ya anteriormente, se obtiene principalmente: profundidad de la lámina de agua para cada periodo de retorno, y la velocidad. En las tablas 4 y 5

se observa la profundidad máxima y velocidad máxima en el Río de Oro y Frio Tramo de estudio para cada periodo de retorno.

Tabla 4.

Profundidad máxima

Periodo de retorno	Profundidad máxima
2	7.53
5	8.08
10	8.35
25	8.67
50	8.81
100	8.90
500	9.08

Tabla 5.

Velocidad máxima

Periodo de retorno	Velocidad máxima
2	10.47
5	11.16
10	10.81
25	11.50
50	11.89
100	12.20
500	12.96

Con la herramienta RAS Mapper se observan la modelación de la profundidad y velocidad en cada tramo (Brunner, HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User Manual, 2016). ver Figuras 20 y 21 respectivamente. Esto para periodo de retorno de cien (100) años

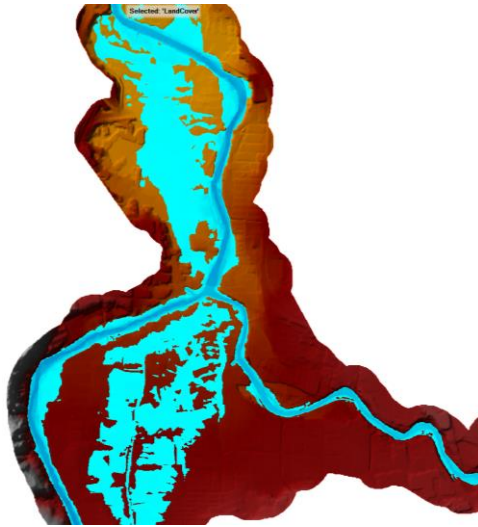


Figura 21. Resultado de la simulación periodo de retorno 500 años, profundidad máxima, tramo típico.

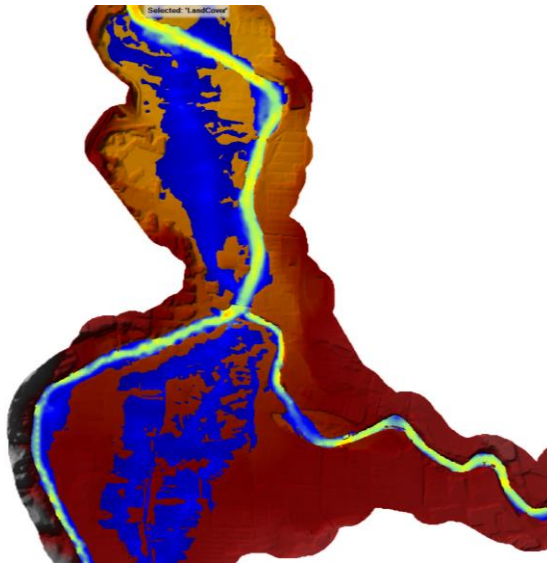


Figura 22. Resultado de la simulación obtenida para la velocidad máxima

En la tabla 6 se observan las áreas del drenaje normal, área ocupada por la lámina de agua durante el levantamiento de información. Esto para cada uno de los tramos.

Tabla 6.

Área del drenaje normal.

Tramo	Drenaje Área(m²)
1	24592,0
2 y 3	225019,3
4	43477,5
5	54119,9
6	10842,3
7	17018,4
8	53172,4
9	28200,2
10	43002,5
11	33954,0
12	30397,9
13	84459,1
14	54556,2
TOTAL	702811,8

En la tabla 7, se muestra el tamaño de área de inundación que tiene cada tramo y todo el terreno de estudio para los siete (7) periodos de retorno estudiados.

Tabla 7.

Tamaños de áreas para cada tramo.

REA INUNDADA (m2)							
Tramo	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 500
1	383.513,3	408.347,0	415.367,6	425.019,6	425.917,2	421.328,3	432.398,3
2 y 3	636.235,0	751.586,6	808.020,9	971.898,3	1.505.708,9	1.261.639,4	1.424.348,4
4	88.487,6	101.470,7	117.989,0	143.338,4	228.874,6	314.820,8	422.003,9
5	93.300,5	116.335,0	134.611,8	148.720,6	155.650,3	162.086,9	171.719,5
6	39.967,9	47.326,8	56.393,5	67.748,8	73.263,2	78.543,8	112.848,5
7	38.141,6	47.354,5	53.238,5	59.085,2	62.445,5	64.250,5	68.814,1
8	89.693,1	151.057,9	103.638,2	118.111,5	129.626,5	151.063,6	177.229,5
9	49.630,9	55.295,4	59.707,1	68.356,5	74.474,4	101.144,1	113.332,9
10	112.495,4	120.128,2	123.369,8	128.468,1	132.083,9	135.869,6	158.509,2
11	137.355,4	180.278,6	199.409,0	215.598,1	223.413,0	227.320,6	235.049,6
12	71.304,8	96.391,9	102.667,0	114.990,8	119.694,0	122.497,0	126.637,3
13	158.579,3	170.831,1	179.230,6	188.226,0	193.177,3	196.371,0	206.308,1
14	130.315,0	130.316,1	168.687,3	181.033,1	193.006,4	200.469,9	221.394,9
Total	2.029.020,0	2.376.719,7	2.522.330,5	2.830.595,0	3.517.335,2	3.437.405,5	3.870.594,2

Los mapas detallados se encuentran al final del documento.

4. Conclusiones

-Cada vez que un ingeniero se enfrenta a la simulación de un modelo hidráulico utiliza el software más apropiado para que sus resultados sean los más verídicos posibles y en este caso se empleó el software Hec-RAS y todas sus aplicaciones ya que ofrece cálculos en una y dos dimensiones; con

esta última versión 5.0.5 que fue lanzada al mercado el 4 de mayo de 2018 se destaca entre otras cosas la velocidad computacional, ya que la simulación del modelo es más veloz que la versión anterior haciendo esto una ventaja muy grande, pero también trae desventajas porque todas sus aplicaciones aún no han sido instaladas, como ocurre con la herramienta para la incorporación de infraestructura provocando esto que el modelo no tenga incorporado ningún tipo de puentes.

-El modelamiento bidimensional hidráulico en cualquier software depende principalmente de los hidrogramas tomados en campo y el modelo digital de terreno utilizado, en este caso se observó que otra gran variable es la dimensión de las celdas de la malla y el tiempo computacional para asegurar que el modelo sea estable.

-Analizando los resultados obtenidos se determinó que la metodología utilizada para obtener los hidrogramas no fue la más adecuada para realizar un modelado bidimensional, debido a que estos se calcularon de forma acumulativa. Como consecuencia se tuvo que hacer un modelo para cada tramo analizado, generando discontinuidades entre dos tramos consecutivos, como se puede observar en la Figura 23.

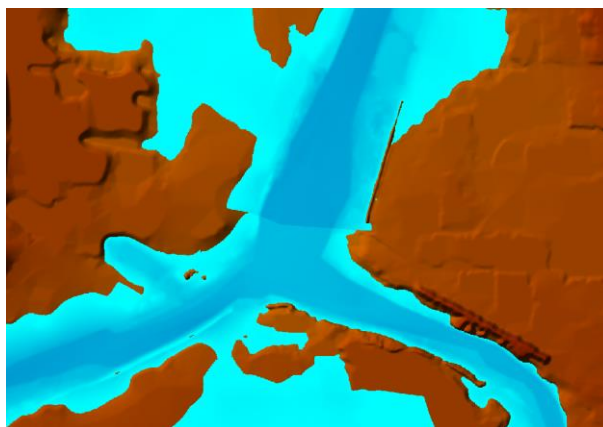


Figura 23. Discontinuidad entre modelos por efecto de hidrogramas acumulativos.

-Lo más recomendable para el modelado bidimensional seria tener el hidrograma por separado de cada afluente, teniendo de esta forma el aporte que realiza cada uno de ellos al cauce principal.

-De acuerdo con el modelado, algunas zonas son inundadas por la falta de continuidad en los muros de contención que ya fueron construidos como se puede observar en la imagen a continuación.

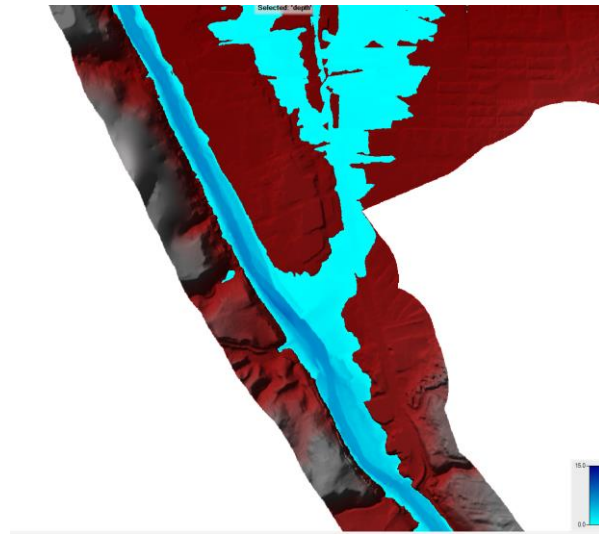


Figura 24. Zoom de zona donde la inundación es provocada por falta de unión de los muros de contención.

-El modelado bidimensional no tiene incorporado ningún puente, pues el software Hec-Ras 5.0.5 no permite incorporarlos directamente; por lo tanto, no es evidente el efecto de represamiento que estos causan a lo largo del Río de Oro y Río Frío.

-El efecto de represamiento trae como consecuencia aumento de las áreas inundadas aguas arriba de donde se encuentre el obstáculo, efecto que no se ve representado en el modelo bidimensional.

-Para el modelamiento bidimensional no es clara la metodología que debe ser utilizada para el cálculo del tamaño de la celda y el tiempo de paso que debe ser usado. Esto hace difícil la estabilización del modelo, pues dependiendo del tamaño de celda y el tiempo de paso elegido el resultado es variable. Por esta razón se debe ser muy cuidadoso durante en la elección de estas variables. Lo adecuado para lograr un modelo más fiel a la realidad sería realizar una calibración con caudales y alturas de la lámina de agua, en este caso en concreto no se puede realizar de esa manera pues no existe una instrumentación en el Río que ofrezca estas variables.

-El periodo de retorno apto para utilizar en los diseños hidráulicos es de 100 años, pero a la hora de ejecutar se recomienda de 20 a 50 años ya que se encuentran dentro de una zona urbana.

-Al analizar los diferentes periodos de retorno se observa que hay varias zonas críticas como son el Corregimiento de Llano Grande (Girón), El Poblado (Girón) desde el periodo de retorno de 2 años y la zona de Arenales pasando por Primero de Mayo y Portal Campestre hasta Villa Campestre desde un periodo de retorno de 25 años; la zona de Hoyo Caliente pasando por El Carrizal y La Rinconada hasta llegar a El Poblado desde el periodo de retorno de 50 años y la zona del Portal 1 pasando por el SENA hasta la Quebrada La Iglesia desde el periodo de retorno de 100 años; lo que se recomienda realizar unas buenas obras de mitigación para prevenir posibles inundaciones.

-Según la resolución 1294 de 2009 expedida por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) Manual de normas geotécnicas o la norma que la modifique, adicione o sustituya, donde se establecen las clases de cauces; “En las rondas hídricas de protección de cauces permanentes o drenajes de invierno localizadas en las áreas urbanas, la distancia mínima de aislamiento será de treinta metros (30 m) para los cauces principales o de primer orden, de veinte metros (20 m) para los cauces secundarios y de quince metros (15 m) para

las corrientes de tercer orden, medidos a partir de la cota máxima de inundación, la corona del talud, o el borde interno de la canalización según sea el caso.” (Luis Francisco, 2014) Teniendo en cuenta que el Río de Oro se encuentra clasificado entre los Ríos de primer orden se recomienda acatar la norma y construir solo después de los 30 metros para toda obra civil.

-Considerando que la malla toma un papel importante en el modelo hidráulico es indispensable conocer bien el terreno en que se desea modelar como los factores de área (a mayor área mayor la dimensión de la celda) y pendiente (a mayor pendiente menor la dimensión de la celda), ya que de ello depende el tamaño de celda adecuado para crear un modelo hidráulico bidimensional con mejor detalle.

Referencias Bibliográficas

- Borrazas, P., Rodriguez Paz, A., & Blanco Rotea, R. (2008). Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Vol 18*, p.15-32.
- Brunner, G. W. (2015). “HEC-RAS USDA-ARS Bank Stability & Toe Erosion Model (BSTEM) Technical Reference & User Manual. U.S Army Corps of Engineers. *March*. version 5.0.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User Manual* U.S Army Corps of Engineers. *March*. version 5.0.
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System User Manual. U.S Army Corps of Engineers. *February*, pag 960. version 5.0.
- Brunner, G. W. (2018). HEC-RAS River Analysis System supplemental to HEC-RAS Version 5.0 User’s Manual. U.S Army Corps of Engineers. *April*. version 5.0.
- Castañeda Torres, J. S., & and Rivera Rangel, P. A. (2017). *Aplicación de HEC-RAS 5.0 para la modelación de una zona susceptible de inundaciones en el área metropolitana de Bucaramanga*. Facultad de ingenierias fisico mecanicas.
- Checa, Z. P., Morales, A. F., & Hernández, L. A. (2014). Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria). 51–58.
- García, J. C. (s.f.). *DielmoOpenLiDAR: control de calidad de datos LiDAR y generación de productos finales. Valencia (spain). III Jornadas de SIG Libre. p 10-14*
- García-Gómez, I., Fernández, M., & Moraza, A. M. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios,”. *vol. 20*, p.25–44.

- Hernández, Y. M. (2011). *Generalización de modelo digital de elevación condicionada por puntos críticos de terreno*. Universidad de Talca, Centro de Geomática. pag.15-18
- Sanchez, J. & Lerma Garcia, J. (2012). *Actualizacion de cartografia catastral urbana mediante lidar y SIG*. Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica, Asociación de Geógrafos Españoles. pag. 25
- Lluén Chero, W. E. (2011). *Aplicacion de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para calculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Julio. pag.65.
- Luis Francisco, B. P. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2013-2027*. Alcaldia de Bucaramanga. pag.146.
- Quijano Quiroga, C. A. (2016). *Plan de Desarrollo Municipio de Bucaramanga 2016-2019*. Junio. Primer documento. Alcaldia de Bucaramanga.
- Revuelto, J., Arguedas, G., & Serreta, A. (2013). *Utilización de técnicas de láser escáner terrestre en la monitorización de procesos geomorfológicos dinámicos: el manto de nieve*. vol. 39, no. 2, pag. 335–357.
- Rodriguez Juarez, A. (2016). Estudio de captura de datos con escáner láser terrestre (TLS) para aplicación en el modelado de información para la edificación (BIM). Ingeniería cartografica, geodèsia y fotogrametria, centro de estudios de postgrados universidad de Jaen. Julio. vol. 95.
- Santos Clavero, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*.Escuela Politecnica Superior, Barcelona España. Junio. pag. 46-60.
- Te Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa fe de Bogota , Colombia, McGRAW-HILL INTRERAMERICANA S.A. marzo. pag 87-125.
- Torres, E., & González, E. (2008). *Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - sector Alicachin Ernesto*. pag. 9-13.

Yang, Z., & Hutchison, K. (2005). Modelado a escala regional inundación utilizando la precipitación NEXRAD , SIG , y HEC-HMS / RAS : un estudio de caso de la cuenca del Río San Antonio Verano 2002 evento de tormenta. *vol. 75*, 325–336.

Apéndices

Apéndice A. UAV

El levantamiento de fotogrametría aérea consiste en el registro fotográfico desde una plataforma aérea con el fin de obtener una secuencia de imágenes a lo largo de una ruta de vuelo previamente establecida que cubra toda la zona de interés. Actualmente, en fotogrametría digital se cuenta con diferentes plataformas para la realización de registros fotogramétricos, entre las que se destacan: los satélites, los aviones tripulados y los vehículos aéreos no tripulados o sistemas UAV. Cada uno de ellos cuenta con grandes ventajas respecto a los otros sensores de acuerdo a los requerimientos que se tengan.

En ese sentido y considerando las necesidades que se presentan para el presente proyecto en el que se requiere obtener información cartográfica a escalas mayores o iguales a 1:2000 para la zona de estudio, se ha seleccionado como plataforma de trabajo para el levantamiento de fotogrametría aérea los sistemas UAV. Las ventajas que ofrecen estos sistemas en el presente proyecto tienen que ver con el registro fotográfico aéreo de las zonas urbanas y suburbanas obteniendo imágenes de alta resolución espacial y temporal.

Como herramientas de trabajo para el presente proyecto ha sido empleada la plataforma UAV eBee de la compañía suiza Sensefly. Algunas características de esta plataforma se presentan en la siguiente tabla resumen:

Tabla 8.

Características del sistema UAV empleado.

Plataforma UAV	eBee
	
Detalle	Características
Envergadura	96 cm
Peso	700 g
Resolución Cámara	20 MP
Batería	3 celdas Litio Polímero
Duración Vuelo	40-45 minutos
Velocidad Crucero	10-16 m/s
Espacio de aterrizaje	Radio de 20 a 40 m
Resistencia al viento	45 km/h (12 m/s)
Radio de comunicación	hasta 3.0 km
Cobertura	1.5 - 10 Km ²
Resolución de imagen	3-30 cm/pixel
Lanzamiento	Manual
Software	eMotion 2 y Pix4D

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

La definición de las áreas de trabajo fue establecida de acuerdo a los requerimientos del proyecto y que fueron denominadas como zonas de estudio. En la tabla 9, se presentan la zona de estudio que corresponde a las longitudes del Río de Oro (entre el barrio Café Madrid y el barrio Nuevo Girón) y del Río Frio (entre la PTAR y la conexión con el Río de Oro) más un área sobre los valles considerada de importancia para el estudio. La Figura 25 incluye además las áreas de

cobertura de cada vuelo con la ubicación de los lugares seleccionados para realizar el lanzamiento y descenso de la plataforma aérea, por su parte la Figura 26 ilustra las líneas de vuelos UAV, que realizó la plataforma en la zona de estudio.

Tabla 9.

Lista de las coordenadas de los sitios en donde se realizaron los vuelos

Sector	Punto de vuelo	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
Barrio Café Madrid - Girón	Vuelos 1 y 2	7° 9'19.30"N	73° 8'53.78"O
	Vuelo 3	7° 9'1.61"N	73° 9'7.16"O
	Vuelo 4	7° 8'1.57"N	73° 9'16.91"O
	Vuelo 5	7° 6'55.47"N	73° 9'38.54"O
	Vuelos 6 y 7	7° 6'20.18"N	73° 9'52.32"O
	Vuelo 8	7° 5'22.80"N	73°10'24.70"O
Girón	Vuelos 9 y 10	7° 4'36.10"N	73°10'7.25"O
	Vuelo 11	7° 3'33.02"N	73°10'6.57"O
	Vuelo 12	7° 3'43.44"N	73° 9'54.15"O
PTAR - Girón	Vuelos 13 y 14	7° 3'31.82"N	73° 8'15.91"O
	Vuelo 15	7° 2'44.64"N	73°10'2.00"O
Girón - Barrio Nuevo Girón	Vuelos 16, 17 y 18	7° 1'56.91"N	73°10'10.28"O
Sistema de referencia WGS-84			

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

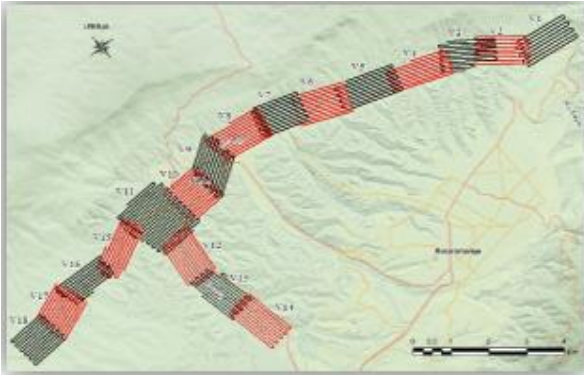


Figura 25. Cobertura y puntos de vuelos UAV en zona de estudio Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS



Figura 26. Líneas de vuelos UAV en zona de estudio

En los levantamientos de fotogrametría aérea realizados con el sistema UAV eBee, se tomaron en promedio cerca de 250 imágenes por vuelo (Tabla 10). Estas imágenes son procesadas por el software de fotogrametría Pix4D Mapper Pro, el cual requiere como datos de entrada las imágenes del vuelo, los datos de posición y orientación asociados a estas imágenes y los puntos de control medidos en el terreno.

Tabla 10.

Parámetros de vuelo de levantamientos de fotogrametría aérea con UAV.

PARÁMETROS VUELO					
Sector	No. Vuelo	Altura [m]	# de fotos	Traslape [%]	Cobertura efectiva aprox. [ha]
				Longitudinal - Lateral	
Café Madrid – Girón	V-1	180	172	75 x 65	2.000
	V-2		185		
	V-3		228		
	V-4		234		
	V-5		265		
	V-6		260		

Sector	No. Vuelo	PARÁMETROS VUELO			Cobertura efectiva aprox. [ha]
		Altura [m]	# de fotos	Traslape [%] Longitudinal - Lateral	
Girón PTAR – Girón Girón – Barrio Nuevo Girón	V-7	180	237		
	V-8		263		
	V-9		246		
	V-10		265		
	V-11	180	504		
	V-12		264		
	V-13		227		
	V-14		242		
	V-15	180	222		
	V-16		198		
	V-17		234		
	V-18		216		

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Las estrategias de procesamiento que emplea el software para imágenes tomadas con sistemas UAV, son una combinación de estrategias empleadas en las áreas de visión por computador y de fotogrametría terrestre.

Estas estrategias inician con la etapa de búsqueda y detección de características homólogas entre imágenes a través del algoritmo SIFT ampliamente utilizado en visión por computador. Estos puntos homólogos junto con los datos de posición y orientación vinculados en cada imagen, y registrados por el sistema GPS/INS a bordo de la plataforma UAV, son utilizados en una estrategia conocida como Bundle Block Adjustment para la reconstrucción exacta de la posición y orientación de la cámara para cada una de las imágenes tomadas (Checa, Morales, & Hernández, 2014).

A partir de esta reconstrucción los puntos homólogos extraídos en la primera etapa son verificados y calculadas sus coordenadas 3D, que se presentan en el sistema de referencia WGS84. Luego, estos puntos son interpolados para formar una Red Irregular Triangulada o TIN (por sus siglas en ingles), para obtener el modelo digital de elevaciones (DSM)

Finalmente, el modelo digital de elevaciones es empleado para proyectar cada pixel de las imágenes y para calcular el orto mosaico georreferenciado.

La depuración del modelo fue necesaria para corregir las curvas de nivel generadas por el UAV.

Debido a la presencia de elementos que no corresponden a la cota del terreno natural, se realizó la revisión minuciosa de cada uno de los DTM por vuelo, con el objetivo de identificar los sectores en los cuales las curvas de nivel eran erróneas.

A continuación, se listan los principales errores encontrados y pueden ser visualizados en la Figura 27 y 28.

Residuos: Son cúmulos de pequeños segmentos que rodean curvas marcadas.

Picos: De comportamiento similar a las burbujas, pero con forma de pico; en el Orto mosaico se observa vegetación espesa o zonas borrosas.

Burbujas: Son acumulaciones abruptas de curvas en forma circular, al observar el orto mosaico se detectan árboles cuya copa coincide con el centro de las burbujas.

Desfase: Se presentan como discontinuidad en las curvas marcadas por picos en forma de zigzag, al observar el orto mosaico, la zona es borrosa y generalmente hay vegetación espesa.

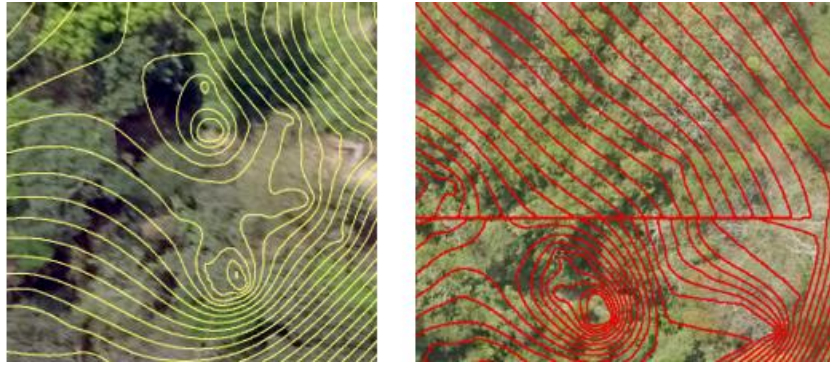


Figura 27. Errores comunes encontrados en las curvas de nivel. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

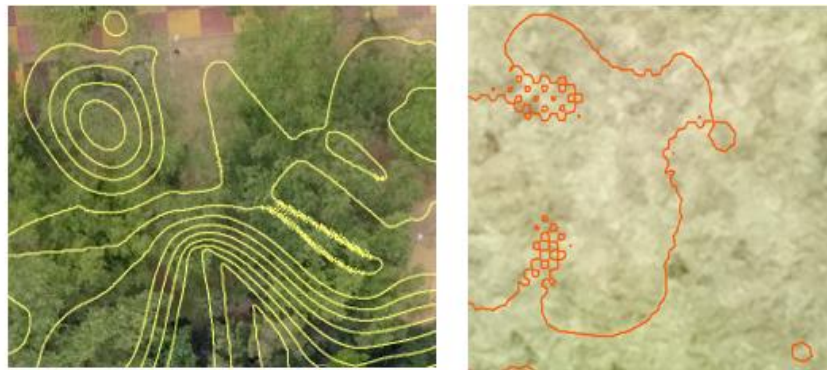


Figura 28. Errores comunes encontrados en las curvas de nivel. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Como soporte para realizar las modificaciones, se usaron videos de los cauces, tomados con dron el presente año en el marco del Convenio Interadministrativo.

Estos vídeos permiten corroborar la forma del terreno en donde los mosaicos y DTM no brindan un resultado muy claro de la topografía del terreno, como, por ejemplo, las zonas urbanas en las cuales el área de conflicto entre las curvas de nivel es mayor.

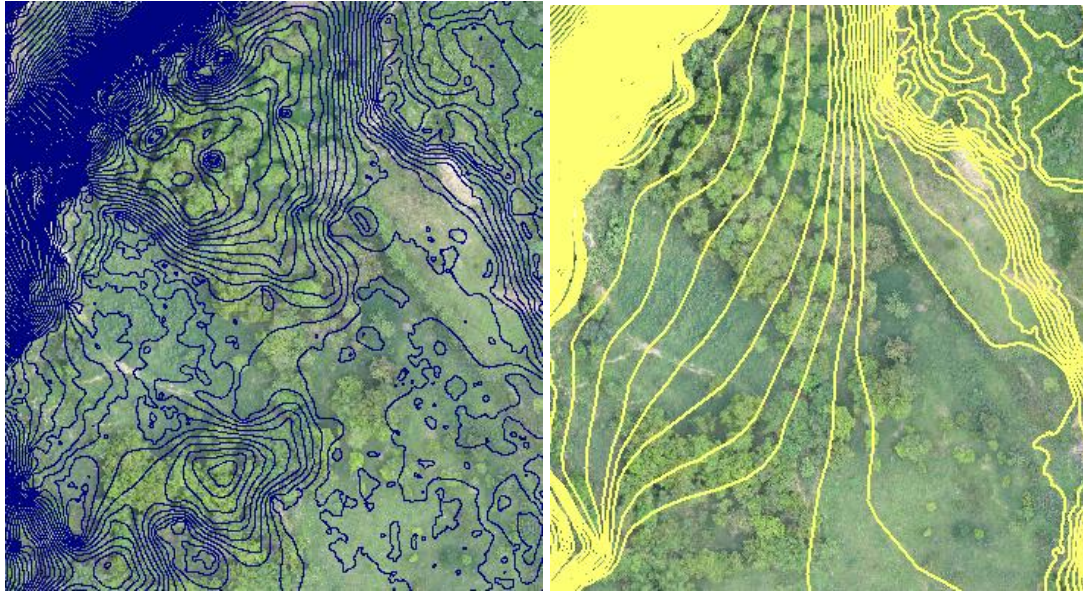


Figura 29. Depuración curva UAV, antes y después. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

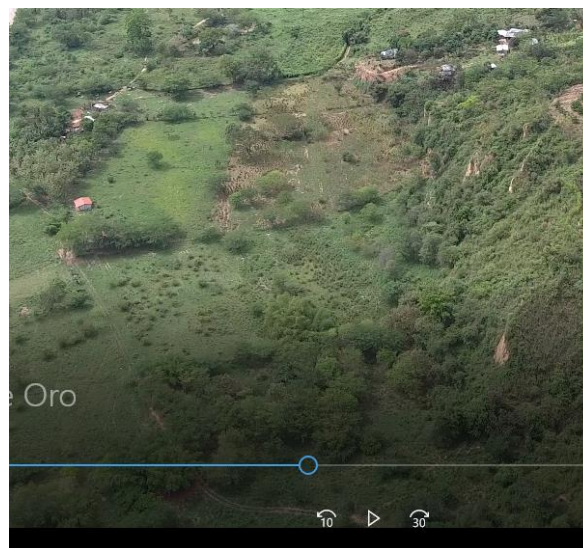


Figura 30. Ejemplo vista de los vídeos tomados sobre el cauce. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

A continuación, se muestran ejemplos de las depuraciones hechas manualmente a las curvas de nivel generadas a partir de modelo del terreno UAV.

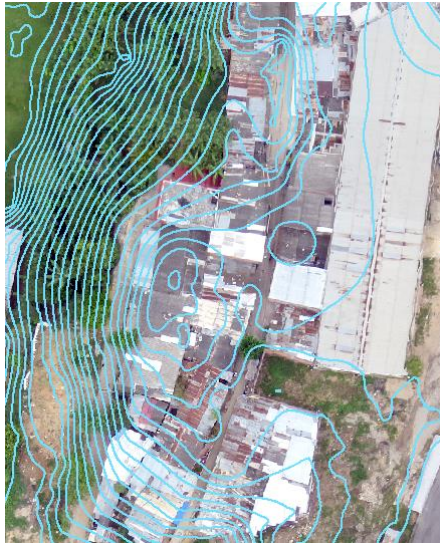
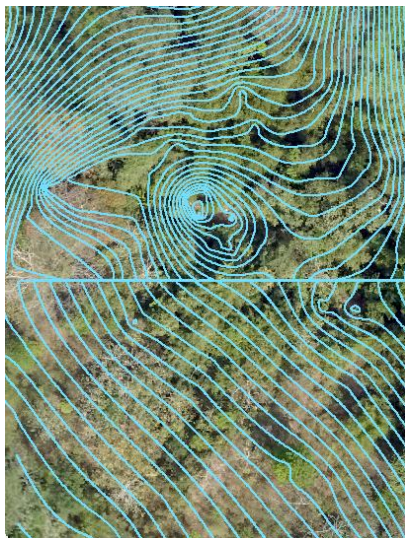
Errores sin depurar**Sectores Depurados**

Figura 31. Vista depuración curvas generadas a partir del levantamiento UAV. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Apéndice B. Curvas de nivel IDEAM

Con el objetivo de consolidar una base topográfica y cartográfica actualizada para las planicies de inundación, se utilizó la información levantada por el *Departamento de Geociencias y Medio Ambiente adscrito a la facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, en el marco de la Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano – contrato No. 408-2013*, hecho por el IDEAM en el año 2013.

La información topográfica usada del estudio proviene de levantamientos realizados con LiDAR aéreo, que consiste en la captura de nubes de puntos mediante escaneo láser, pero en este caso el sensor se encuentra ubicado en una plataforma aérea o drone (García, s.f.) (Sanchez Lopera & Lerma Garcia, 2012).

Luego de una revisión y validación de la información, se realizaron pequeños ajustes a las curvas de nivel LiDAR, ya que se encontraron zonas con ruido en donde la topografía no reflejaba fielmente el terreno; de igual forma se validó el sistema de referencia, tomando puntos de control con equipo GPS de precisión submétrica, garantizando así la coherencia entre la información levantada con diversas tecnologías. Las Figuras que siguen muestran ejemplos de los errores encontrados por el equipo técnico a la izquierda, a la derecha se presenta el resultado luego de la depuración.



Figura 32. Estudio Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano. Nota. Tomado de: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

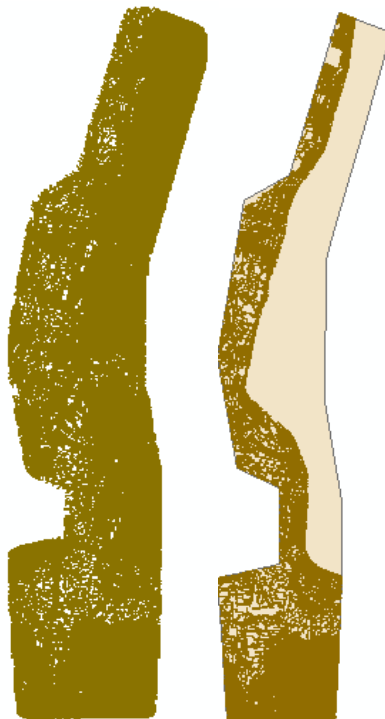


Figura 33. Curvas de nivel suministradas por el IDEAM. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

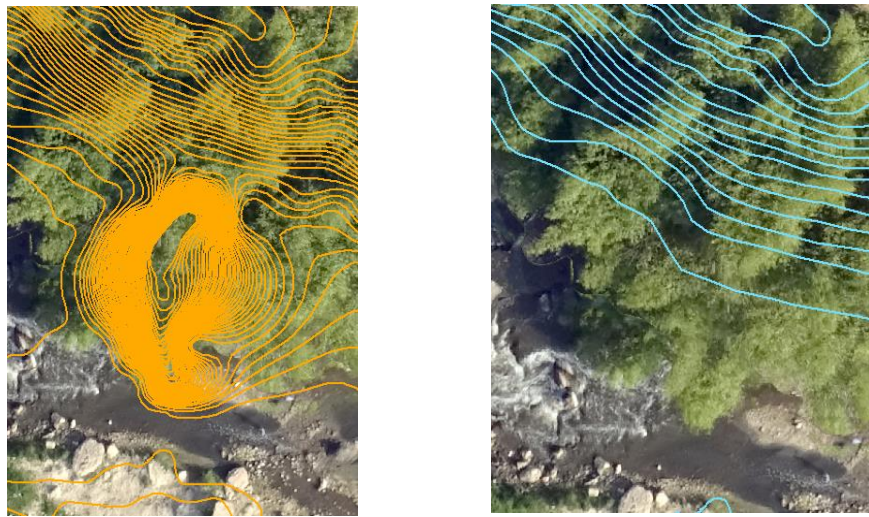


Figura 34. Errores y correcciones, información LiDAR – IDEAM 2013. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Apéndice C. Levantamiento con escáner láser terrestre – TLS

El escáner laser terrestre se basa en el mismo principio que el sistema LIDAR aerotransportado (ALS), en donde el barrido de la zona a levantar se realizada mediante un láser, sólo que en este caso el barrido se realiza desde un equipo estacionado en la superficie del suelo.

En los últimos años el escáner laser terrestre ha teniendo una gran variedad de aplicaciones, entre ellas la aplicación en la elaboración de estudios topográficos, gracias a la gran cantidad de detalles que se pueden obtener con su uso. Además, que se pueden generar modelos con un alto nivel de precisión que luego son utilizados para la generación de información como curvas de nivel (Borrazas, Rodriguez Paz, & Blanco Rotea, 2008).

De acuerdo a esto y considerando las necesidades que se presentan para el presente proyecto en el que se requiere un levantamiento topográfico detallado del cauce de los Ríos Frio y de Oro, se optó por el uso del escáner laser terrestre como apoyo, especialmente en las zonas no sea posible encontrar todos los detalles a partir de la imagen tomada con el sistema UAV. Como herramientas de trabajo se ha empleado el escáner láser terrestre RIEGL VZ-400, que gracias a su gran alcance de hasta 600 metros y su precisión de cinco (5) milímetros. Algunas características de este sistema laser se presentan en la tabla 11 resumen.

Tabla 11.

Características escáner láser terrestre.

Escáner láser terrestre	Riegl VZ-400
	
Detalle	Características
Puntos por posición de escaneo	Entre 6.0 y 8.0 millones
Alcance	350-600 m
Peso	9.6 Kg
Tipo Cámara integrada	NIKON 700
Resolución Cámara integrada	12.1 MP
Precisión	3-5 mm
Batería	Externa
Duración posición de escaneo	1.5-2.0 Min
Resolución de escaneo	0.02°-0.08°
GPS y Brújula	Integrado
Software	Riscan Pro

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Para llevar a cabo el levantamiento topográfico y geométrico con el Escáner Láser Terrestre, es necesario realizar una configuración previa del instrumento de acuerdo a la resolución que se desea.

A continuación, se detalla la resolución de escaneo.

Resolución de Escaneo: es la cantidad de puntos en un área determinada. Por lo tanto, es necesario definir un patrón de escaneo “*Panorama 80*”, cuyas propiedades se muestran en la tabla

que sigue. Esta configuración implica que, en cada posición de escaneo, el láser se moverá 100° en vertical y rotará 360° en horizontal y con un paso angular de 0.08° .

El tiempo promedio de escaneo con esta configuración es aproximadamente $1'30''$ y el tamaño de los datos recolectados está alrededor de 780Mb por cada posición de escaneo.

Sistema de Referencia: el sistema de referencia con el que trabaja el escáner está basado en el estándar internacional WGS84, apoyado con puntos de control tomados con el equipo **Topcon GR-5**, para georreferenciar con precisión la nube de puntos.

Tabla 12.

Características del Patrón de Escaneo Panorama 80.

	Ángulo de inicio	Ángulo de parada	Incremento
Escaneo Vertical	30°	130°	0.08°
Escaneo Horizontal	0	360°	0.08°

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

En total para el Río de Oro se levantaron 243 puntos para el Río de Oro y para el Río Frío se tomaron 73. Para tener un total de 316 puntos de control con los que será georreferenciado el modelo digital de elevaciones.

Sobre estos puntos tomados se deja una marca y una codificación de tal forma que cuando se realiza el escaneo se pone un cilindro especial de material altamente reflectante que se reconoce fácilmente dentro de la nube de puntos al cual durante el trabajo de oficina se le asignan las coordenadas tomadas previamente con el sistema GNSS.



Figura 35. Levantamiento en campo con sistema RTK. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Levantamiento nube de puntos. En total se realizaron 1296 estaciones de escaneo en el margen del Río de Oro entre la vereda llano grande y la confluencia con el Río Surata y 122 posiciones de escaneo correspondientes a la margen del Río Frio desde la PTAR de Río frío y la confluencia del Río de Oro.

En las Figuras a continuación se evidencian las labores en campo con el escáner láser terrestre realizadas por el equipo técnico UIS.



Figura 36. Levantamientos en campo con TLS. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Levantamiento de información batimétrica:

Con el fin de obtener información altimétrica correspondiente al lecho del Río, se optó por tomar puntos mediante tecnología RTK, en total se tomaron 2049 puntos que servirán de insumo para la generación de la superficie con el lecho del Río presente al momento de realizar los levantamientos, adicional a esto en las zonas más hondas del Río se usó el ecosonda M9 para obtener la información batimétrica.



Figura 37. Levantamiento de información batimétrica. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Procesamiento de datos en oficina:

Luego de tener descargados los datos que contiene el TLS que son nubes de puntos de cada posición de escaneo, fotografías, posición y orientación y demás parámetros tomados por el equipo. Se procede a la conversión en un Proyecto mediante el software Riscan Pro (Revuelto, Arguedas, & Serreta, 2013).



Figura 38. Software RISCAN PRO. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Registro de nubes de puntos.

El registro consiste en unir dos o más nubes de puntos de tal forma que estas queden en un sistema de coordenadas común, generando de esta forma una nube de puntos continua con todas las posiciones de escaneo disponibles en el proyecto (Rodríguez Juárez, 2016).

Este proceso se puede realizar de diferentes formas dependiendo del uso que vayan a tener los datos obtenidos. En este caso específico, se realizó con un método manual que consiste en encontrar mínimo 4 (cuatro) puntos en común entre dos posiciones de escaneo diferentes, buscando obtener errores en esta unión entre uno (1) y cinco (5) centímetros ya que entre más pequeño sea este error, los ajustes en los pasos posteriores serán más eficientes en la minimización de estos

Registro manual de las nubes de puntos (Coarse Registration).

Este método consiste en seleccionar como mínimo cuatro (4) puntos que sean comunes en dos nubes de puntos que pertenezcan a posiciones de escaneo diferentes, luego de tener elegidos los cuatro puntos se registra automáticamente la nube de puntos mostrando en esa misma ventana la desviación estándar del procedimiento

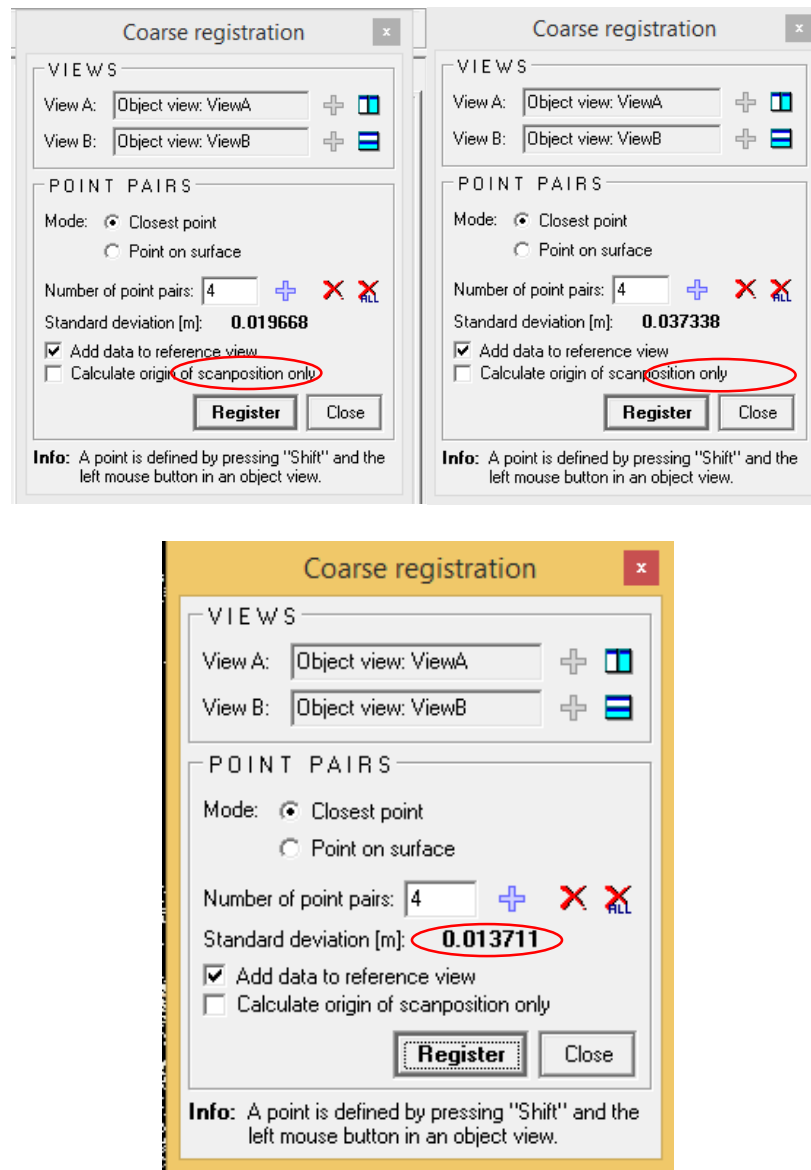


Figura 39. Desviación estándar nubes de puntos. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Los errores presentados en el registro por el método manual pueden ser reducidos mediante una funcionalidad del software *RISCAN PRO* llamada *MULTISTATION ADJUSTMENT* cuya principal función es ajustar la unión en las nubes de puntos hasta llevar los errores al mínimo posible.

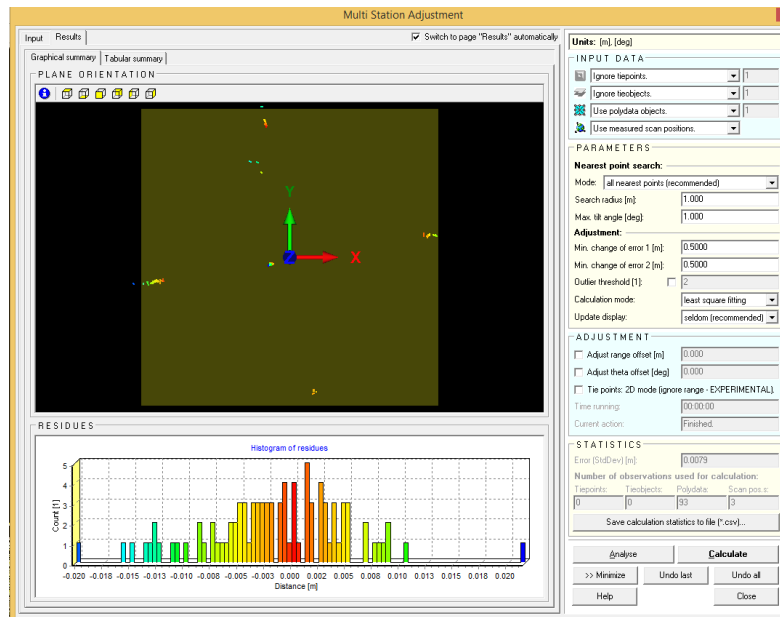


Figura 40. Parámetro multi-station adjustment. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS



Figura 41. Vista de la nube de puntos registrada. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Posteriormente se filtran las nubes de puntos para eliminar los datos que no corresponden al terreno, este proceso de filtrado se hace mediante filtros ajustados que identifican la vegetación presente, también tiene un proceso de depuración manual ya que estos filtros generalmente y dadas las particularidades de la zona toman elementos pertenecientes al terreno y otras veces deja puntos que corresponden a vegetación. Teniendo en cuenta estos detalles, el proceso de filtrado se hace por zonas para garantizar un correcto filtrado de las nubes de puntos.

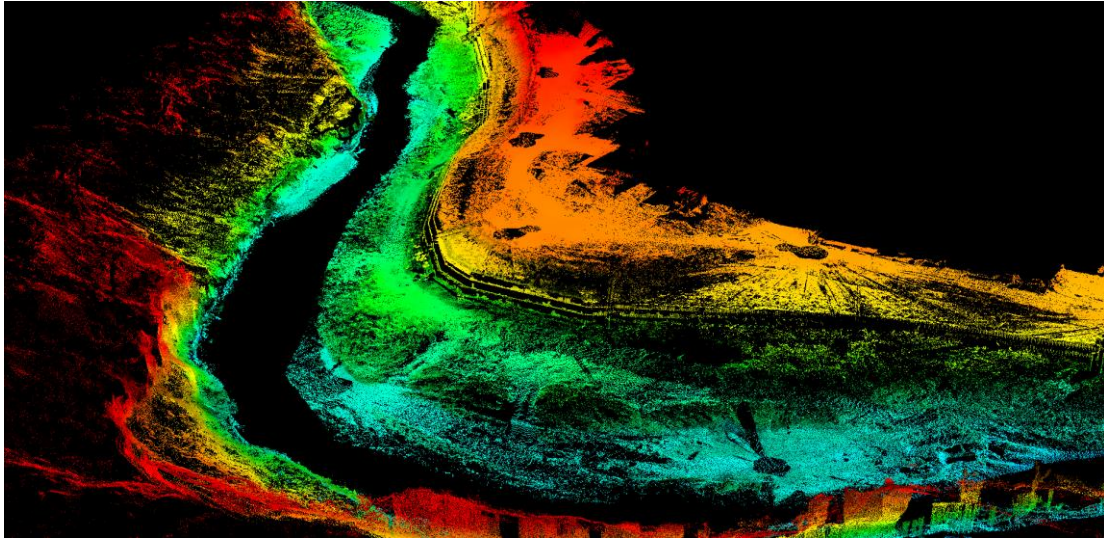


Figura 42. Vista de la nube de puntos filtrada. Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Luego de tener las nubes de puntos filtradas se procedió a asignarles los puntos de control tomados con el GPS TOPCON GR-5, este procedimiento consiste en localizar manualmente los cilindros puestos en campo y asignarle las coordenadas.

Posteriormente se creó el archivo en formato .LAS, que será el usado para la generación del MDT en el software SIG.

Apéndice D. Puentes.

De las nubes de puntos tomadas con el Escáner Laser Terrestre (TLS) se filtró la información con el software RISCAN PRO dejando solamente la información importante para obtener las medidas de los puentes, esta información se exportó como archivo .DXF para poder ser manipulada con el software AUTOCAD CIVIL y así poder acotar sacando las dimensiones necesarias.

En la siguiente tabla se encuentran las dimensiones, ubicación (Sector y barrio), tipo de servicio, cantidad de carriles y material predominante de todos los puentes que se encuentran ubicados a lo largo del Río.

Tabla 13.

Dimensiones, ubicaciones, material y datos generales de los puentes.

INSPECCIÓN GENERAL								
CARACTERÍSTICAS GENERALES PUENTES ZONA DE ESTUDIO								
CARACTERIZACIÓN DE INSPECCIÓN GENERAL								
Identificación y ubicación			Datos generales		Datos geométricos			
No.	Sector	Barrio	Tipo de servicio	Número de carriles	Ancho de calzada	Ancho de carriles	Longitud total del puente	Material predominante de los elementos
1	Predios Aledaños 2		Peatonal	1	4	4	41.3	Concreto
2	Nuevo Girón		Peatonal	1	1.1	1.1	35.5	Madera
3	Vado Hondo	Vado Hondo	Vehicular	1	9.5	4	44	Concreto
4	La Rinconada, la Cascada, el Centro 1 - Gallinera	El Malecón-Rio de Oro	Peatonal	1	1.6	1.6	44.5	Madera
5	La Rinconada, la Cascada, el Centro 1 - Gallinera	Villa Campestre II y Portal Campestre II	Vehicular	1	3.3	3.3	61.28	Concreto

No.	Sector	Barrio	Tipo de servicio	Número de carriles	Ancho de calzada	Ancho de carriles	Longitud total del puente	Material predominante de los elementos
6	La Rinconada, la Cascada, el Centro 1 - Gallinera	Villa Campestre II y Portal Campestre II	Peatonal	1	1.5	1.5	77.5	Madera
7	La Rinconada, la Cascada, el Centro 1 - Gallinera	Villa Campestre I y II, Portal Campestre II	Vehicular	2	10.2	3.2	30.5	Concreto
8	Zona Aledaña		Vehicular	2	8.5	3.1	40	Concreto
9	San Jorge II, Villa Campestre III, Castilla real 2	Castilla real 2-villa Campestre	Vehicular	4	20	3.3	34.2	Concreto
10	San Jorge II, villa campestre III, castilla real 2	Castilla Real 2-Villa Campestre	Peatonal	1	1.4	1.4	33	Madera
11	El Carmen, la	El Carmen-	Vehicular	2	10.9	3.2	30	Concreto

No.	Sector	Barrio	Tipo de servicio	Número de carriles	Ancho de calzada	Ancho de carriles	Longitud total del puente	Material predominante de los elementos
	Isla- El Rincón 1	Rincón de Girón						
12	Altos de San Antonio del Carrizal, Carrizal Campestre – Sena	Altos San Antonio del Carrizal - El Poblado - El Palenque	Vehicular	6	47	3.4	100	Concreto
13	José Antonio Galán 1, Arenales, Carlos Pizarro	5 de enero	Peatonal	1	0.9	0.9	67.2	Madera
14	Rural		Peatonal	1	0.9	0.9	51.2	Madera
15	Rural		Peatonal	1	1.5	1.5	95.4	Madera
16	Rural		Peatonal	1	1	1	123	Madera
17	Puente Nariño		Vehicular	1	4	4	36.4	madera
18	Café Madrid	El Túnel- Café Madrid	Vehicular	1	4.1	4.1	51.5	concreto

Nota. Tomado de: Equipo técnico UIS

Apéndice E. Muros

De manera similar que se editó la información de las nubes de puntos generadas por el TLS se realizó el filtro para obtener los perfiles de los muros. Se clasificaron por su tipo de perfil como se muestra en la siguiente Figura.

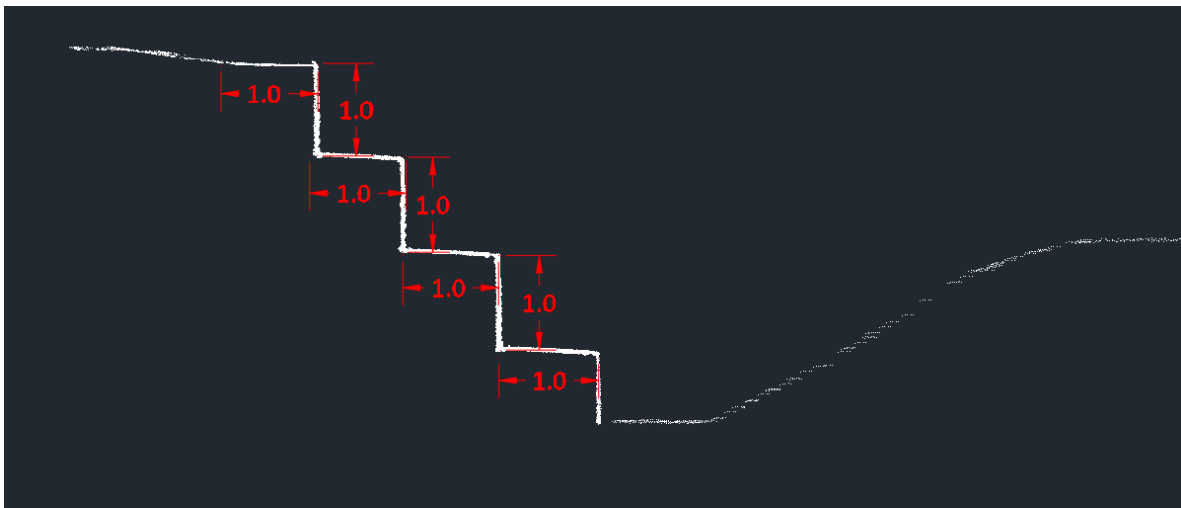


Figura 43. Vista perfil de muros en el software AutoCAD civil.

Escalones con dimensiones de un (1) metro para huella y contrahuella en todos los muros. La longitud total de muros es quince mil doscientos siete metros lineales (15.207) en el transcurso del tramo Río de Oro (sector Nuevo Girón - Café Madrid, 20 km aprox.) y del Río Frio (sector PTAR - Girón, 6km aprox.).

En la siguiente tabla se muestra el área desde la vista superior y la longitud de cada uno de los muros.

Tabla 14.

Dimensiones de los muros.

Id	Area (m2)	Longitud (ml)	Id	Area (m2)	Longitud (ml)	Id	Area (m2)	Longitud (ml)
1	612.99	262.28	13	2,521.00	1,268.99	25	9.60	21.17
2	4,254.51	1,317.34	14	1,486.79	858.39	26	117.59	200.11
3	1,513.35	516.68	15	344.14	413.73	27	37.01	78.02
4	278.35	269.14	16	143.86	252.36	28	21.97	55.66
5	395.89	226.06	17	796.57	390.10	29	31.78	36.89
6	229.32	202.47	18	3,167.57	1,551.34	30	960.10	781.55
7	420.31	227.54	19	1,770.41	870.90	31	199.55	221.77
8	845.63	570.24	20	1,962.02	830.06	32	85.59	174.15
9	516.78	317.62	21	7.63	54.88	33	101.44	117.90
10	1,209.38	703.18	22	189.61	122.72	34	803.00	384.10
11	590.71	337.88	23	609.02	935.83	35	370.41	171.22
12	231.72	134.62	24	141.49	330.08			

Apéndice F. Pendientes

Del Modelo Digital de Terreno podemos obtener la cota en cualquier punto utilizando con el software SIG, ubicando las abscisas donde se tomaron los hidrogramas, se hace un Shapefile de polígonos creando áreas para cada uno como se muestra en la Figura 44.

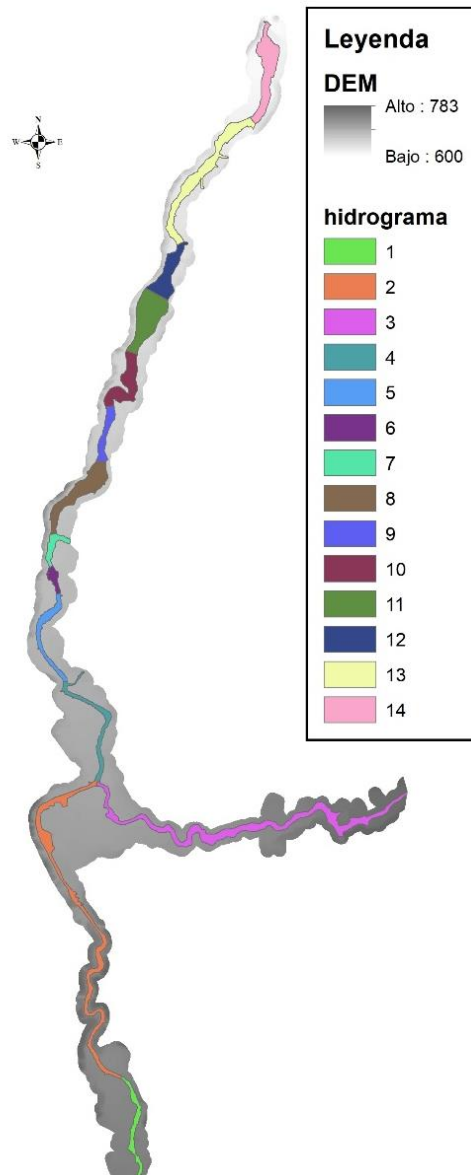


Figura 44. Áreas de Hidrogramas.

Posteriormente creamos un Shapefile de puntos donde cada punto se puso dentro del encauzamiento en la parte más profunda que conectaba con el borde del polígono de área según el hidrograma; esto se realizó para los catorce (14) tramos como se muestra en la Figura 45.

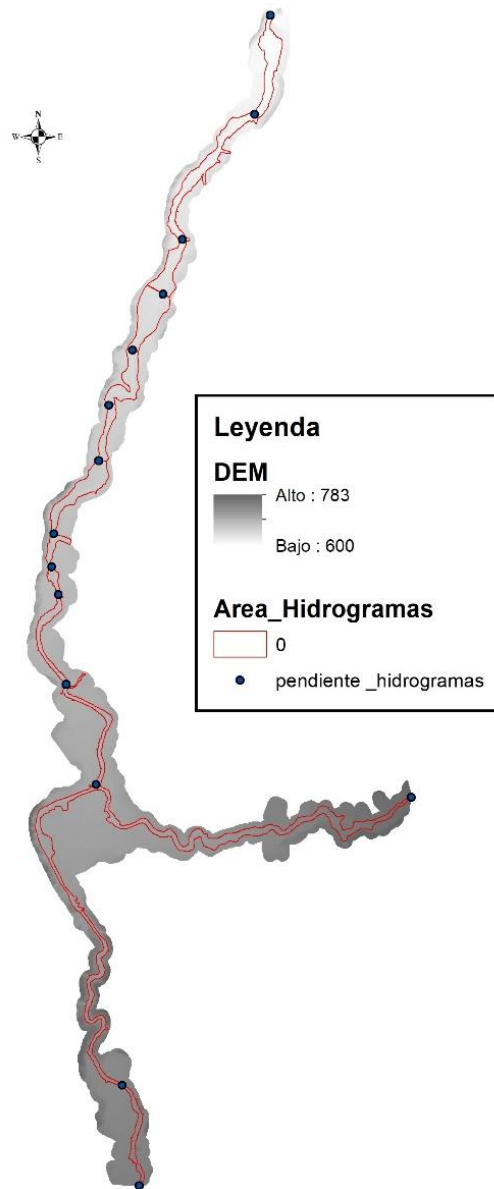


Figura 45. Shapefile para hallar pendientes de cada tramo.

Teniendo estos puntos se halla la cota en cada uno y utilizando la ecuación 1 se calcula la pendiente de cada tramo como lo muestra la tabla 15.

$$\text{Pendiente} = \frac{(\text{cota inicial} - \text{cota final})}{\text{longitud}} \quad (2)$$

Tabla 15.

Pendientes para cada tramo.

Tramos	Descripción	Altura		Longitud	Pendiente
		Inicio	Fin		
1	Inicio-Nuevo Girón	729.008301	718.624329	3197.17912	0.00324785
2	Nuevo Girón- Confluencia RF	718.624329	687.316345	6031.70551	0.00519057
3	PTAR Río Frío- Confluencia Río de Oro	749.2225342	687.316345	6297.75133	0.00982989
4	Confluencia RF-RO-Q. Las Macanas	687.316345	677.163391	1890.09507	0.00537166
5	Q. Las Macanas-Q. La Iglesia	677.163391	667.544983	1560.45433	0.00616385
6	Q. La Iglesia-Q. La Honda	667.544983	664.458801	419.844625	0.00735077
7	Q. La Honda-Q. Chimitá	664.458801	662.968201	509.975316	0.00292289
8	Q. Chimitá-Q. La Cuyamita	662.968201	650.627563	1530.13865	0.00806505
9	Q. La Cuyamita-Q. Nápoles	650.627563	646.344299	839.910477	0.00509967
10	Q. Nápoles-Q. La Argelia	646.344299	639.690979	1229.82122	0.00540999
11	Q. La Argelia-Q. Las Navas	639.690979	633.046509	931.176212	0.00713557
12	Q. Las Navas-Q. Chapinero	633.046509	621.895935	902.819715	0.01235083
13	Q. Chapinero-Q. La Picha	621.895935	610.215088	2395.8963	0.00487536
14	Q. La Picha-Confluencia Río Suratá	610.215088	600.823914	3197.17912	0.00293733

Apéndice G. Coeficiente de maning

Del estudio realizado por el grupo de investigación Geomática se obtuvo diferentes tipos de suelo y con la clasificación de (Te Chow, 2004) se seleccionó su Manning.

Tabla 16.

Coeficientes de Manning según Ven te Chow en Hidráulica de canales abiertos.

Tipo de suelo	Manning
Arbusto denso	0.1
Arbustos escasos mucho pasto	0.05
Asfalto rugoso	0.02
Asfalto rugoso min	0.016
Cultivos maduros alineados	0.035
Grupos Grandes de madera	0.1
Pastos Altos	0.035
Pastos Cortos	0.03
Pastos cortos mínimo	0.025
Pequeños arbustos y arboles	0.04
Pequeños arbustos y árboles máx.	0.05
Pequeños arbustos y árboles min	0.035
Piedra partida suelta máx.	0.035
Piedra partida suelta min	0.033
Ríos sección regular	0.025
Sección irregular	0.035

Nota. Tomado de: Hidráulica de canales abiertos, Ven te Chow.

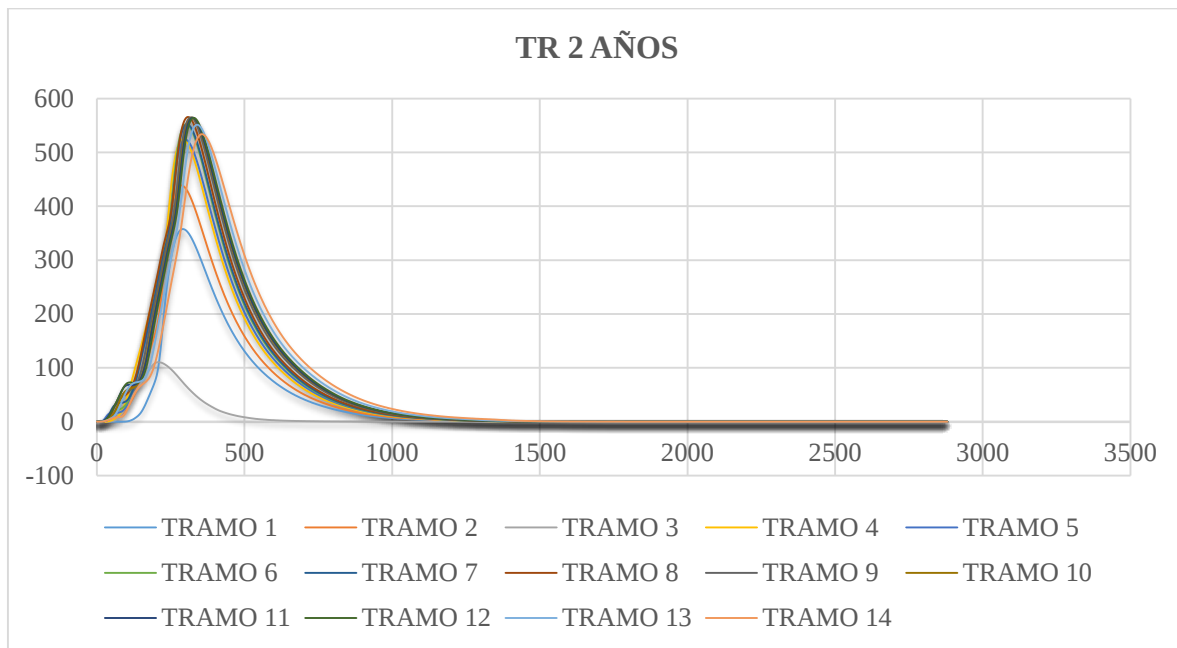
Apéndice H. Hidrogramas

Figura 46. Hidrogramas para periodo de retorno de dos (2) años.

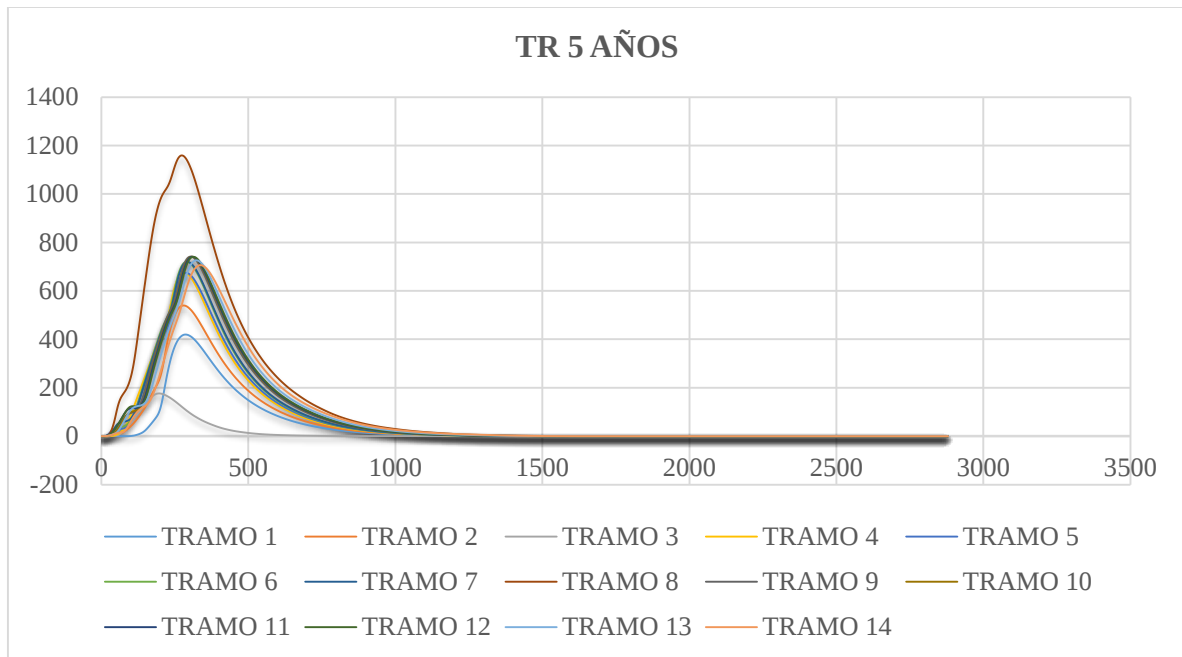


Figura 47. Hidrogramas para periodo de retorno de cinco (5) años.

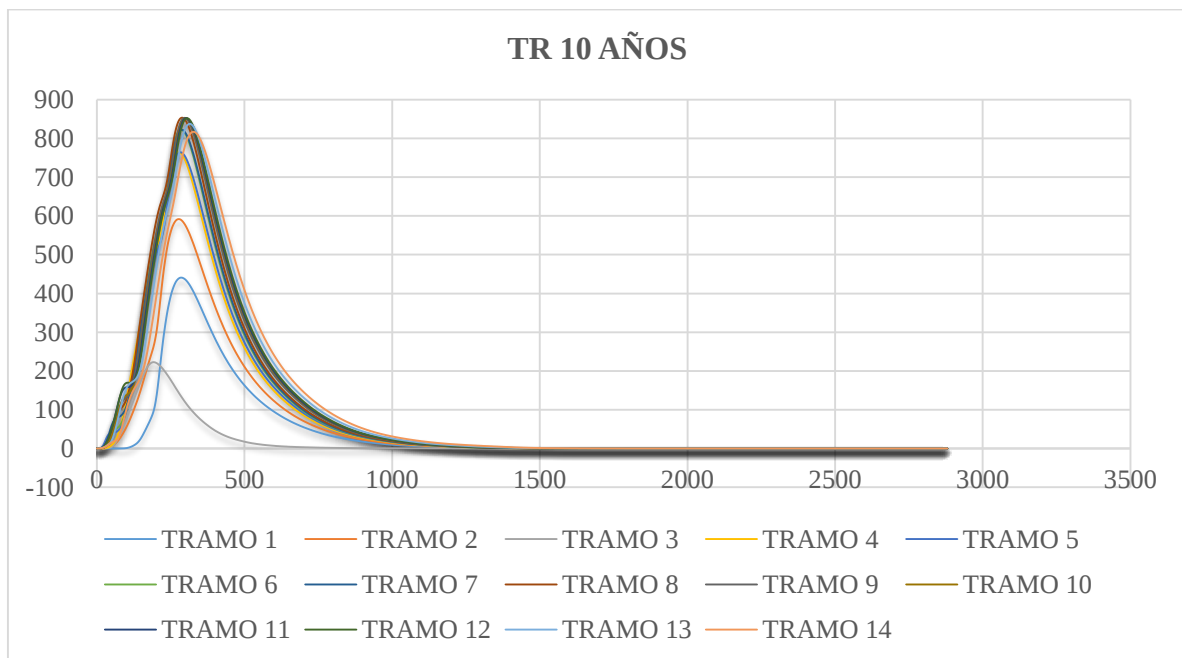


Figura 48. Hidrogramas para periodo de retorno de diez (10) años.

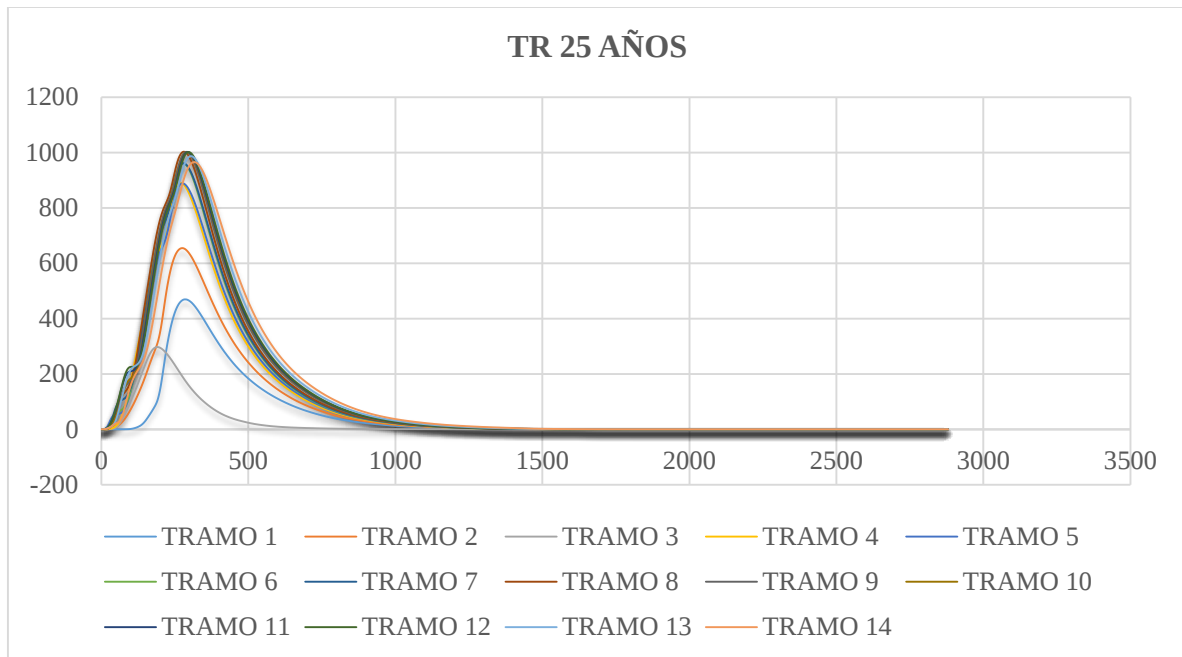


Figura 49. Hidrogramas para periodo de retorno de veinticinco (25) años.

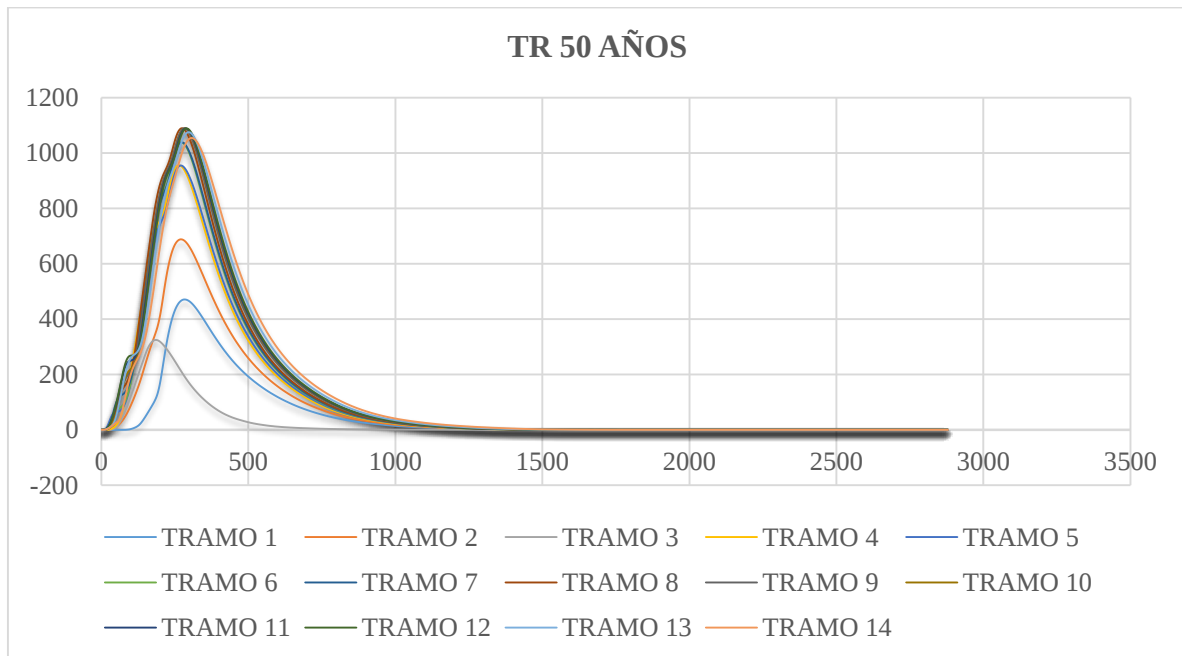


Figura 50. Hidrogramas para periodo de retorno de cincuenta (50) años.

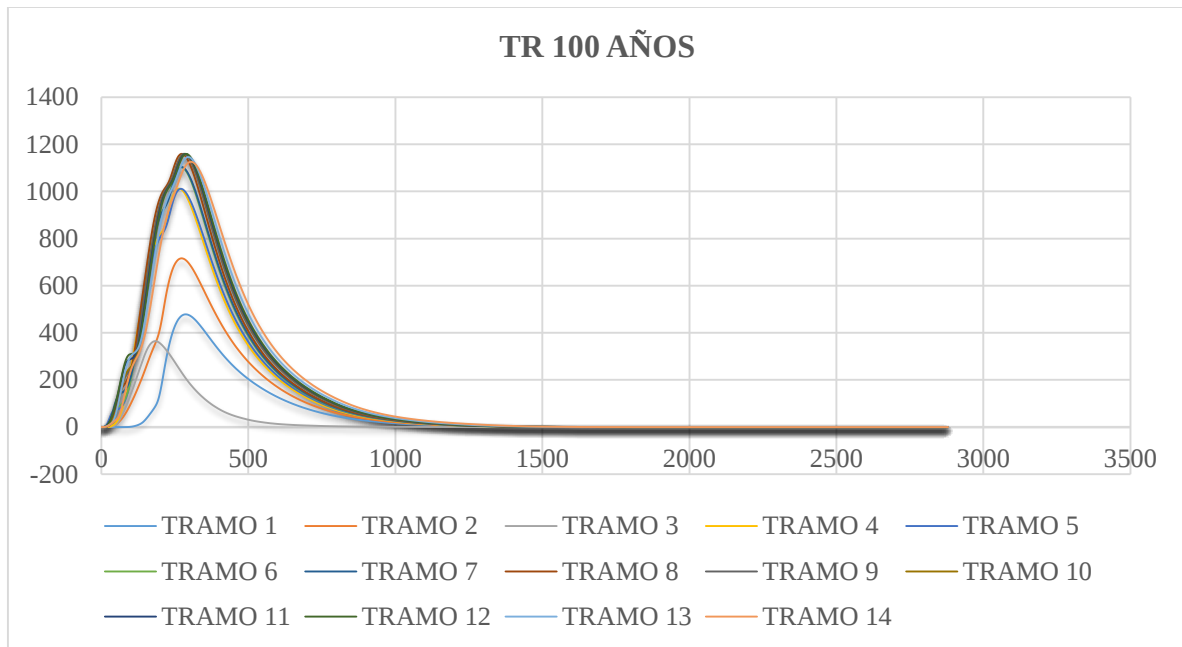


Figura 51. Hidrogramas para periodo de retorno de cien (100) años.

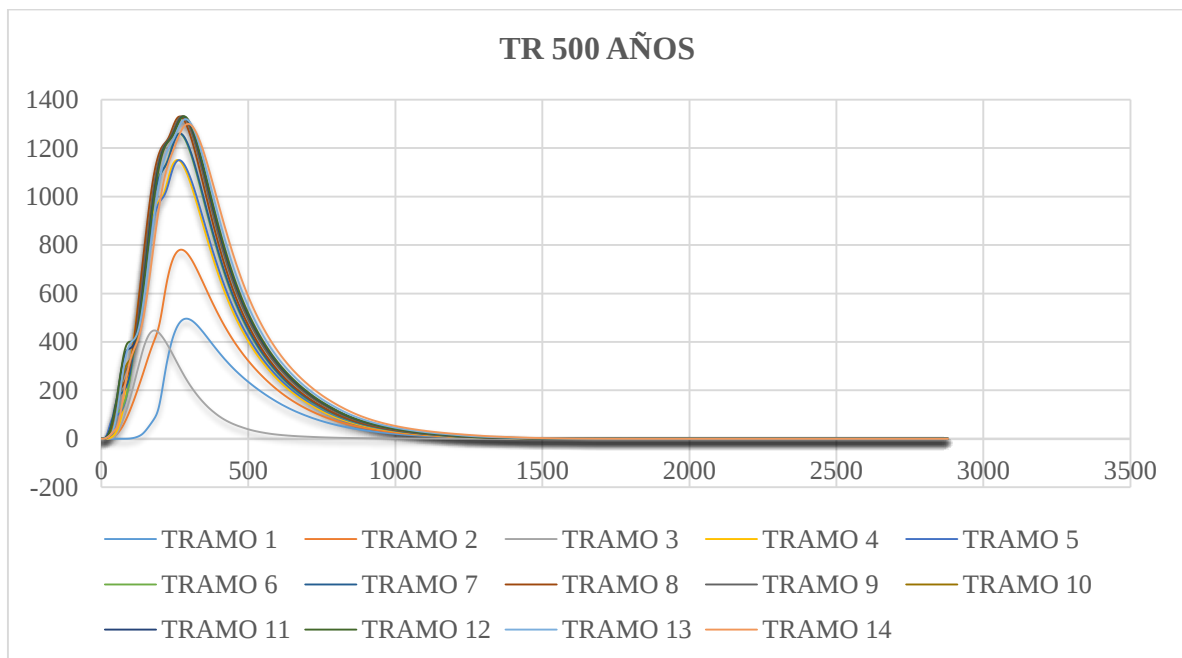


Figura 52. Hidrogramas para periodo de retorno de quinientos (500) años.

Apéndice I. Carga de modelo digital

Mediante la herramienta RAS Mapper damos clic a la pestaña Terrain (terreno) y seleccionamos create a new terrain (crear nuevo terreno) donde abrirá la ventana de New Terrain Layer (nueva capa de terreno). (Brunner, HEC-RAS River Analysis System supplemental to HEC-RAS Version 5.0 User's Manual, 2018)

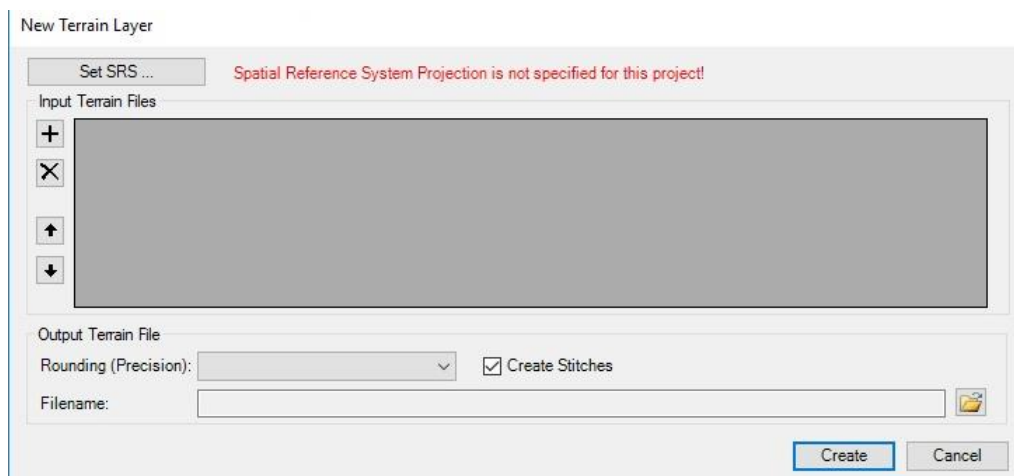


Figura 53. Nueva capa de terreno.

Siguiente a esto, en la pestaña mas (+) seleccionamos el terreno a subir.

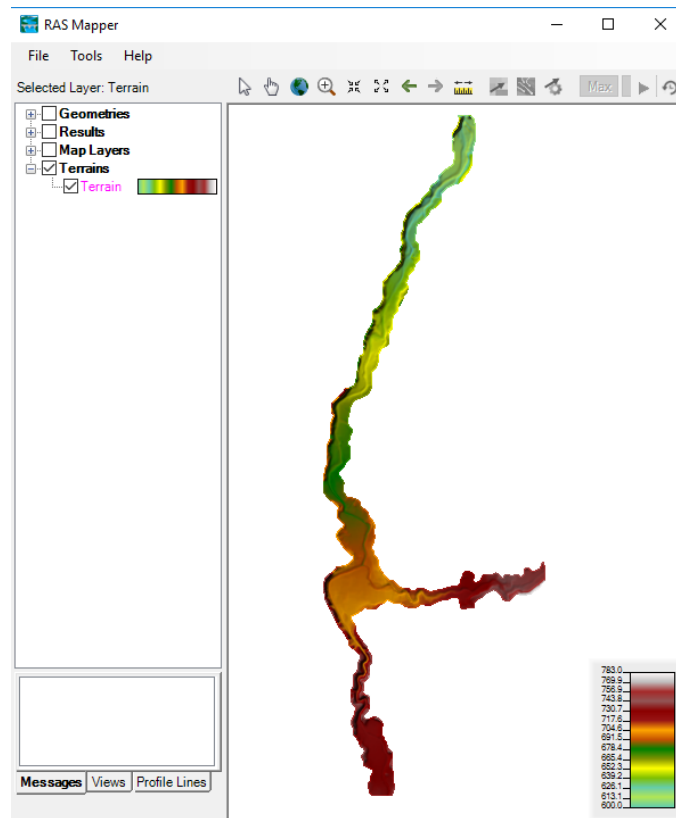


Figura 54. DEM cargado en RAS Mapper.

Apéndice J. Pasos para crear geometría

En el menu Edit damos clic en la opcion Geometry Data, la cual abrira una ventana donde se observara una imagen del DEM cargado.

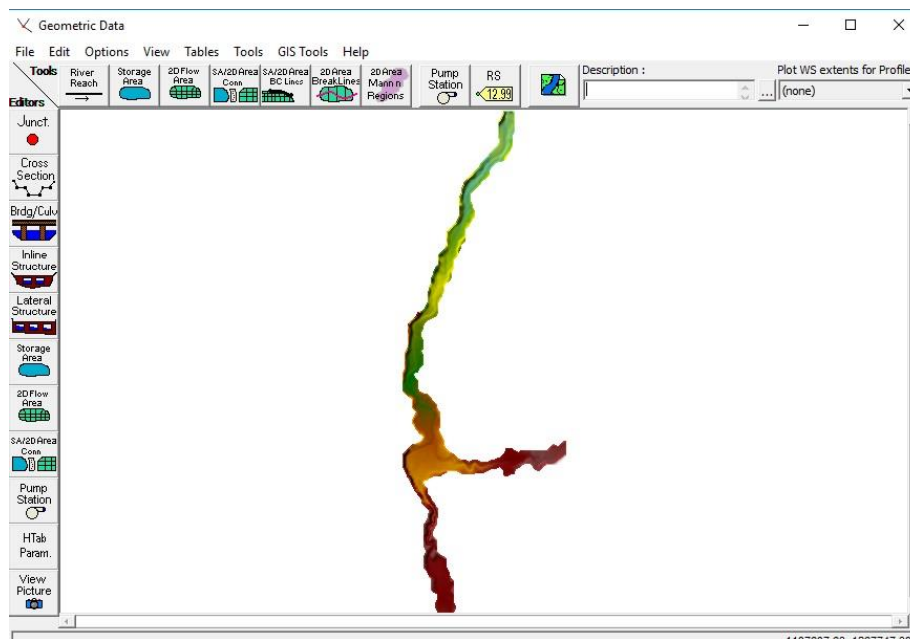


Figura 55. Imagen de DEM listo para la Geometría.

Con la barra de Herramientas podemos visualizar la pestaña 2D Flow Area, la cual nos permite dibujar el Area de estudio (en este caso 14 áreas diferentes) simplemente cliqueando el borde del modelo. (Brunner, HEC-RAS River Analysis System User Manual, 2016)

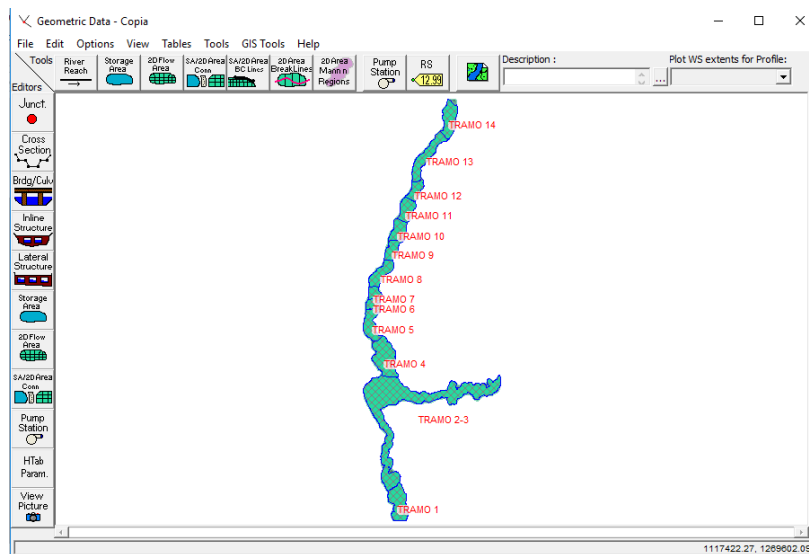


Figura 56. 2D Flow Área de todos los tramos.

Después de crear cada área de estudio con la pestaña SA/2D Area BC Lines agregamos las líneas de contorno aguas arriba y aguas abajo para cada tramo, estas líneas se dibujan en el borde del área dibujada perpendicular al flujo del agua.

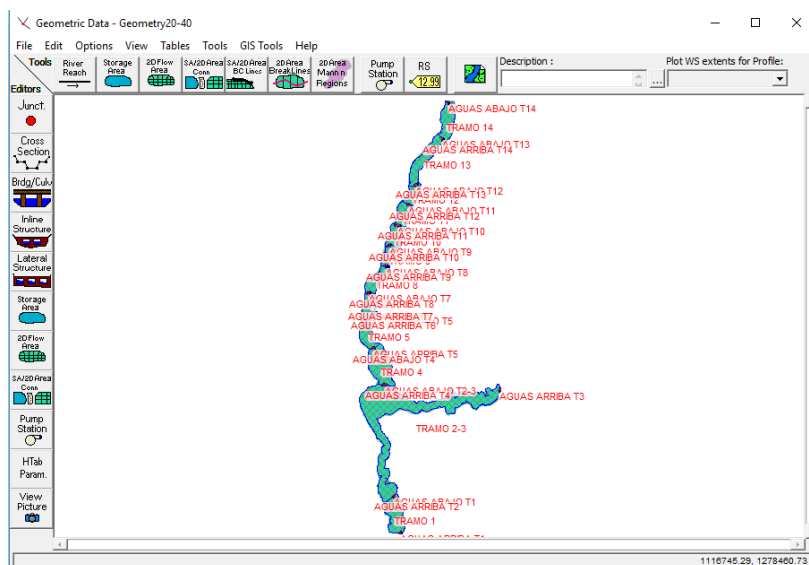


Figura 57. Geometría del terreno.

Apéndice K. Calculo de tamaño de celda para las mallas.

El software puede modelar con dos tipos de ecuaciones, onda difusa y saint venant. Se utilizó la ecuación onda difusa ya que otorgan una solución más rápida, debido a que requieren intervalos computacionales más grandes y tienen mayor estabilidad diferente a la ecuación saint venant que es utilizada solo si se presentan determinados casos de estudio que se exponen a continuación:

- Onda de inundación altamente dinámica: si se está modelando la rotura de una presa o inundaciones repentinas, la onda de inundación se alzará y caerá extremadamente rápido.
- Expansiones y contracciones abruptas
- Modelamiento de una bahía, estuario o Río que sea altamente influenciado por marea
- Análisis de ondas al abrir o cerrar repentinamente una compuerta.

Por lo mencionado anteriormente se modela utilizando la ecuación de onda difusa ecuación (1), Donde:

C: Numero de Courant. (1 y 5 máx.), utilizamos 1 ya que según (6) es el más óptimo.

V: velocidad de onda, la velocidad máxima se halló con el modelo unidimensional (realizado por el grupo CHIO entregado a Geomática), se calcularon las velocidades máximas en cada tramo como se muestra en la Figura 58.

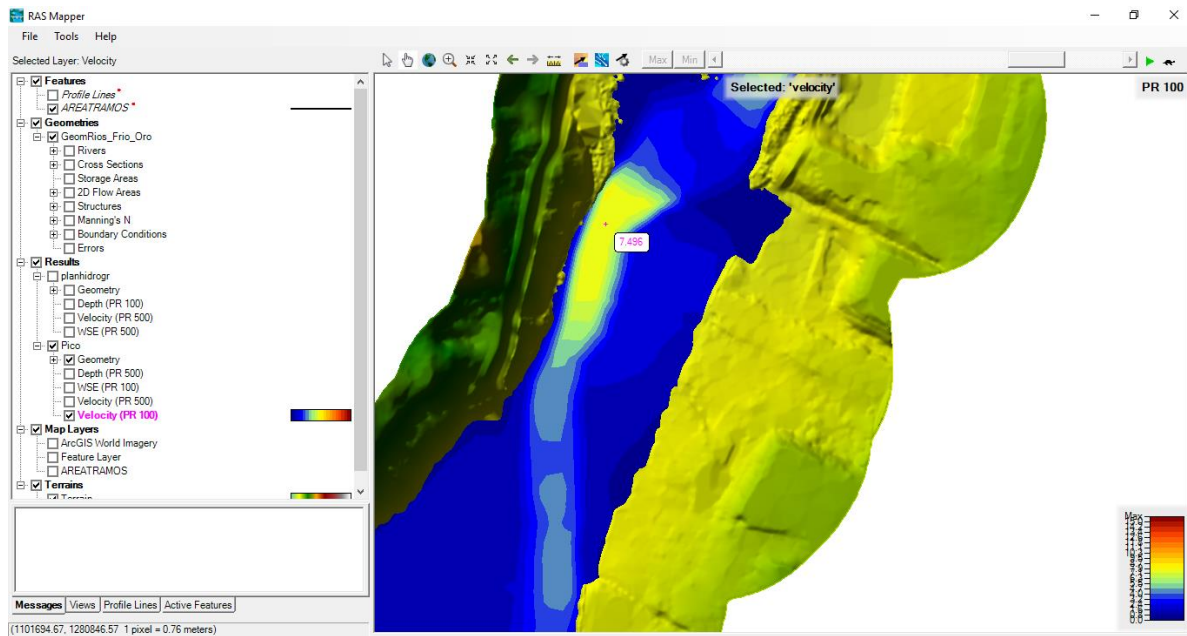


Figura 58. Punto de velocidad máxima modelo unidimensional.

Tabla 17.

Velocidad máxima para cada tramo.

Tramo	Velocidad máxima (m/s ²)
1	7.03
2	8.1
3	9.6
4	9.2
5	8.8
6	5.7
7	5.8
8	7.9
9	8.1
10	6.01
11	8.5
12	7.5

Tramo	Velocidad máxima (m/s ²)
13	8.6
14	8.01

Cada velocidad fue multiplicada por un factor como lo sugiere (Santos Clavero, 2014).

Forma de canal	Ratio V_w / V
rectangular de ancho	1.67
amplia parabólico	1.44
Triangular	1.33
Canal Natural	1.5

Figura 59. Factor de multiplicación para la velocidad. Nota. Tomado de: Manual Hec-ras.

Se tomó un tiempo de 1.5 que corresponde a un canal natural

El Raster de velocidad se anexa en archivos digitales.

Δt : Paso del tiempo computacional.

$$\Delta t \leq \frac{TCMP - TMIN}{20} \quad (3)$$

TCMP: tiempo en que ocurre el valor máximo del hidrograma.

TMIN: tiempo en que ocurre el valor mínimo del hidrograma.

Se calculó un tiempo para cada tramo como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 18.

Variables para hallar tiempo computacional.

TRAMO	TCMP(min)	TMIN(min)	$\Delta T(\text{min})$
1	285	81	10.2
2	273	15	12.9
3	183	12	8.55
4	264	12	12.6
5	270	3	13.35
6	270	6	13.2
7	273	6	13.35
8	273	6	13.35
9	282	6	13.8
10	285	6	13.95
11	285	3	14.1
12	288	3	14.25
13	294	3	14.55
14	306	3	15.15

Con estos valores se obtiene una malla con celdas grandes lo cual no permite que el modelo detalle más el terreno, tomamos el valor 2 segundos teniendo en cuenta que la ecuación (3) es más flexible en cuanto este intervalo cumpliendo con la regla general de la ecuación (1) (Brunner, “HEC-RAS USDA-ARS Bank Stability & Toe Erosion Model (BSTEM) Technical Reference & User Manual, 2015).

Con base en los valores obtenidos anteriormente se hallaron los tamaños de las celdas para cada tramo despejando de la ecuación (1) y cumpliendo que la ecuación sea igual o menor que dos (2) como se muestra en la siguiente tabla.

Donde:

$$\Delta x = \frac{V \cdot \Delta t}{c} \quad (4)$$

Tabla 19.

Variables para hallar dimensión de la celda para cada malla.

Tamo	Velocidad máxima (m/s ²)	Factor	Tiempo (s)	Malla (m)	Courant	Valor de Ecuación	≤ 2
1	7.03	1.5	2	21	1	1.0043	CUMPLE
2	8.1	1.5	2	24	1	1.0125	CUMPLE
3	9.6	1.5	2	29	1	0.9931	CUMPLE
4	9.2	1.5	2	28	1	0.9857	CUMPLE
5	8.8	1.5	2	26	1	1.0154	CUMPLE
6	5.7	1.5	2	17	1	1.0059	CUMPLE
7	5.8	1.5	2	17	1	1.0235	CUMPLE
8	7.9	1.5	2	24	1	0.9875	CUMPLE
9	8.1	1.5	2	24	1	1.0125	CUMPLE
10	6.01	1.5	2	18	1	1.0017	CUMPLE
11	8.5	1.5	2	26	1	0.9808	CUMPLE
12	7.5	1.5	2	23	1	0.9783	CUMPLE
13	8.6	1.5	2	26	1	0.9923	CUMPLE
14	8.01	1.5	2	24	1	1.0013	CUMPLE

Apéndice L. Pasos para agregar tamaños de celdas.

Damos clic en el área deseada para cambiar el tamaño de celda y escogemos la opción Edit 2D Flow Área.

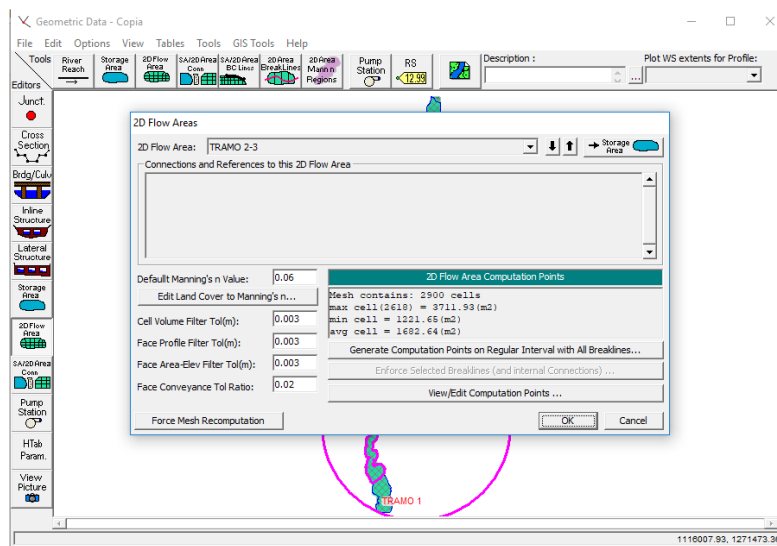


Figura 60. 2D Flow Area.

Seleccionamos la opción Generate Computation Points on Regular Interval All Breaklines la cual nos abre una ventana donde podemos cambiar el tamaño de celda.

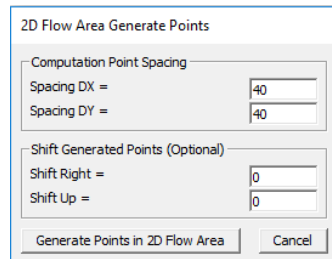


Figura 61. 2D Flow Area Generate Points..

El tamaño de la malla se debe escoger de acuerdo a dos factores, el primero consiste en asignar un valor que su tamaño y orientación describan la forma del terreno, debido a que estas controlaran el movimiento del agua; el segundo se basa en la pendiente del terreno, es decir, si se cuenta con un terreno donde la pendiente cambia suavemente, se podría usar tamaños de celdas grandes. Por el contrario, si las pendientes del terreno cambian bruscamente, se tendrá que usar celdas pequeñas que describan los cambios en la superficie del agua. (Castañeda Torres & and Rivera Rangel, 2017).

Apéndice M. Pasos para cargar Shapefile de coeficiente de Manning

Con la herramienta RAS Mapper en el menú Tools seleccionamos la opción new land cover la cual abrirá una ventana. En lista desplegable de Import Extents seleccionamos Entire Input File(s) y con la pestaña más seleccionamos el shapefile de coeficiente de Manning.

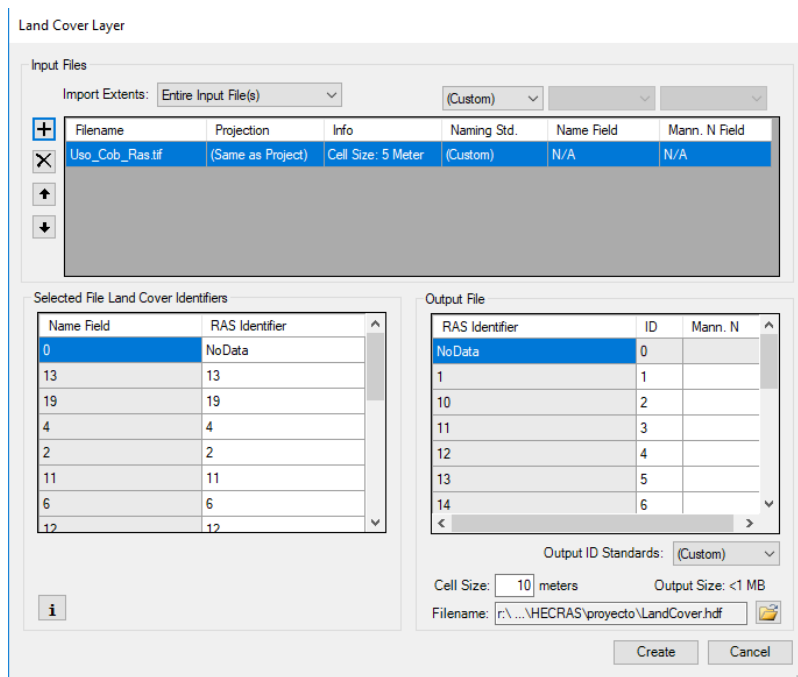


Figura 62. Land Cover Layer.