

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

PROYECTO

**GESTIÓN DE LAS PLANICIES INUNDABLES EN UN CONTEXTO
DE CAMBIO GLOBAL**

TEMA:

**ELABORACIÓN DE UN MODELO ESPACIALIZADO QUE
REPRESENTE LAS INTERACCIONES ENTRE RÍOS DE AGUAS
NATURALES, REDES DE RIEGO Y DRENAJE Y LOS ESTEROS.
PALESTINA-GUAYAS-ECUADOR.**

AUTOR:

BORIS HAMILTON APOLO MASACHE

Guayaquil - Ecuador

2022

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ANTECEDENTES	1
3	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
3.1	OBJETIVOS.....	4
3.2	Objetivo general.....	4
3.3	Objetivos específicos	4
4	HIPÓTESIS	4
5	ALCANCE	4
6	MARCO CONCEPTUAL.....	6
6.1	Modelo hidrodinámico	6
6.2	Periodos de retorno y determinación de caudales máximos.....	6
6.3	HEC-RAS.....	6
7	METODOLOGÍA.....	8
7.1	Fase I: Reconocimiento en campo de los sitios de interés.	8
8.1.	Fase II: Análisis de datos y procesamiento de la información.	8
8.2.	Fase III: Generación del modelo hidrodinámico.	20
7.1.1	Modelo Digital de Elevación (DEM).....	20
8.3.2.	Información topográfica	21
8.3.3.	Datos e información hidrometeorológica	22
8.3.4.	Uso del suelo.....	24
8.3.5.	Datos de estudios externos	24
8.3.6.	Herramienta.....	25
8.3.	Fase IV: Escenarios y opciones de manejo.	26
8	RESULTADOS	28
8.1	Datos hidrológicos.....	28
8.2	Procesamiento de datos orto-fotogramétricos.	29
8.3	Visitas de campo y recolección de datos batimétricos del río Macul y Pula.....	31
8.4	Ingreso de datos al programa computacional.....	33
8.5	Simulación base y calibración del modelo.....	35
8.6	Simulación de cinco escenarios.	37
8.7	Discusión	40
9	CONCLUSIONES.....	42
10	RECOMENDACIONES.....	43
11	REFERENCIAS.....	44
12	ANEXOS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio y los puntos de interés visitados.	3
Figura 2. Salida de campo por los ríos Macul y Pula del sitio de interés.	8
Figura 3. Nube de puntos y geo-referenciación en Agisoft a partir de puntos de control.	10
Figura 4. DEM final a escala de 1m de la zona de estudio para las simulaciones en Hec-Ras.	11
Figura 5. Geometría de los ríos de la zona de estudio.	12
Figura 6. Esquema del modelo hidrodinámico.	20
Figura 7. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del Río Daule (resolución espacial de 3m).	21
Figura 8. Mapa de ubicación de los ríos de interés y sobrevuelo con dron (Palestina - Vines). Adaptado de (IGM, 2013; SNI, 2014).	22
Figura 9. Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río Daule y los ríos de interés. Adaptado de (IGM, 2013; INAHMI, 2020; SNI, 2014).	23
Figura 10. Caudal histórico registrado en la estación meteorológica “Pula en Palizada”. Adaptado de (INAHMI, 2020).	23
Figura 11. Mapa del uso del suelo en la zona de estudio.	24
Figura 12. Zonas inundables en el area de estudio.	26
Figura 13. Caudal anual en la estación “Pula en Palizada”. Fuente: Información proveniente de los anuarios hidrológicos del INAMHI (2020).	28
Figura 14. Caudal histórico registrado en la estación meteorológica “Pula de Palizada”. Fuente: Información proveniente de los anuarios hidrológicos del INAMHI (2020).	29
Figura 15. Filtrado y clasificación del suelo por medio de Global Mapper.	30
Figura 16. Ajustes del TIN del río Pula y Macul (figura arriba y abajo respectivamente).	31
Figura 17. Salida de campo y recolección de datos de batimetría.	32
Figura 18. Geometría inicial de los ríos Macul y Pula en Hec-Ras.	33
Figura 19. Tabulación de datos para áreas de almacenamiento (Elevación-Volumen). ...	33
Figura 20. Ingreso de datos del “n” de Manning en las secciones transversales.	34
Figura 21. Hidrogramas para la modelación y condiciones para la simulación base.	35
Figura 22. Punto de referencia para caudal de retorno de 100 años.	36
Figura 23. Punto de referencia alcanzado para un caudal de retorno de 100 años de 205.2 m ³ /s.	36
Figura 24. Geometría final para el modelo hidrodinámico del área de estudio.	37
Figura 25. Representaciones gráficas del alcance máximo del nivel de agua en los cinco escenarios.	37
Figura 26. Sección inundable del río arriba del Macul.	38
Figura 27. Representaciones gráficas de las velocidades máximas alcanzadas en los escenarios simulados.	40
Figura 28. Geoposicionamiento de imágenes a partir de los puntos de control.	48
Figura 29. Generación de nube de puntos en todos los ríos.	48
Figura 30. Generación de malla para la obtención del ortomosaico.	49
Figura 31. Generación y extracción del ortomosaico en Agisoft.	49
Figura 32. Revisión y ajuste del mallado a lo largo los ríos.	50
Figura 33. Generación del nuevo TIN de toda la zona de estudio.	50
Figura 34. Pre-procesamiento de DEM de prueba en Hec-Ras.	51
Figura 35. DEM de un sobrevuelo a través de Global Mapper.	52
Figura 36. Análisis del DEM en la zona de estudio del proyecto.	52
Figura 37. Generación de shapefile del flow path, bank line y el eje de los ríos.	53
Figura 38. Ingreso de los shapefiles del flow path, bank line y el eje de los ríos a Hec-Ras.	53
Figura 39. Generación de los cross sections en Hec-Ras.	54
Figura 40. Generación de la tabla elevación-volumen del embalse en toda área de estudio del proyecto.	54

Figura 41. Ingreso de datos en las secciones transversales.....	55
Figura 42. Ingreso del embalse de toda el área de estudio del proyecto como un “storage area” para la modelación final.	55
Figura 43. Revisión y modificación de los nodos en las cross sections en Hec-Ras.	56
Figura 44. Hidrogramas para la modelación y condiciones para la simulación base.....	56
Figura 45. Presentación de los avances del proyecto en el primer taller presencial.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Macul.	16
Tabla 2. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Pula (Aguas abajo).....	18
Tabla 3. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Pula (Aguas arriba).	20
Tabla 4. Escenarios y parámetros establecidos para obtención de diversos resultados.	27
Tabla 5. Test de los métodos aplicados para el cálculo de caudales máximos en Pula Palizada.	28
Tabla 6. Caudales máximo y periodos de retorno en Pula Palizada.....	29
Tabla 7. Resumen de los escenarios simulados y criterios establecidos.....	38

1 INTRODUCCIÓN

Los efectos de las inundaciones han ocasionado diversas alteraciones en el ecosistema natural y en zonas patrimoniales alrededor del mundo, como es el caso de sitios protegidos de la UNESCO (56% de los sitios afectados) (Arrighi, 2021). Por lo general, la periodicidad de las inundaciones provoca problemas ambientales y socioeconómicos en la población (Dhote et al., 2018a), debido a eventos extremos como fuertes lluvias monzónicas (Pradhan & Youssef, 2011), el desbordamiento de los ríos en una determinada cuenca (Ali et al., 2022; Hromadka et al., 1988), por aumento del nivel del mar y hundimiento del suelo (Yin et al., 2019), entre otros.

Debido a los efectos y daños ocasionados por las inundaciones, la generación de modelos es esencial para analizar estos eventos y planificar una adecuada gestión en la prevención y mitigación de desastres (Dhote et al., 2018b; Zhang et al., 2021). En general, existen diversos métodos y modelos que permiten obtener estos objetivos, tales como i) los métodos empíricos (fácil implementación y compatibilidad con otros métodos), ii) los modelos hidrodinámicos (1D, 2D y 3D por medio de modelos matemáticos) y iii) los modelos conceptuales simplificados (bajo costo computacional) (Morante-Carballo et al., 2022; Teng et al., 2017).

Las inundaciones ocasionadas por los desbordamientos de los ríos es un tema de estudio que ha llevado a la generación de diversos modelos, los cuales se enfocan en comprender su hidrodinámica y analizar el riesgo a inundaciones en zonas bajas de las cuencas (Chen et al., 2014; Tanaka et al., 2017). Por lo que, para la generación del modelo hidrodinámico bidimensional, el uso del software HECRAS es un medio óptimo para llegar a completar el objetivo, permitiendo analizar las diferentes condiciones de flujo como resultado del desbordamiento de los ríos (Dasallas et al., 2019; Marimin et al., 2018; Syafri et al., 2020). Esta herramienta computacional permite generar simulaciones bajo diferentes perspectivas y enfoques (como hidrológico e hidrodinámico), para la evaluación del peligro y riesgo de inundaciones en zonas pobladas (Bezak et al., 2018; Farooq et al., 2019; Jamali et al., 2019; Zeleňáková et al., 2019).

Para la ejecución de este estudio, se considera imprescindible la recopilación de información existente y relevante, en especial, aquellos datos cercanos a la zona de interés. El estudio se enfoca en las interacciones de los ríos de aguas naturales (redes de drenaje y riego) y esteros, que se localizan en la subcuenca del río Daule, en el sector de Palestina, exactamente en la parte central de la provincia del Guayas, zona de grandes extensiones de terreno de cultivos de arroz y actividades ganaderas. Esta presenta un relieve topográfico muy bajo, lo que provoca que sean muy propensos a inundaciones, las cuales bloquean vías, destruyen los cultivos y el trabajo de quienes lo habitan.

2 ANTECEDENTES

Este trabajo está vinculado al Proyecto de Investigación “Desarrollar y gestionar las planicies inundables en un contexto de cambio global”, el cual se encuentra relacionado con el convenio específico de cooperación entre la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), la empresa pública de servicios (ESPOL-TECH E.P.) y Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières (AVSF).

AVSF es el ejecutor en Ecuador del proyecto COSTEA, el cual se centra en producir conocimientos con fines aplicados en la subcuenca del río Daule. La experiencia transmitida permitirá desarrollar proyectos hidroagrícolas de manera integrada y razonada en función de múltiples objetivos. Por lo cual, el presente caso de estudio se enfoca en eje temático 2 del presente convenio: Caracterización hidro(geo)lógica e hidráulica de las llanuras inundables.

Hoy en día, los datos o información relacionada a la hidrodinámica del río Daule es limitada, lo cual provoca dificultades al momento de poner en marcha a diferentes acciones, que pueden estar relacionadas a obras de captación o de derivación de aguas.

Además, se tiene presente que este tipo de información (en forma de registros hidrometeorológicos o en formato de archivo informático “shapefile”), está esparcida en un sinnúmero de instituciones y fuentes, quienes realizan diversos estudios con diferentes enfoques, lo cual beneficia al investigador al contar con una base de datos amplia y diversa, aunque con difícil acceso en cierto casos (CIPAT-ESPOL et al., 2014; Kazakis et al., 2016; Koutsouris & Lyon, 2018; Rivero Solórzano, 2014; Rushton, 2007; Sanz et al., 2011; van Vliet et al., 2017). No obstante, lo que se conoce sobre la misma es útil para la elaboración de un proyecto que busque evaluar la interacción hidrodinámica entre el río y sus riberas.

Los ríos que intervienen en el sector son el río Macul y el río Pula (Figura 1), los cuales se ven principalmente influenciados por las precipitaciones (locales y aguas arriba) y por las obras hidráulicas aguas arriba (Presa Daule-Peripa, Trasvase Daule-Vinces y Presa Baba), provocando el desbordamiento de los ríos e inundaciones en las llanuras aledañas a estas zonas. Durante la época invernal o de fuertes precipitaciones, el caudal del río Pula cambia considerablemente, desbordándose e inundando las zonas cercanas al cauce de este río. Este río se ve fuertemente influenciado por el río Macul, el cual aporta considerables volúmenes en temporada invernal. Esto es influenciado por la presencia de humedales río arriba.

Con la finalidad de obtener un resultado más acorde a la necesidad del proyecto y en las zonas de interés, se establece realizar el estudio a lo largo del cauce de dos ríos (río Pula y el río Macul), quienes se encuentran próximos al río Daule (Figura 1). Además, en base al recorrido realizado anteriormente junto a los miembros del AVSF (noviembre 2021), se concluyó que el mejor lugar para el estudio en la elaboración del modelo hidrodinámico es en el sector de Palestina, a largo del cauce del río Pula, aguas arriba y debajo de la confluencia con el río Macul (Figura 1, alrededor del punto P1).



Figura 1. Localización de la zona de estudio y los puntos de interés visitados.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se hace necesario la implementación de una simulación bidimensional debido a dos razones:

Primero, la comprensión actual del río Daule y afluentes en cuanto a hidrodinámica es muy limitado. Por lo que, la falta de conocimiento no permite a los tomadores de decisión tomar medidas sobre el uso de suelo, preparación de la población frente a las avenidas a través de un Sistema de Alerta Temprana y la planificación hídrica.

Segundo, la dinámica de inundaciones de estos ríos con respecto a sus planicies, esteros, afluentes y zonas potenciales de riego y drenaje de agricultura es muy activa, pese a que el río Daule y otros cursos de agua están parcialmente regulados hace algún tiempo (Presa Daule-Peripa, Trasvase Daule-Vinces y Presa Baba). Estas presas y trasvase intervienen directa e indirectamente en el caudal de los ríos que atraviesan la zona de estudio, por lo que, la falta de comprensión sobre la interacción entre los cursos de agua, es una desventaja para las actividades diarias de este sector.

3.1 OBJETIVOS

3.2 Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrodinámico espacial basado en los parámetros de datos hidrometeorológicos y espaciales entre los ríos Macul, Bobo, Pula y los humedales aledaños, para el establecimiento y conocimiento de áreas aptas como zonas de amortiguamiento, que servirán de captadores o almacenadores de agua en momentos de altas precipitaciones e inundaciones en la parte baja de la subcuenca, previniendo así pérdidas económicas del sector y de vidas humanas.

3.3 Objetivos específicos

- Analizar las interacciones entre ríos de aguas naturales, redes de riego y drenaje, la topografía y los esteros para la generación de un modelo hidrodinámico.
- Evaluar el impacto de diferentes escenarios de manejo en el cambio de uso del suelo, a través del modelo hidrodinámico que recopile información hidrometeorológica pertinente.

4 HIPÓTESIS

H1: El cambio de uso de suelo de los humedales influye sobre la dinámica de las inundaciones.

Ho: El cambio de uso de suelo de los humedales no influye sobre la dinámica de las inundaciones.

5 ALCANCE

El alcance del estudio consiste en la generación del modelo y la simulación de diversos escenarios correspondientes a situaciones de elevados caudales a lo largo del cauce, principalmente ocasionado por fuertes precipitaciones y la influencia de otros ríos, presas y trasvase, lo cual ocasiona inundaciones en las llanuras adyacentes.

Los ríos que intervienen en la zona de estudio son el río Macul y el río Pula (Figura 1), los cuales se ven principalmente influenciados por las precipitaciones (locales y regionales) y por las obras hidráulicas aguas arriba (Daule-Peripa, Daule-Vinces y Presa Baba), provocando el desbordamiento de los ríos e inundaciones en las llanuras aledañas a estas zonas.

Por lo tanto, la elaboración de un modelo hidrodinámico bidimensional permitirá simular las interacciones entre estos ríos y las planicies aledañas, logrando así, dar a conocer las dimensiones más adecuadas que deben tener los ríos para evitar las inundaciones (geometría del cauce en función al caudal de estos).

La generación de este modelo ofrecerá adicionalmente la posibilidad de estudiar las posibles zonas de amortiguamiento, logrando así disminuir el impacto de estos fenómenos naturales en zonas urbanas ubicadas en el sector y sectores río abajo, logrando un beneficio social y económico de la subcuenca influenciada por estos ríos.

Otro beneficio que ofrece esta modelación es su adaptabilidad a cualquier zona o subcuenca de interés, y bajo ciertos requisitos de datos indispensables que en este estudio se darán a conocer. Esta es una zona piloto que ofrecerá conocimiento oportuno en la hidrodinámica de sus ríos y de simulaciones, para conocer las diversas circunstancias de inundaciones a las que están sometidos los pobladores de este sector.

A través de este modelo, el proceso de toma de decisión de los administradores de la subcuenca y de los diferentes actores involucrados, podrá ser mejorado considerando diferentes opciones de manejo. De esta manera, se pueden constatar los beneficios a través de las mejoras del uso del suelo, anticipo de avenidas y la óptima planificación hídrica. Por tanto, se promueve ventajas claves a ser alcanzadas con el apoyo de una adecuada modelación hidrodinámica.

6 MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se da a conocer los datos que se tienen referente al estudio, además de la información que se necesitan analizar o generar para su respectivo análisis.

6.1 Modelo hidrodinámico

Las simulaciones hidrodinámicas, enfocadas en inundaciones, permiten modelar diversos escenarios en los que, basados en el intercambio de caudales entre ríos y llanuras, se puede calcular y determinar el desbordamiento de los nodos de los ríos hacia las mallas superficiales de las llanuras aluviales (Dutta et al., 2007; Nandalal, 2009; Timbadiya et al., 2015).

Estos modelos pueden proveer de gran información y enfoque en diversas acciones para el sector de estudio, principalmente en su aplicación para el diseño de medidas estructurales (Abdella & Mekuanent, 2021), el mapeo de peligros de inundaciones (Trinh & Molkenthin, 2021), diligencia en la toma de decisiones (Liu et al., 2015), como guía para la construcción de infraestructuras (Li et al., 2014), mapeo de susceptibilidad máxima (Pradhan & Youssef, 2011) y, en general, para simulación de rupturas de presas y medidas preventivas de inundaciones fluviales (Salunkhe et al., 2018; Ullah et al., 2016).

6.2 Periodos de retorno y determinación de caudales máximos

El periodo de retorno es una medida adoptada para la estimación y gestión de inundaciones, en la cual se considera la probabilidad de excedencia (periodo de retorno), representándola en una curva de probabilidad de excedencia-pérdida (curva de riesgo) y estimar el riesgo como la área bajo la curva en un determinado tiempo (M. I. Brunner et al., 2016; Ward et al., 2011).

La consideración de estos periodos de retorno son parte esencial para la simulación de inundaciones (Abdullah et al., 2018; De Luca & Biondi, 2017), lo cual puede ser determinado a través de diferentes métodos de distribución de probabilidades como Gumbel, Log-normal, Pearson III, LbPearson III y GEV (Burian et al., 2020; Osei et al., 2021; Sharma et al., 2021). Estos permiten estimar crecidas o caudales máximos de manera anual, 2 años, 5 años, 10 años, 25 años, 50 años y hasta los 1000 años.

6.3 HEC-RAS

El desarrollo de un modelamiento hidrodinámico requiere de herramientas que permitan realizar simulaciones de manera libre y flexible. Hec-Ras (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) es un software de acceso libre desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). El programa es flexible al momento de realizar diversos enfoques de modelamiento (hidrológico e hidrodinámico) en los cauces fluviales (Abdella & Mekuanent, 2021; G. W. Brunner, 2010).

A través de este software se puede ingresar datos relacionados a:

- Geometría del río de estudio.
- Información de las llanuras aluviales aledañas.
- Secciones transversales y separación de estas.

- Parámetros iniciales de modelamiento (periodos de retorno, hidrogramas, pendiente, etc.)
- Caudales de ingreso al cauce.
- Entre otros, dependiendo del enfoque de estudio.

Y con ello, se logra obtener diversos resultados como:

- Diagramas (niveles de agua, velocidad del agua, etc.).
- Propiedades hidráulicas (energía, velocidad del agua, etc.)
- Elevación de la superficie del agua.
- Zonas inundadas
- Entre otros resultados, dependiendo de los objetivos de estudio.

7 METODOLOGÍA

La metodología aplicada se realizó por fases, como se presenta a continuación:

7.1 Fase I: Reconocimiento en campo de los sitios de interés.

Durante esta fase se llevó a cabo salidas de campo a los posibles puntos de interés, con el fin de observar y reconocer máximo tres secciones del río (de aproximadamente 6 km cada uno). El recorrido implicó el reconocimiento de las zonas más propensas a inundarse, el uso y tipo de suelo, su disponibilidad a ser inundable, entre otros.

Previo a las salidas de campo y sobrevuelos con dron a lo largo del cauce de los ríos de interés, se determinó los lugares ideales para ejecutar los sobrevuelos. Se utilizó diferentes equipos como el dron por parte del CADS, GPS diferencial por parte de CIPAT y uso de polvo tiza para marcar los puntos de control o calibración para el procesamiento de imágenes (Figura 2).



Figura 2. Salida de campo por los ríos Macul y Pula del sitio de interés.

8.1. Fase II: Análisis de datos y procesamiento de la información.

El presente trabajo se enfocó en dos tipos de información:

- Información primaria. - Hace referencia a los datos in situ, como por ejemplo los datos batimétricos y fotogrametría por medio de dron. Estos datos son útiles para el procesamiento de datos en el área de la teledetección y generación de la geometría del cauce de los ríos.
- Información secundaria. - Se realizó a través de una revisión bibliográfica y de fuentes externas para la recopilación de datos, como los siguientes:
 - Topografía - Modelo Digital de Elevación (DEM, resolución 3 m).
 - Datos meteorológicos e hidrológicos (Precipitaciones – Caudales, INAMHI).
 - Uso del suelo - Zonas de anegamiento.
 - Tipo de suelo – información geoespacial (NASA)

Para la sección de muestreo, se ejecutó una campaña de recolección de datos de forma directa, principalmente en:

- Ortofotos. - Hace referencia al muestreo remoto obtenido por medio de un dron. Se efectuaron sobrevuelos a lo largo de los ríos (Figura 3), donde el número de vuelos dependió de las dimensiones de ríos y llanuras, logrando así obtener información útil para la construcción del DEM a través del uso de software y minería de datos.

Lo generado en las dos fases proporcionó información sólida para empezar la construcción del modelo, entre cuyas actividades está la generación de las condiciones de borde. Las imágenes obtenidas por medio del dron fueron ingresadas en el software Agisoft Metashape.

A través de ello, se obtuvo una nube de puntos a partir de todas las imágenes georreferenciadas con los puntos de control establecidos en campo (Figura 3). Posterior a esto, se generó un TIN (red irregular de triángulos) en ArcMap, para corregir la interpolación espacial. De esta manera, fue posible obtener un modelo de elevación digital (DEM).

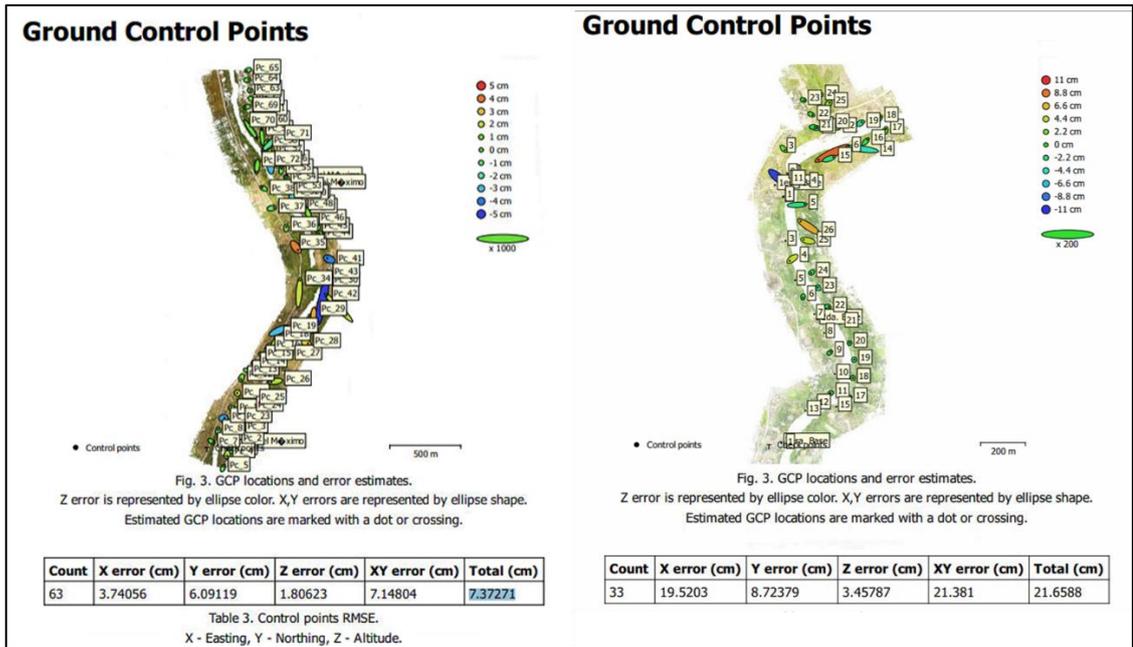


Figura 3. Nube de puntos y geo-referenciación en Agisoft a partir de puntos de control.

Los DEM procesados a partir de los sobrevuelos realizados con el dron generaron información a escala centimétrica del cauce de los ríos Macul y Pula. Sin embargo, para efectos de complementar la topografía en sus contornos (precisamente para el caso de inundaciones durante eventos extremos), se utilizó un DEM proveniente del programa SIGAGRO (del MAG) a escala 3x3 m (Figura 4, DEM final a escala de 1m). Ambos DEM (proveniente de ortofotos, y de SIGAGRO) fueron unificados mediante un mosaico.

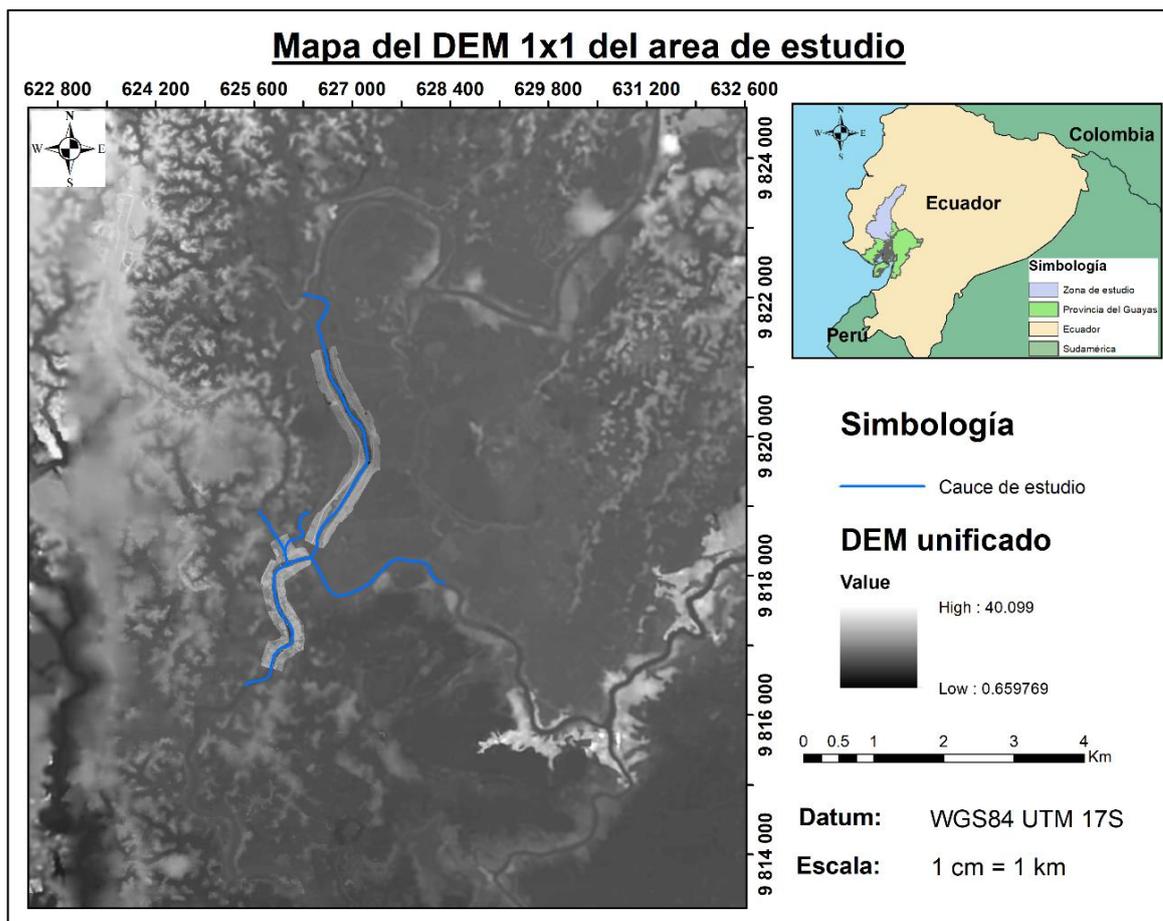


Figura 4. DEM final a escala de 1m de la zona de estudio para las simulaciones en Hec-Ras.

Previo al uso de Hec-Ras y simulación de inundaciones, se generó la geometría en todo el trayecto de los ríos Macul y Pula, mediante el eje, líneas de banco (banklines) y líneas de extremo (flowpaths). Estos fueron indispensables para la posterior elaboración de las secciones transversales, delimitación de zonas de inundación y áreas de almacenamiento o storage área (de varios existentes) que aporta al cauce del río con agua almacenada durante las épocas de lluvia (Figura 5).

Además, con las visitas en campo, se logró determinar el “n” de Manning para cada una de las secciones en todo el cauce de estudio, lo cual se asignó en base a la guía establecida por Arcement & Schneider (1989). Estas secciones fueron asignadas a lo largo del río Macul y Pula (aguas arriba y aguas abajo) (Tabla 1 y 2, respectivamente). De acuerdo con las siguientes condiciones:

- Irregularidades en la superficie
- Cambios de ancho (no aplicable para las llanuras, solo para los cauces)
- Obstrucciones
- Presencia de vegetación
- Meandros (no aplicable para las llanuras, solo para los cauces)

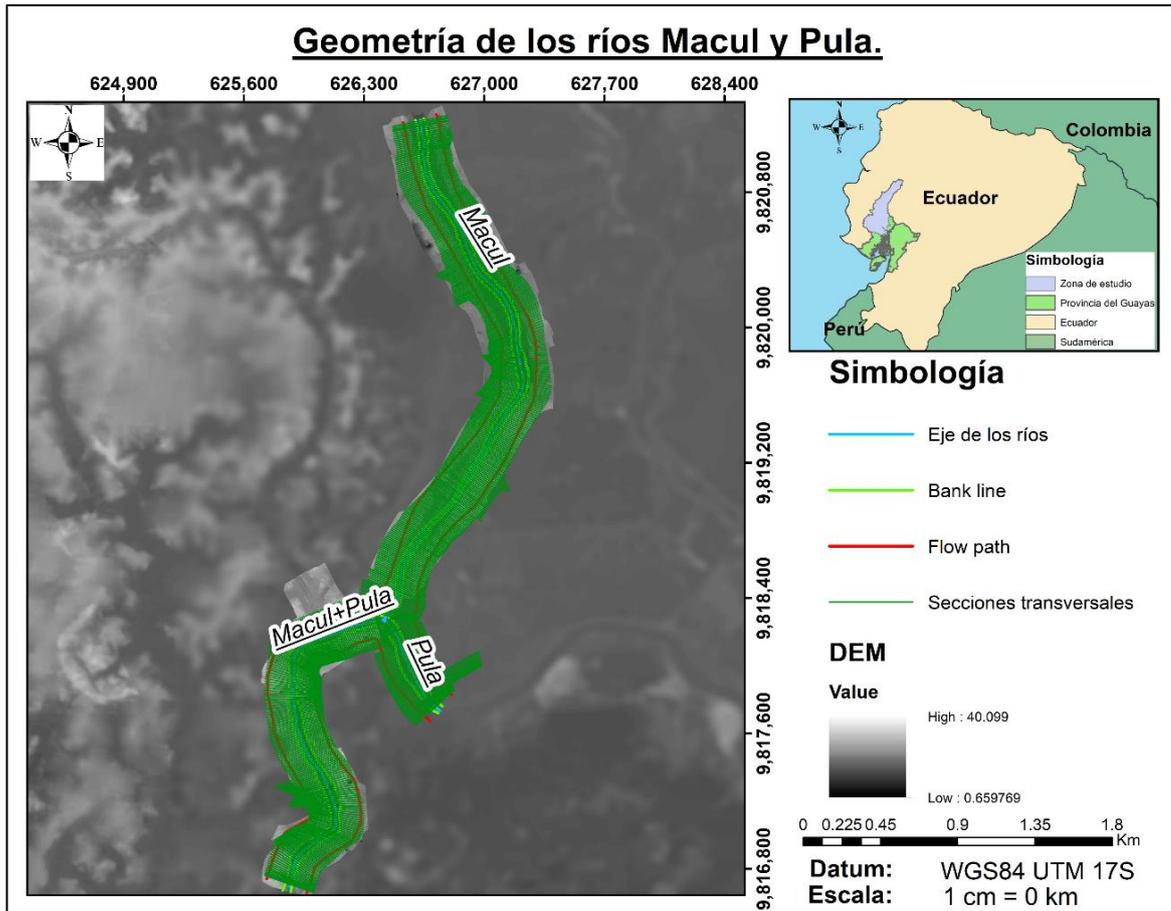


Figura 5. Geometría de los ríos de la zona de estudio.

Tabla 1. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Macul.

Río Macul									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularidad supr	cambios sección	obstrucción	vegetación	meandros	n corr
			Suelo firme / Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3345 - 0+3135	Llanura izq	0.028	0.004	0.000	0.025	0.043	1.00	0.100
		Canal	0.031	0.007	0.005	0.001	0.010	1.00	0.054
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.092
			Arena / Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3135 - 3075	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.024	0.038	1.00	0.093
		Canal	0.031	0.008	0.005	0.001	0.010	1.00	0.055
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.022	0.035	1.00	0.088
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Muy Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3075 - 0+2485	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.027	0.050	1.00	0.110
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.002	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderado / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2485 - 0+2275	Llanura izq	0.027	0.006	0.000	0.028	0.040	1.00	0.101
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.027	0.040	1.00	0.098
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Menor	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2275 - 0+1965	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.027	0.046	1.00	0.106
		Canal	0.031	0.008	0.009	0.004	0.010	1.00	0.062

Río Macul									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularidad supr	cambios sección	obstrucción	vegetación	meandros	n corr
			Suelo firme / Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
		Llanura der	0.026	0.007	0.000	0.017	0.040	1.00	0.090
			Arena/ Arena gruesa / Suelo firme	Moderado / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Menor / Despreciable / Apreciable	Muy Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1965 - 0+1565	Llanura izq	0.026	0.007	0.000	0.015	0.055	1.00	0.103
		Canal	0.031	0.009	0.009	0.004	0.010	1.00	0.063
		Llanura der	0.028	0.005	0.000	0.028	0.049	1.00	0.110
			Suelo firme/ Arena gruesa / Suelo firme	Moderado / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1565 - 0+1385	Llanura izq	0.028	0.007	0.000	0.028	0.050	1.00	0.113
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.003	0.010	1.00	0.060
		Llanura der	0.028	0.005	0.000	0.026	0.048	1.00	0.107
			Arena/ Arena gruesa / Suelo firme	Moderado / Moderado / Moderado	Gradual	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Muy Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1385 - 0+1185	Llanura izq	0.026	0.008	0.000	0.024	0.055	1.00	0.113
		Canal	0.031	0.006	0.000	0.001	0.010	1.00	0.048
		Llanura der	0.028	0.007	0.000	0.023	0.045	1.00	0.103
			Arena/ Arena gruesa / Arena	Moderado / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1185 - 0+5	Llanura izq	0.026	0.010	0.000	0.027	0.045	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.010	0.013	0.004	0.010	1.00	0.068
		Llanura der	0.026	0.010	0.000	0.025	0.040	1.00	0.101

Tabla 2. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Pula (Aguas abajo).

Río Pula (Aguas abajo)									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularidad supr	cambios sección	obstrucción	vegetación	meandros	n corr
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2190 - 0+1970	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.025	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.004	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1970 - 1630	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.027	0.038	1.00	0.096
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.010	0.000	0.026	0.048	1.00	0.110
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Muy Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1630 - 0+1330	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.008	0.000	0.028	0.036	1.00	0.098
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderado / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1330 - 0+1110	Llanura izq	0.027	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.002	0.010	1.00	0.057
		Llanura der	0.026	0.007	0.000	0.024	0.030	1.00	0.087

Río Pula (Aguas abajo)									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularidad supr	cambios sección	obstrucción	vegetación	meandros	n corr
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Menor	Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1110 - 0+900	Llanura izq	0.028	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.094
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.019	0.039	1.00	0.090
			Arena/ Arena gruesa / Suelo firme	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Menor / Despreciable / Apreciable	Muy Largo / Pequeño / Largo	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+900 - 0+440	Llanura izq	0.026	0.005	0.000	0.026	0.051	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.009	0.010	0.004	0.010	1.00	0.064
		Llanura der	0.028	0.010	0.000	0.026	0.040	1.00	0.104
			Suelo firme/ Arena gruesa / Suelo firme	Moderado / Moderado / Menor	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+440 - 0+10	Llanura izq	0.028	0.007	0.000	0.025	0.048	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.008	0.010	0.003	0.010	1.00	0.062
		Llanura der	0.028	0.008	0.000	0.025	0.048	1.00	0.109

Tabla 3. Parámetro y asignación de coeficientes de rugosidad (n de Manning) en el río Pula (Aguas arriba).

Río Pula (Aguas arriba)									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularidad supr	cambios sección	obstrucción	vegetación	meandros	n corr
			Suelo firme/ Arena gruesa / Arena	Menor / Moderado / Moderado	Alternando ocasionalmente	Apreciable / Despreciable / Apreciable	Largo / Pequeño / Medio	Menor	[s/m ^{1/3}]
1	0+592 - 0+80	Llanura izq	0.028	0.007	0.000	0.028	0.050	1.00	0.113
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.003	0.010	1.00	0.060
		Llanura der	0.028	0.005	0.000	0.026	0.048	1.00	0.107

8.2. Fase III: Generación del modelo hidrodinámico.

En esta etapa se procedió a la elaboración del modelo hidrodinámico (Figura 6) a través del software HECRAS y de los datos e información recopilada durante las fases anteriores, permitiendo simular el medio actual (línea base) lo más cercano a la realidad posible.

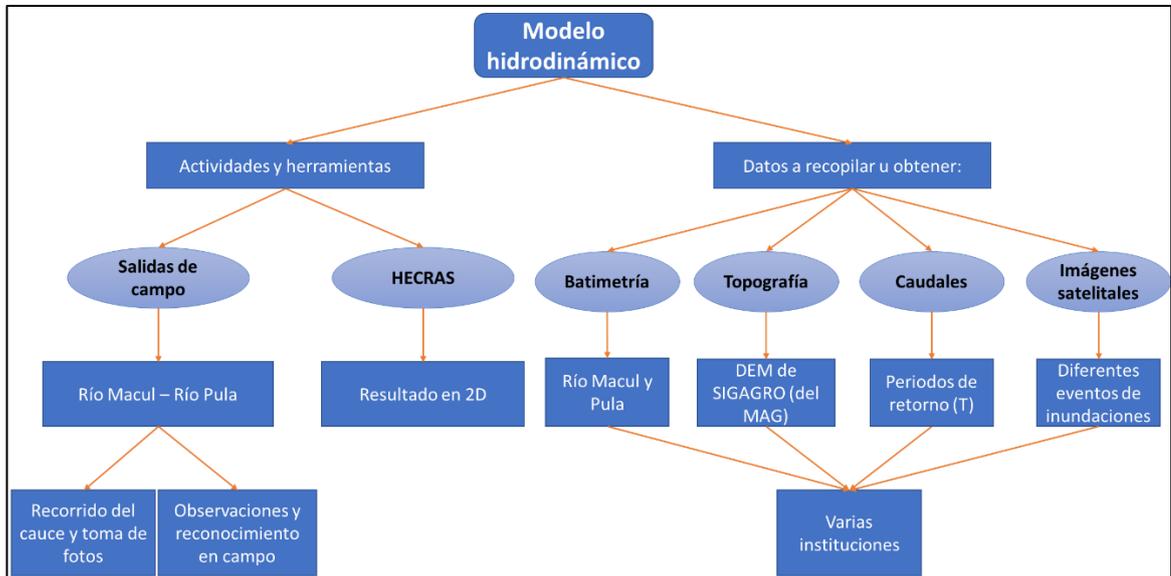


Figura 6. Esquema del modelo hidrodinámico.

Entre los datos recopilados u obtenidos por medio de este estudio, están:

7.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Para la elaboración del modelo espacializado se necesitó del DEM proveniente del programa SIGAGRO (del MAG) con 3 metros de resolución espacial, es de gran utilidad para el desarrollo de las simulaciones (Figura 7).

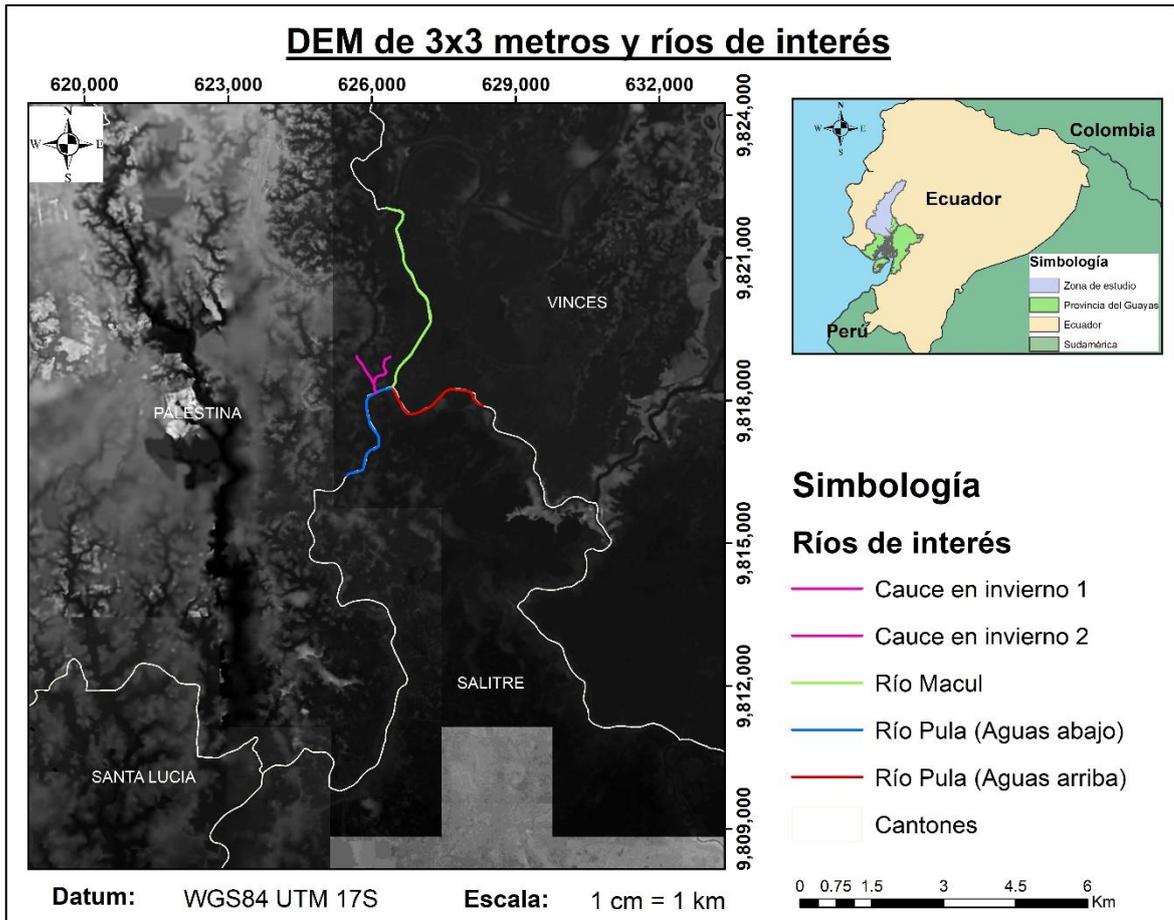


Figura 7. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del Río Daule (resolución espacial de 3m).

8.3.2. Información topográfica

A partir del DEM de SIGAGRO se generó curvas de nivel con una resolución de 3 metros. Sin embargo, su resolución espacial no permitió un análisis adecuado para este tipo de trabajo de gran precisión en la geometría del cauce. Por lo que, se propuso la alternativa de realizar sobrevuelos con dron a lo largo de los ríos de interés, con el fin de obtener una mejor topografía de los bordes o flancos del cauce (Figura 8).

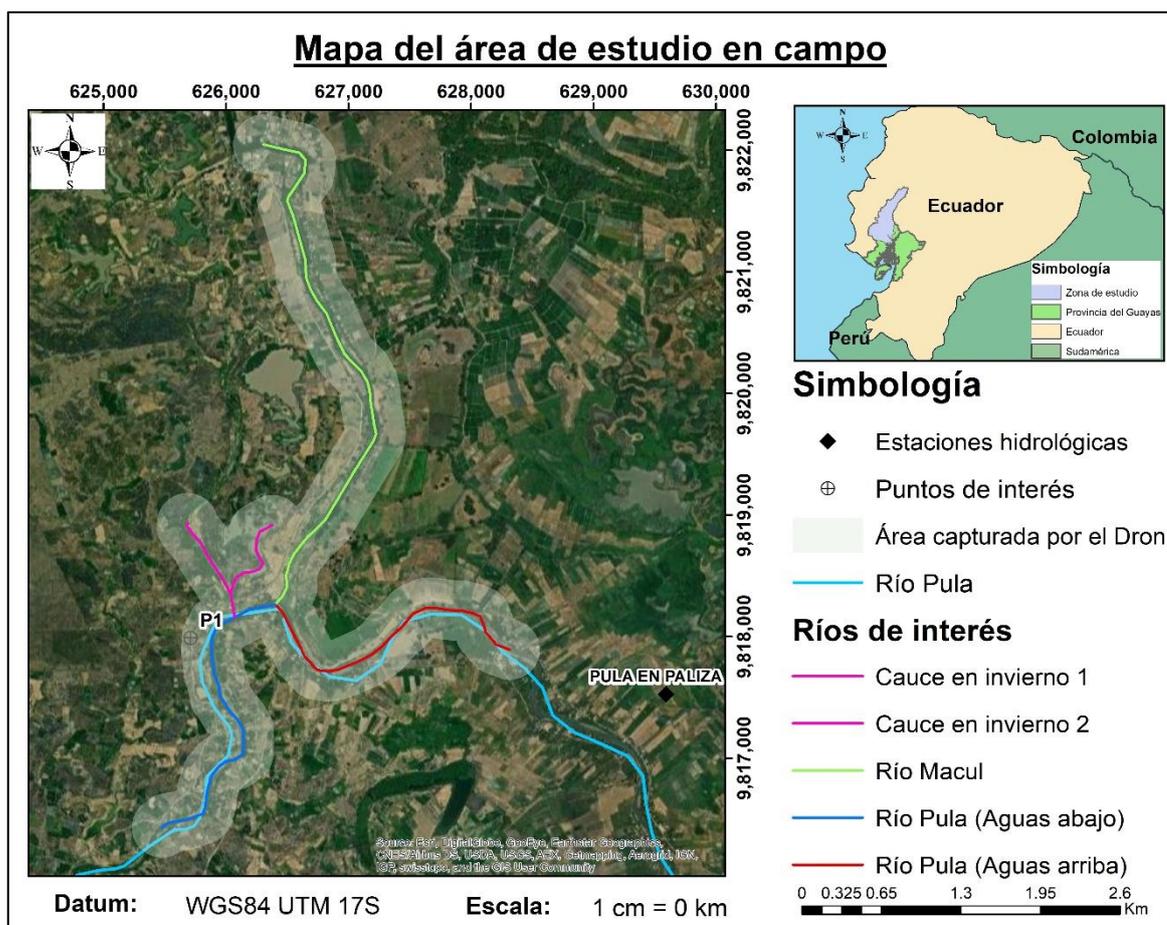


Figura 8. Mapa de ubicación de los ríos de interés y sobrevuelo con dron (Palestina - Vinces). Adaptado de IGM (2013) y SNI (2014).

8.3.3. Datos e información hidrometeorológica

Los datos obtenidos pertenecieron a las estaciones meteorológicas del INAMHI y otras instituciones, cuya información cedida es referente a valores de precipitaciones, caudales, aforo, curvas de descarga, entre otros.

Esta información procedió de las estaciones hidrológicas cercanas a los sitios visitados inicialmente junto a los miembros del proyecto (P1, P2 y P3, ver figura 9, siendo el P1 donde se centra el estudio). A lo largo del río Pula y Macul se pudo observar dos estaciones meteorológicas (Figura 9, Pula en Palizada y Pula en Yurima), a través de la cual, se extrajo información de las precipitaciones a partir de los anuarios hidrológicos provenientes del INAMHI.

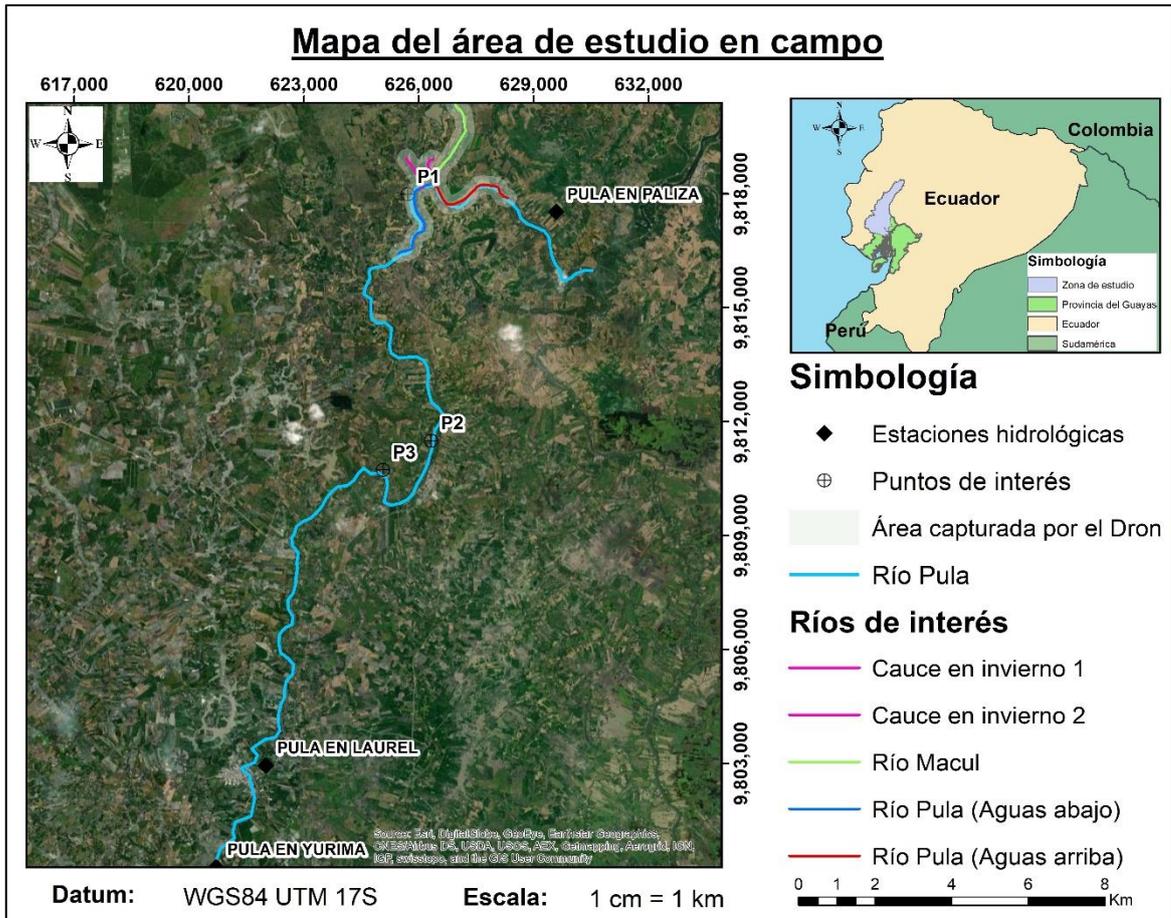


Figura 9. Estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río Daule y los ríos de interés. Adaptado de IGM (2013), INAMHI (2020) y SIN (2014).

La estación hidrológica ubicada al sur de nuestra zona de estudio (Pula en Yurima) tiene datos limitados correspondientes a los años 2002, 2003, 2006 y 2008. En cambio, en la estación situada al este de este sector, tiene un registro histórico de caudal de descarga desde 1975 al 2006, el cual ha presentado un continuo descenso hasta el 2006, donde acaba el registro en dicha estación. Esto se presentó en el siguiente gráfico (Figura 10):

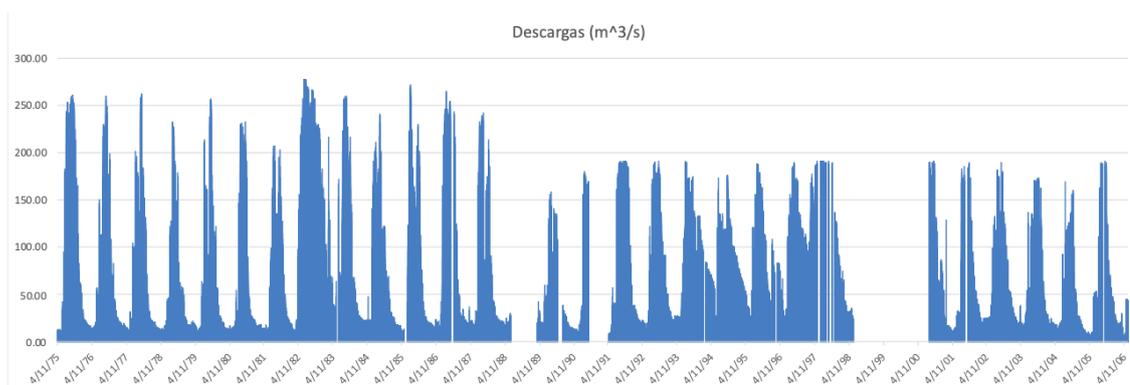


Figura 10. Caudal histórico registrado en la estación meteorológica “Pula en Palizada”. Adaptado de (INAHMI, 2020).

8.3.4. Uso del suelo

Conocer el uso del suelo implementado en la zona de estudio permitió mejorar la comprensión del área de estudio y mejorar la simulación hidrodinámica (Figura 11). Además, las condiciones hídricas, productivas y comerciales del sector han ocasionado que los pobladores o campesinos cambien su modo de vida, modificando los cultivos en zonas o sectores, tales como los humedales del lugar.

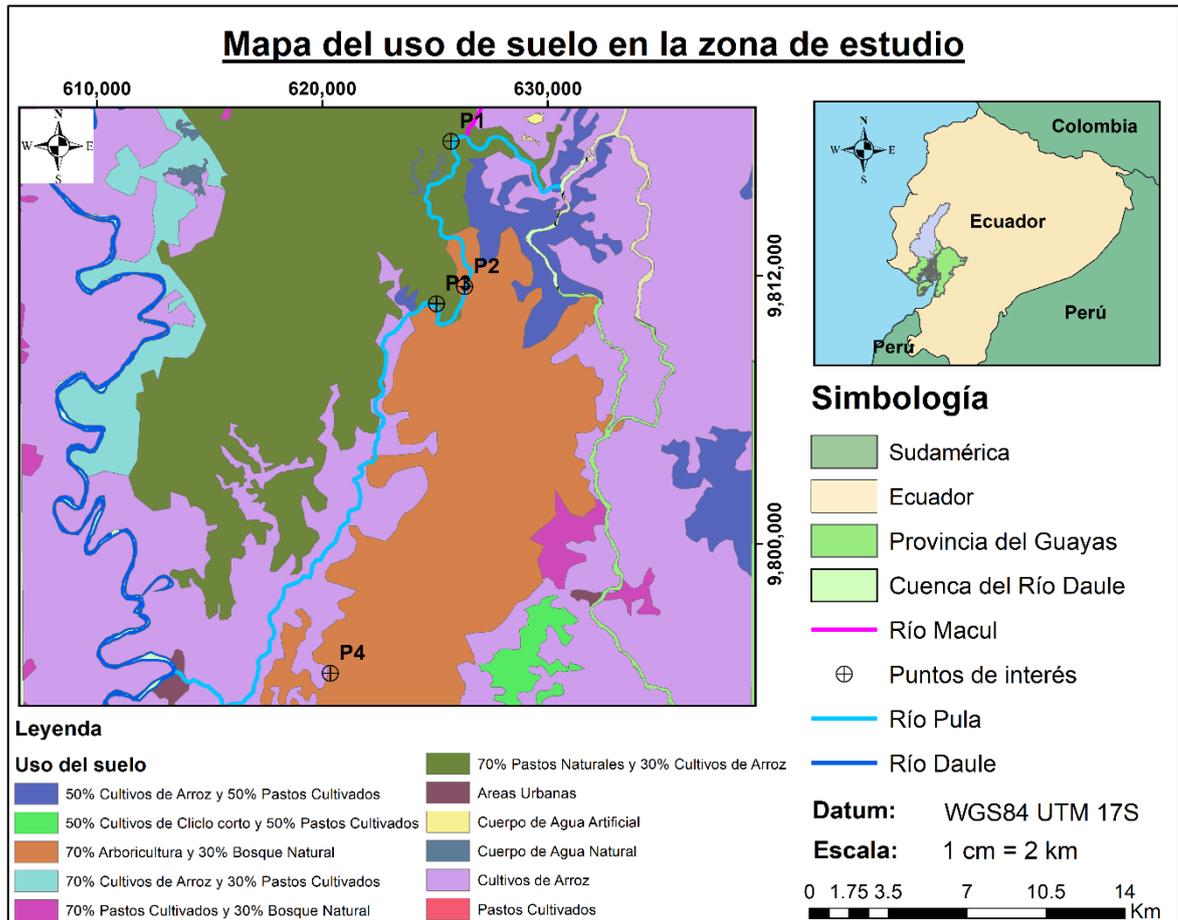


Figura 11. Mapa del uso del suelo en la zona de estudio.

8.3.5. Datos de estudios externos

A lo extenso de la subcuenca se han llevado a cabo diversos estudios, quienes brindan información dispersa, como: archivos informáticos tipo shapefile, registro de caudales y datos relevantes relacionados con la hidrología. Entre estos se pueden enlistar:

- Cuencas hidrográficas en formato shapefile (IGM, 2013; SENAGUA, 2012; SNI, 2014).
- Actualización del estudio hidrológico complejo multipropósito Jaime Roldós Aguilera, Daule-Peripa (Ministerio de Electricidad y energía Renovable, CELEC EP).
- Plan de conservación Daule (EMAGAP EP, UCSG, Gobierno Autónomo Municipal de la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil).

- Estudio Preliminar de Erosión para la Priorización de una Microcuenca de la Subcuenca Daule (INTERAGUA, Livelihoods Funds, ONG Central Ecuatoriana de Servicios Agrícolas CESA y su aliado Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières AVSF).
- Anuarios hidrológicos y meteorológicos del INMAHI.

8.3.6. Herramienta

Las actividades de campo emprendidas en este estudio permitieron obtener información óptima del lugar. Además, la información mencionada en las fases anteriores como la geometría del cauce de estudio, fue ingresada al software Hec-Ras en formato vector (shapefile).

Para el caso de las zonas de acumulación de volúmenes (almacenamiento), se ingresó los datos tabulados del elevación-volumen obtenidos a través de ArcMap. A partir de las secciones transversales ingresadas en el software, se procedió a verificar la conexión de puntos en todo el eje de estudio e ingresar los coeficientes de rugosidad antes determinados para cada sección.

Con el fin de generar las solicitaciones de carga hidráulica, se generó un hidrograma sintético, cuyo valor máximo fue el asociado al periodo de retorno de diseño (100 años). Este hidrograma fue ingresado como condición de borde aguas arriba. Aguas abajo, se empleó la pendiente de fondo (Normal Depth).

Además, se incluyó zonas de amortiguamiento (storage áreas) en las márgenes, basados en lo reportado por imágenes satelitales provenientes de la plataforma Google Earth Engine (2019). Allí se resaltan las zonas de inundación en este sector (Figura 12). Estas áreas de almacenamiento se conectaron con las secciones transversales y entre ellas, garantizando conectividad durante los eventos extremos de inundación.

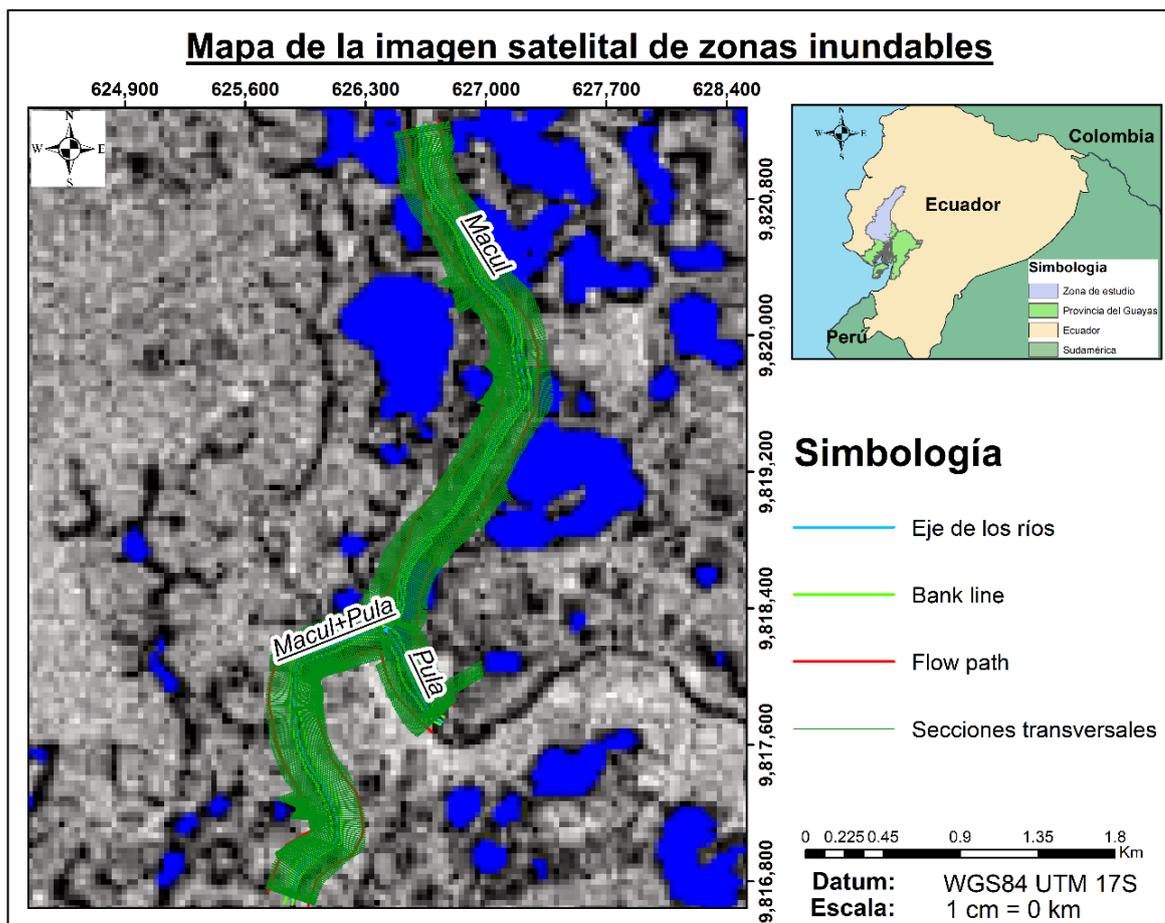


Figura 12. Zonas inundables en el area de estudio.

8.3. Fase IV: Escenarios y opciones de manejo.

En esta fase se evaluó los resultados del escenario base, de los diversos escenarios y el desempeño de diversas acciones de manejo propuestas.

Por lo que se propuso la generación de cinco escenarios (Tabla 4) enfocados en: i) simulación con la geometría base y datos iniciales usados para la calibración (incluido toda la geometría final) para un periodo de retorno de $T = 2$ años; ii) simulación con los mismos datos iniciales e incluidas las áreas de almacenamiento en la geometría final para $T = 100$ años; iii) mismos parámetros que el escenario anterior, pero extrayendo o restringiendo el funcionamiento natural de las áreas de almacenamiento; iv) simulación con caudales con periodo de retorno de $T = 200$ años, pero con las áreas de almacenamiento y parámetros inicialmente establecidos; y v) misma simulación con caudales con periodo de retorno de $T = 200$ años, pero sin las áreas de almacenamiento.

Tabla 4. Escenarios y parámetros establecidos para obtención de diversos resultados.

Escenarios	Caudales	Áreas de almacenamiento	Resultados a obtener		
			Áreas inundadas	Nivel max. del agua	Velocidad max. del agua
Escenario #1	2 años	✓	✓	✓	✓
Escenario #2	100 años	✓	✓	✓	✓
Escenario #3	100 años	X	✓	✓	✓
Escenario #4	200 años	✓	✓	✓	✓
Escenario #5	200 años	X	✓	✓	✓

8 RESULTADOS

8.1 Datos hidrológicos.

Los datos obtenidos pertenecen a las estaciones hidrológicas del INAMHI, cuya información cedida hace referencia a los valores de caudales. Esta información es procedente de las estaciones hidrológicas de “Pula en Palizada” y “Pula en Yurima” (Figura 9).

➤ Pula en Palizada.

Estos datos han sido recopilados de forma diaria por medio de la estación hidrológica mencionada, sin embargo, previo al análisis de caudales máximos, se llevó a cabo el cálculo del caudal anual, como se presenta en la figura 13.

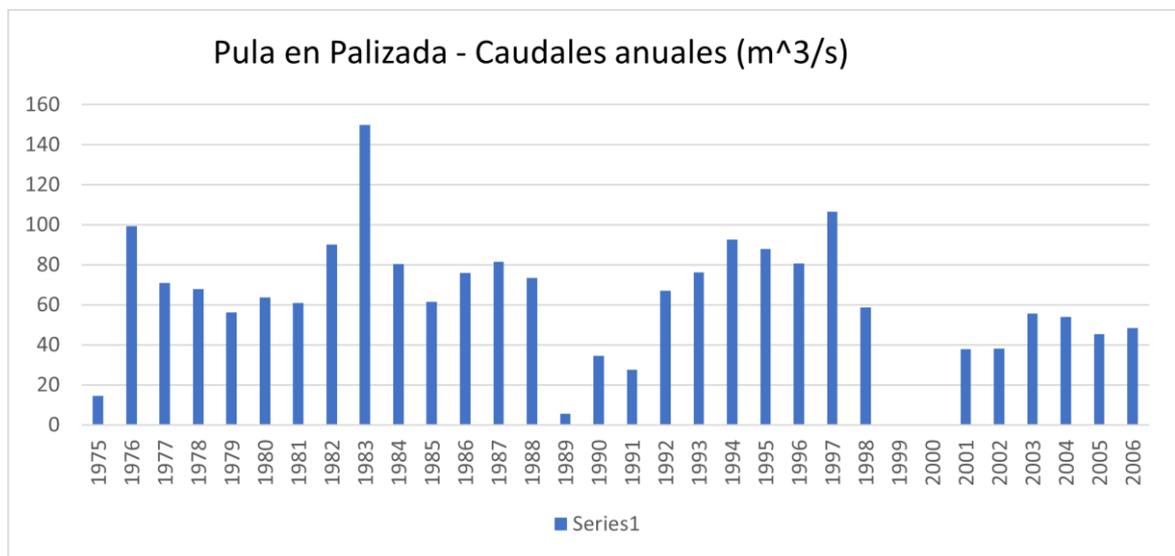


Figura 13. Caudal anual en la estación “Pula en Palizada”.

Fuente: Información proveniente de los anuarios hidrológicos del INAMHI (2020).

A partir de estos datos anuales, se procedió a calcular los caudales máximos por medio de diversos métodos o modelos estadísticos, los cuales sirven para explicar o analizar los patrones máximos. En la tabla 5 se observa que el método más apropiado es el de Pearson III, con un porcentaje de aceptación del 0.4%.

Tabla 5. Test de los métodos aplicados para el cálculo de caudales máximos en Pula Palizada.

	Gumbel	Log-normal	Pearson III	GEV-1
Δmax:	3.3%	5.5%	0.4%	2.8%
Conclusión:	Se acepta el ajuste			

De esta manera, se logró escoger la distribución probabilística más apropiada para simular la tendencia de extremos hidrológicos. En la tabla 6 se constató los caudales máximos para cada periodo de retorno.

Tabla 6. Caudales máximo y periodos de retorno en Pula Palizada.

Periodo de retorno	Pearson III		
	Q [m ³ /s]	C. de ajuste	Δ
2	198.8	198.9	0.1%
5	243.4	242.5	0.4%
10	276.1	275.5	0.2%
25	319.0	319.1	0.0%
50	351.6	352.1	0.1%
75	370.8	371.4	0.2%
100	384.5	385.1	0.2%
150	403.9	404.4	0.1%
200	417.7	418.1	0.1%
300	437.2	437.4	0.0%
400	451.1	451.1	0.0%
500	462.0	461.7	0.1%
1000	495.9	494.7	0.2%
		Δmax:	0.4%

➤ **Pula en Yurima.**

Esta estación posee datos mensuales únicamente de los años 2002, 2003, 2006 y 2008, como se observa en la figura 14. Dado que no existe más información relevante en esta estación, no se generó un análisis de caudales máximos y se limitó a tenerlos presentes para posteriores análisis.

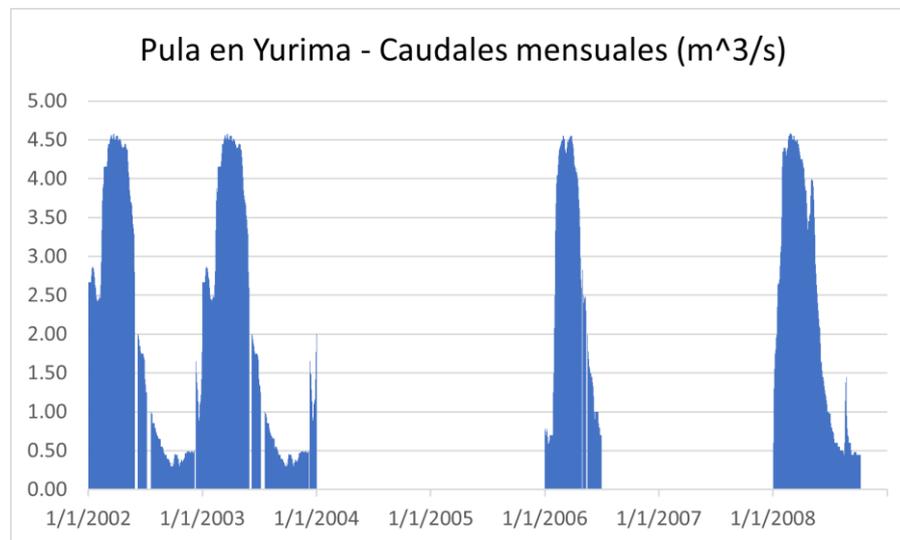


Figura 14. Caudal histórico registrado en la estación meteorológica “Pula de Palizada”.
Fuente: Información proveniente de los anuarios hidrológicos del INAMHI (2020).

8.2 Procesamiento de datos orto-fotogramétricos.

Las imágenes obtenidas por medio del dron son ingresadas en el software de Agisoft Metashape. El objetivo principal de usar este software fue obtener una nube de puntos a partir de todas las imágenes georreferenciadas con los puntos de control establecidos en campo (Figura 7), y posterior a esto, generar un Modelo Digital de Elevación (DEM) para

obtener nuestra topografía a escala centimétrica de todo el cauce de los ríos de interés (Figura 8).

Por otro lado, para el procesamiento de dicha nube de puntos se usa el programa Global Mapper, el cual permitió realizar filtros de manera más automatizada y en base a los colores de esta nube de puntos. De esta manera, se obtuvo una clasificación más precisa del suelo del lugar y generar un DEM de forma rápida y automática (Figura 15).

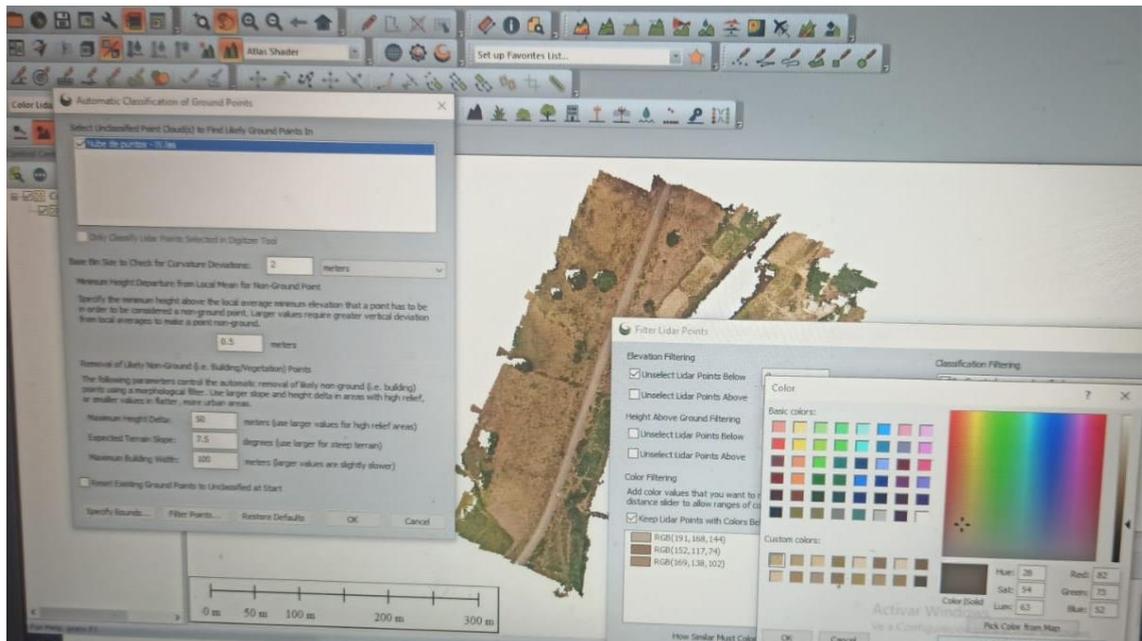


Figura 15. Filtrado y clasificación del suelo por medio de Global Mapper.

Previo a la generación del DEM, en el software ArcMap se procedió a visualizar el mallado de la nube de puntos de los ríos, el cual se encontraba con un filtrado, es decir, se ha extraído todo lo que no sea suelo. Para este trabajo se revisaron varias secciones de toda el área de trabajo en apoyo del ortomosaico, logrando verificar que los vértices coincidan exactamente con el suelo filtrado de la zona de estudio.

Así mismo, con la ayuda del TIN se logró ajustar aún más el modelo, permitiendo eliminar zonas que no existen y que generaron errores al generar el ráster o DEM de las ortofotos (Figura 16). Para el caso en el que exista un error, se reajustó los vértices correcta valores aceptables, y así evitar resultados no acordes a la realidad en el modelo hidráulico, por causa de la topografía.

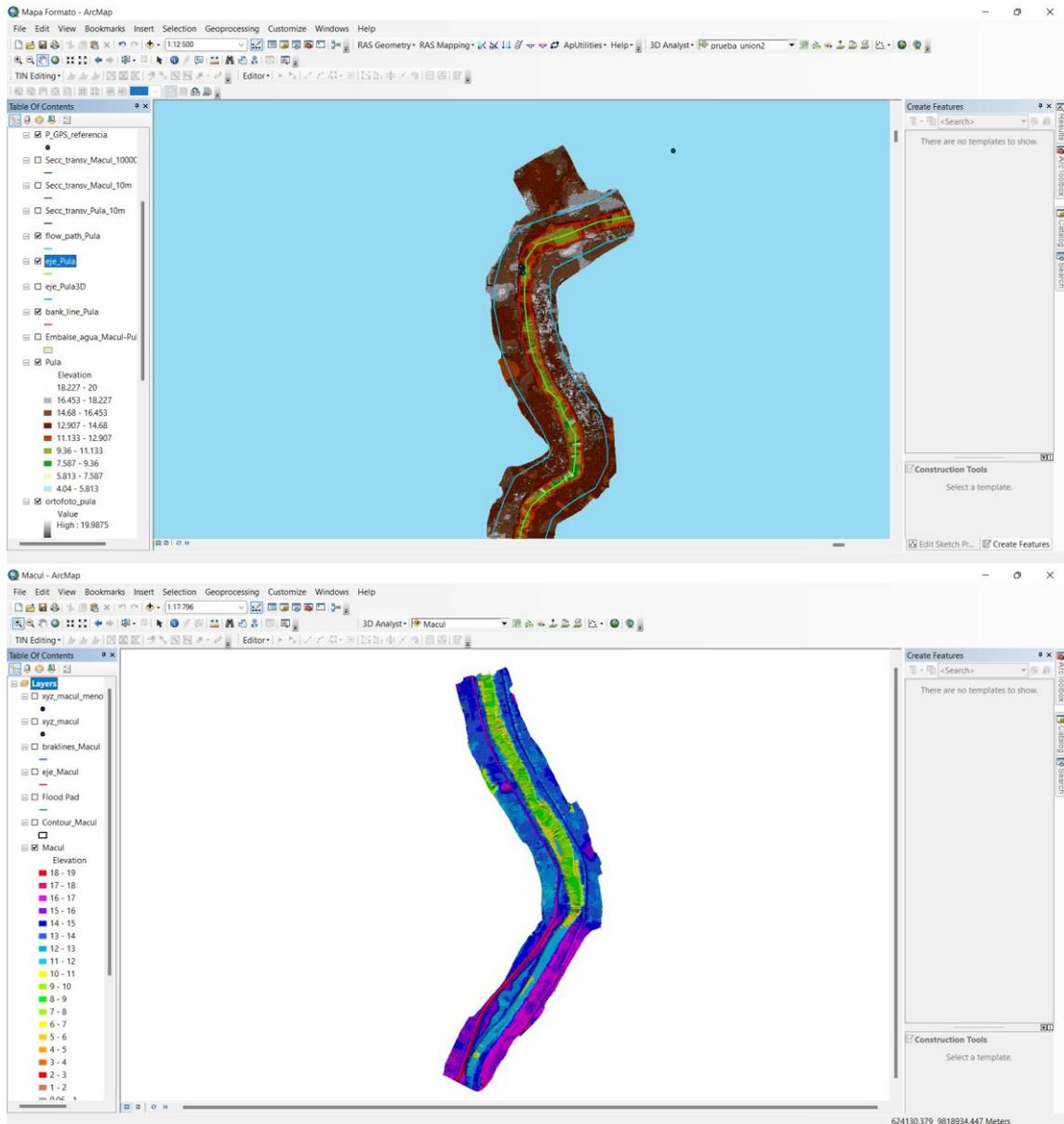


Figura 16. Ajustes del TIN del río Pula y Macul (figura arriba y abajo respectivamente).

8.3 Visitas de campo y recolección de datos batimétricos del río Macul y Pula

Durante esta etapa, en el mes de julio se llevó a cabo salidas de campo navegando con lancha por los ríos de interés (Figura 17), junto con los instrumentos adecuados para realizar la batimetría (uso de una sonda y GPS diferencial). De esta manera, se logró obtener una nueva nube de puntos, esencial para darle un nuevo enfoque y mejora a este modelo.



Figura 17. Salida de campo y recolección de datos de batimetría.

Sin embargo, se resalta que en estos datos existieron anomalías o discordancia con respecto al eje “z” de elevación, lo cual debió ser corregido para conseguir ingresar estos datos batimétricos al Hec-Ras y obtener una simulación más apropiada al estudio.

Estas anomalías pueden darse por muchas razones, tales como el incorrecto sistema de elevación de las ortofotos y el DEM, fuertes velocidades de los ríos, afectación del sonido del motor de la lancha, entre otros. Estos pueden ser factores que provocaron errores en la recolección de datos, por lo que, en campo, se determinó ciertos lugares con puntos de profundidades medidos manualmente. Todo esto permitió tener una guía para mejorar esta base de datos y obtener una batimetría más adecuada para el objetivo del proyecto.

8.4 Ingreso de datos al programa computacional

La geometría del cauce de estudio fue ingresada al software Hec-Ras en formato vector y ráster (Figura 18). Para el caso de las zonas de acumulación de volúmenes (almacenamiento), se ingresó los datos tabulados del elevación-volumen obtenidos a través de ArcMap (Figura 19). Además, a partir de las secciones transversales ingresadas en el software, se procedió a verificar la conexión de puntos en todo el eje de estudio e ingresar los coeficientes de rugosidad antes determinados para cada sección (Figura 20).

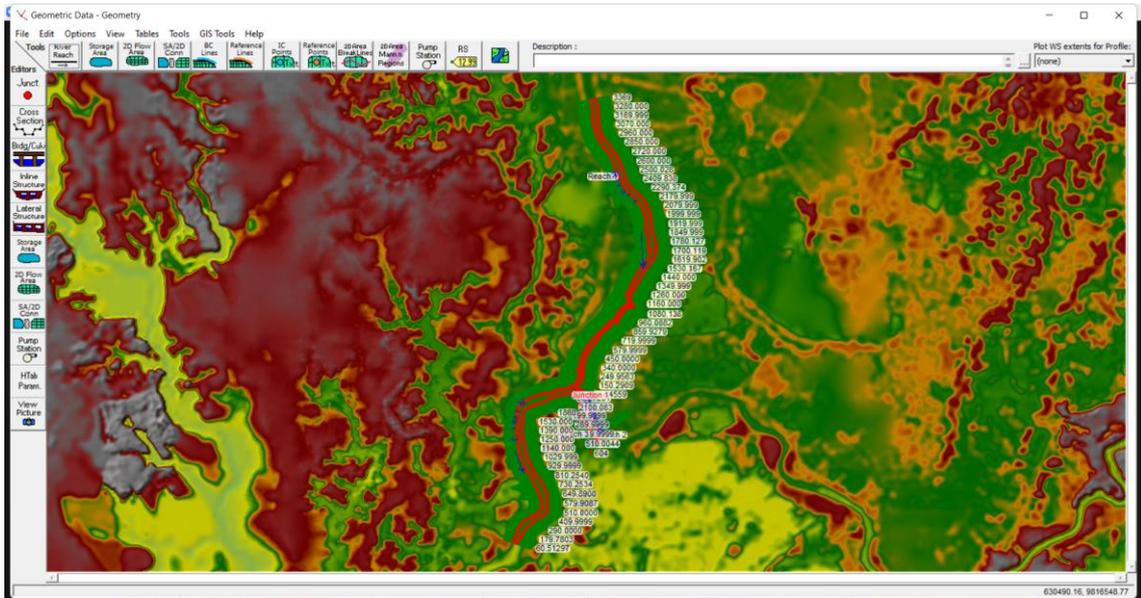


Figura 18. Geometría inicial de los ríos Macul y Pula en Hec-Ras.

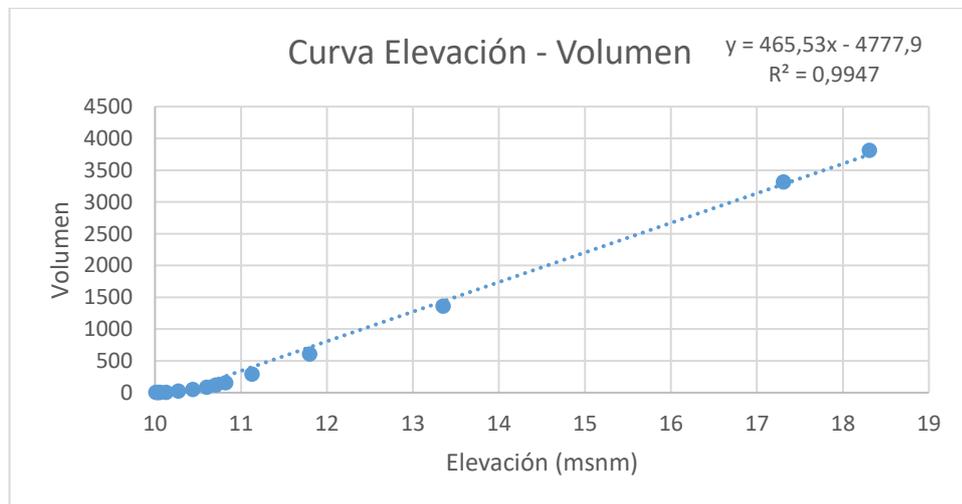


Figura 19. Tabulación de datos para áreas de almacenamiento (Elevación-Volumen).

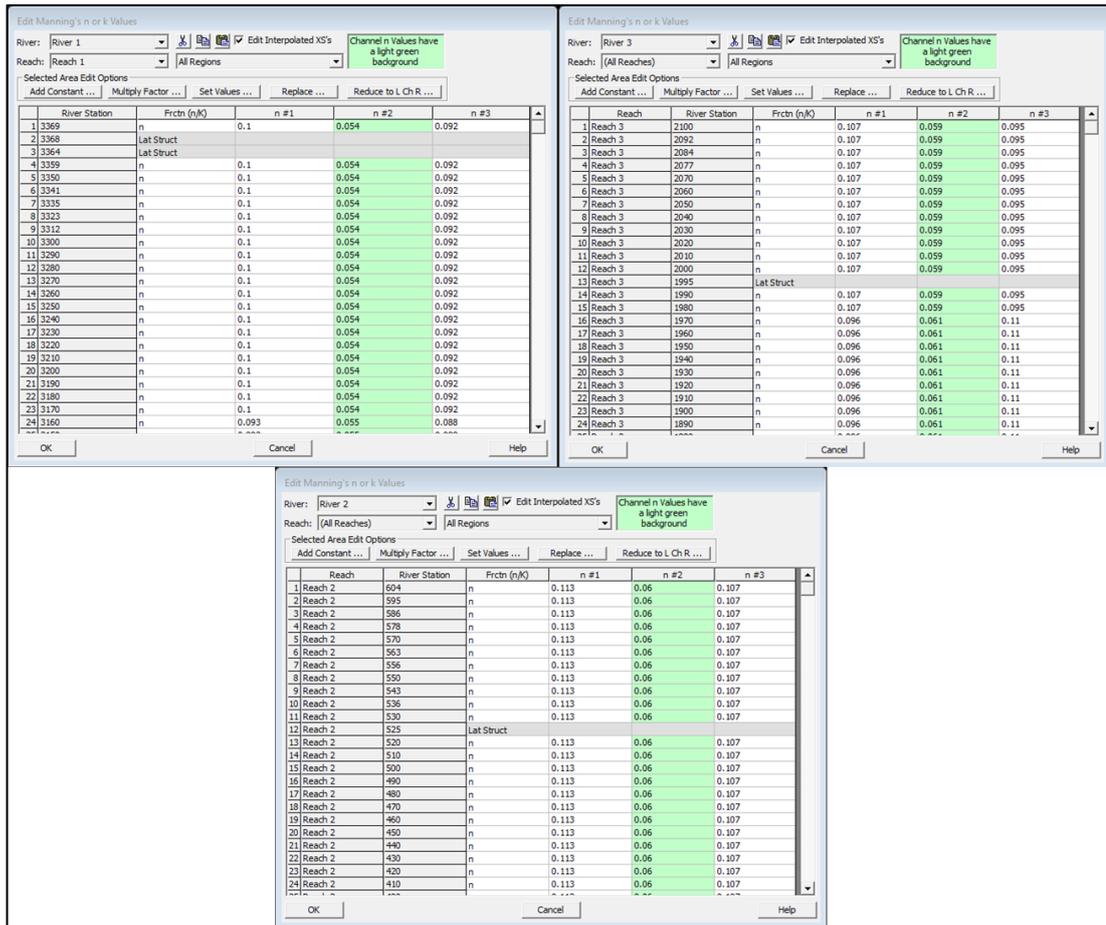


Figura 20. Ingreso de datos del “n” de Manning en las secciones transversales.

Con el fin de generar las solicitaciones de carga hidráulica, se generó un hidrograma sintético, cuyo valor máximo fue el asociado al periodo de retorno de diseño (100 años) (21). Este hidrograma fue ingresado como condición de borde aguas arriba. Aguas abajo, se empleó la pendiente de fondo (*Normal depth*).

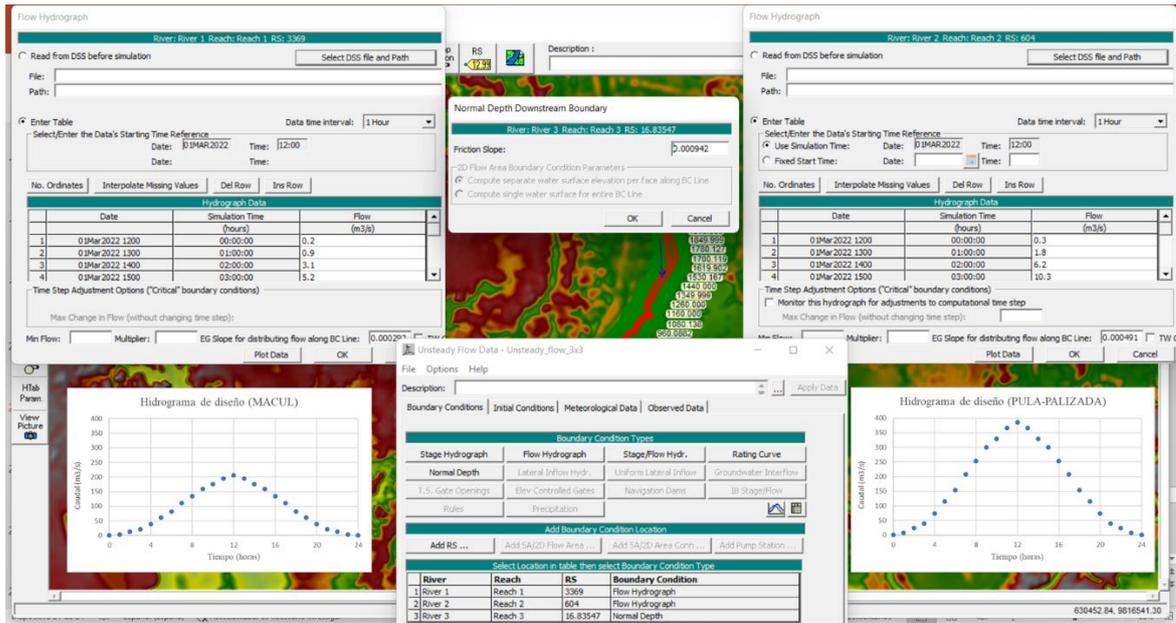


Figura 21. Hidrogramas para la modelación y condiciones para la simulación base.

8.5 Simulación base y calibración del modelo.

La simulación inició con los datos del Macul (geometría, DEM, números de Manning, etc), se estimó un caudal de retorno de 100 años de 180 m³/s a partir de los datos registrados aguas arriba del río Pula, debido a que es la única estación hidrológica disponible se encuentra sobre este río.

Observando los porcentajes de aporte de cada río, se pudo cotejar con los registros obtenidos en campo, y complementando con las consultas a sus pobladores en cuanto a niveles alcanzados en crecidas.

No obstante, con este caudal no se llegó al punto de referencia que indicaron los agricultores y demás pobladores (Figura 22). Por consiguiente, se calibró los coeficientes de rugosidad hasta conseguir llegar a un nivel reportado en eventos extremos (Figura 23).

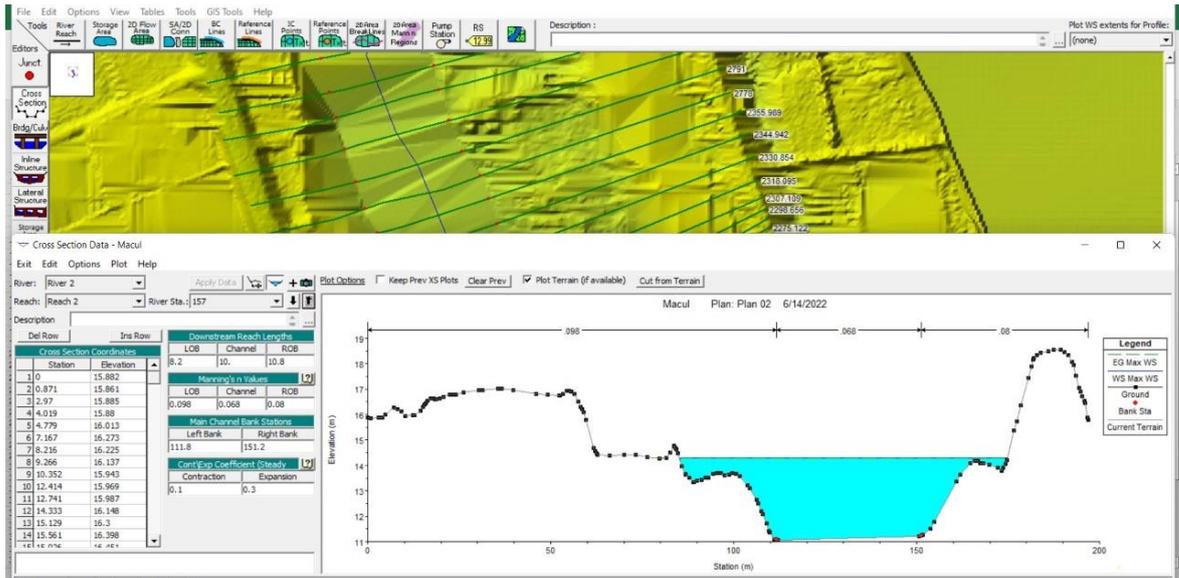


Figura 22. Punto de referencia para caudal de retorno de 100 años.

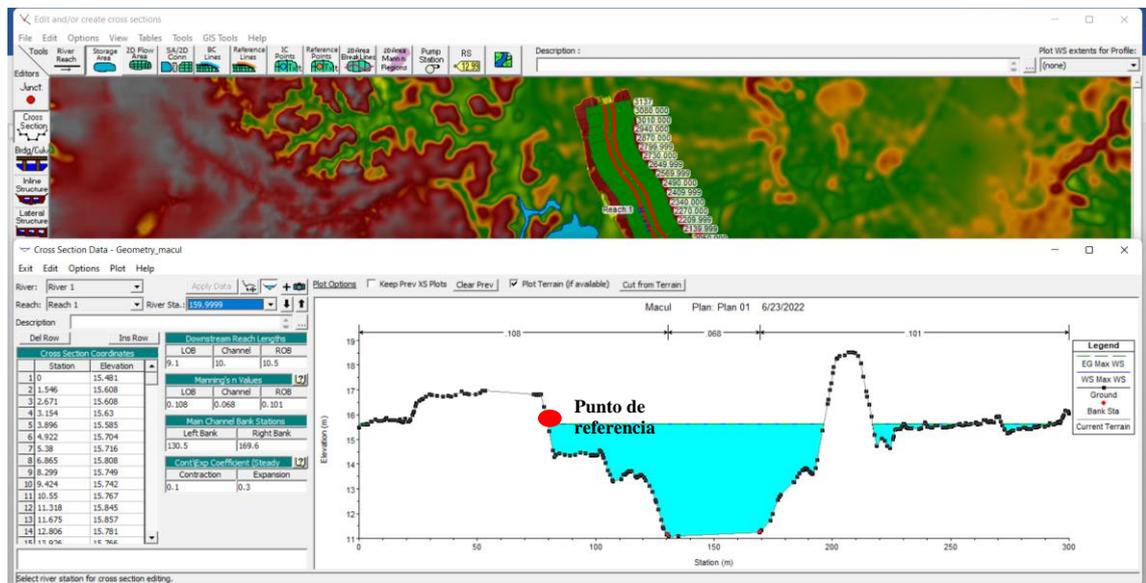


Figura 23. Punto de referencia alcanzado para un caudal de retorno de 100 años de 205.2 m³/s.

Con estas condiciones establecidas y conjunto de datos calibrados se consiguió obtener una geometría final, que es la información base para las simulaciones y escenarios definidos (Figura 24). Además, se identificaron áreas de almacenamiento imprescindibles para conocer el grado de importancia que tienen, considerando la cantidad de caudal que circularía al no existir zonas de amortiguamiento ante caudales elevados.

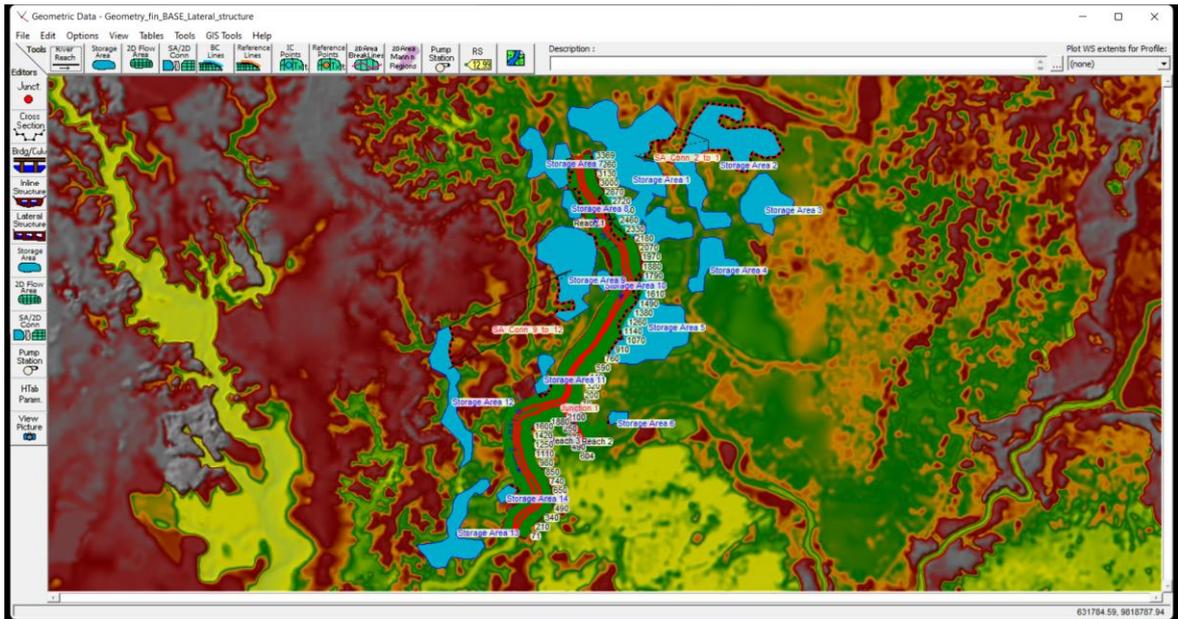


Figura 24. Geometría final para el modelo hidrodinámico del área de estudio.

8.6 Simulación de cinco escenarios.

Los escenarios simulados con el modelo finalizado permitieron generar diversos resultados, los cuales van acorde a las diferentes limitantes y criterios establecidos para cada uno. En la figura 25 se observa el nivel del agua de cada escenario. Esta sección fue corroborada en campo en base a la experiencia de los pobladores y las marcas de inundación suscitadas año tras año.

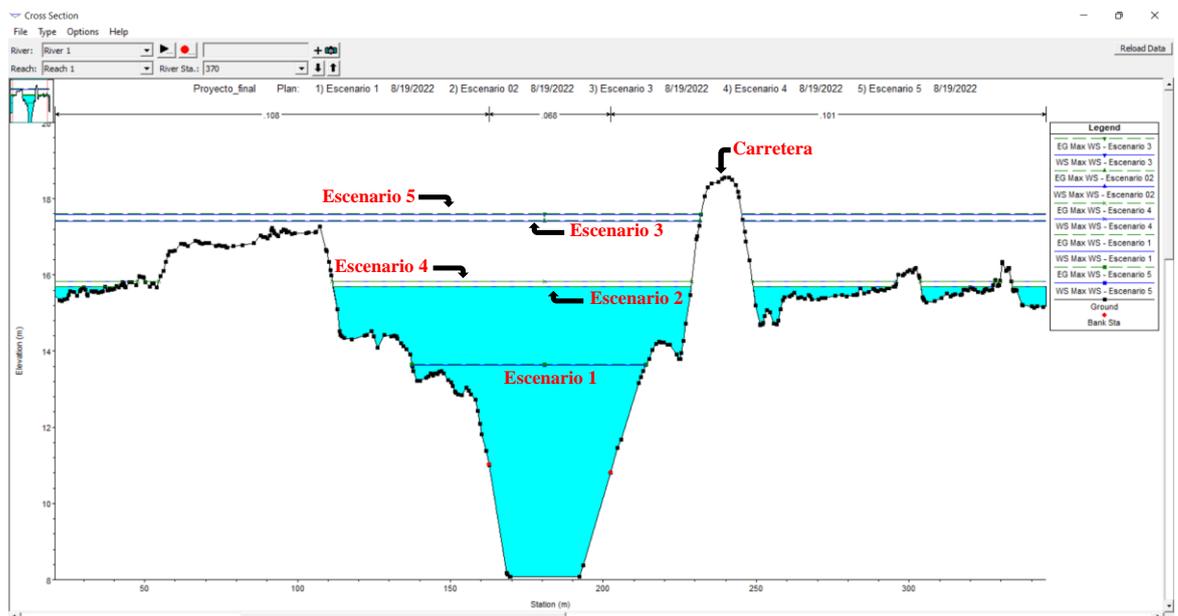


Figura 25. Representaciones gráficas del alcance máximo del nivel de agua en los cinco escenarios.

El escenario 1 hizo referencia a un escenario normal, con parámetros hidrológicos bajos debido a su periodicidad de $T = 2$ años, algo que se estimó que suceda con normalidad

casi cada año. De manera general, en esta figura se visualizó que el escenario 5 es aquel en el que ocurre un aumento bastante elevado de agua, debido a que no existe áreas de almacenamiento, aun así, casi sobrepasó parte de la carretera en esta sección de análisis.

Sin embargo, en escenarios como el 2 y 4 se observó poco nivel del agua dado que existen áreas de almacenamiento que cumplen la función de desfogar el exceso de agua en los ríos. Aunque, analizando río arriba del mismo Macul, existen zonas en las cuales se desbordaba el río por encima de la carreta, debido a la topografía de ese sector (Figura 26). Esto ocasionaba que varias áreas sean inundadas y circulen río abajo por el sector derecho de la carretera, es por ello que en la figura 25 se observa agua en este sector.

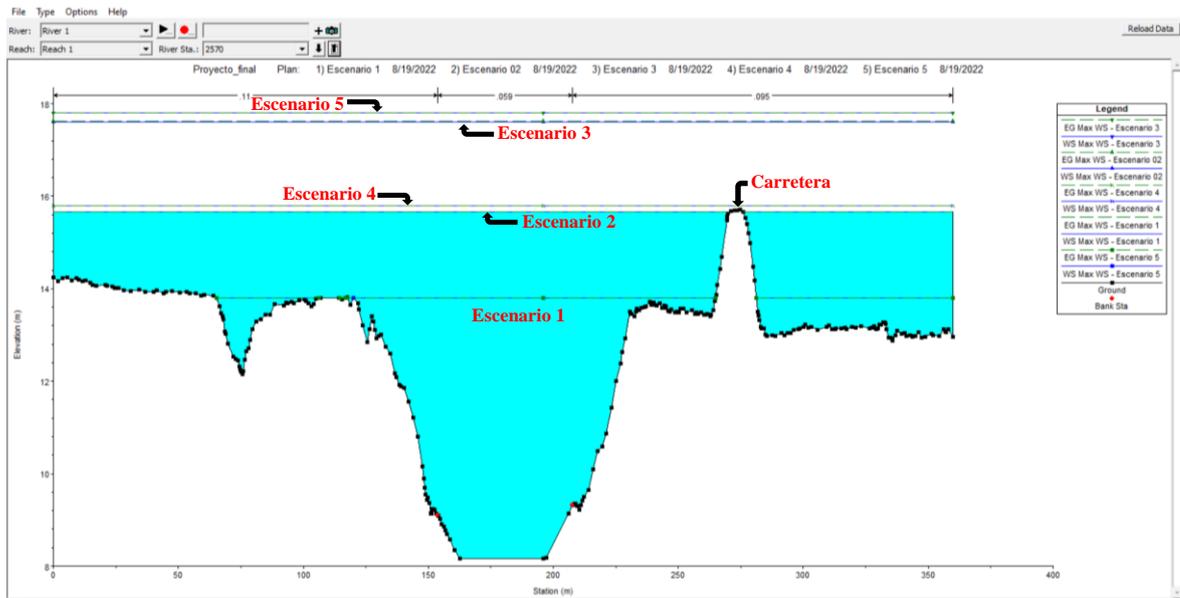


Figura 26. Sección inundable del río arriba del Macul.

La extensión de cada escenario se observa en la tabla 7, en la cual se expuso el área de afectación y la descripción de los resultados para cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 7. Resumen de los escenarios simulados y criterios establecidos.

		Escenario #1	Escenario #2	Escenario #3	Escenario #4	Escenario #5
Caudal [m³/s]	Macul	106 m ³ /s	205.2 m ³ /s	205.2 m ³ /s	238.2 m ³ /s	238.2 m ³ /s
	Pula (aguas arriba)	198.9 m ³ /s	385.1 m ³ /s	385.1 m ³ /s	418.1 m ³ /s	418.1 m ³ /s
Periodo de retorno [T = # años]		2 años	100 años	100 años	200 años	200 años
Presencia de áreas de almacenamiento		No influye debido al bajo caudal	Si	No	Si	No
Área inundada [m²]		914,645.28 m ²	10,122,566.30 m ²	1,939,242.42 m ²	10,190,931.76 m ²	1,968,715.42 m ²
Porcentaje de eliminación de áreas de almacenamiento [%]		No influye debido al bajo caudal	Eliminación del 80.9%		Eliminación del 80.7%	
Altura máxima de agua sobre el nivel del mar [m]		13.80 m	15.65 m	17.62 m	15.80 m	17.80 m
Porcentaje de afectación por eliminación de áreas de almacenamiento [%]		No influye debido al bajo caudal	Aumento del 11.1%		Aumento del 11.2%	
Velocidad máxima del agua [m/s]	Centro del canal	0.28 m/s	0.18 m/s	0.45 m/s	0.19 m/s	0.46 m/s
	Extremos del canal	0.06 m/s	0.04 m/s	0.17 m/s	0.06 m/s	0.18 m/s
Porcentaje de afectación por eliminación de áreas de almacenamiento [%]	Centro del canal	No influye debido al bajo caudal	Aumento del 60%		Aumento del 60%	
	Extremos del canal		Aumento del 76%		Aumento del 67%	

Los escenarios 2 y 3 fueron simulados bajo los mismos parámetros (caudal y periodo de retorno) y geometría del cauce (secciones transversales y n de Manning), con la única diferencia en la presencia de las áreas de almacenamiento (Tabla 7). Al disminuir o eliminar completamente estas zonas por medio del confinamiento lateral del canal, se consiguió evitar más del 80% de sectores inundados, sin embargo, esto provocó cambios dinámicos y físicos alrededor de los ríos de estudio, provocando deslaves y debilitamiento en los bordes del cauce.

Uno de los efectos por la restricción de las zonas de almacenamiento son el cambio o aumento de las cotas de agua, lo cual sucede en cada sección de los ríos (medidos con referencia al nivel de mar). Esto ha provocado que en el escenario 3, el agua se eleve casi 2 metros a diferencia del primer escenario, degradando la estabilidad de los taludes cercanos a la carretera, y donde podría comprometerse la vía por la cual circulan diariamente cientos de personas. En ese sentido, las altas velocidades asociadas (a $T = 100$ años) ocasionarían un efecto erosivo que devastaría las estructuras antropogénicas que se localicen aguas abajo (viviendas, puentes, etc). Este efecto es el más perjudicial dado su aumento de 60% y 76% (en el centro y extremos del canal del río, respectivamente).

Algo similar sucedió con los escenarios 4 y 5, en donde se plantea el mismo análisis, pero con un periodo de retorno mayor al anterior ($T = 200$ años, ver tabla 7). Su efecto fue más fuerte que antes, dado el aumento de caudal y el área afectada (aproximadamente 30,000 m^2 y 68,000 m^2 más que antes, con y sin áreas de almacenamiento respectivamente), reflejando una considerable afectación para los extremos del cauce de los ríos.

Los efectos de la restricción o privatización de las zonas de anegamiento fueron reflejados en las zonas más bajas del área de simulación (parte sur del río Pula, Figura 8), en donde se juntan las aguas del río Macul y Pula (aguas arriba). En la figura 27 se observa las cuatro últimas simulaciones en las que se usó y restringió las áreas de almacenamiento. Esto permitió verificar que los efectos ocasionados por el cierre de zonas de anegamiento influyen directamente aguas abajo, aumentando drásticamente el valor de la velocidad de agua de aproximadamente 3 m/s (Figura 27, superior derecha e inferior izquierda). También se observa un aumento en el nivel de agua, el cual puede causar alteración en los bordes de los ríos y su posterior desbordamiento, algo a lo que la población no está preparada y lo que provocaría notables afectaciones.

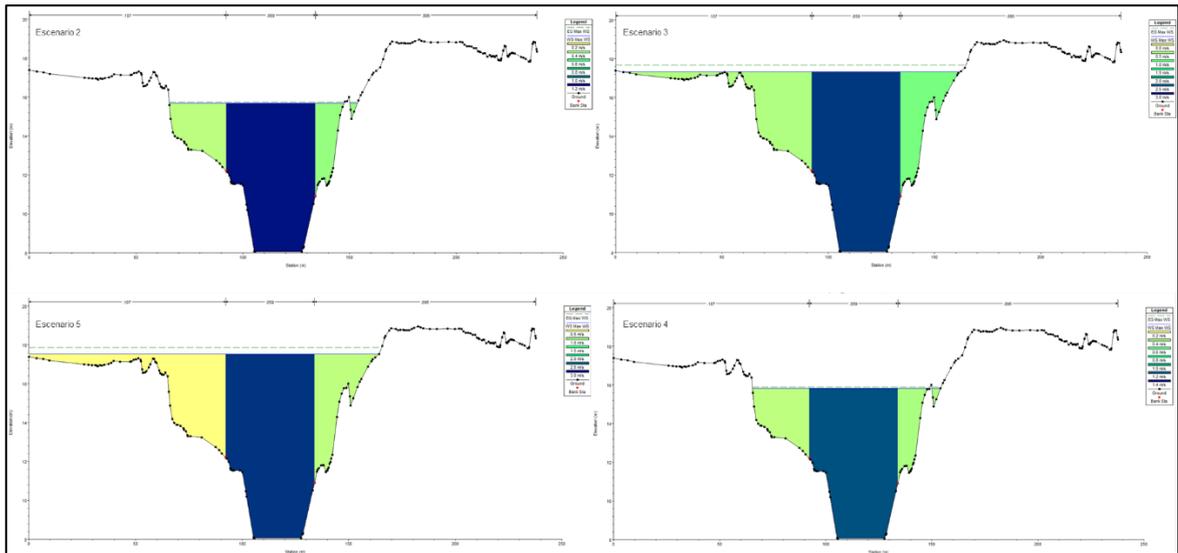


Figura 27. Representaciones gráficas de las velocidades máximas alcanzadas en los escenarios simulados.

8.7 Discusión

Este proceso de la calibración fue esencial para estipular los criterios y geometría base del modelo, lo que influyó directamente en los resultados de los diferentes escenarios en los que se ejecuta un determinado proyecto. Uno de los métodos se enfocó específicamente en la altimetría o crecidas máximas del agua, logrando mejorar la precisión en cada punto de muestreo y en los resultados de los escenarios (Jiang et al., 2019). Por lo que, el modelo hidrodinámico fue calibrado en base a la experiencia de los pobladores y agricultores de la zona, en donde se reconoció sectores puntuales en los que ha llegado el nivel de agua, permitiendo obtener un punto referencial para la calibración del modelo en un periodo de retorno de 100 años.

Otra forma fue el uso de imágenes satelitales como los mapas de zonas inundables (Figura 12), el cual es otro método esencial para calibrar el modelo y validar los resultados en su forma base para un determinado periodo de retorno, tal como lo mencionan y analizan en los trabajos de Dung et al., (2011) y Dasgupta et al., (2020). Este método forma parte de la teledetección que, en conjunto con los puntos de referencia determinados en campo, ayudó en la modificación de los parámetros iniciales de la modelización, como el ingreso de caudales y el coeficiente de rugosidad “n de Manning” (Ferreira et al., 2021; Mohammadian et al., 2022).

El uso de áreas de almacenamiento que conectan con los bordes de los ríos permitió acumular agua que se desborda del cauce. En este contexto, estos se inundan parcial o completamente y disminuyen las descargas de caudal río abajo de un determinado sector de estudio, tal como se menciona en el trabajo de Chatterjee et al., (2008). Sin embargo, al restringir el paso del agua a las áreas de almacenamiento, se produjo un elevado nivel de agua que puede comprometer las paredes del cauce del río, ocasionando daños estructurales en el contorno de este e inundando zonas donde antes no llegaba el agua y que ahora se encuentran vulnerables. El modelo hidrodinámico generado por Zeng et al., (2018), resaltó la importancia de estas zonas como soluciones basadas en la naturaleza

para mantener en control del caudal de los ríos, evitando daños colaterales dado que este sistema es más óptimo que el de compuertas.

Por medio del software Hec-Ras, al igual que los trabajos de Yalcin (2020) y Abdella & Mekuanent (2021), fue posible obtener datos de varios parámetros que intervienen en las crecidas de los ríos, como es la profundidad y extensión de la inundación, velocidad del agua, tiempos de llegada, etc. Se evidenció que río abajo existe un elevado nivel resultante en zonas donde antes no se inundaba, debido al aumento de caudal asociado a periodos de retorno de baja probabilidad, e.g. $T = 100$ y 200 años (escenarios 2 y 4, ver figura 25). No obstante, con la eliminación de las áreas de almacenamiento bajo esos mismos caudales, estos sectores se verían afectados drásticamente debido al aumento de la velocidad y nivel de agua (corridos 3 y 5, ver figura 25). Estas dos variables pueden permitir el análisis del grado o nivel de afectación en una determinada zona, logrando planificar esquemas de mitigación de inundaciones apropiados y rentables (Salunkhe et al., 2018).

9 CONCLUSIONES

Para la generación del modelo hidrodinámico se analizó las interacciones existentes entre los ríos y los elementos de la zona de estudio. La topografía es relativamente baja y juega un papel fundamental en la fluidez del agua, por lo cual, fue imprescindible realizar fotogrametría a través de un dron. Esto permitió extraer ortofotos para su procesamiento y obtención de un DEM a gran escala (centimétrica o métrica), logrando generar adecuadamente la geometría del lecho del cauce y comprender la compleja interacción entre los ríos, las llanuras, las áreas de amortiguamiento hidráulico, y en general, la topografía. Con respecto a esta última, se observó que existe una menor cota en los bordes, río arriba del Macul, en donde se generan inundaciones con mayor facilidad, aportando con grandes volúmenes a los sectores río abajo en los cuales no hay desbordamiento.

En cambio, en cuanto a la interacción con los humedales, se observó una relación o vínculo de gran beneficio en los ríos de interés, en los que se manifestó la necesidad de mantener activos a estos humedales para garantizar una sostenibilidad óptima como almacenadores de agua, logrando mantener los bodes del canal del cauce y evitar inundaciones por el desbordamiento de estos. Además, en conjunto a los puntos de muestreo o reconocimiento de sectores anegados por parte de los pobladores (cotas referenciales de zonas inundadas), se logró modificar adecuadamente los parámetros de modelización inicialmente cargados, como los caudales y los coeficientes de rugosidad (n de Manning). Lo cual permitió estimar secciones con diferentes rugosidades debido a la irregularidad del terreno, presencia de vegetación, actividad agrícola, etc, que influyen directamente en el comportamiento hidrodinámico de los ríos. Gracias a la imagen satelital obtenida de la plataforma Google Earth Engine (19 de marzo del 2019), se logró validar el escenario base en el cual se estima una inundación de 1012.25 hectáreas para un periodo de retorno de 100 años.

Las zonas de anegamiento juegan un papel fundamental como un amortiguador natural del agua excedente de los ríos. Esto permitió mantener un caudal bajo aguas abajo sin perjudicar los bordes del cauce del río, evitando que se rebosen en zonas vulnerables a las que nunca se han registrado desbordamiento de algún río. Esto podría deberse a dos razones: i) el caudal de un periodo de retorno mayor a los simulados y ii) el cierre o cambio de uso del suelo en zonas que antes eran inundadas y que ahora se encuentran protegidas por alguna estructura a lo largo del cauce. En los escenarios 2 y 3 (como también en el 4 y 5), se simuló un caso en el que se eliminan estas áreas debido al cambio de uso del suelo (humedales que ahora son lugares de cultivo). Por lo que, toda el agua fue enviada río abajo y, por consiguiente, la velocidad del agua aumenta en más del 60% y 76%, provocando una mayor energía y fuerza de contacto con los bordes del cauce. Este suceso se debe a que las áreas de almacenamiento representan aproximadamente el 80% de las zonas las inundadas. Por lo cual, el 20% restante equivale al lecho o zonas cercanas al cauce de los ríos, provocando que el nivel del agua aumente considerablemente y afecte zonas que antes no eran afectadas río abajo.

10 RECOMENDACIONES

Para las cotas referenciales obtenidas en campo por parte de los pobladores y agricultores, se recomienda tener presente el sistema de coordenadas en el que se trabaja, considerando al DEM con el que se hará la unión para el trabajo de modelamiento. De esta manera, se evitan errores como el mal traslape entre dos ráster (DEM de ortofoto y DEM de acceso libre con resolución 3x3m). Además, es imprescindible el reconocimiento de campo para la asignación del “n” de Manning a cada sección de los ríos, así como también, la implementación de teledetección para conseguir imágenes satelitales para la calibración y validación del modelo.

Los datos de geoposicionamiento y de batimetría recopilados en campo, deben ser analizados y post-procesados para disminuir el grado incertidumbre o error entre estos valores. Esto es realizado con el objetivo de evitar incongruencia en los datos de la batimetría y la nube de puntos de las ortofotos, sobre todo en la coordenada “z” en donde suele existir mayor problema. Por lo que, es recomendable obtener el DEM definitivo a través de la nube de puntos y puntos batimétricos fusionados, generando un TIN para editar los vértices y errores visibles, para posteriormente generar el DEM final con el que se realizará las simulaciones establecidas.

Finalmente, para este tipo de trabajos se recomienda tener acceso a herramientas que permitan procesar imágenes de dron, logrando extraer información de manera clara y segura, esto puede ser a través de una computadora con gran alcance informático y extensa memoria de procesamiento. Además, la información ingresada es pesada y los datos a obtener como la nube de puntos son más pesados que antes. Por lo que, tan solo el procesamiento de la nube de puntos puede llegar a tomar más de 3 días de forma consecutiva, algo comprobado ya en este estudio.

11 REFERENCIAS

- Abdella, K., & Mekuanent, F. (2021). Application of hydrodynamic models for designing structural measures for river flood mitigation: the case of Kulfo River in southern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2779–2791. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01057-5>
- Abdullah, J., Muhammad, N. S., Julien, P. Y., Ariffin, J., & Shafie, A. (2018). Flood flow simulations and return period calculation for the Kota Tinggi watershed, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S766–S782. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12256>
- Ali, R. M., Kamran, A., Rubab, S., Sailuj, S., & Sajjad, A. (2022). 2D Hydrodynamic Model for Flood Vulnerability Assessment of Lower Indus River Basin, Pakistan. In *World Environmental and Water Resources Congress 2018* (pp. 468–482). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784481400.044>
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*.
- Arrighi, C. (2021). A Global Scale Analysis of River Flood Risk of UNESCO World Heritage Sites. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.764459>
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., & Mikoš, M. (2018). Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results. *Geosciences*, 8(2), 69. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>
- Brunner, G. W. (2010). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 4.1. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. *Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center*.
- Brunner, M. I., Seibert, J., & Favre, A. (2016). Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation. *WIREs Water*, 3(6), 819–833. <https://doi.org/10.1002/wat2.1173>
- Burian, T., Gorin, S., Radevski, I., & Vozenilek, V. (2020). A novel way to present flood hazards using 3D-printing with transparent layers of return period isolines. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin*, 151(1), 16–22.
- Chatterjee, C., Förster, S., & Bronstert, A. (2008). Comparison of hydrodynamic models of different complexities to model floods with emergency storage areas. *Hydrological Processes*, 22(24), 4695–4709. <https://doi.org/10.1002/hyp.7079>
- Chen, Y.-W., Tsai, J.-P., Chang, L.-C., Ho, C.-C., & Chen, Y.-C. (2014). The development of a real-time flooding operation model in the Tseng-Wen Reservoir. *Hydrology Research*, 45(3), 490–503. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.301>
- CIPAT-ESPOL, Agua, S. N. del, & Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2014). *Proceso : Re-Senagua-026-2012 Proyecto : Elaboración Del Mapa Hidrogeológico a Escala 1 : 250 . 000 Informe Final*. 110–121. [file:///C:/Users/Wimdowns 10/Downloads/4_MAPA HIDROGEOLOGICO ESPOL.pdf](file:///C:/Users/Wimdowns%2010/Downloads/4_MAPA_HIDROGEOLOGICO_ESPOL.pdf)
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water*, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Dasgupta, A., Thakur, P. K., & Gupta, P. K. (2020). Potential of SAR-Derived Flood Maps for Hydrodynamic Model Calibration in Data Scarce Regions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001988](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001988)
- De Luca, D. L., & Biondi, D. (2017). Bivariate Return Period for Design Hyetograph and Relationship with T-Year Design Flood Peak. *Water*, 9(9), 673. <https://doi.org/10.3390/w9090673>
- Dhote, P. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Sharma, V. C., Garg, V., Nikam, B. R., & Chouksey, A. (2018a). Experimental flood early warning system in parts of beas basin using integration of weather forecasting, hydrological and hydrodynamic models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII–5, 221–225. <https://doi.org/10.5194/isprs->

- archives-XLII-5-221-2018
- Dhote, P. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Sharma, V. C., Garg, V., Nikam, B. R., & Chouksey, A. (2018b). EXPERIMENTAL FLOOD EARLY WARNING SYSTEM IN PARTS OF BEAS BASIN USING INTEGRATION OF WEATHER FORECASTING, HYDROLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODELS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-5, 221–225. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-221-2018>
- Dung, N. V., Merz, B., Bárdossy, A., Thang, T. D., & Apel, H. (2011). Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1339–1354. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1339-2011>
- Dutta, D., Alam, J., Umeda, K., Hayashi, M., & Hironaka, S. (2007). A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation: a case study in the lower Mekong river basin. *Hydrological Processes*, 21(9), 1223–1237. <https://doi.org/10.1002/hyp.6682>
- Farooq, M., Shafique, M., & Khattak, M. S. (2019). Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM). *Natural Hazards*, 97(2), 477–492. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., & Bleninger, T. (2021). Calibration of river hydrodynamic models: Analysis from the dynamic component in roughness coefficients. *Journal of Hydrology*, 598, 126136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126136>
- Hromadka, T. V., Walker, T. R., & Yen, C. C. (1988). Using the Diffusion Hydrodynamic model (DHM) to evaluate flood plain environmental impacts. *Environmental Software*, 3(1), 4–11. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(88\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0266-9838(88)90003-2)
- IGM. (2013). *Capas de Información Geográfica Básica del IGM de Libre Acceso*. Cartas Topográficas Escala 1:50.000, Formato Shp. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- INAHMI. (2020). *Anuarios Meteorológicos del INAHMI año 2012*. Anuarios Meteorológicos Por Año: INAHMI. <https://elyex.com/inamhi-anuarios-metereologicos-en-pdf/>
- Jamali, B., Bach, P. M., Cunningham, L., & Deletic, A. (2019). A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA-ffé) Model. *Water Resources Research*, 55(6), 4936–4953. <https://doi.org/10.1029/2018WR023679>
- Jiang, L., Madsen, H., & Bauer-Gottwein, P. (2019). Simultaneous calibration of multiple hydrodynamic model parameters using satellite altimetry observations of water surface elevation in the Songhua River. *Remote Sensing of Environment*, 225, 229–247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.014>
- Kazakis, N., Vargemezis, G., & Voudouris, K. S. (2016). Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of The Total Environment*, 550, 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>
- Koutsouris, A. J., & Lyon, S. W. (2018). Advancing understanding in data-limited conditions: estimating contributions to streamflow across Tanzania’s rapidly developing Kilombero Valley. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 197–209. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426857>
- Li, L. Q., Cui, W. J., & Liu, X. (2014). Effect of New Village Layout on Flood Control Based on Hydrodynamic Model in Henan Yellow River Floodplain. *Applied Mechanics and Materials*, 641–642, 162–166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.641-642.162>
- Liu, J., Qi, S., Zhang, Y., & Wan, L. (2015). Establishment of hydrodynamic model for main stream river network in Harbin segment of Songhua River and its application in urban flood early warning and prevention decision making. *Journal of Natural*

- Disasters*, 24, 172–177. <https://doi.org/10.13577/j.jnd.2015.0222>
- Marimin, N. A., Mohammad Razi, M. A., Ahmad, M. A., Adnan, M. S., & Rahmat, S. N. (2018). HEC-RAS Hydraulic Model for Floodplain Area in Sembrong River. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.02.029>
- Mohammadian, A., Morse, B., & Robert, J.-L. (2022). Calibration of a 3D hydrodynamic model for a hypertidal estuary with complex irregular bathymetry using adaptive parametrization of bottom roughness and eddy viscosity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 265, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107655>
- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Arias-Hidalgo, M., Domínguez-Granda, L., Apolo-Masache, B., & Carrión-Mero, P. (2022). Flood Models: An Exploratory Analysis and Research Trends. *Water*, 14(16), 2488. <https://doi.org/10.3390/w14162488>
- Nandalal, K. D. W. (2009). Use of a hydrodynamic model to forecast floods of Kalu River in Sri Lanka. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 151–158. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01032.x>
- Osei, M. A., Amekudzi, L. K., Omari-Sasu, A. Y., Yamba, E. I., Quansah, E., Aryee, J. N. A., & Preko, K. (2021). Estimation of the return periods of maxima rainfall and floods at the Pra River Catchment, Ghana, West Africa using the Gumbel extreme value theory. *Heliyon*, 7(5), e06980. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06980>
- Pradhan, B., & Youssef, A. M. (2011). A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management*, 4(3), 189–202. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x>
- Rivero Solórzano, J. (2014). *Actualización del Estudio Hidrológico Complejo Multipropósito Jaime Roldós Aguilera. Informe final.*
- Rushton, K. (2007). Representation in regional models of saturated river–aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.008>
- Salunkhe, S. S., Rao, S. S., Prabu, I., Raghu Venkataraman, V., Krishna Murthy, Y. V. N., Sadolikar, C., & Deshpande, S. (2018). Flood Inundation Hazard Modelling Using CCHE2D Hydrodynamic Model and Geospatial Data for Embankment Breaching Scenario of Brahmaputra River in Assam. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(6), 915–925. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0749-3>
- Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J. J., Peña, S., & Calera, A. (2011). Modeling aquifer–river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 475–487. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0694-x>
- SENAGUA. (2012). *Secretaría del Agua.*
- Sharma, I., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2021). A simple procedure for design flood estimation incorporating duration and return period of design rainfall. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(13), 1286. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07645-8>
- SNI. (2014). *Sistema Nacional de Información.* IEDG Geoportail. <https://sni.gob.ec>
- Syafri, R. R., Hadi, M. P., & Suprayogi, S. (2020). Hydrodynamic Modelling of Juwana River Flooding Using HEC-RAS 2D. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 412, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012028>
- Tanaka, T., Tachikawa, Y., Ichikawa, Y., & Yorozu, K. (2017). Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency analysis by incorporating a flood-inundation model for flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 554, 370–382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.012>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

- Timbadiya, P. V., Patel, P. L., & Porey, P. D. (2015). A 1D–2D Coupled Hydrodynamic Model for River Flood Prediction in a Coastal Urban Floodplain. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(2), 5014017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001029](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001029)
- Trinh, M. X., & Molkenthin, F. (2021). Flood hazard mapping for data-scarce and ungauged coastal river basins using advanced hydrodynamic models, high temporal-spatial resolution remote sensing precipitation data, and satellite imageries. *Natural Hazards*, 109(1), 441–469. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04843-1>
- Ullah, S., Farooq, M., Sarwar, T., Tareen, M. J., & Wahid, M. A. (2016). Flood modeling and simulations using hydrodynamic model and ASTER DEM—A case study of Kalpani River. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(6), 439. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2457-z>
- van Vliet, M. T. H., Flörke, M., & Wada, Y. (2017). Quality matters for water scarcity. *Nature Geoscience*, 10(11), 800–802. <https://doi.org/10.1038/ngeo3047>
- Ward, P. J., de Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2011). How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12), 3181–3195. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3181-2011>
- Yalcin, E. (2020). Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. *Natural Hazards*, 101(3), 995–1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>
- Yin, J., Zhao, Q., Yu, D., Lin, N., Kubanek, J., Ma, G., Liu, M., & Pepe, A. (2019). Long-term flood-hazard modeling for coastal areas using InSAR measurements and a hydrodynamic model: The case study of Lingang New City, Shanghai. *Journal of Hydrology*, 571, 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.015>
- Zeleňáková, M., Fijko, R., Labant, S., Weiss, E., Markovič, G., & Weiss, R. (2019). Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kružlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production*, 212, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.008>
- Zeng, Z., Liang, J., Yang, M., Zeng, Z., & Lang, Y. (2018). A hydrodynamic model coupled multiple scenarios for plain river network and its application. *MATEC Web of Conferences*, 246, 01016. <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201824601016>
- Zhang, H., Wu, W., Hu, C., Hu, C., Li, M., Hao, X., & Liu, S. (2021). A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 600, 126513. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126513>

12 ANEXOS

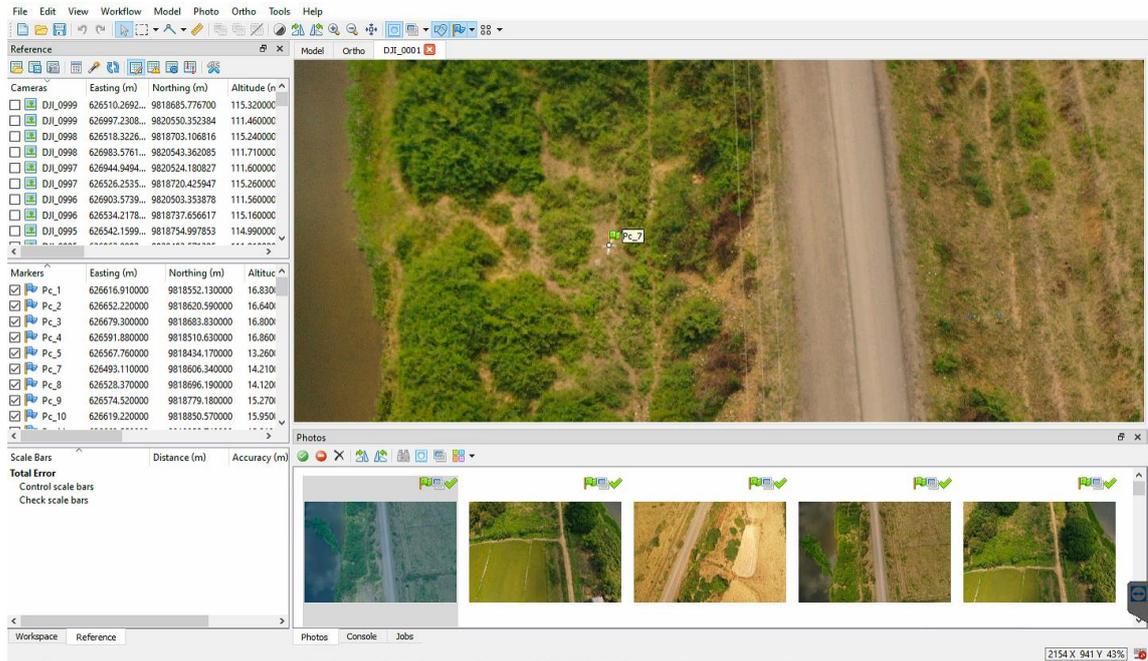


Figura 28. Geoposicionamiento de imágenes a partir de los puntos de control.

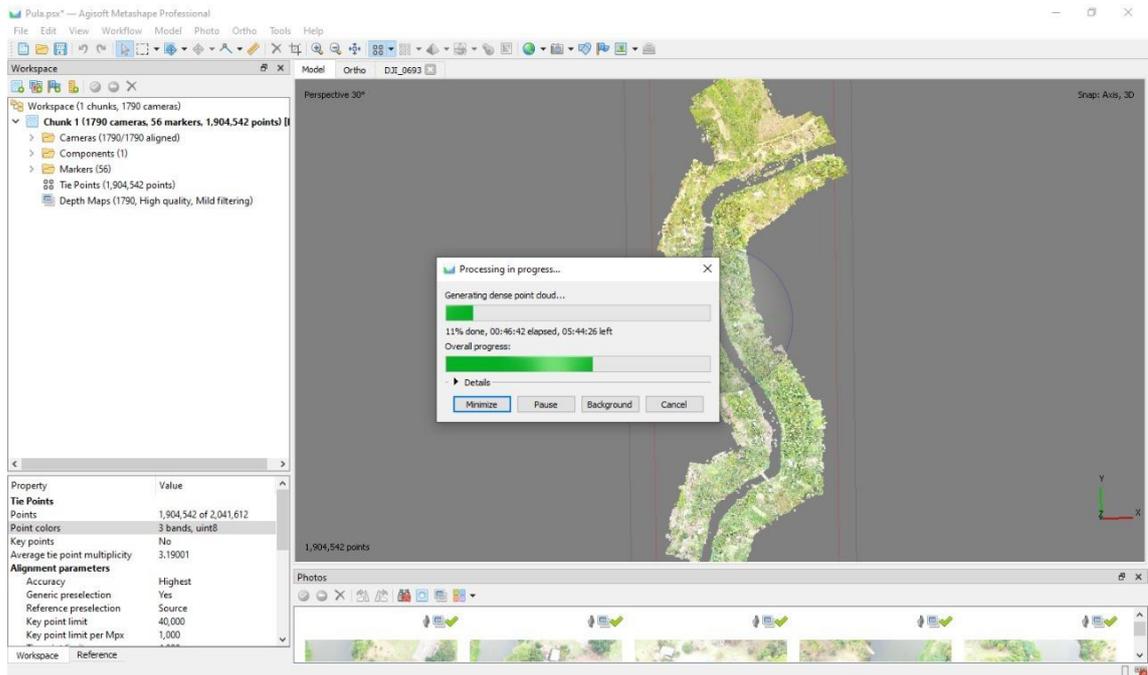


Figura 29. Generación de nube de puntos en todos los ríos.

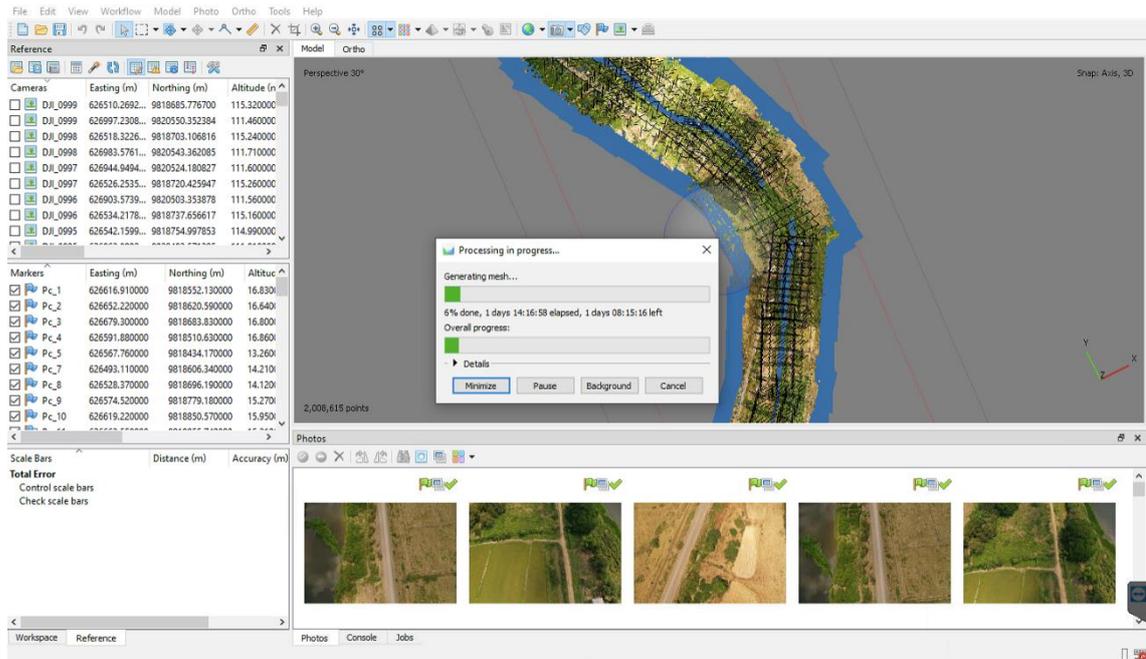


Figura 30. Generación de malla para la obtención del ortomosaico.

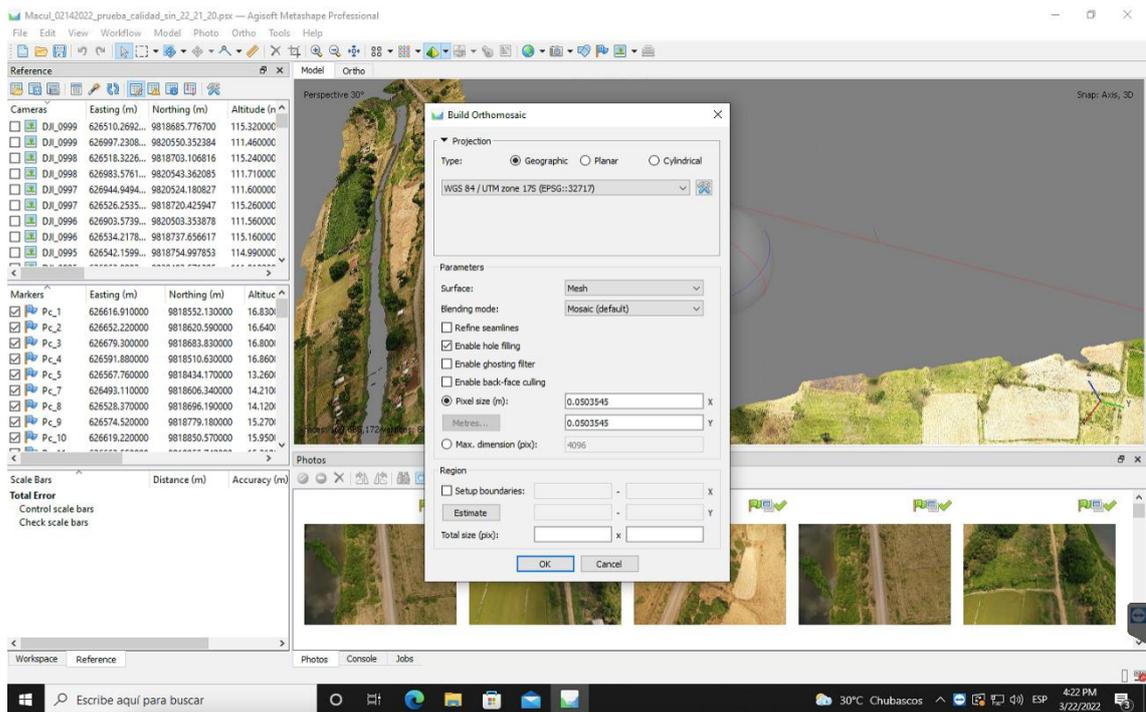


Figura 31. Generación y extracción del ortomosaico en Agisoft.

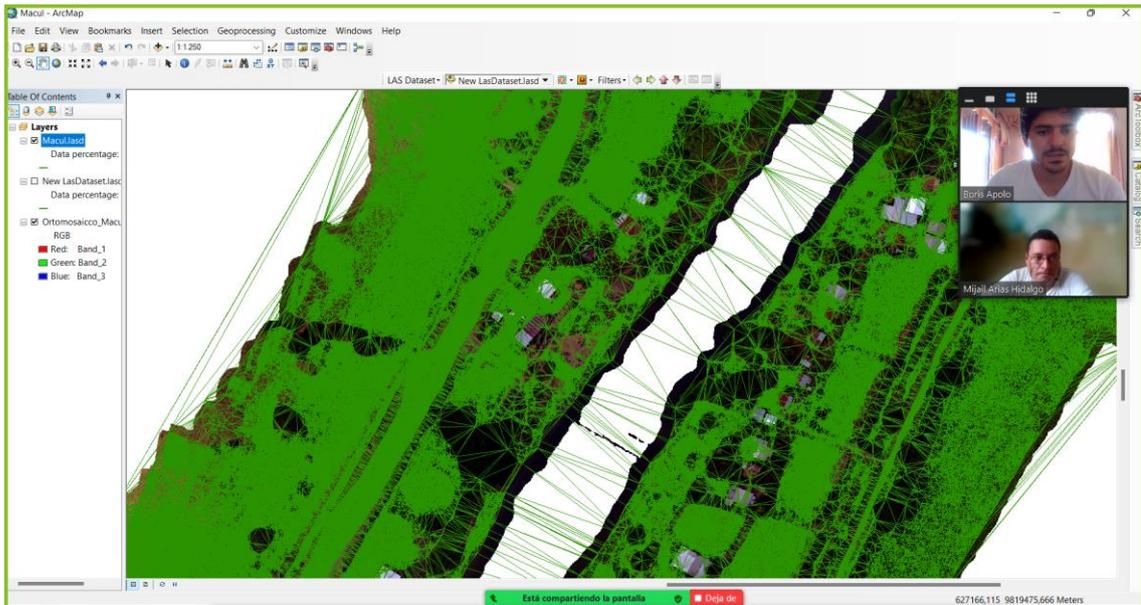


Figura 32. Revisión y ajuste del mallado a lo largo los ríos.

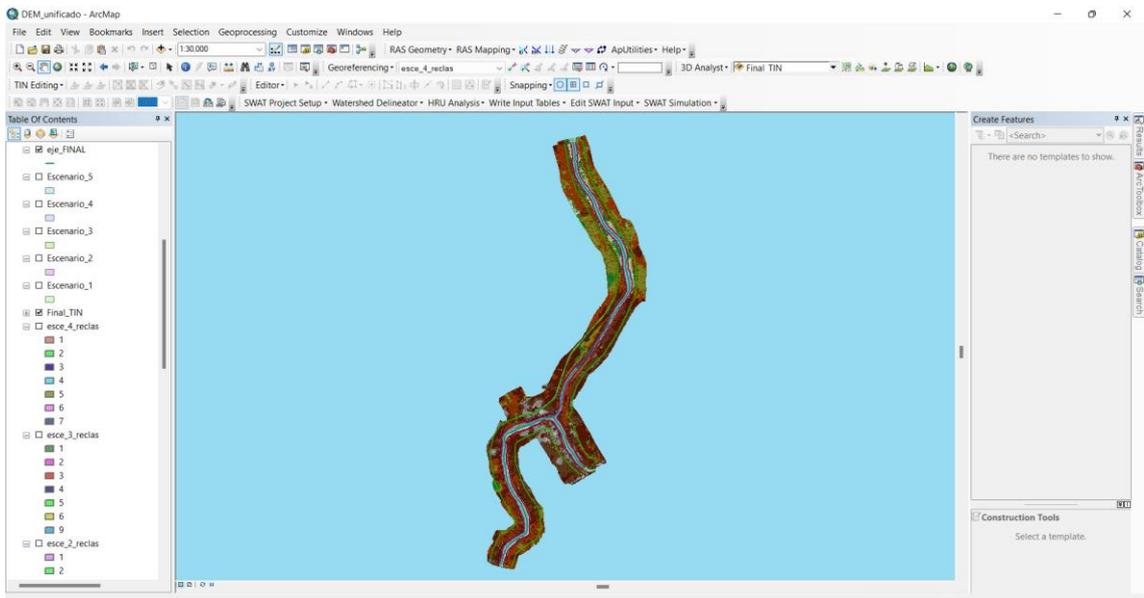


Figura 33. Generación del nuevo TIN de toda la zona de estudio.

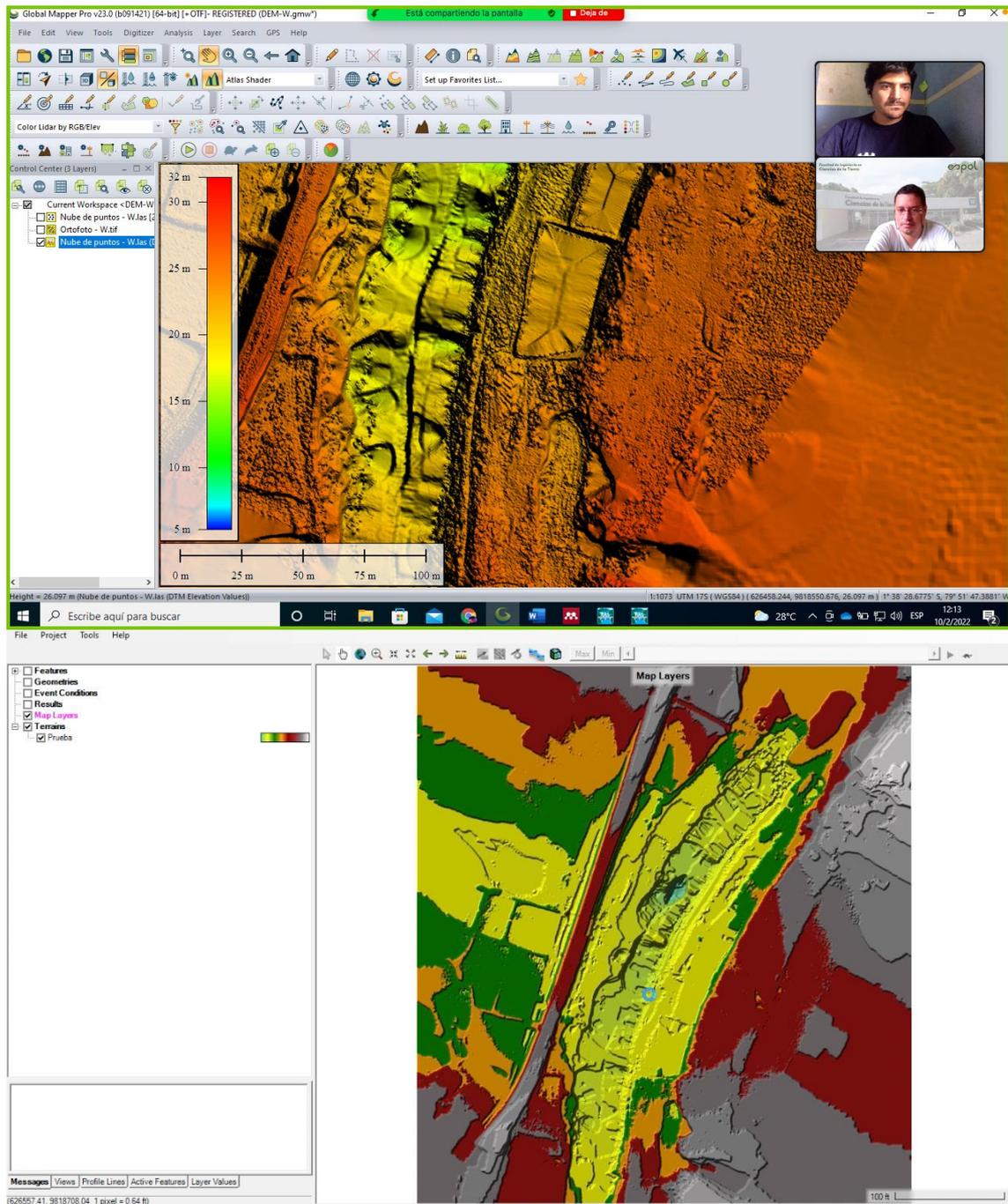


Figura 34. Pre-procesamiento de DEM de prueba en Hec-Ras.

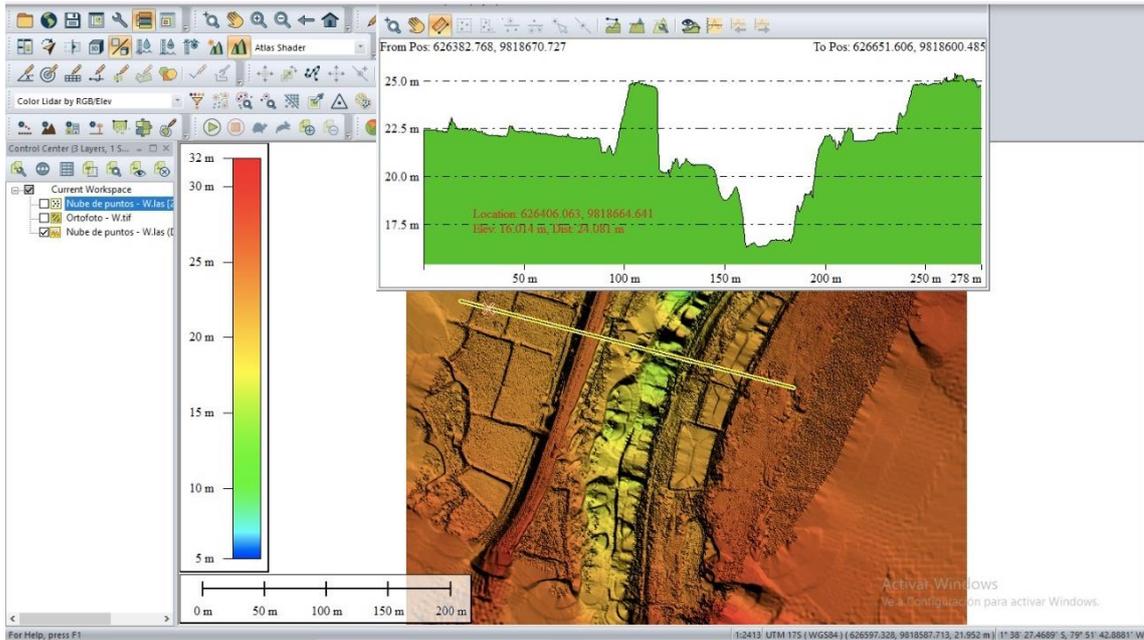


Figura 35. DEM de un sobrevuelo a través de Global Mapper.

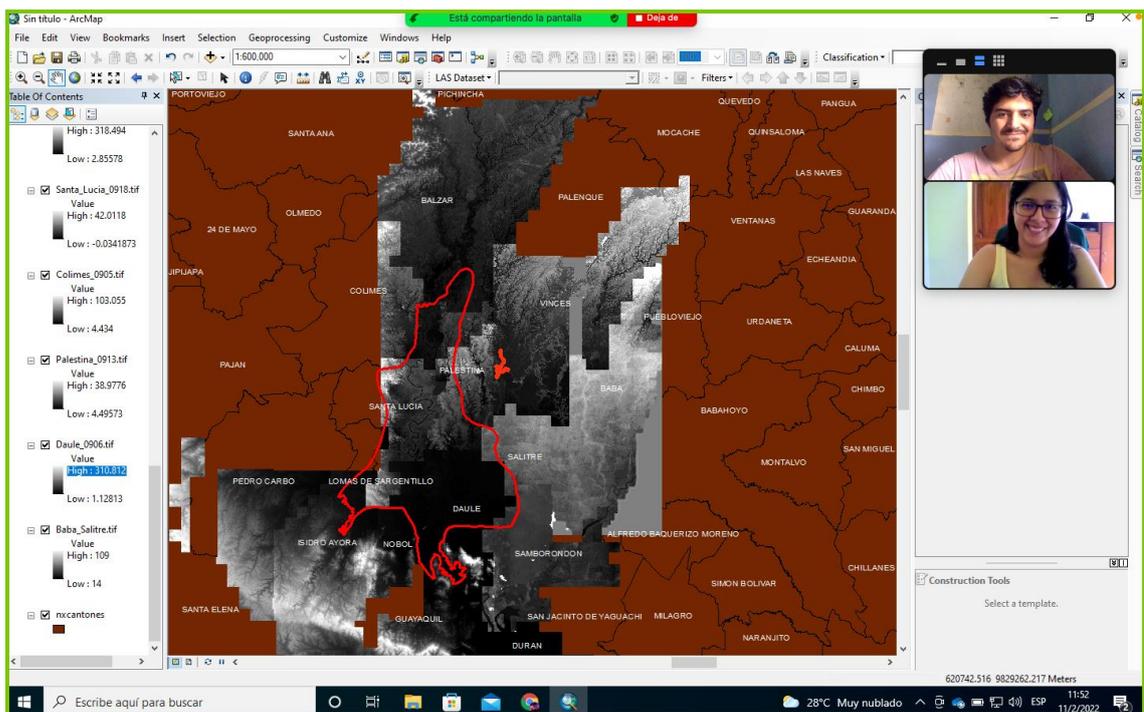


Figura 36. Análisis del DEM en la zona de estudio del proyecto.

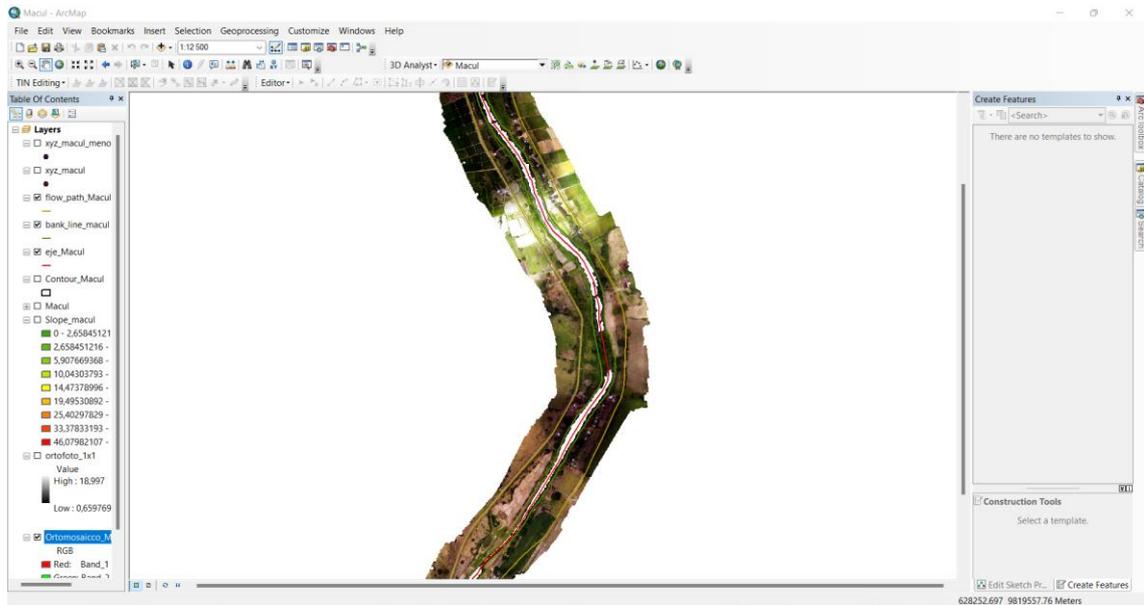


Figura 37. Generación de shapefile del flow path, bank line y el eje de los ríos.

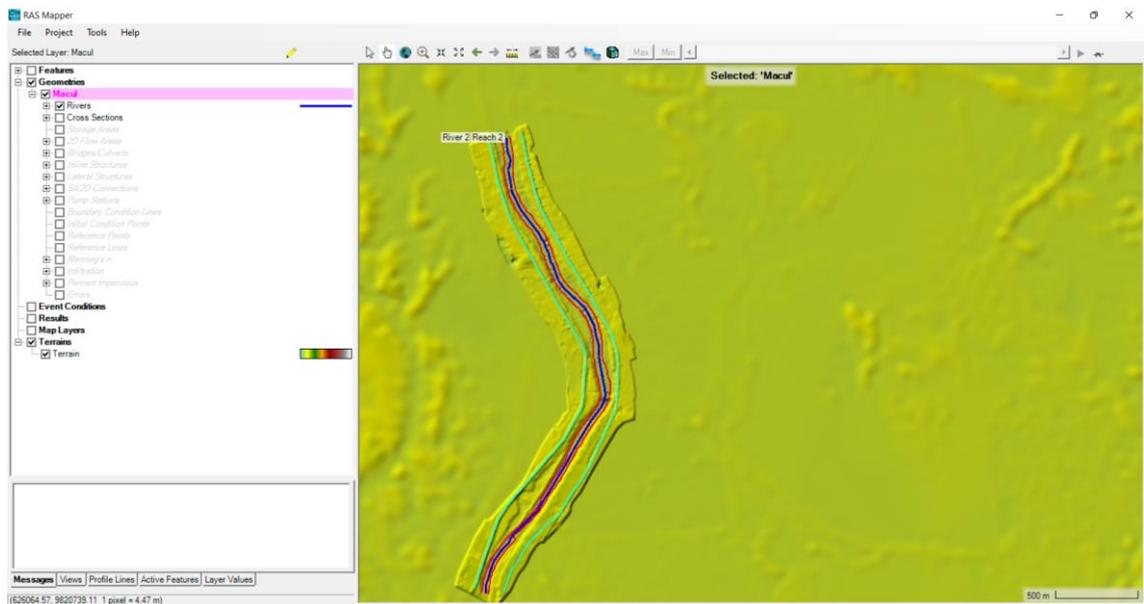


Figura 38. Ingreso de los shapefiles del flow path, bank line y el eje de los ríos a Hec-Ras.

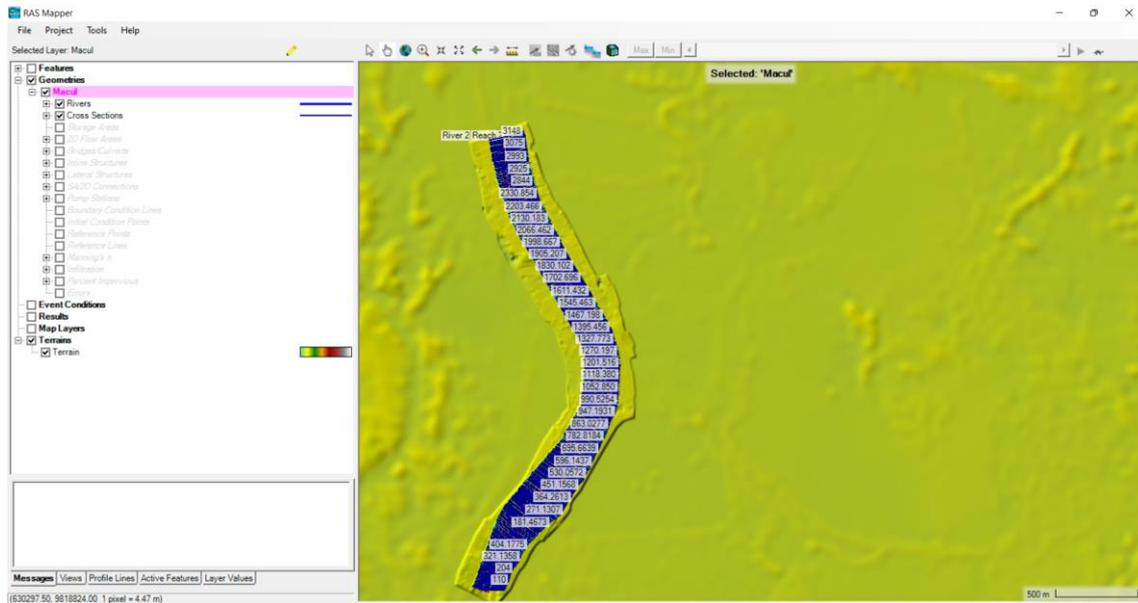


Figura 39. Generación de los cross sections en Hec-Ras.

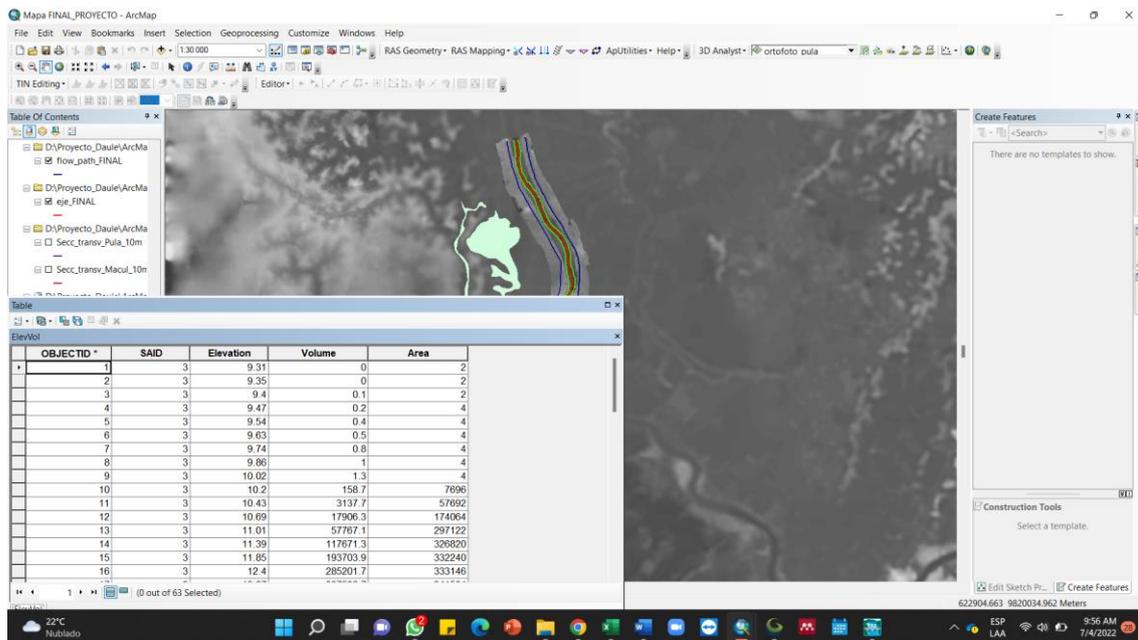


Figura 40. Generación de la tabla elevación-volumen del embalse en toda área de estudio del proyecto.

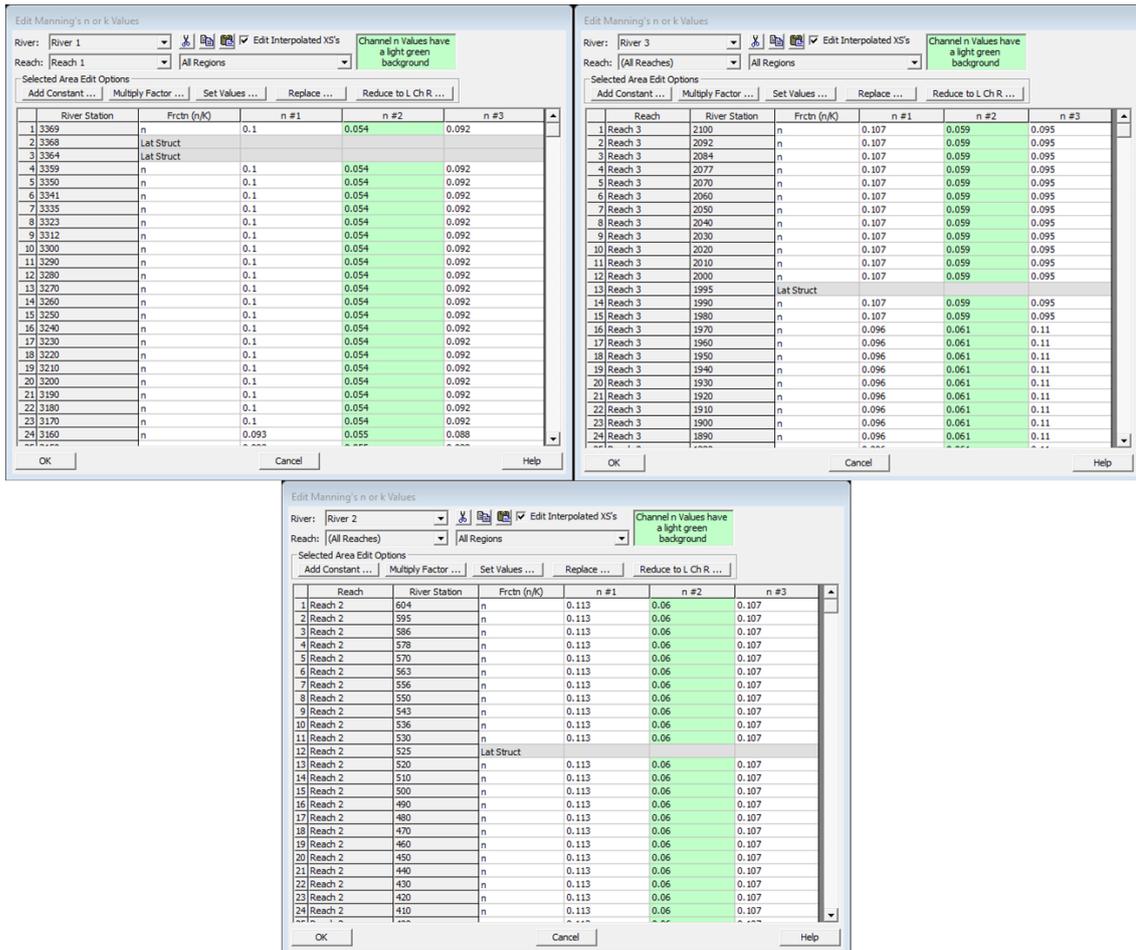


Figura 41. Ingreso de datos en las secciones transversales.

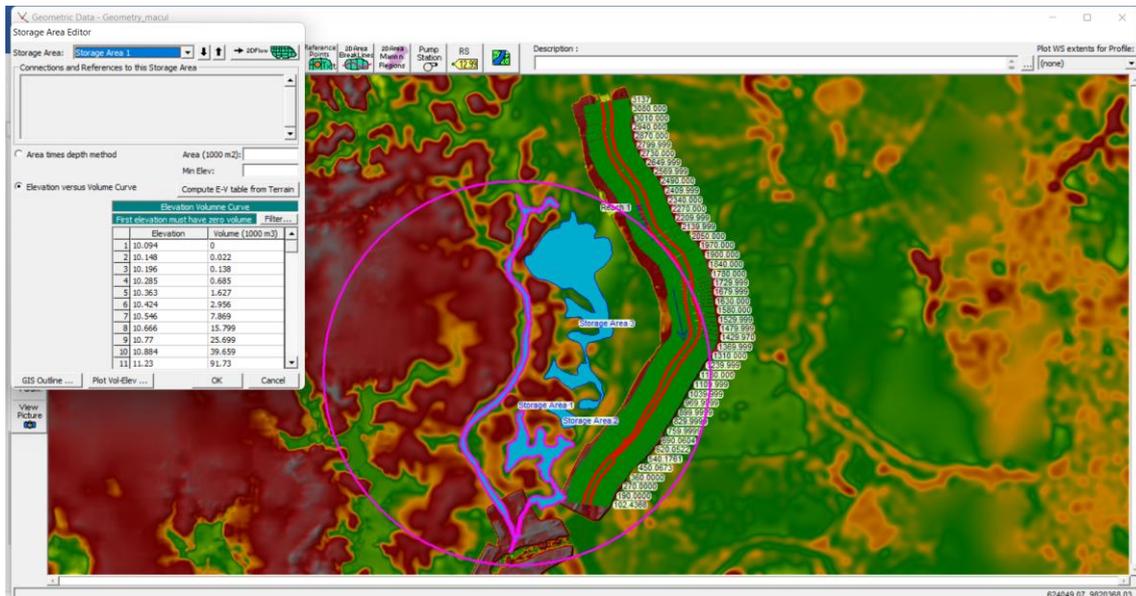


Figura 42. Ingreso del embalse de toda el área de estudio del proyecto como un "storage area" para la modelación final.

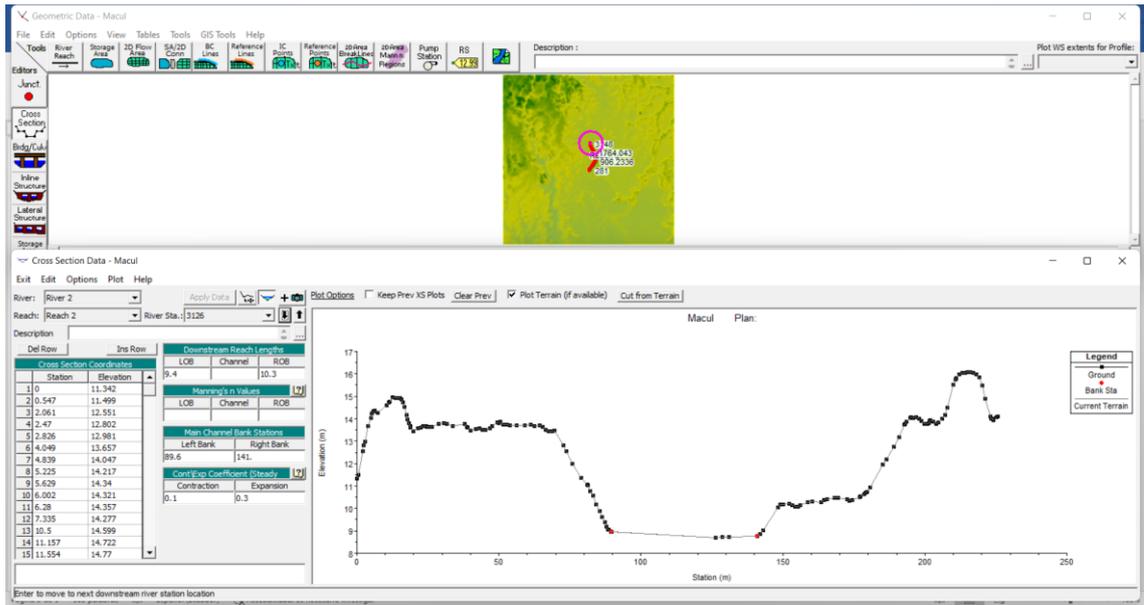


Figura 43. Revisión y modificación de los nodos en las cross sections en Hec-Ras.

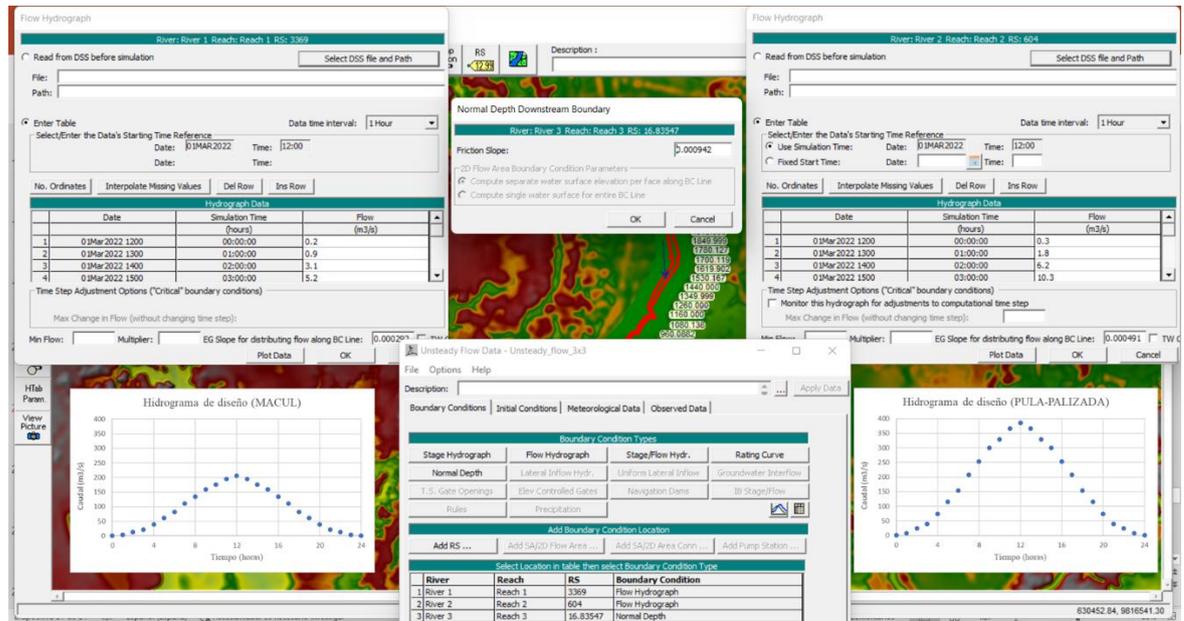


Figura 44. Hidrogramas para la modelación y condiciones para la simulación base.



Figura 45. Presentación de los avances del proyecto en el primer taller presencial.