



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**PROPAGACIÓN DE AVENIDAS EN CAUCES.
EFECTO DE LA RESOLUCIÓN DE LA TOPOGRAFÍA
EN LAS VARIABLES HIDRÁULICAS**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL:

GRADO DE ESPECIALISTA

EN:

HIDRÁULICA

P R E S E N T A

ING. VERÓNICA DOMÍNGUEZ FRÍAS

DIRECTORA DE TESINA

M.I. SIXTA HINNDI MENDOZA PÉREZ



Ciudad Universitaria, CDMX, 2024

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios innumerables que hicieron posible que hoy pueda culminar este proyecto académico.

A mis amigos cercanos, quienes siempre estuvieron ahí para escucharme y motivarme

Este logro está dedicado a mi familia y familia elegida, quienes han compartido conmigo cada paso del camino con amor, paciencia y confianza. Cada uno de ustedes ha sido crucial en mi camino hacia la culminación de este proyecto.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi directora de tesina, M.I. Sixta Mendoza y al M.I. Fabián González, por su orientación experta, paciencia y apoyo durante todo este proceso de investigación.

A la UNAM, por el apoyo constante y la guía de su distinguido cuerpo académico.

Al grupo GEIICA de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y a la empresa SIX Ingeniería por la orientación y el acceso a los recursos que hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por su generoso apoyo financiero que hizo posible este proyecto.

CONTENIDO

Resumen	1
Introducción	2
Problemática.....	2
Justificación.....	2
Objetivo	3
Descripción del trabajo.....	3
1 Antecedentes	5
1.1 Aspectos topográficos	5
1.1.1 Modelos digitales de elevación del INEGI	5
1.1.2 Fotogrametría (Satélites y drones)	5
1.1.3 Técnicas de levantamiento topográfico en campo	9
1.1.4 Resolución espacial.....	13
1.2 Modelación hidráulica en ríos	14
1.2.1 Ecuaciones de gobierno (Sanz-Ramos, y otros, 2022)	14
1.2.2 Esquemas numéricos	14
1.2.3 Software de uso libre.....	15
2 Zona de estudio	16
2.1 Localización.....	16
2.2 Medio físico.....	16
2.2.1 Clima	16
2.2.2 Hidrografía.....	19
2.3 Información disponible.....	20
2.3.1 Uso de suelo y cobertura vegetal	20
2.3.2 Estaciones climatológicas	21
2.4 Topografía	22
2.4.1 Información oficial.....	22
2.4.2 Información de campo	24
3 Aplicación	27
3.1 Datos de entrada	27
3.1.1 Modelos digitales de elevación (MDE)	27
3.1.2 MDE y asignación de malla del Grupo 1	27
3.1.3 MDE y asignación de malla del Grupo 2	31
3.1.4 Gasto de diseño	33
3.1.5 Rugosidad del terreno	40
3.2 Modelación numérica 2D	42
4 Análisis de resultados	44
4.1 Resultados obtenidos de las modelaciones del Grupo 1	44
4.1.1 Elevaciones presentadas en el cauce (Grupo 1).....	44
4.1.2 Velocidades en la zona de estudio (Grupo 1)	45
4.1.3 Tirantes en la zona de estudio (Grupo 1)	49
4.1.4 Error relativo (Grupo 1).....	52
4.2 Resultados obtenidos de las modelaciones del Grupo 2.....	56
4.2.1 Elevaciones presentadas en el cauce (Grupo 2).....	56
4.2.2 Velocidades en la zona de estudio (Grupo 2)	57
4.2.3 Tirantes en la zona de estudio (Grupo 2)	61
4.2.4 Error relativo (Grupo 2).....	64
5 Conclusiones y recomendaciones	68

TABLAS

Tabla 1. Resoluciones y áreas mínimas registradas en algunos sensores (Marquina & Mogollón R., 2018). 13

Tabla 2. Usos de suelo y vegetación en la subcuenca.20

Tabla 3. Ubicación de estaciones climatológicas utilizadas.....22

Tabla 4. Modelos digitales de elevación disponibles.26

Tabla 5. Modelos digitales de elevación disponibles.27

Tabla 6. Tamaños de malla en Grupo 131

Tabla 7. Características fisiográficas de la cuenca.34

Tabla 8. Número de curva para la cuenca de estudio.35

Tabla 9. Precipitación total y efectiva.....38

Tabla 10. Gastos pico obtenidos por HUT, para diferentes periodos de retorno39

Tabla 11. Valores de Manning (Chow, 2004).....40

Tabla 12. Distribución del uso de suelo del área de estudio.....42

Tabla 13. Comparación de tirantes y velocidad (Grupo 1).....52

Tabla 14. Nivel de agua en la sección del puente54

Tabla 15. Comparación de tirantes y velocidad para la sección aguas arriba (Grupo 1)54

Tabla 16. Comparación de tirantes y velocidad (Grupo 2).....64

Tabla 17. Nivel de agua en la sección del puente66

Tabla 18. Comparación de tirantes y velocidad para la sección aguas arriba (Grupo 1)66

FIGURAS

Figura 1. Colocación de puntos de control. Elaboración propia.....7

Figura 2. Dron utilizado para la obtención de fotogrametría. Elaboración propia.7

Figura 3. Ortofoto obtenida del procesamiento de imágenes. Elaboración propia.8

Figura 4. Colocación de BASE en BN1. Elaboración propia.....10

Figura 5. Colocación de ROVER en BN2. Elaboración propia.11

Figura 6. Levantamiento de poligonal de apoyo con puntos RTK. Elaboración propia.11

Figura 7. Levantamiento con estación total. Elaboración propia.12

Figura 8. Planta del levantamiento para la zona de estudio. Elaboración propia.13

Figura 9. Fotografía tomada de aguas arriba hacia aguas abajo. Fuente: Elaboración propia.16

Figura 10. Localización de la subcuenca Río Copala. Elaboración propia.17

Figura 11. Temperatura máxima media anual en la zona de estudio. Elaboración propia.17

Figura 12. Temperatura mínima media anual en la zona de estudio. Elaboración propia.18

Figura 13. Precipitación media anual. Elaboración propia.19

Figura 14. Agua superficial y subterránea. Elaboración propia.20

Figura 15. Uso de suelo y vegetación secundaria. Elaboración propia.21

Figura 16. Distribución espacial de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio. Elaboración propia.22

Figura 17. CEM de Guerrero utilizado en la zona de estudio. Elaboración propia.23

Figura 18. Cartas LiDAR utilizadas en la zona de estudio. Elaboración propia.23

Figura 19. Modelo digital de terreno tipo ASTER. Elaboración propia.....24

Figura 20. Modelo digital de terreno y superficie para la zona de estudio mediante fotogrametría. Elaboración propia.25

Figura 21. Modelo digital de terreno a partir de topografía. Elaboración propia.26

Figura 22. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT LiDAR_128

Figura 23. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDS LiDAR_128

Figura 24. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT CEM_1	29
Figura 25. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT FOTO_1	29
Figura 26. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDS FOTO_1	30
Figura 27. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT TOPO_1	30
Figura 28. Tamaños de malla asignados en el grupo 2 para cada modelo	31
Figura 29. Elevaciones obtenidas a partir del MDT LiDAR_2 y MDS LiDAR_2, respectivamente	32
Figura 30. Elevaciones obtenidas a partir del MDT CEM_2 y MDT FOTO_2, respectivamente	32
Figura 31. Elevaciones obtenidas a partir del MDS FOTO_2 y MDT TOPO_2, respectivamente	33
Figura 32. Cuenca de aportación al puente Copala. Elaboración propia.	34
Figura 33. Área de influencia en la cuenca con Polígonos de Thiessen. Elaboración propia.	35
Figura 34. Curvas idt para la cuenca Río Copala	38
Figura 35. Fotografías tomadas en campo del cauce y llanuras de inundación. Elaboración propia.	40
Figura 36. Distribución de los usos de suelo utilizados en la modelación. Elaboración propia.	42
Figura 37. Delimitación de la zona de estudio y condición de entrada y salida. Elaboración propia.	43
Figura 38. Perfil de terreno natural (Grupo 1)	44
Figura 39. Elevaciones de terreno natural en la sección el puente (Grupo 1)	45
Figura 40. Velocidades en la zona de estudio para el MDT LiDAR_1	45
Figura 41. Velocidades en la zona de estudio para el MDT CEM_1	46
Figura 42. Velocidades en la zona de estudio para el MDT FOTO_1	46
Figura 43. Velocidades en la zona de estudio para el MDT TOPO_1	47
Figura 44. Velocidades en la zona de estudio para el MDS LiDAR_1	47
Figura 45. Velocidades en la zona de estudio para el MDS FOTO_1	48
Figura 46. Tirantes en la zona de estudio para el MDT LiDAR_1	49
Figura 47. Tirantes en la zona de estudio para el MDT CEM_1	49
Figura 48. Tirantes en la zona de estudio para el MDT FOTO_1	50
Figura 49. Tirantes en la zona de estudio para el MDT TOPO_1	50
Figura 50. Tirantes en la zona de estudio para el MDS LiDAR_1	51
Figura 51. Tirantes en la zona de estudio para el MDS FOTO_1	51
Figura 52. Profundidades en la sección del puente (Grupo 1).....	53
Figura 53. Velocidad en la sección del puente (Grupo 1)	53
Figura 54. Profundidades en la sección aguas arriba (Grupo 1)	55
Figura 55. Velocidad en la sección aguas arriba (Grupo 1).....	55
Figura 56. Perfil de terreno natural (Grupo 2).....	56
Figura 57. Elevaciones de terreno natural en la sección el puente (Grupo 2)	57
Figura 58. Velocidades en la zona de estudio para el MDT LiDAR_2	57
Figura 59. Velocidades en la zona de estudio para el MDT CEM_2	58
Figura 60. Velocidades en la zona de estudio para el MDT FOTO_2	58
Figura 61. Velocidades en la zona de estudio para el MDT TOPO_2	59
Figura 62. Velocidades en la zona de estudio para el MDS LiDAR_2	59
Figura 63. Velocidades en la zona de estudio para el MDS FOTO_2	60
Figura 64. Tirantes en la zona de estudio para el MDT LiDAR_2.....	61
Figura 65. Tirantes en la zona de estudio para el MDT CEM_2	61
Figura 66. Tirantes en la zona de estudio para el MDT FOTO_2	62
Figura 67. Tirantes en la zona de estudio para el MDT TOPO_2.....	62
Figura 68. Tirantes en la zona de estudio para el MDS LiDAR_2	63
Figura 69. Tirantes en la zona de estudio para el MDS FOTO_2.....	63
Figura 70. Profundidades en la sección del puente (Grupo 2).....	65
Figura 71. Velocidad en la sección del puente (Grupo 2).....	65
Figura 72. Profundidades en la sección aguas arriba (Grupo 2)	67
Figura 73. Velocidades en la sección aguas arriba (Grupo 2).....	67

RESUMEN

Se evaluaron seis modelos digitales de elevación (MDE) obtenidos de diversas fuentes y con diferente resolución, siendo estos CEM (15 m), LiDAR (5 m), fotogrametría con dron (5 cm) y levantamiento topográfico (2 m). Se utilizaron modelos digitales de terreno (MDT) de las cuatro fuentes mencionadas, además de dos modelos digitales de superficie (MDS) para LiDAR y fotogrametría con dron.

Se llevaron a cabo dos análisis para cada MDE, agrupándolos en dos categorías para establecer igualdad de condiciones:

Grupo 1: Se determinaron los tamaños de malla considerando la resolución de cada MDE, priorizando la zona de propagación.

Grupo 2: Se empleó el mismo tamaño de malla para los seis MDE, estableciendo un tamaño mínimo de 15 m, que corresponde a la resolución más baja de los MDE evaluados.

En total, se realizaron doce modelaciones en el software Iber, delimitando un área de estudio de 88 hectáreas distribuidas en cuatro tipos de uso de suelo, cada uno con su respectivo coeficiente de rugosidad; y un gasto de diseño acorde a un periodo de retorno de 1,000 años.

Los resultados obtenidos en la sección del puente revelaron variaciones significativas en función del tipo de Modelo Digital de Elevación (MDE) utilizado. Los Modelos Digitales de Superficie (MDS) mostraron mayores errores relativos en el cálculo del tirante, con variaciones que oscilaron entre el 45% y el 55%. En contraste, el Modelo Digital del Terreno (MDT) del CEM presentó las mayores discrepancias en la estimación de la velocidad, con un error del 17%.

Se concluye que los resultados obtenidos utilizando el MDT generado a partir de un levantamiento topográfico son más precisos y cercanos a la realidad, debido a la exactitud del procedimiento empleado en su obtención.

INTRODUCCIÓN

La modelación numérica de la hidrodinámica fluvial requiere aplicar la teoría hidráulica del flujo en lámina libre junto con métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. Como los modelos numéricos son representaciones simplificadas de la realidad, es crucial que los modelos de flujo en ríos representen con precisión la topografía del cauce y las llanuras de inundación. Existen herramientas de modelización numérica que permiten realizar simulaciones en diferentes dimensiones: unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D) (Ochoa, y otros, 2016).

La representación del terreno ha sido una preocupación constante en la cartografía y en geociencias como la hidrología. Una representación precisa del terreno contribuye significativamente a mejorar los resultados obtenidos. La coherencia y la calidad de un modelo están determinadas por las características del terreno, la calidad de la información altimétrica inicial y el método utilizado para su generación (Martínez Ruíz, González Gámez, & Gordo Murillo, 2001, como se citó en Burgos & Salcedo, 2014).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son una representación de las elevaciones que conforman la superficie terrestre. En la actualidad, se dispone de diversas fuentes para obtener estos modelos, como la tecnología LiDAR (del inglés *Light Detection and Ranging*), la fotogrametría, los levantamientos topográficos de campo y otras técnicas avanzadas. Entre las características más importantes que afectan la calidad de la información obtenida se encuentran la resolución y la precisión vertical del modelo, que determinan su capacidad para representar con exactitud la topografía de la zona de interés.

Problemática

Los modelos digitales de elevación (MDE) son una representación de la superficie utilizados en análisis hidrológicos e hidráulicos. En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) pone a disposición el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) y algunos modelos con formato LiDAR, sin embargo, se debe considerar que la información contenida no es actual (2012 para ambas fuentes), por lo que resulta necesario recurrir a otras fuentes de información como la fotogrametría o levantamientos topográficos en campo, siendo este último el más preciso.

Justificación

“Los aspectos hidráulicos son fundamentales en los puentes fluviales: un buen conocimiento de estos hará el puente más seguro y económico” (Vide, 2003).

En la modelación numérica de la propagación de avenidas se requiere de información particular del sitio de estudio. Principalmente, es necesario conocer:

- Caudal de diseño
- Coeficientes de rugosidad
- Características topográficas del terreno (MDE)

Sin restar importancia a los aspectos antes mencionados, pero debido a los alcances del presente trabajo, resulta importante enfatizar sobre los modelos digitales de elevación.

Los modelos digitales de elevación se clasifican en dos tipos, modelo digital de superficie (MDS) y modelo digital de terreno (MDT), de acuerdo con el tipo de MDE que se utilice, los

resultados podrían mostrar una enorme variación. Además, es importante considerar la resolución de cada uno de ellos, ya que esta determinará la cantidad y calidad de información disponible para la zona de estudio.

En México, el INEGI, pone a disposición el modelo digital de terreno que lleva por nombre, Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) con resoluciones de 120, 90, 60, 30 y 15 m. Además, cuenta con modelos digitales de elevación tipo LiDAR con resolución de 5 m y 1.5 m. Si bien, esta información es totalmente gratuita, es indispensable considerar que no se encuentra actualizada, puesto que, es información obtenida en los años 2012, lo cual podría resultar en información poco confiable, ya que con el paso del tiempo las condiciones de la superficie terrestre han sufrido cambios importantes.

A nivel internacional es posible acceder a modelos digitales de elevación creados por la NASA (ASTER DEM), con resolución de 30 m, publicada en el año 2013. Sin embargo, al ser información obtenida de manera global, resulta aún más imprecisa (en México) que la proporcionada por INEGI.

Por lo anterior, es imprescindible recurrir a otros métodos de obtención de modelos digitales de elevación, principalmente, por el enorme requerimiento de información actual y precisa.

Hoy en día, la tecnología en el campo de la topografía ha tenido un gran impacto, haciendo posible la obtención de modelos digitales de elevación en un tiempo relativamente corto mediante el empleo de drones, aunque esto conlleva costos. Sin embargo, al igual que los MDE proporcionados por INEGI, se pueden tener algunas imprecisiones como resultado del procesamiento de información, puesto que, proporcionan información no solamente del terreno natural, sino también de los elementos que se encuentran en él, como son: casas, árboles, automóviles, etc. Si bien, es posible clasificar información irrelevante, no siempre es posible eliminar estas impurezas de forma completa, otro de los problemas es la alta probabilidad de obtener información errónea en cuerpos de agua.

Otra fuente de información para los modelos digitales de elevación es mediante levantamientos topográficos. Aunque este método suele implicar un costo más elevado y tiempos de ejecución más prolongados, ofrece una mayor precisión en los datos. Esta precisión adicional contribuye a mejorar la exactitud de los análisis y optimizar el diseño de infraestructuras.

Lo descrito en párrafos anteriores, realza la importancia del presente trabajo, cuya finalidad es comparar los resultados obtenidos a partir del uso de diferentes modelos digitales de elevación.

Objetivo

Analizar el comportamiento de las variables hidráulicas bajo las mismas condiciones y el empleo de topografía con diferente resolución y fuente de información.

Descripción del trabajo

El presente trabajo busca comparar los resultados obtenidos de las variables hidráulicas, a partir de modelaciones numéricas 2D con el software Iber, para el puente Copala ubicado en el municipio de Copala, Guerrero. Para ello, se empleará información topográfica de diferente resolución proveniente de fuentes oficiales mexicanas (CEM y LiDAR de INEGI), fotogrametría y topografía de detalle.

De tal manera que, se mantendrá una igualdad de condiciones para la zona de estudio, pero haciendo uso de seis modelos digitales de elevación de diferente fuente y resolución.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes, abarcando aspectos topográficos y detallando las diferentes fuentes de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y sus resoluciones. Además, ofrece un panorama general sobre las ecuaciones de gobierno y los esquemas numéricos necesarios para la modelación hidráulica de ríos utilizando el software Iber.

Capítulo 2: Tiene como objetivo proporcionar una visión detallada de la zona de estudio, incluyendo su localización geográfica e hidrológica del Puente Copala, clima e hidrografía de la subcuenca del río Copala. También se presenta la información disponible para el estudio, que incluye el uso del suelo y cobertura vegetal, estaciones climatológicas y la topografía basada en fuentes oficiales (INEGI, 2012) y de campo.

Capítulo 3: Describe la información utilizada en las simulaciones, incluyendo los MDE y tamaños de malla asignados, la obtención del gasto de diseño y los coeficientes de rugosidad aplicados, basados en las observaciones de campo y en los valores propuestos en el libro de Ven-Te Chow (Chow, 2004).

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan los resultados de las 12 simulaciones realizadas, mostrando una comparación de los resultados de elevación y de las variables hidráulicas (velocidad y tirante) obtenidas en el centro de la sección del Puente Copala.

1 ANTECEDENTES

Este capítulo detalla la metodología empleada para la obtención de los Modelos Digitales de Elevación. Se incluyen fuentes de datos disponibles gratuitamente, como los proporcionados por el INEGI, así como aquellos generados mediante métodos propios, como la fotogrametría con dron y levantamientos topográficos. También se aborda la resolución espacial, la cual varía dependiendo del método de obtención de la información utilizada para la creación de los MDE. Además, se discuten las ecuaciones utilizadas por el software Iber.

1.1 Aspectos topográficos

1.1.1 Modelos digitales de elevación del INEGI

“Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo” (INEGI, s.f.).

Los modelos digitales de elevación se clasifican en dos tipos:

Modelo digital de superficie (MDS): representa todos los elementos existentes en la superficie terrestre, como son: vegetación, infraestructura, edificaciones y el terreno natural.

Modelo digital de terreno (MDT): es una recreación del terreno, mediante interpolaciones, una vez que han sido removidos todos los elementos ajenos (vegetación, infraestructura, edificaciones, entre otros).

INEGI pone a disposición los dos tipos de modelos digitales de elevación, creados a partir de dos métodos, representados mediante el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) y el LiDAR, cuya diferencia es el método empleado en su generación y consecuentemente su resolución y exactitud.

1. El Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) es adquirido mediante el método fotogramétrico de correlación cruzada. La técnica de correlación cruzada de imágenes se fundamenta en la comparación de imágenes digitales a partir de pares estereoscópicos de fotografías aéreas digitalizadas, con este método es posible obtener modelos de tipo terreno y superficie con resolución de 15 m, exactitud en la vertical de 3 m a una escala de 1:20,000 (INEGI, s.f.).
2. Tecnología LiDAR (acrónimo en el idioma inglés de *Light Detection and Ranging*), esto es, “Detección y Medición a través de la Luz”): LiDAR es la combinación de tecnologías diseñadas para la obtención de coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), de puntos del terreno mediante un telémetro láser montado en un avión. A partir de estos datos llamados “Nube de puntos LiDAR ajustada al terreno” se pueden elaborar modelos digitales de elevación de alta resolución sub-métricos, tanto del terreno como de la superficie de este (objetos naturales o artificiales). Las resoluciones obtenidas a partir de este método se encuentran entre 1 a 15 metros, con exactitud en la vertical de 15 a 90 cm y escala cartográfica de 1:10,000 y 1:20,000 (INEGI, s.f.).

1.1.2 Fotogrametría (Satélites y drones)

“La fotogrametría es la técnica cuyo objetivo es determinar las dimensiones y posición de objetos en el espacio a partir de imágenes fotográficas, esto se consigue a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, por medio de la

fotogrametría podemos obtener modelos digitales de terreno que pueden ser utilizados para el diseño de vías” (Del Río, Gómez, López, Saenz, & Espinoza, 2020, pág. 3). Es posible obtener este tipo de información a partir de los satélites colocados en órbita o bien, haciendo uso de la tecnología disponible hoy en día, como los vehículos aéreos no tripulados.

Uno de los proyectos con mayor rendimiento actualmente y al cual se le podría atribuir el comienzo del estudio de la superficie terrestre mediante imágenes de satélites, pertenece al grupo de satélites conocido como LandSat, cuya capacidad de giro lateral, aumenta la resolución temporal. Los satélites se encuentran conformados con sensores, así como aplicaciones que hacen posible la obtención de imágenes satelitales sujetas a diferentes resoluciones ligadas a la capacidad de los sensores para discriminar información que no cumple con el objetivo esperado en la creación de modelos digitales de terreno (Díaz, 2013).

El vehículo aéreo no tripulado, mejor conocido como dron, actualmente representa una gran reducción en tiempos de ejecución, así como, menores costos, lo cual refleja grandes beneficios para los distintos campos de estudio en que se utiliza. Considerando la finalidad del presente estudio, es importante resaltar el gran avance tecnológico que ha tenido el uso de éstos para la realización de levantamientos topográficos (fotogrametría).

➤ **Obtención de información**

A continuación, se describen brevemente los pasos a seguir para la obtención de imágenes aéreas, particularmente, para la zona de estudio utilizando un vehículo aéreo no tripulado.

1. Recorrido de la zona de estudio: Es importante conocer la zona para la cual se realiza el estudio, ya que, de esta manera se puede recolectar información de interés, como el tipo de uso de suelo y vegetación, posibles obstrucciones que impidan recopilar información del terreno natural, elementos que provoquen alteración en los resultados obtenidos, zonas ideales para la colocación de puntos de control, entre otros.
2. Colocación de puntos de control terrestre: Es indispensable que estos se ubiquen en zonas despejadas permitiendo su identificación a través de las fotografías tomadas durante el vuelo, preferentemente con colores que no pierdan nitidez ante la exposición solar. Para la zona de estudio se colocaron en zonas altas y bajas, distribuidos de tal manera que, sean envolventes del área de estudio misma para la que realizará el plan de vuelo (Figura 1). Para el procesamiento es importante conocer las coordenadas de cada uno de los puntos de control, este se obtendrá haciendo uso de un GPS.



Figura 1. Colocación de puntos de control. Elaboración propia.

3. Plan de vuelo: Se realiza a partir de algún software, en este caso se emplea PIX4D, en el cual se asigna la zona de mapeo que es recorrida por el dron, además, es necesario ingresar parámetros del vuelo como, velocidad, altitud, ángulo de la cámara, etc.
4. Ejecución del vuelo: El dron comienza el recorrido definido en el plan de vuelo mencionado anteriormente, realizando tomas fotográficas, los pixeles obtenidos tienen resoluciones que alcanzan hasta 1 cm, las cuales se respaldan automáticamente en la memoria del dron.



Figura 2. Dron utilizado para la obtención de fotogrametría. Elaboración propia.

➤ Procesamiento de los datos

Una vez obtenidas las imágenes aéreas mediante el vuelo de dron, se realiza el procesamiento con algún software de fotogrametría, en nuestro caso se utilizó Agisoft Metashape. A continuación, se describe el procedimiento:

- A partir de un nuevo proyecto, se cargan al programa cada una de las imágenes obtenidas del plan de vuelo, estas son orientadas con una calidad alta y se asigna la proyección de acuerdo con la zona de estudio.
- Se importan las coordenadas obtenidas por medio del GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), para cada uno de los puntos de control colocados. Dichos puntos se colocan como marcadores, los cuales deben ser orientados con los puntos de control terrestre que se visualizan en las imágenes, este paso se realiza para todos los marcadores y en las imágenes en que sea necesario.
En la Figura 3, se observa la colocación del punto de control 1 (PC 01), tal como se describió anteriormente, este se colocó en una zona alta y visible, correspondiente a la superficie de rodamiento del puente.
- Se realiza la optimización de los puntos de control y se crea la nube de puntos densa con una calidad alta.
- Se clasifican los puntos de terreno, cuyo objetivo es omitir en el procesamiento todos los elementos que no conforman el terreno, para finalmente generar diversos productos tales como un ortomosaico y un modelo digital de elevaciones.

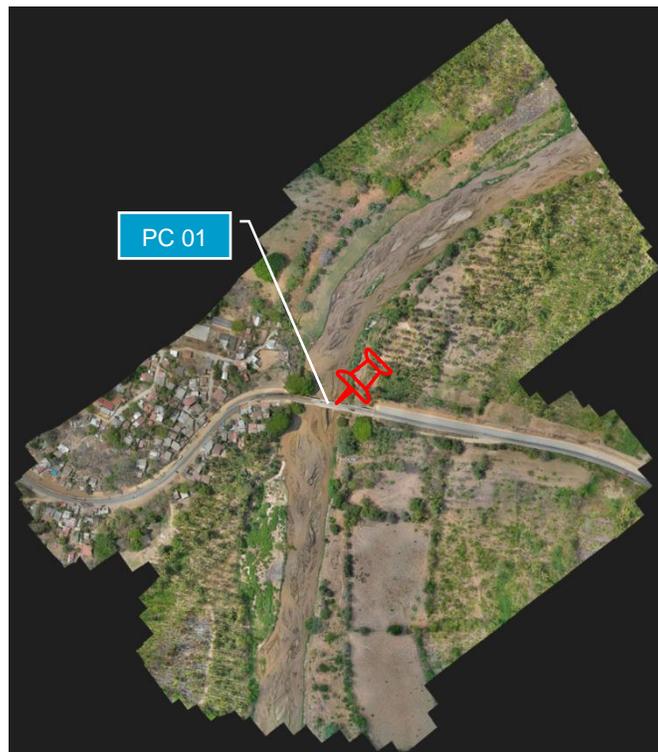


Figura 3. Ortofoto obtenida del procesamiento de imágenes. Elaboración propia.

1.1.3 Técnicas de levantamiento topográfico en campo

El levantamiento topográfico se encuentra conformado por métodos directos e indirectos, el primero hace uso, principalmente, de estación total y GPS, también conocido como GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), mientras que en el segundo podemos encontrar a la fotogrametría.

Estación total: A grandes rasgos, se podría describir como el equipo que integra 3 importantes funciones; las que realiza un teodolito electrónico, medidor de distancias electrónico y un microprocesador que ayuda a la obtención de coordenadas rectangulares. Es utilizada tanto, en levantamientos planimétricos como altimétricos, obteniendo datos rápidos y precisos (Pachas L., 2009).

La obtención de datos involucra dos elementos, el primero se encuentra incorporado al equipo, consta de un rayo láser y basta con apuntar hacia el punto deseado y sencillamente, con un clic se obtiene la información, el uso de este se involucra principalmente en zonas de difícil acceso y con poca vegetación. El segundo elemento se basa en el empleo de prismas o tarjeta reflectora, el procedimiento es básicamente el mismo que el anterior, sin embargo, el punto deseado es el que se encuentra marcado en dichas herramientas, comúnmente el centro de estas, considerando la altura a la que se encuentra la referencia de dicho objeto.

GPS de alta precisión (GNSS geodésico): Torres y Villate (2000) lo definen como un sistema de medición tridimensional que utiliza señales de radio que proporciona el sistema NAVSTAR, esta constelación está integrada por 24 satélites artificiales que orbitan la Tierra en 12 horas. Esto permite que durante las 24 horas estén visibles al menos 5 a 8 satélites desde cualquier punto del planeta. Los satélites NAVSTAR, orbitan la tierra en 6 planos orbitales, de 4 satélites cada uno, a una altura aproximada de 20.2 Km. Como sistema, está integrado por tres segmentos: espacial, de control y el de usuario.

En el segmento espacial se encuentran los satélites, encargados de emitir señales de radio desde el espacio. La red de estaciones de monitoreo, conocida como segmento de control, tiene la responsabilidad de supervisar el funcionamiento de satélites y relojes atómicos. Además, se encarga de determinar las coordenadas precisas y actúa como un canal para transmitir la información generada por los satélites. Y el segmento usuario es el instrumento encargado de recibir y decodificar la señal de satélite, entregando al usuario las coordenadas del punto deseado, son empleados para el posicionamiento estático y cinemático (Pachas L., 2009).

El ultimo segmento, denominado usuario, se conforma principalmente, por dos receptores, conocidos como Base y Rover, además, cuenta con una interfaz conformada con SIG y navegación, permitiendo la obtención de datos de manera rápida y precisa.

➤ Obtención de información

A continuación, se describe el levantamiento topográfico realizado para la zona de estudio, mediante el empleo de estación total marca Sokkia y un GNSS marca E-Survey:

- Se realiza un recorrido para conocer la zona de estudio, ubicando zonas altas, edificios, árboles y torres de electricidad, debido a que, dichos elementos podrían afectar la recepción de señal.
- Se realiza la construcción de 2 mojoneras de concreto, denominadas Banco de Nivel 1 (BN1) y Banco de Nivel 2 (BN2). Estos bancos servirán como referencia para establecer la línea de control geodésico. (Figura 4).
- En el banco de nivel (BN1) se coloca el receptor nombrado BASE, el cual se encarga de recibir, transmitir y guardar las señales emitidas por diferentes satélites (Figura 4).



Figura 4. Colocación de BASE en BN1. Elaboración propia.

- En el BN2, se coloca el receptor móvil (ROVER) sobre una baliza, el cual recibe señales del receptor fijo (BASE). Este sistema incluye una interfaz, comúnmente conocida como COLECTORA, que facilita la comunicación entre el usuario y el aparato. La COLECTORA permite visualizar la zona de estudio en su pantalla mediante un mapa base, muestra el error horizontal y vertical de las mediciones, y permite observar los datos capturados en tiempo real, entre otras funciones. El receptor ROVER se posiciona de manera fija durante un período de 30 minutos sobre el BN2, para obtener un punto estático preciso (Figura 5).



Figura 5. Colocación de ROVER en BN2. Elaboración propia.

- Posteriormente, se llevará a cabo el postproceso de los datos crudos obtenidos del receptor BASE y del receptor ROVER, con el fin de vincular los datos con una estación de INEGI.
- La poligonal de apoyo, que se utilizará para la nivelación del levantamiento topográfico, se construye a lo largo del eje del río, aprovechando la época de estiaje. Para cada uno de los puntos que la conforman, se obtienen las coordenadas utilizando tanto la estación total como el GPS en modo RTK (Figura 6).



Figura 6. Levantamiento de poligonal de apoyo con puntos RTK. Elaboración propia.

- El trabajo con la estación total inicia aguas arriba del cauce y avanza hacia aguas abajo. Se seleccionan puntos estratégicos desde los cuales se puede observar la mayor cantidad de elementos de la zona de estudio, realizando levantamientos de secciones cada 20 metros.
- Se realizan todos los cambios necesarios de estación, orientando el equipo a través de coordenadas conocidas o supuestas para asegurar la precisión en las mediciones.
- Por medio del lente que conforma a la estación total, se ubican los puntos de interés tomando como referencia un prisma, tarjeta reflectora o simplemente utilizando el láser, se obtiene el dato y este se guarda de manera automática en la memoria del equipo (Figura 7).



Figura 7. Levantamiento con estación total. Elaboración propia.

➤ **Procesamiento de los datos**

Se realiza el postproceso de los datos para obtener coordenadas precisas vinculadas a INEGI. Este proceso se basa en la información del receptor tipo BASE y, para mejorar la precisión, se lleva a cabo una corrección de datos utilizando el levantamiento estático de los bancos de nivel.

El levantamiento obtenido con la estación total debe ser georreferenciado a la ubicación exacta determinada durante el postproceso. Una vez establecida la posición precisa del levantamiento, se utiliza software de dibujo CAD para importar los datos y proceder con su análisis y representación gráfica.

El levantamiento realizado con estación total se puede exportar desde el equipo a través de una memoria USB e importarlos al proyecto.

Finalmente, con ayuda del software se produce una red de triángulos entre los puntos (X, Y, Z), que ayuda a obtener una superficie de la zona de estudio (Figura 8).

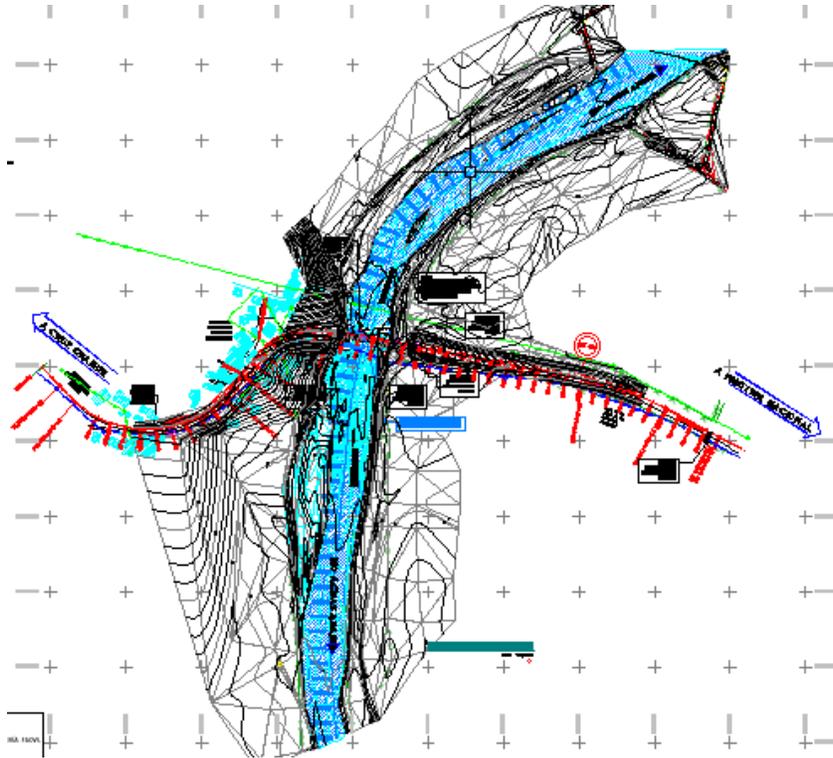


Figura 8. Planta del levantamiento para la zona de estudio. Elaboración propia.

1.1.4 Resolución espacial

De acuerdo con Marquina y Mogollón (2018) (Marquina & Mogollón R., 2018) el término resolución espacial se refiere al objeto más pequeño que puede ser registrado por un sensor y posteriormente detectado en una imagen por el intérprete. El avance tecnológico en la obtención de imágenes satelitales a conducido al desarrollo de sensores que proporcionen mejores resoluciones, ayudando a la extracción de más información de las zonas de interés (Tabla 1).

Tabla 1. Resoluciones y áreas mínimas registradas en algunos sensores (Marquina & Mogollón R., 2018).

Sistema	Resolución (m)	Ha/Píxel	Lado (m)
LandsatMss	56x74	0.44	264
Landsat TM	30x30	0.09	118
Spot Mult	20x20	0.04	77
Spot Pan	10x10	0.01	45
Miranda PMC	2.5x2.5	0.0006	2.45
IKONOS	1x1	0.0001	1

En México, el INEGI emplea tres métodos en la obtención de MDE:

1. Generación a partir del método fotogramétrico de correlación cruzada: se basa en la comparación de sub-imágenes digitales homólogas, estas se correlacionan a través

de su respectiva información radiométrica y se determinan áreas homólogas. Los modelos digitales a partir de este método son de 15 metros.

2. Tecnología LiDAR: se originan de datos conocidos como Nube de puntos LiDAR ajustada al terreno, logrando resoluciones de hasta 1.5 metros.
3. Digitalización de cartografía topográfica: se obtienen a partir de la conversión de información proporcionada por las curvas de nivel, el producto son modelos digitales de elevación con resoluciones de 10 a 100 metros.

La resolución espacial dependerá del uso que se pretenda dar a la imagen aérea, si el estudio requiere de una mayor precisión conviene recurrir a la obtención de modelos digitales de elevación a partir de levantamientos con dron, estación total o GPS, en donde la resolución obtenida dependerá del nivel de detalle que se tenga durante la ejecución.

1.2 Modelación hidráulica en ríos

Las modelaciones hidráulicas son herramientas valiosas para simular y comprender el comportamiento de situaciones reales mediante la creación de modelos. Estos modelos permiten la representación detallada de estructuras hidráulicas, como presas, puentes y sistemas de drenaje, entre otros.

1.2.1 Ecuaciones de gobierno (Sanz-Ramos, y otros, 2022)

Desde sus inicios, el módulo hidrodinámico de Iber utiliza las ecuaciones de Saint Venant 2D (Sanz-Ramos, y otros, 2022).

- **Ecuaciones de Saint Venant 2D**

Los cálculos en Iber para dos dimensiones se realiza mediante ecuaciones de aguas someras (Ecuaciones de Saint Venant), el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f$	<i>Ecuación 1</i>
$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^{7/3}} q q_x$	<i>Ecuación 2</i>
$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^{7/3}} q q_y$	<i>Ecuación 3</i>

Donde h es el tirante o profundidad de agua, q_x y q_y son las dos componentes del caudal unitario, $|q|$ es su módulo, R es la intensidad de precipitación, f es la tasa de infiltración, z_b es la cota de fondo, g es la aceleración de la gravedad, n es el coeficiente de Manning

1.2.2 Esquemas numéricos

La solución de las ecuaciones hidrodinámicas se da a partir del empleo del método de volúmenes finitos, siendo de los más utilizados en dinámica de fluidos computacional. En la aplicación de este método es necesario realizar la discretización espacial del dominio a estudiar, por lo cual se divide el dominio de estudio en pequeñas celdas (Bladé, y otros, 2014).

1.2.3 *Software de uso libre*

Iber es un software de uso libre empleado en simulaciones hidráulicas bidimensionales en el que se considera flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, así como en procesos medioambientales en hidráulica fluvial.

En un inicio, Iber contaba con tres módulos de cálculo principales: módulo de hidrodinámica, turbulencia y transporte de sedimentos, sin embargo, a través del tiempo se han tenido actualizaciones importantes del software, implementando nuevos módulos como el módulo de rotura de presas y balsas, calidad de aguas, hábitat hidráulico, drenaje urbano y erosión de suelos. Además, se han realizado mejoras a los módulos ya existentes, así como a la interfaz y el tiempo de cálculo en las simulaciones (Sanz-Ramos, y otros, 2022).

2 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a un tramo de cauce aguas arriba y aguas abajo del puente Copala de la carretera Federal MEX-200 que cruza el río Copala; en dicha zona, en época de estiaje el cauce presenta poca sinuosidad, fondo plano, así como tirantes máximos de aproximadamente 0.5 m. Se ubica dentro de la Región Hidrológica Río Copala (RH20Db) en el estado de Guerrero.

2.1 Localización

El puente en estudio se localiza en las coordenadas geográficas 16°36'43.22" latitud norte y 98°59'49.44" longitud oeste, se ubica en el municipio de Copala, Guerrero, aproximadamente a 6.11 km de la línea de costa. Se encuentra conformado por cuatro claros de 23.8 m cada uno, así como pilas con diámetro promedio de 1.3 m. El nivel de rasante se ubica a los 14 msnm y la cota inferior de losa a los 12 msnm (Figura 9).



Figura 9. Fotografía tomada de aguas arriba hacia aguas abajo. Fuente: Elaboración propia.

El río Copala se localiza dentro de la región hidrológica RH20 Costa Chica-Río Verde, delimitado por la subcuenca RH20Db R. Copala (Figura 10).

2.2 Medio físico

2.2.1 Clima

De acuerdo con la información almacenada por las estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, la temperatura media máxima anual se encuentra en un rango que va de 31 °C hasta 35 °C (Figura 11). Los meses más cálidos son abril y mayo, cuando las temperaturas máximas diarias pueden alcanzar los 42 °C.

La temperatura media mínima anual en la subcuenca es de aproximadamente 20 °C (Figura 12). Los meses más fríos son enero y febrero, cuando las temperaturas mínimas diarias han descendido hasta los 8 °C.

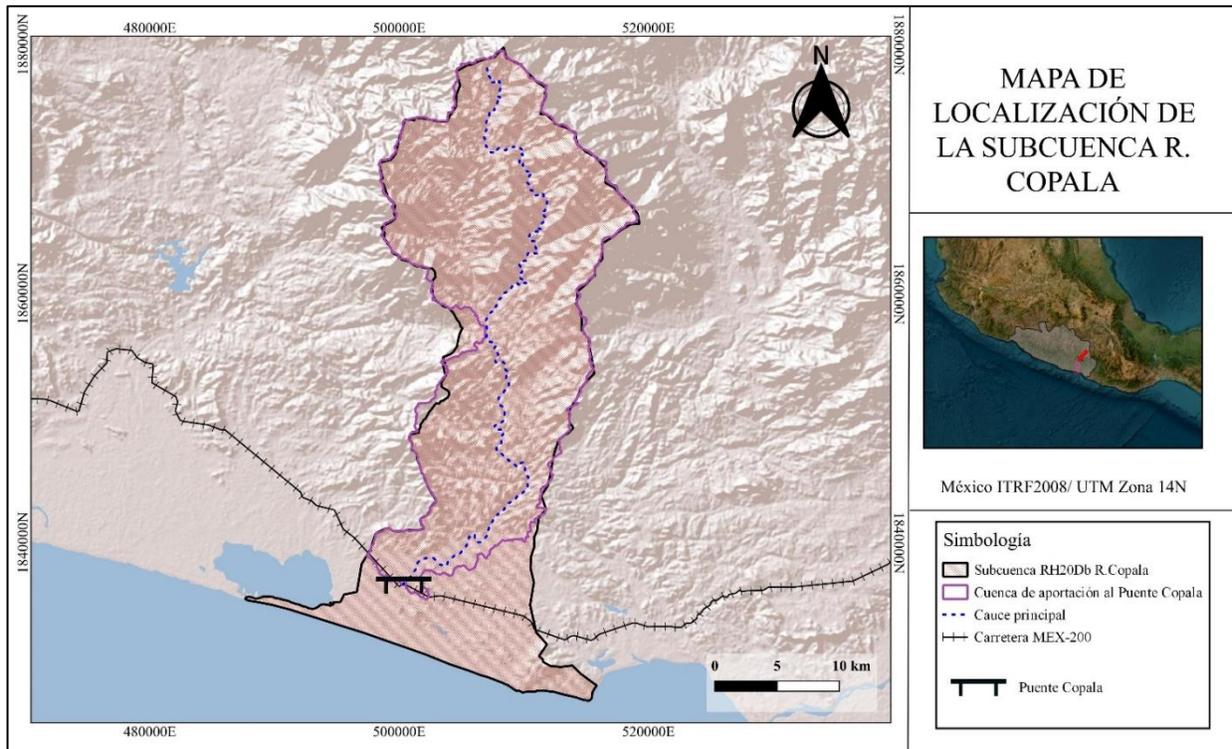


Figura 10. Localización de la subcuenca Río Copala. Elaboración propia.

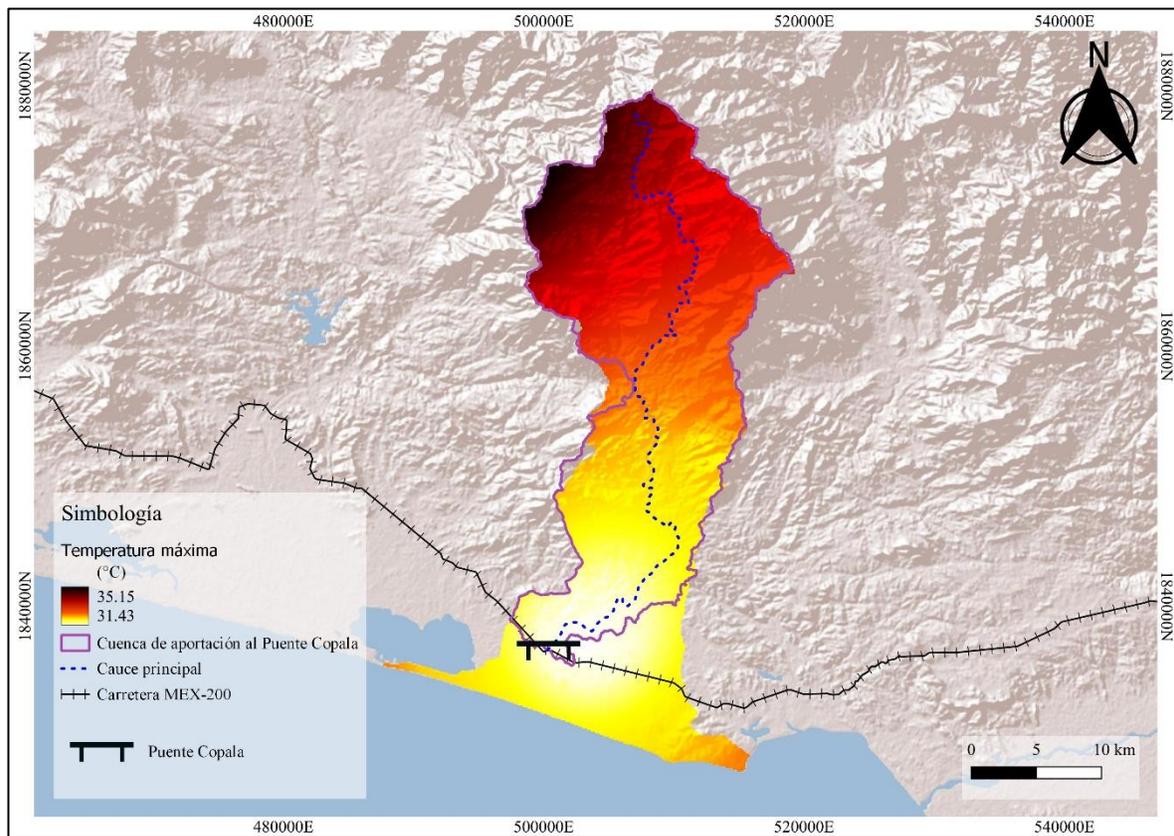


Figura 11. Temperatura máxima media anual en la zona de estudio. Elaboración propia.

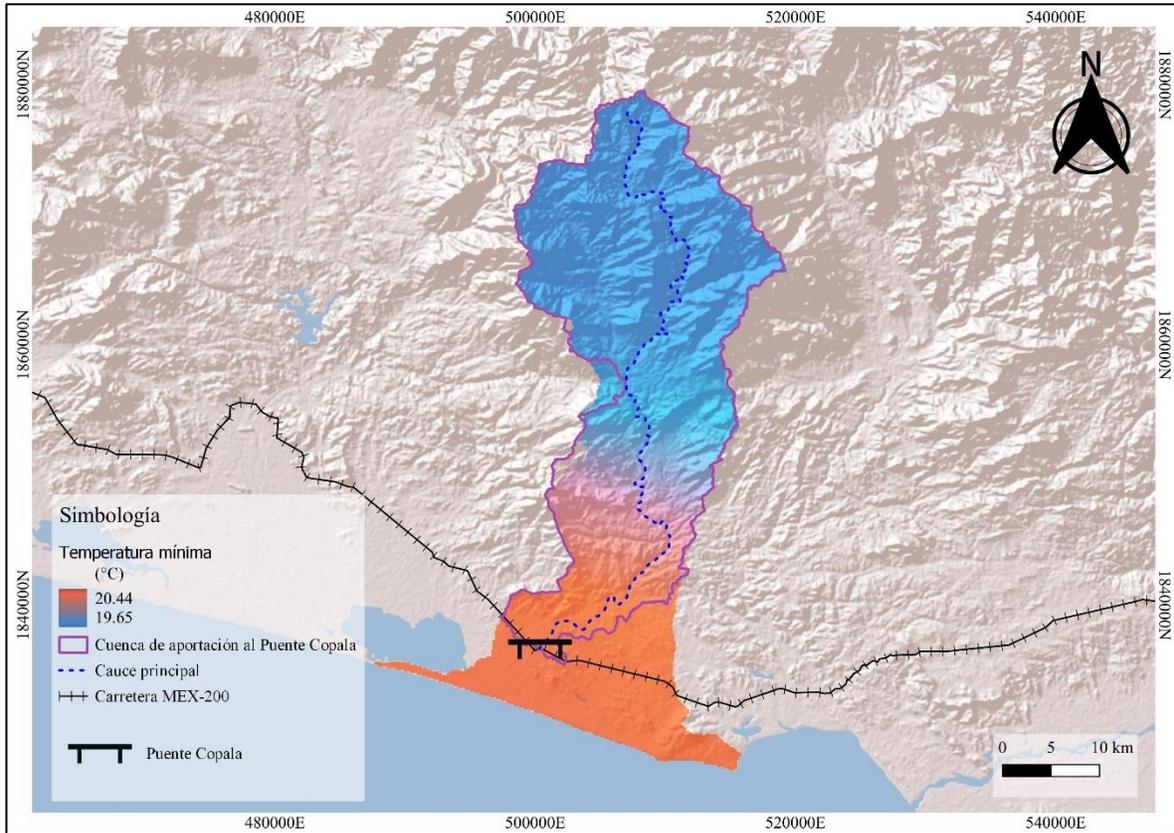


Figura 12. Temperatura mínima media anual en la zona de estudio. Elaboración propia.

La precipitación media anual en la subcuenca R. Copala se distribuye espacialmente, con aproximadamente 1,300 mm al sur y alcanzando los 1,700 mm hacia el norte, siendo esta última zona la que percibe mayores precipitaciones. Los meses de mayor lluvia son junio, julio, agosto y septiembre donde se han registrado lluvias de hasta 1,250 mm al mes (Figura 13).

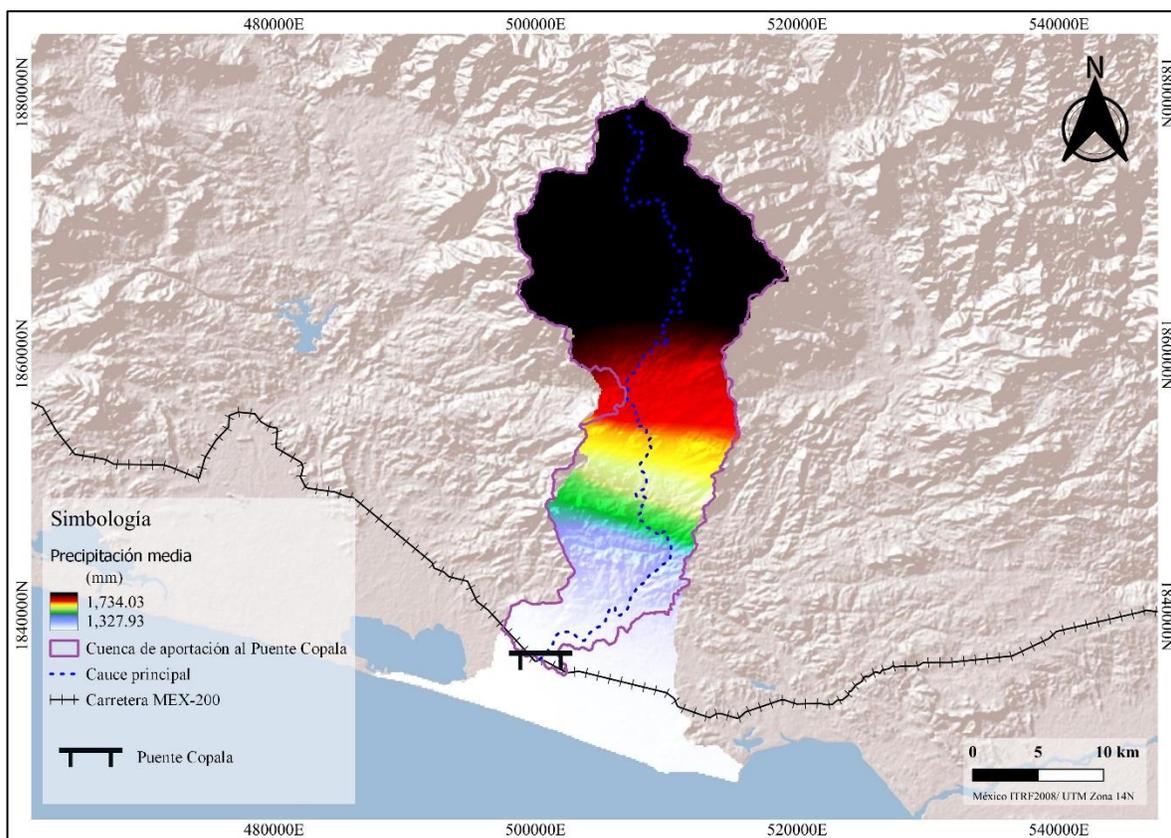


Figura 13. Precipitación media anual. Elaboración propia.

2.2.2 Hidrografía

La subcuenca R. Copala, pertenece a la cuenca RH20 Costa Chica-Río Verde. Dentro de la superficie existen corrientes provenientes de las partes altas. El cauce principal de la subcuenca es el Río Copala, que nace en la porción más septentrional, en la Sierra Copainola; atraviesa las poblaciones Paso de Salinas, Atlixco y Copala, primero en dirección norte-sur, luego NE-SO para finalmente retomar su dirección original, hasta desembocar en el mar, en la zona del estero Los Draguitos (CONAGUA, 2023) (Figura 14).

Como fuentes de agua subterránea la subcuenca cuenta con 4 acuíferos los cuales cuentan con disponibilidad. La recarga media anual para el acuífero Copala es del orden de 19.6 millones de m^3 , sin embargo, el volumen de extracción es de 2.98 millones de m^3 y la descarga anual comprometida de 10.1 millones de m^3 , lo que produce una disponibilidad media anual de aproximadamente 6.52 millones de m^3 al año (Figura 14).

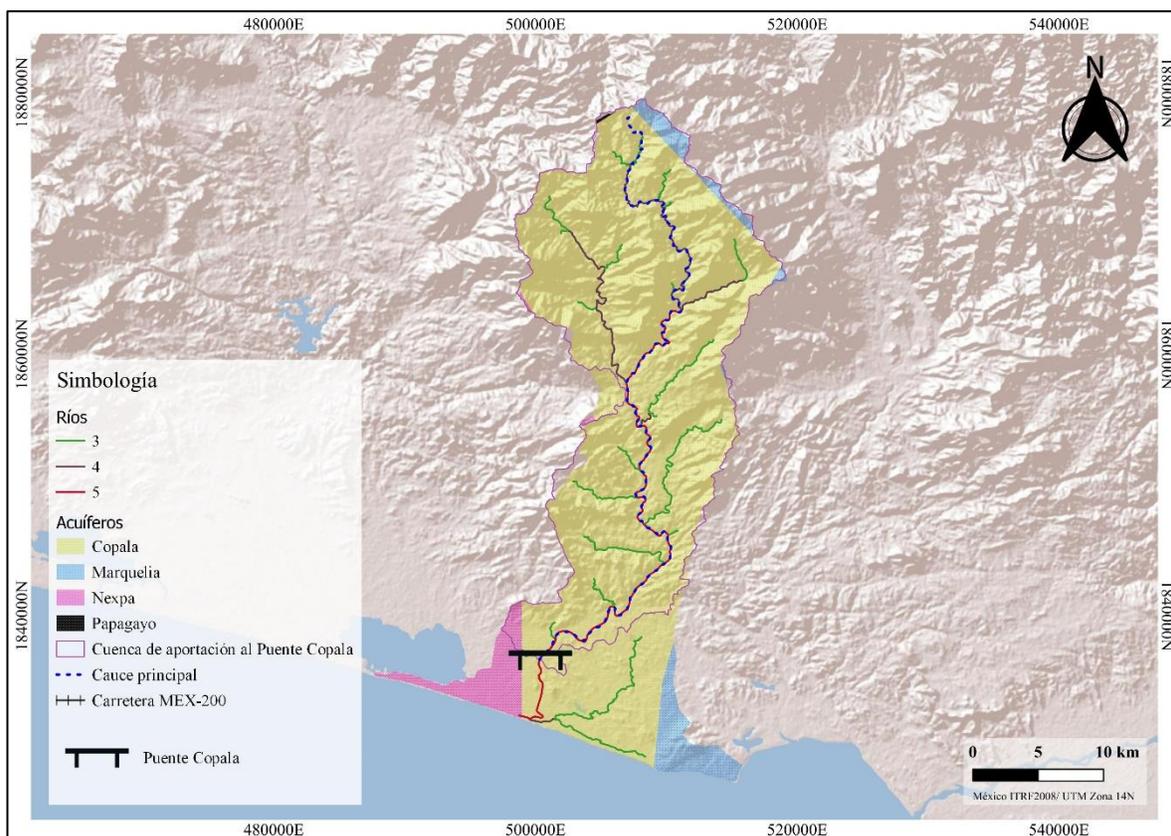


Figura 14. Agua superficial y subterránea. Elaboración propia.

2.3 Información disponible

2.3.1 Uso de suelo y cobertura vegetal

La subcuenca se encuentra cubierta por 22 tipos de uso de suelo y vegetación, principalmente por bosque de encino – pino que representa un 19.3 % del área de estudio, seguido por pastizal cultivado con un 17 % y finalmente por vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un 16.1 %. La Tabla 2 y la Figura 15 muestran el área que abarca y la distribución espacial de cada uno de los tipos de uso de suelo y vegetación.

Tabla 2. Usos de suelo y vegetación en la subcuenca.

Uso de suelo y vegetación	Área (%)
Agricultura de riego semipermanente y permanente	1.1%
Agricultura de temporal anual	7.3%
Agricultura de temporal anual y permanente	4.5%
Asentamientos humanos	0.3%
Bosque de encino-pino	19.3%
Bosque de pino-encino	5.9%
Cuerpo de agua	0.3%
Manglar	0.7%
Pastizal cultivado	17.0%
Pastizal halófilo	1.0%
Pastizal inducido	0.2%

Uso de suelo y vegetación	Área (%)
Sabanoide	2.7%
Tular	1.1%
Vegetación de dunas costeras	0.2%
Vegetación halófila hidrófila	0.2%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	1.6%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	7.2%
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	3.2%
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	9.2%
Vegetación secundaria arbustiva de manglar	0.2%
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	16.1%
Zona urbana	0.5%

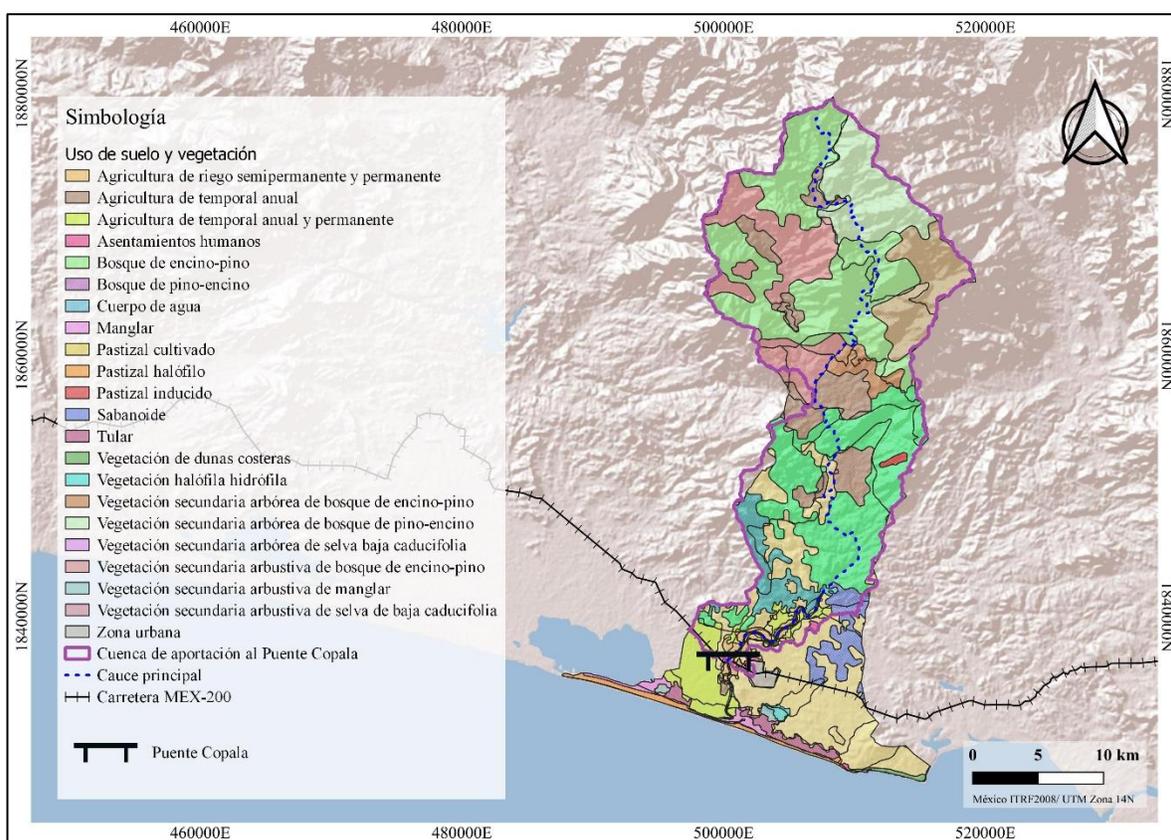


Figura 15. Uso de suelo y vegetación secundaria. Elaboración propia.

2.3.2 Estaciones climatológicas

De las estaciones climatológicas cercanas a la subcuenca Río Copala, se seleccionaron aquellas con una longitud de registro mayor a 25 años. Para la zona de estudio se utilizaron las estaciones “Copala”, “Ayutla” y “Coacoyulichan” (Tabla 3 y Figura 16).

Tabla 3. Ubicación de estaciones climatológicas utilizadas

Nombre	Clave	Longitud	Latitud	Años de registro	Precipitación media
Copala	12022	98.97 O	16.61 N	59	1,352.42
Ayutla	12012	99.09 O	16.96 N	45	1,551.81
Coacoyulichan	12214	98.93 O	16.79 N	26	1,674.38



Figura 16. Distribución espacial de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio. Elaboración propia.

2.4 Topografía

2.4.1 Información oficial

En la Figura 17 se presenta el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del estado de Guerrero con una resolución de 15 m. La Figura 18, que presenta el MDT (a la izquierda) y el MDS (a la derecha), muestra la carta LiDAR con clave e14d61d1, que tiene una resolución de 5 metros. Ambos datos fueron obtenidos de INEGI y utilizados en el caso de estudio de este trabajo.

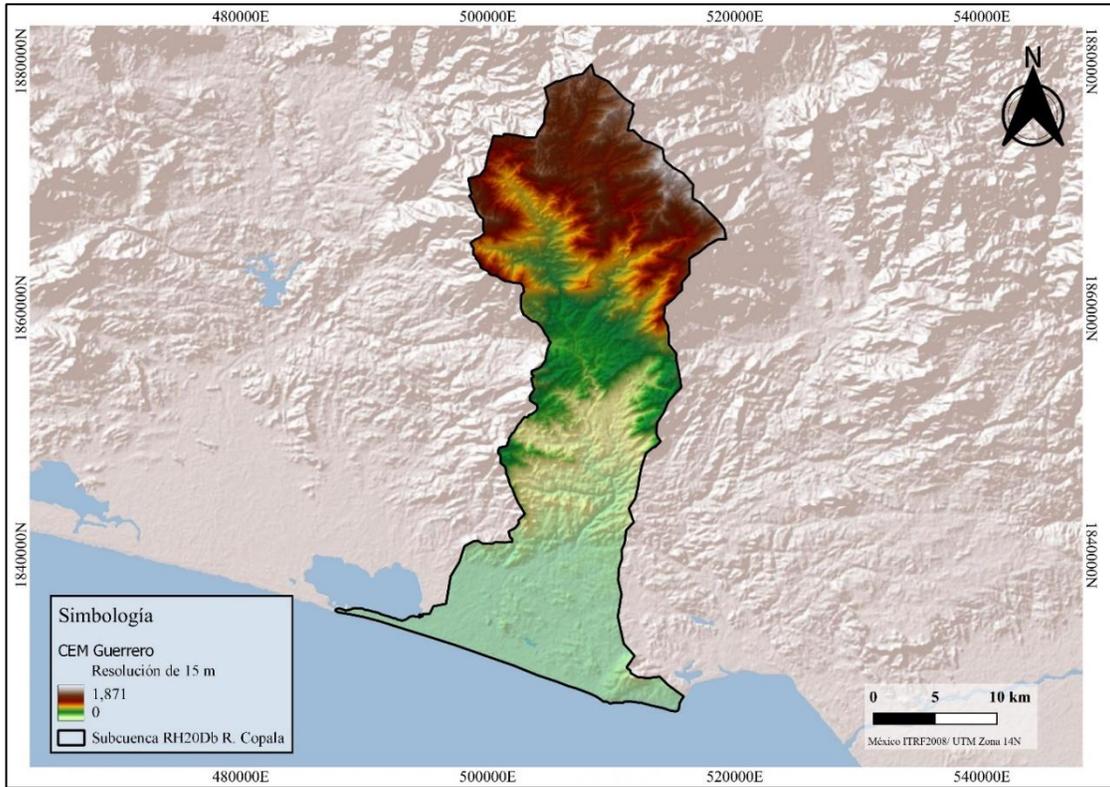


Figura 17. CEM de Guerrero utilizado en la zona de estudio. Elaboración propia.

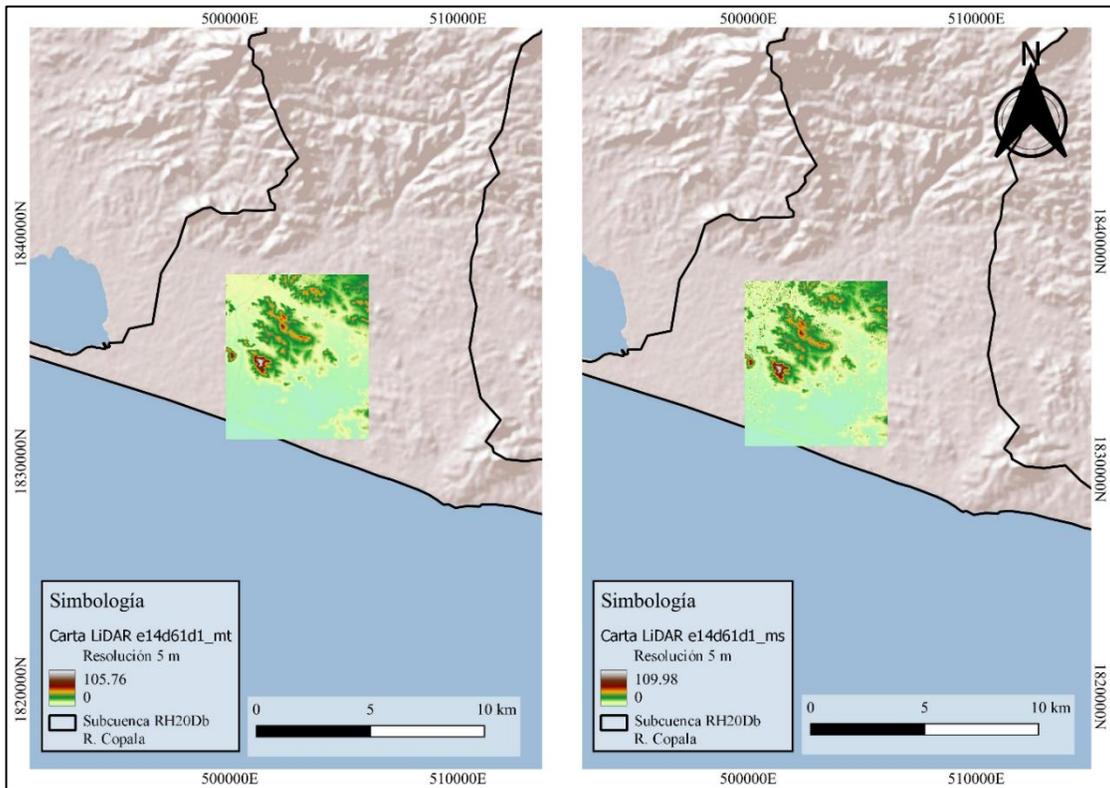


Figura 18. Cartas LiDAR utilizadas en la zona de estudio. Elaboración propia.

La NASA, a través de su plataforma proporciona modelos digitales de elevación globales con resolución espacial de aproximadamente 30 metros obtenidos de la versión 3 del radiómetro de reflexión y emisión térmica espacial avanzado Terra (ASTER) (Figura 19).

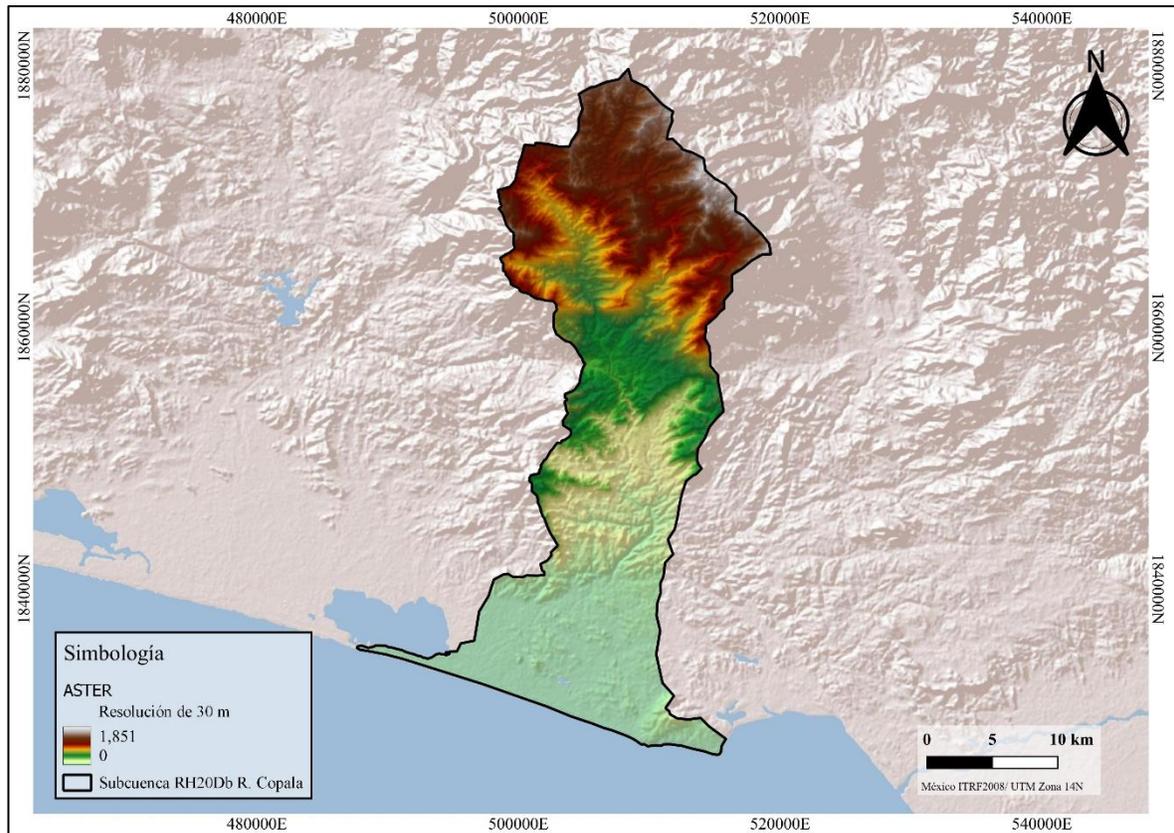


Figura 19. Modelo digital de terreno tipo ASTER. Elaboración propia.

2.4.2 Información de campo

En la zona de estudio se cuenta con modelos digitales de elevación obtenidos por cuenta propia, se dispone del modelo digital de terreno y superficie con resolución de 5 cm obtenido de una fotogrametría y de un modelo digital de terreno creado a partir del levantamiento topográfico con resolución de 2 metros.

La fotogrametría se realizó en un área que abarca aproximadamente 900 metros de longitud y 330 metros de ancho del cauce, cubriendo así un total de 30 hectáreas. El vuelo duró aproximadamente 45 minutos, durante los cuales se capturaron 1,236 fotografías a una elevación de 90 m. La Figura 20 muestra los MDE obtenidos por medio de la fotogrametría.

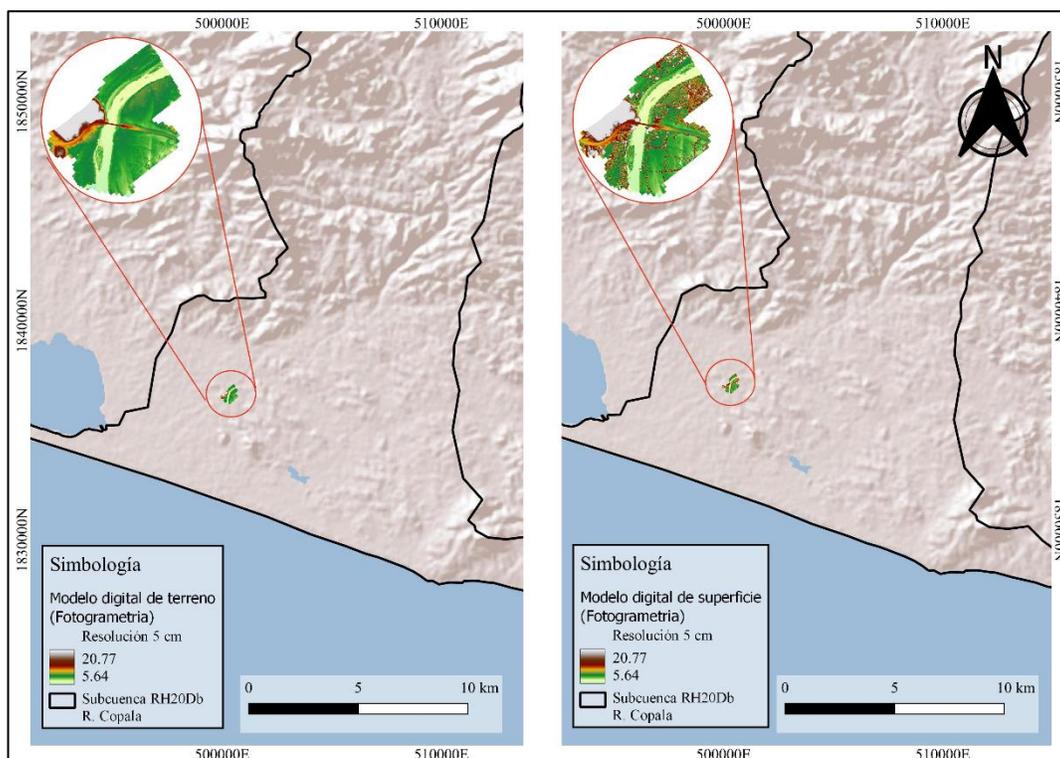


Figura 20. Modelo digital de terreno y superficie para la zona de estudio mediante fotogrametría. Elaboración propia.

El modelo digital de terreno se generó a partir de un levantamiento topográfico en la zona de estudio. Se tomaron secciones cada 20 metros de un ancho aproximado de 300 metros, abarcando 1,060 metros a lo largo del cauce principal. En total se recolectaron 1,406 puntos, los cuales se utilizaron para crear 2,325 triangulaciones que representan la superficie de la zona de estudio (Figura 21).

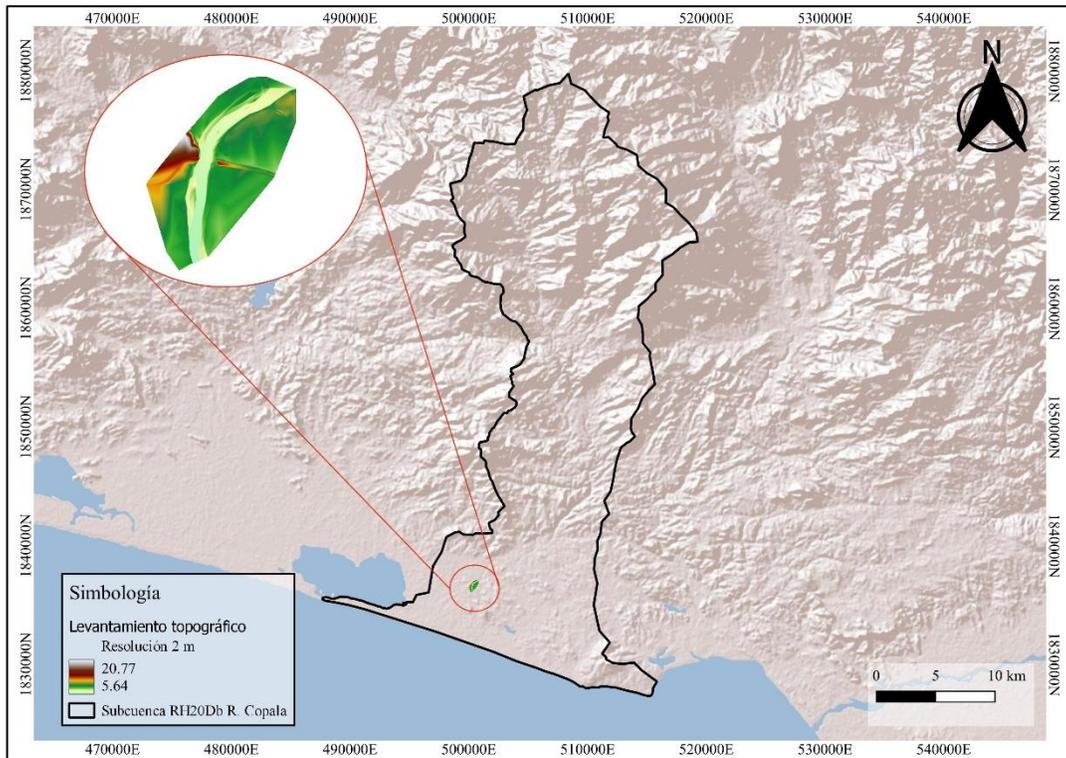


Figura 21. Modelo digital de terreno a partir de topografía. Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra un resumen de los modelos digitales de elevación mencionados anteriormente.

Tabla 4. Modelos digitales de elevación disponibles.

Tipo	Fuente	Resolución
MDT – LiDAR	INEGI	5 m
MDS – LiDAR		
MDT – CEM		15 m
MDT – ASTER	NASA	30 m
MDT – Fotogrametría con dron	Fuente propia	5 cm
MDS – Fotogrametría con dron	Fuente propia	5 cm
MDT – Levantamiento topográfico	Fuente propia	2 m

3 APLICACIÓN

A continuación, se describe la información utilizada y los resultados obtenidos de las diversas modelaciones realizadas para la zona de estudio. Con el fin de facilitar la comprensión, cada modelación será identificada con un nombre específico, mismo que hace alusión al tipo y fuente de modelo digital de elevación empleado, además contendrá un número correspondiente al grupo de modelaciones, tal como se muestra en la Tabla 5.

Las modelaciones se han agrupado en dos tipos distintos, diferenciados por el tamaño de malla asignado. El primer tipo incluye modelaciones con tamaños de malla que varían según la resolución de los diferentes MDE, mientras que el segundo tipo consiste en modelaciones utilizando un tamaño de malla uniforme.

Tabla 5. Modelos digitales de elevación disponibles.

Tipo	Modelación	
	Grupo 1	Grupo 2
MDT – LiDAR	MDT LiDAR_1	MDT LiDAR_2
MDT – CEM	MDT CEM_1	MDT CEM_2
MDT – Fotogrametría con dron	MDT FOTO_1	MDT FOTO_2
MDT – Levantamiento topográfico	MDT TOPO_1	MDT TOPO_2
MDS – LiDAR	MDS LiDAR_1	MDS LiDAR_2
MDS – Fotogrametría con dron	MDS FOTO_1	MDS FOTO_2

3.1 Datos de entrada

3.1.1 Modelos digitales de elevación (MDE)

Se dispone de seis modelos digitales de elevación que serán utilizados para la modelación hidráulica. Originalmente se consideró también el uso de un séptimo MDE proporcionado por la NASA; sin embargo, durante las modelaciones se descartó debido a la baja calidad de la información disponible para la zona de estudio.

Los modelos digitales de elevación utilizados fueron delimitados con una longitud de 1,003 m y un ancho de 972.45 m, abarcando un área de aproximadamente 97.6 hectáreas, dimensiones que fueron propuestas tomando como referencia las longitudes del levantamiento topográfico realizado, así como las planicies observadas en campo.

3.1.2 MDE y asignación de malla del Grupo 1

Los tamaños de malla fueron asignados considerando la resolución de cada uno de los MDE, dando prioridad a la zona de propagación.

- **MDT LiDAR_1 y MDS LiDAR_1**

Se asignaron tamaños de malla de 5 m para el cauce, 10 m en las llanuras de inundación y 18 m para la zona urbana. Obteniendo un total de 25,452 elementos triangulares (Figura 22 y Figura 23).

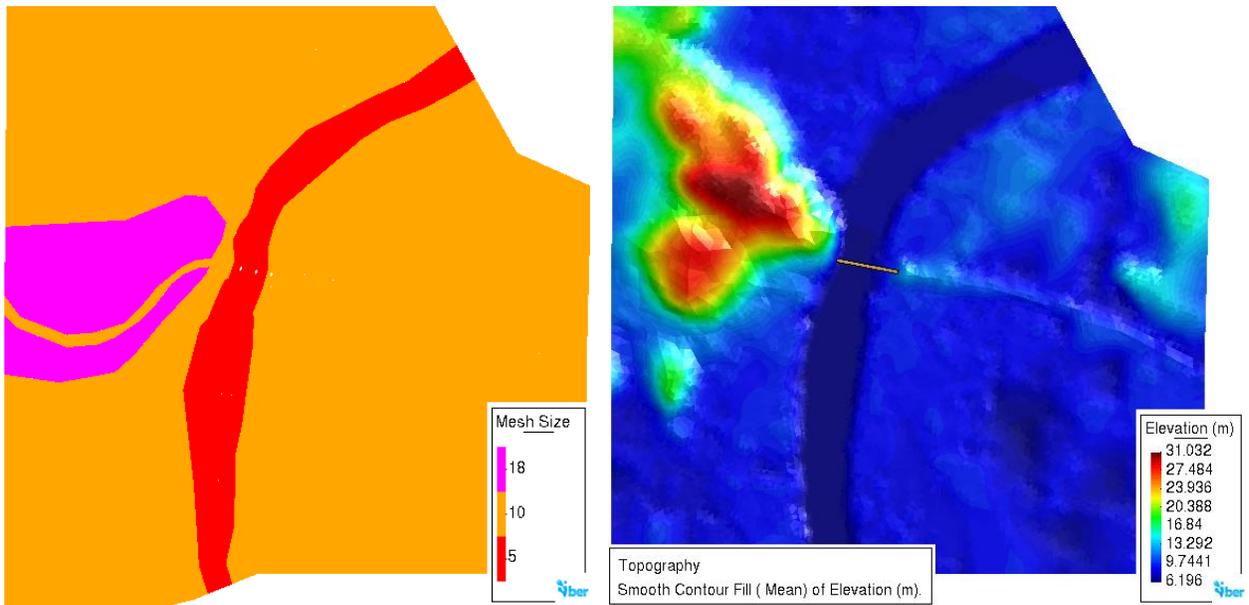


Figura 22. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT LiDAR_1

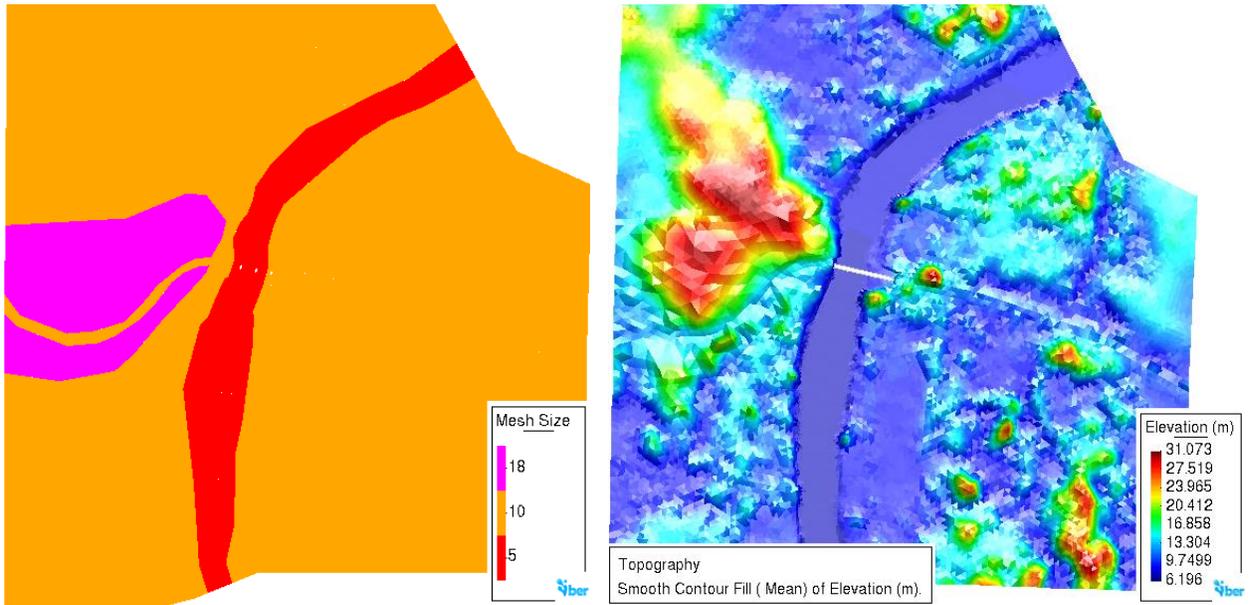


Figura 23. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDS LiDAR_1

- **MDT CEM_1**

Se establecieron tamaños de malla de 15 m para el cauce, 20 m en las llanuras de inundación y 25 m para zona urbana. Obteniendo un total de 6,749 elementos triangulares (Figura 24).

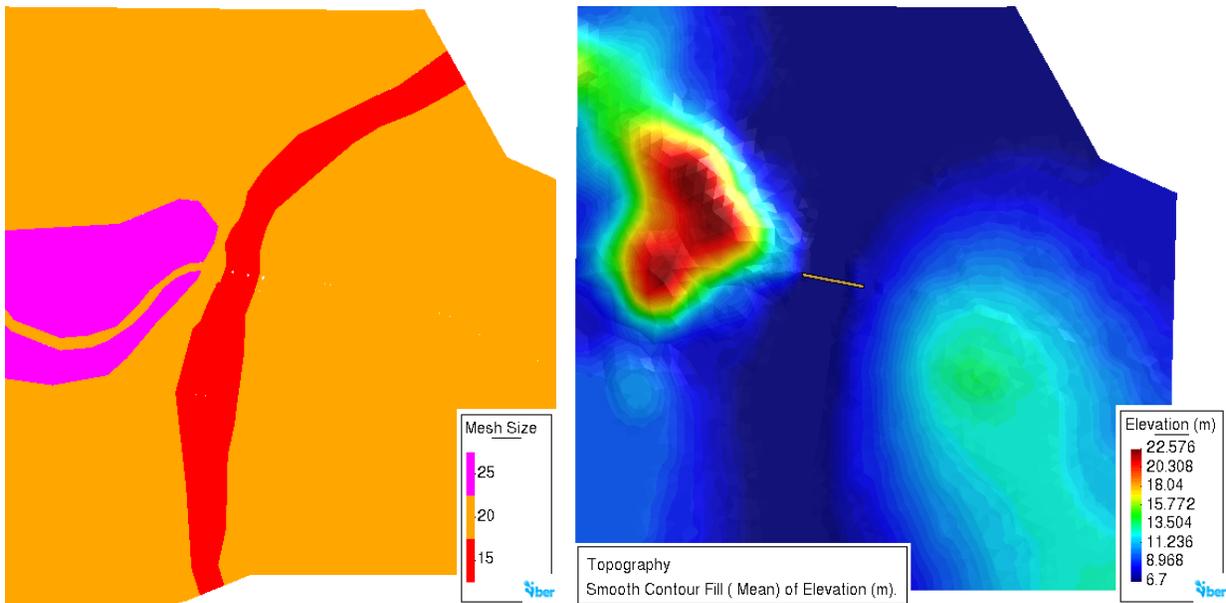


Figura 24. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT CEM_1

- **MDT FOTO_1 y MDS FOTO_1**

Se asignaron tamaños de malla de 1 m para el cauce, 3 m en llanuras de inundación y 5 m para la zona urbana. Obteniendo un total de 361,883 elementos triangulares (Figura 25 y Figura 26). Debido a la extensión que abarca la zona de estudio, fue necesario complementar con el MDE tipo LiDAR para las zonas de aportación.

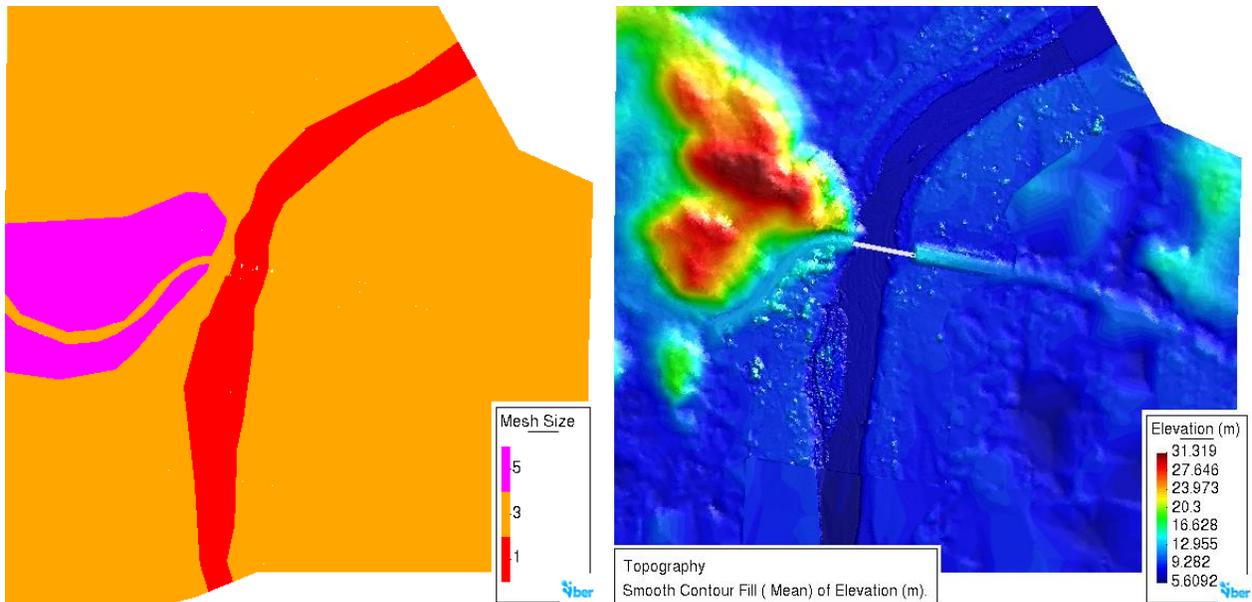


Figura 25. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT FOTO_1

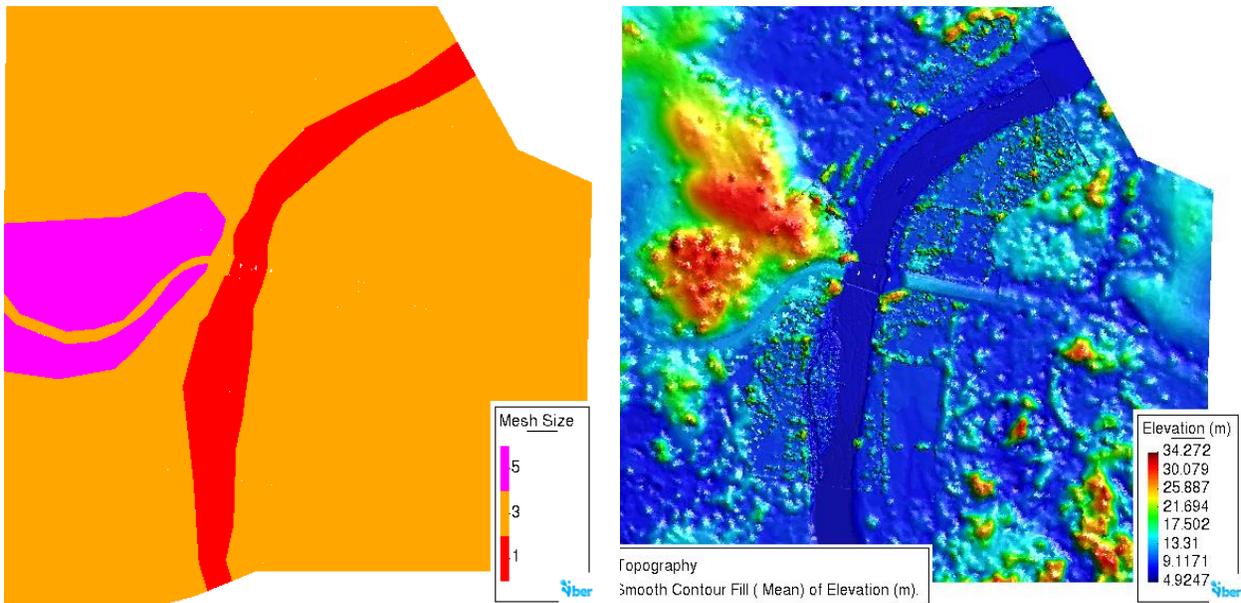


Figura 26. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDS FOTO_1

- **MDT TOPO_1**

A partir del levantamiento en campo se generó un modelo digital de terreno con una resolución de aproximadamente 2 m. Se utilizaron tamaños de malla de 2.5 m para el cauce, 7 m en las llanuras de inundación y 15 m para la zona urbana. Obteniendo un total de 64,192 elementos triangulares (Figura 27). Por la extensión que abarca la zona de estudio, fue necesario complementar con el MDE tipo LiDAR para las zonas de aportación.

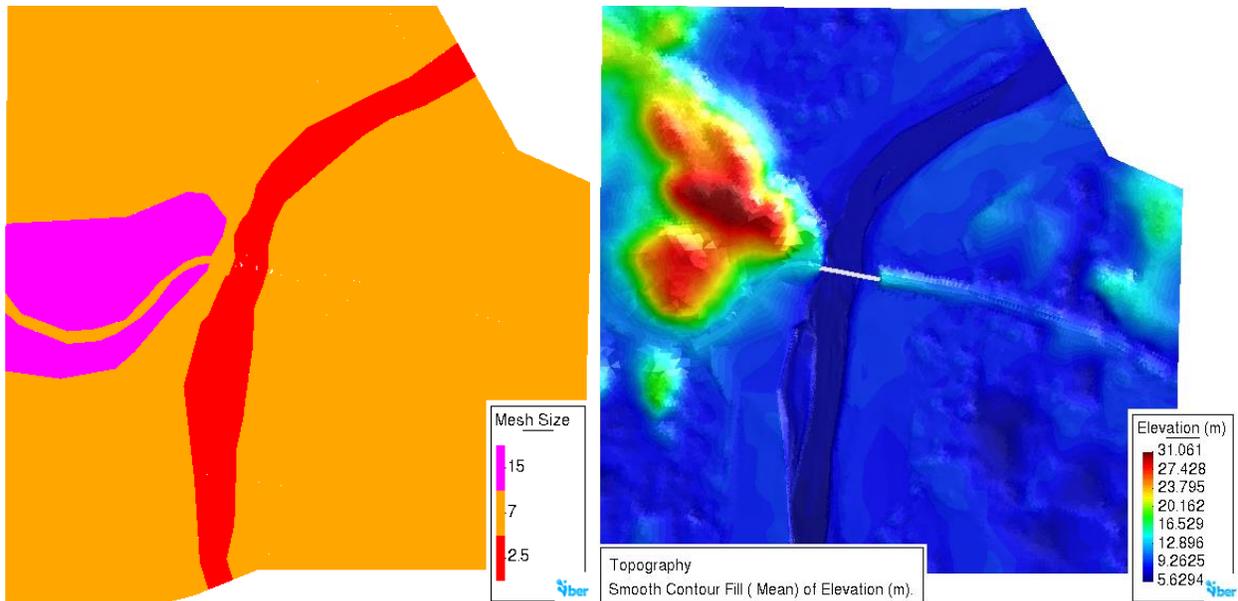


Figura 27. Tamaños de malla y elevaciones obtenidas a partir del MDT TOPO_1

En la Tabla 6 se presenta el resumen de los tamaños de malla utilizados para las diferentes modelaciones del Grupo 1.

Tabla 6. Tamaños de malla en Grupo 1

Tipo	Resolución (m)	Tamaño de malla		
		Cauce	Llanuras de inundación	Zona urbana
MDT LiDAR_1	5	5	10	18
MDT CEM_1	15	15	20	25
MDT FOTO_1	0.05	1	3	5
MDT TOPO_1	2	2.5	7	15
MDS LiDAR_1	5	5	10	18
MDS FOTO_1	0.05	1	3	5

3.1.3 MDE y asignación de malla del Grupo 2

Con la finalidad de establecer una igualdad de condiciones entre todos los cálculos de este grupo de comparación, se asignó un mismo tamaño de malla para todas las modelaciones, establecido a partir del modelo con tamaño de menor resolución, siendo el Continuo de Elevaciones Mexicano (15 m). Por lo tanto, se utilizó un tamaño de malla de 15 m para el cauce, 20 m en las llanuras de inundación y 25 m para la zona urbana (Figura 28). Obteniendo un total de 6,607 elementos triangulares. Las elevaciones obtenidas a partir de los tamaños de malla para cada uno de los MDE se muestran de la Figura 29 a la Figura 31.

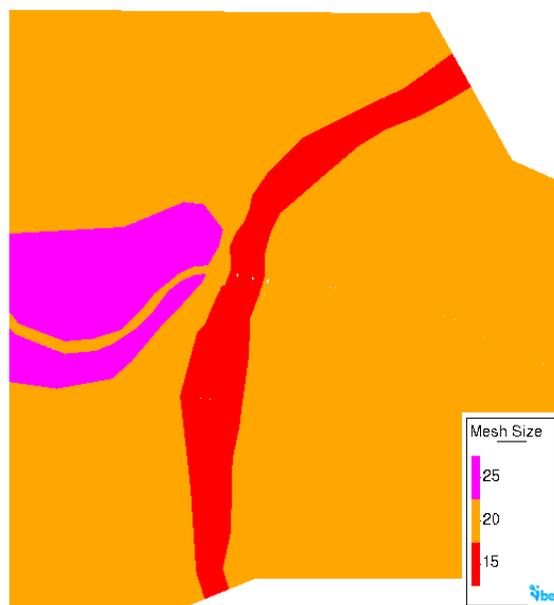


Figura 28. Tamaños de malla asignados en el grupo 2 para cada modelo

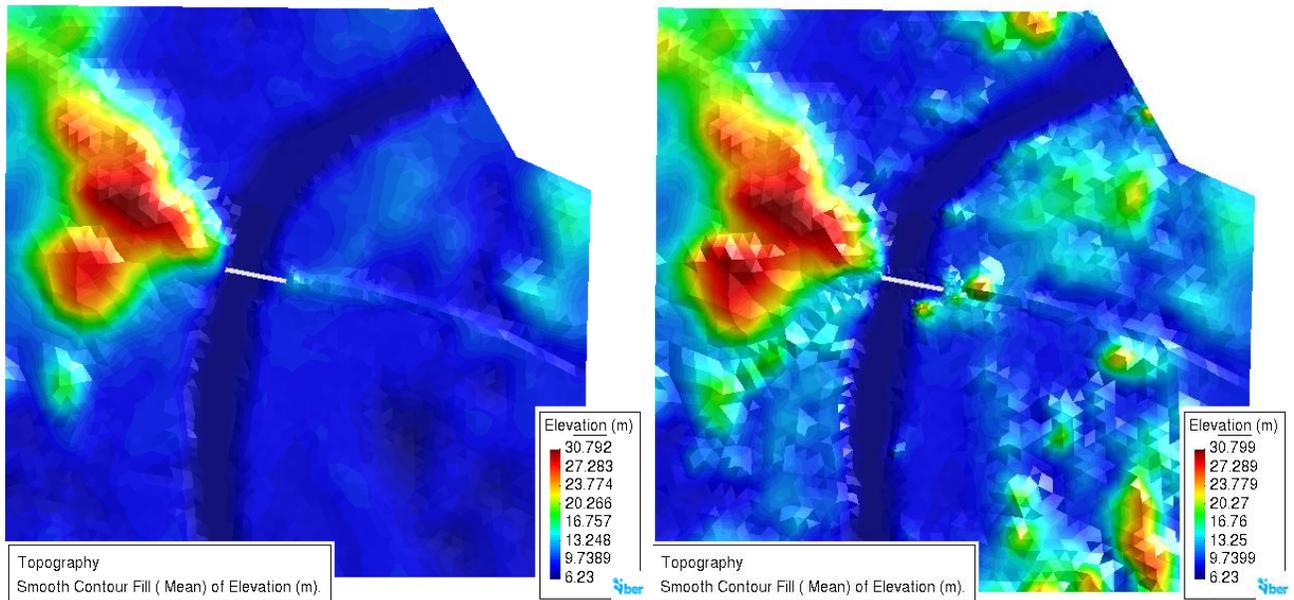


Figura 29. Elevaciones obtenidas a partir del MDT LiDAR_2 y MDS LiDAR_2, respectivamente

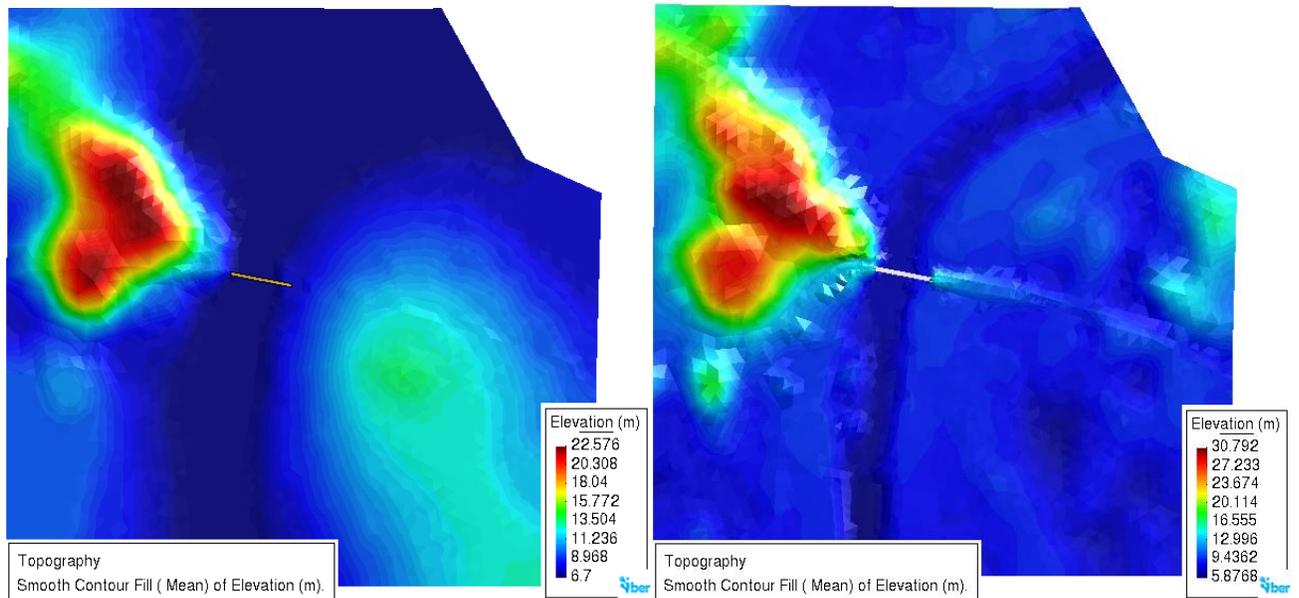


Figura 30. Elevaciones obtenidas a partir del MDT CEM_2 y MDT FOTO_2, respectivamente

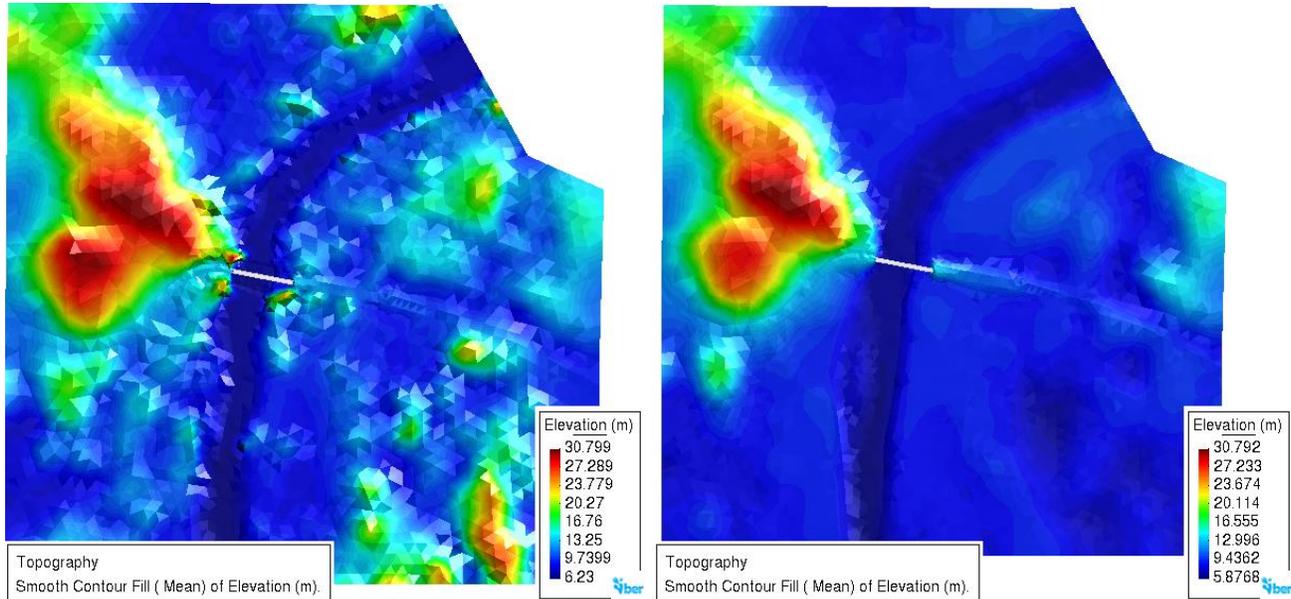


Figura 31. Elevaciones obtenidas a partir del MDS FOTO_2 y MDT TOPO_2, respectivamente

3.1.4 Gasto de diseño

- **Delimitación de la cuenca de estudio**

Haciendo uso del CEM de INEGI se delimitó la cuenca de aportación (Figura 32), que tiene como punto de salida el puente que cruza transversalmente el cauce (Figura 10).

- **Pendiente del cauce principal**

La pendiente media del cauce se calculó mediante la fórmula establecida por Taylor y Schwarz (Ecuación 4), quienes proponen considerar una sección uniforme con longitud y tiempo de recorrido igual al de la corriente principal (Taylor & Schwarz, 1952).

$$s = \left[\frac{L}{\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_m}}} \right]^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

L – es la longitud del tramo i

s – es la pendiente del tramo i

Algunas de las características fisiográficas de la cuenca de estudio se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características fisiográficas de la cuenca.

Características fisiográficas	
Área (km ²)	527.04
P (km)	162.33
Sm (%)	26.33
Lcp (km)	72.59
Scp (%)	0.70

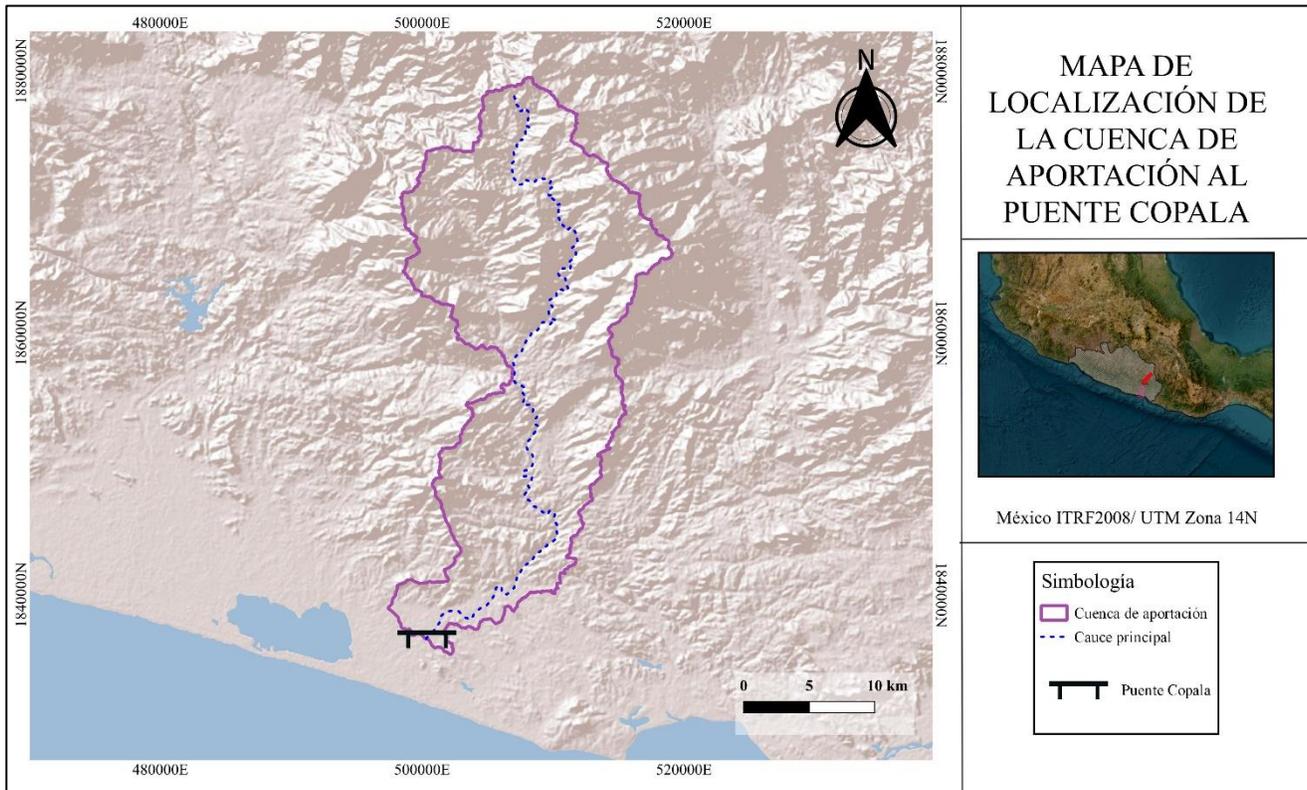


Figura 32. Cuenca de aportación al puente Copala. Elaboración propia.

- **Registros de precipitación máxima anual acumulada**

A partir de los registros obtenidos del Sistema de Información Hidrológica de la CONAGUA se obtuvieron las precipitaciones máximas para cada uno de los años, descartando aquellos en los cuales se tenían registros incompletos, principalmente cuando eran datos correspondientes a los meses de época de lluvia.

Mediante polígonos de Thiessen se determinó el área de influencia de cada una de las estaciones, siendo la estación Coacoyulichan la que representa mayor área sobre la cuenca de estudio (Figura 33).

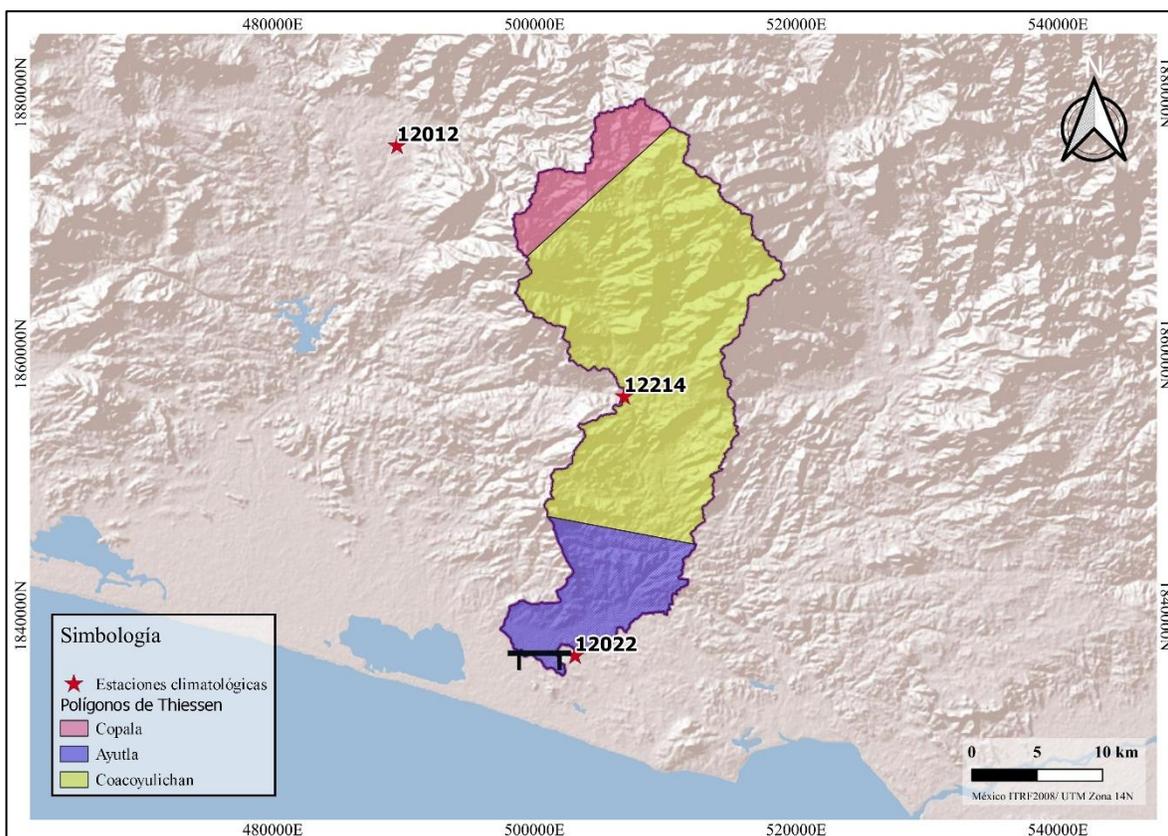


Figura 33. Área de influencia en la cuenca con Polígonos de Thiessen. Elaboración propia.

Para la serie de precipitación, se logró un ajuste óptimo de las estaciones utilizando la función de distribución doble Gumbel, con un error estándar de ajuste por máxima verosimilitud de 0.04 mm/mm.

- **Número de curva**

Este método fue propuesto por El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Mishra & P. Singh, 2003), en donde el número de curva es un valor que depende del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y la precipitación antecedente.

La cuenca de estudio presenta los siguientes valores, para los cuales se obtuvo un número de curva ponderado con un valor de **NC= 77.59** (Tabla 8).

Tabla 8. Número de curva para la cuenca de estudio.

Uso de suelo	Área (km ²)	NC
Asentamientos humanos	1.56	69
Bosque de pino-encino	36.98	73
Bosque de encino-pino	122.75	73
Cuerpo de agua	0.89	100
Pastizal cultivado	51.62	69
Pastizal inducido	1.17	69
Agricultura de riego semipermanente y permanente	5.42	76

Uso de suelo	Área (km ²)	NC
Agricultura de temporal anual	41.74	76
Agricultura de temporal anual y permanente	11.32	76
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	45.78	86
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino -pino	64.87	86
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	138.05	79
Sabanoide	4.53	66
Zona urbana	0.4	98
	NC Ponderado	77.59

- **Factor de convectividad**

De acuerdo con el estudio “Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2000 estaciones pluviométricas” realizado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la república se divide en 3 regiones, representando factores de convectividad de 0.3, 0.45 y 0.65. Para la cuenca de estudio, aplicando un promedio ponderado se estableció un factor de **R=0.32**.

- **Factor de reducción por área (FRA)**

De acuerdo con el estudio “Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2000 estaciones pluviométricas” realizado para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se han realizado diversos estudios para determinar un FRA para diferentes sitios. Para la cuenca de estudio se determinó el FRA mediante la Ecuación 5, correspondiente a la región hidrológica 19 Costa Grande.

$$FRA = -0.044 * \ln(A) + 1.0291 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

A – Es el área de la cuenca en km².

Aplicando la ecuación anterior se obtiene un **FRA=0.75**

- **Tiempo de concentración**

El tiempo de concentración se obtuvo mediante la fórmula de Kirpich (Ecuación 6)

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

L – Es la longitud del cauce principal, en m.

S – Es la pendiente del cauce principal, adimensional

t_c – Es el tiempo de concentración, en horas

Utilizando la Ecuación 6 se obtuvo un tiempo de concentración para la cuenca de **12.13 hrs.**

- **Curvas intensidad-duración-periodo de retorno (idt)**

Conociendo la lámina de lluvia-duración para 24 horas y las láminas de lluvia-periodo de retorno para 10 y 100 años, es posible aplicar la fórmula general propuesta por Chen (1983) para representar las curvas idt (Ecuación 7).

$$R_t^T = \frac{aR_1^{10} \log(10^{(2-X)T^{(X-1)}})}{(t + b)^c} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

I_t^T – Es la intensidad de lluvia en mm/hr para un periodo de retorno de T años y una lluvia de t minutos de duración.

a, b y c – Son parámetros que dependen del lugar y de la relación $\frac{I_1^{10}}{I_{24}^{10}}$ y se pueden determinar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a &= -2.297536 + 100.0389(R) - 432.5438(R)^2 - 1028.902(R)^4 \\ b &= -9.845761 + 96.94864(R) - 341.4349(R)^2 - 598.7461(R)^4 \\ c &= -0.06498345 + 5.069294(R) - 16.08111(R)^2 - 20.06288(R)^4 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 8}$$

De las ecuaciones anteriores:

$R = R_1^T / R_{24}^T$ – Es el *factor de convectividad*, correspondiente a la relación entre la precipitación acumulada en 1 y 24 horas, para un mismo periodo de retorno.

P_1^{10} – Es la precipitación para una hora y periodo de retorno de 10 años.

$X = R_t^{100} / R_t^{10}$ – Es el cociente entre la precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 100 años y la precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 10 años.

Se obtuvieron las curvas idt para diferentes periodos de retorno, considerando una lámina de lluvia de 24 horas (Figura 34).

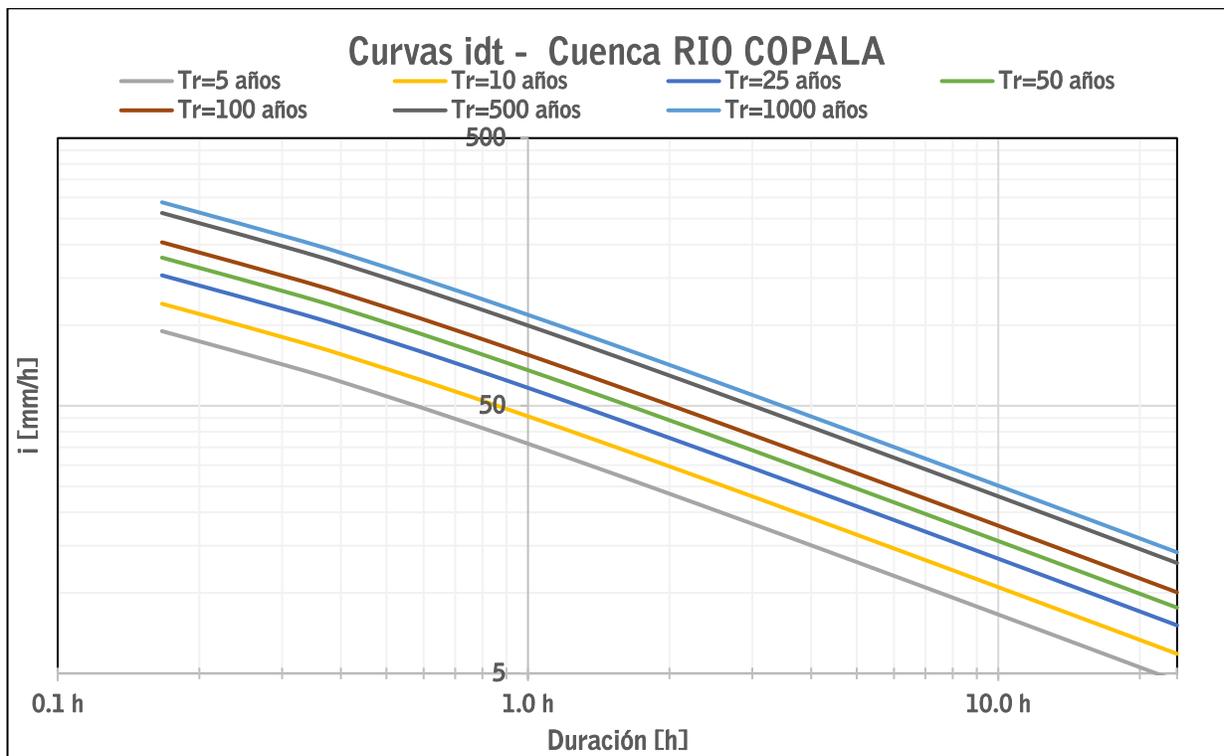


Figura 34. Curvas idt para la cuenca Río Copala

- **Precipitación total y efectiva**

Haciendo uso de las curvas idt (Figura 34), se calcularon los valores de precipitación total, los cuales fueron afectados por el factor de reducción por área. Estos resultados se utilizaron para calcular la precipitación efectiva mediante la Ecuación 9 (Tabla 9) (Aparicio Mijares, 2003).

$$Pe = \begin{cases} \left[P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \right]^2 & \text{si } P - \frac{5080}{CN} + 50.8 > 0 \\ P + \frac{20320}{CN} - 203.2 & \\ 0 & \text{si } P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \leq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

P – Es la precipitación total calculada, en mm

NC – Número de curva

Tabla 9. Precipitación total y efectiva.

Pt mm	Pe mm
112.25	55.70
142.06	80.82
181.45	115.82
211.26	143.15

Pt mm	Pe mm
241.06	170.97
310.26	236.80
340.06	265.51

- **Hidrograma Unitario Triangular**

De acuerdo con la norma N-PRY-CAR-1-06-004/18 de la SICT, por tratarse de una cuenca con un área mayor a los 25 km² se debe utilizar el método del Hidrograma Unitario Triangular para la obtención del gasto de diseño.

El gasto pico (Q_p), se puede calcular como el producto de la altura de precipitación efectiva (P_e) y el gasto pico del hidrograma (q_p) (Ecuación 10).

$$Q_p = q_p P_e \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

P_e – Es la precipitación efectiva, en mm

q_p – Se calcula con la Ecuación 11

$$q_p = \frac{0.208 A}{t_p}, \text{ en } m^3/s/mm \quad \text{Ecuación 11}$$

Y donde:

A – Es el área en km²

t_p – Es el tiempo pico, calculado como:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad \text{Ecuación 12}$$

d_e – Es la duración en exceso en horas

Y $t_r = 0.6 t_c$, donde t_c es el tiempo de concentración en horas.

- **Gasto pico por el Hidrograma Unitario Triangular**

Aplicando la Ecuación 10 se obtienen los resultados presentados en la Tabla 10. De acuerdo con la norma N-PRY-CAR-1-06-004/18 de la SICT, para puentes en zonas con presencia de tormentas tipo ciclónicas en cualquier tipo de carretera, el periodo de retorno será de 1,000 años.

Tabla 10. Gastos pico obtenidos por HUT, para diferentes periodos de retorno

Tr	QpHU m ³ /s
5	454.972
10	660.229
25	946.112
50	1,169.342
100	1,396.592

Tr	QpHU m ³ /s
500	1,934.342
1000	2,168.881

3.1.5 Rugosidad del terreno

El coeficiente de rugosidad representa la resistencia del flujo de agua ante los diferentes materiales o características que puedan presentarse durante su tránsito por el cauce o las llanuras de inundación. Existen diversos métodos para su cálculo, entre ellos los que implican el empleo de fórmulas empíricas y tablas (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

Para el caso de estudio, dado que no se cuenta con una estación hidrométrica para calibrar los coeficientes, se propusieron valores de $n=0.035$ en la zona de cauce, $n=0.045$ en las llanuras de inundación, $n=0.02$ en la zona de carretera y $n=0.15$ para la zona urbana (Figura 36). Los valores de rugosidad empleados se asignaron de acuerdo con lo observado en campo, así como, haciendo uso de la Tabla 11 del Libro de Ven-Te Chow (Figura 35) (Chow, 2004).



Figura 35. Fotografías tomadas en campo del cauce y llanuras de inundación. Elaboración propia.

Tabla 11. Valores de Manning (Chow, 2004)

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas < 30 m):			
a) Corrientes en planicie:			
1. Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos, tirante alto.	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior. pero más rocoso y con hierba	0.030	0.035	0.040
3. Limpios. sinuosos, algunas irregularidades del fondo.	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, algo de hierba y rocas.	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficaces.	0.040	0.048	0.055
6. Igual que el 4, pero con más piedras.	0.045	0.050	0.060
7. Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos.	0.050	0.070	0.080

Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
8. Tramos con mucha hierba. estancamientos profundos, cauces inundación con raíces y plantas subacuáticas.	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bordos muy inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes, que quedan sumergidos durante las inundaciones:			
1. -Fondo de grava. boleó y algunos cantos rodados.	0.030	0.040	0.050
2. Fondo de boleó	0.040	0.050	0.070
B. Planicies de inundación:			
a) Pastura sin arbustos:			
1. Pasto bajo.	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto.	0.030	0.035	0.050
b) Áreas de cultivo:			
1. Sin cultivo.	0.020	0.030	0.040
2. Cultivo maduro en surcos	0.025	0.035	0.045
3. Cultivo maduro en campo	0.030	0.040	0.050
c) Arbustos:			
1. Arbustos escasos y mucha hierba.	0.035	0.050	0.070
2. Pocos arbustos y árboles. en invierno.	0.035	0.050	0.060
3. Pocos arbustos y árboles. en verano.	0.040	0.060	0.080
4. Mediana a densa población de arbustos. en invierno.	0.045	0.070	0.110
5. Mediana a densa población de arbustos, en verano,	0.070	0.100	0.160
d) Árboles:			
1. Población densa de sauces en verano, rectos.	0.110	0.150	0.200
2. Terrenos talados con troncos muertos	0.030	0.040	0.050
3. Igual al anterior, pero con troncos retoñados.	0.050	0.060	0.080
4. Gran concentración de madera, algunos árboles caídos, pocos de escaso crecimiento, nivel de inundación abajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior. pero el nivel de inundación alcanza a las ramas,	0.100	0.120	0.160
C. Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas > 30 m). El valor de n es menor que en los arroyos de igual descripción, pero donde los bordos ofrecen menor resistencia:			
a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos.	0.025		0.060
b) Secciones rugosas	0.035		0.100

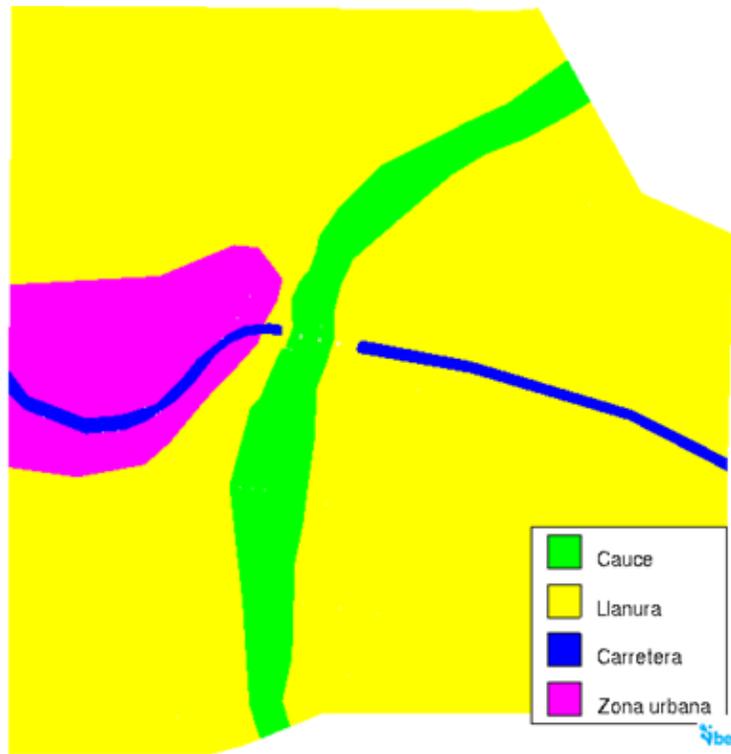


Figura 36. Distribución de los usos de suelo utilizados en la modelación. Elaboración propia.

3.2 Modelación numérica 2D

Empleando el software Iber, se realizaron modelaciones para simular el comportamiento de las variables hidráulicas en el puente Copala.

Se delimitó un área de estudio de 88 ha, distribuida en 4 usos de suelo (cauce, llanuras, carretera y zona urbana) (Tabla 12), abarcando una longitud de 1,060 m de cauce, cuyo ancho aproximado es de 65 m. El área de estudio es menor que la delimitada en los MDE (97.6 ha), esta reducción se realizó para evitar errores en el contorno de la zona de estudio durante la asignación de elevaciones a la malla. Para la condición de entrada se asignó el caudal de diseño y para la salida una condición tipo vertedor evaluando el no afectar los resultados del puente (Figura 37).

Tabla 12. Distribución del uso de suelo del área de estudio.

Tipo	Área (ha)	Área (%)
Carretera	1.53	2%
Cauce	7.04	8%
Edificaciones	7.15	8%
Llanura	72.38	82%
Total	88.09	100%

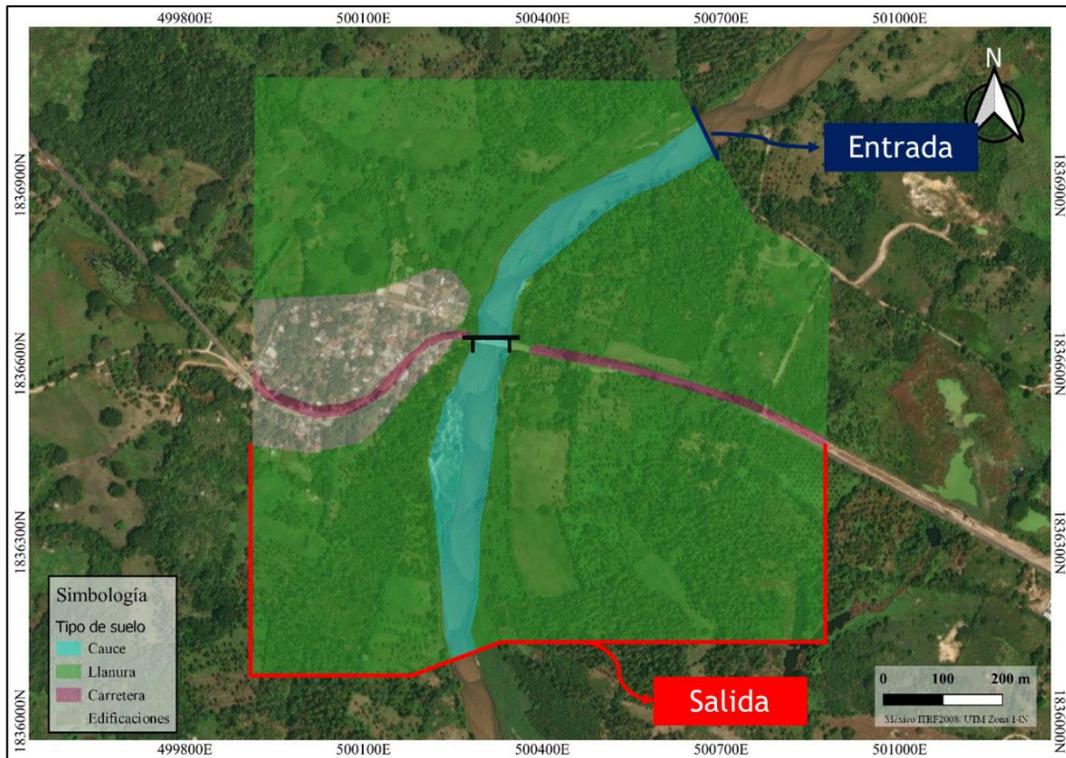


Figura 37. Delimitación de la zona de estudio y condición de entrada y salida. Elaboración propia.

En cada uno de los modelos se asignaron los coeficientes de rugosidad establecidos en el apartado 3.1.5 y el gasto de entrada correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años correspondiente a 2,169 (m³/s). La simulación de las pilas del puente se realizó considerando una barrera infinita, que se modeló mediante la creación de huecos en la superficie sin mallar. Al contorno de estos se le asignó un coeficiente de rugosidad de 0.015, que corresponde al material de concreto. Se realizaron 2 cálculos (2 grupos) para cada uno de los 6 MDE (12 en total).

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cada cálculo se determinó la profundidad del agua y velocidad en el centro del cauce, en la intersección con el eje del puente; posteriormente se calculó el error relativo de dichas variables, tomando como referencia los valores obtenidos a partir del MDT producto de la topografía de campo, considerándola como la de mayor precisión.

4.1 Resultados obtenidos de las modelaciones del Grupo 1

A partir de las modelaciones realizadas en el grupo 1, se obtuvieron las elevaciones a lo largo del cauce según el MDE utilizado, así como mapas que muestran la velocidad y el tirante de agua en la zona de estudio.

4.1.1 Elevaciones presentadas en el cauce (Grupo 1)

En la Figura 38 se observan los perfiles del terreno natural a lo largo y centro del cauce principal obtenidos de 6 tipos diferentes de modelos digitales de elevación.

En el caso del CEM, se observa que la elevación se mantiene constante a lo largo de todo el tramo, con un valor de 6.7 m. Sin embargo, esta constancia resulta algo incierta debido al arrastre de sedimentos y materiales provocado por las velocidades presentes en el cauce. Este fenómeno puede ocasionar variaciones en los niveles de elevación en el fondo de este.

En cuanto al tipo LiDAR, se observa una diferencia de aproximadamente 0.5 m en el tramo aguas abajo del cauce. Respecto a la fotogrametría, se registra una diferencia similar de aproximadamente 0.5 m tanto aguas abajo como aguas arriba del cauce.

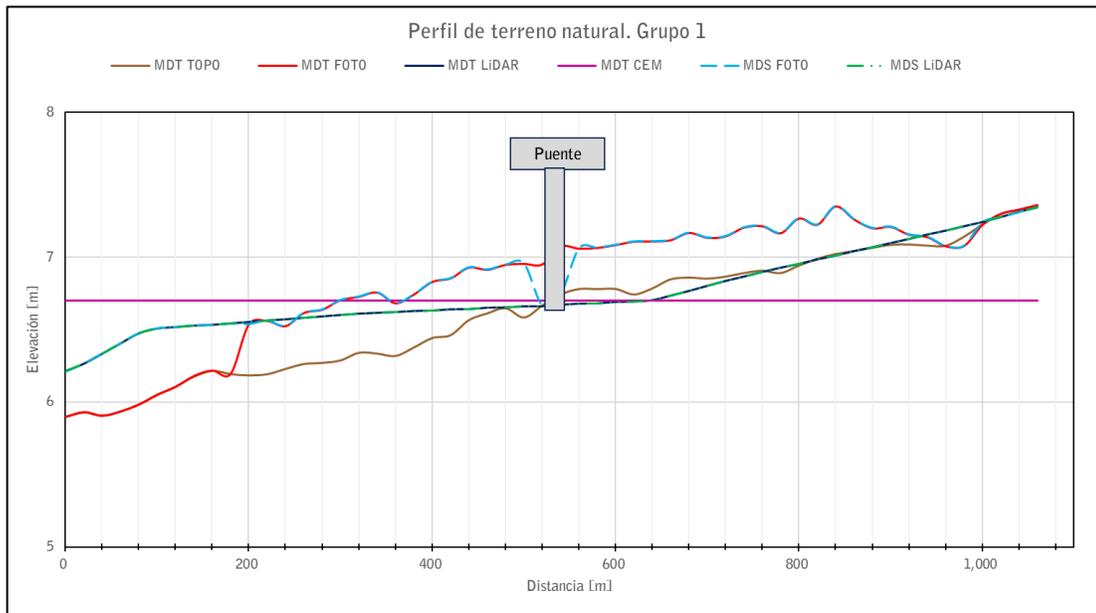


Figura 38. Perfil de terreno natural (Grupo 1)

La Figura 39 muestra las elevaciones obtenidas en la sección del puente a partir de diferentes Modelos Digitales de Elevación (MDE). Se observa una diferencia significativa en el área representada entre los MDT y los MDS provenientes de la misma fuente. En el caso del MDT del CEM, la sección presenta una apariencia casi plana. Por otro lado, destaca que la sección de terreno derivada del MDS de fotogrametría es la que más se asemeja a la topografía real (MDT TOPO) en la zona del cruce.

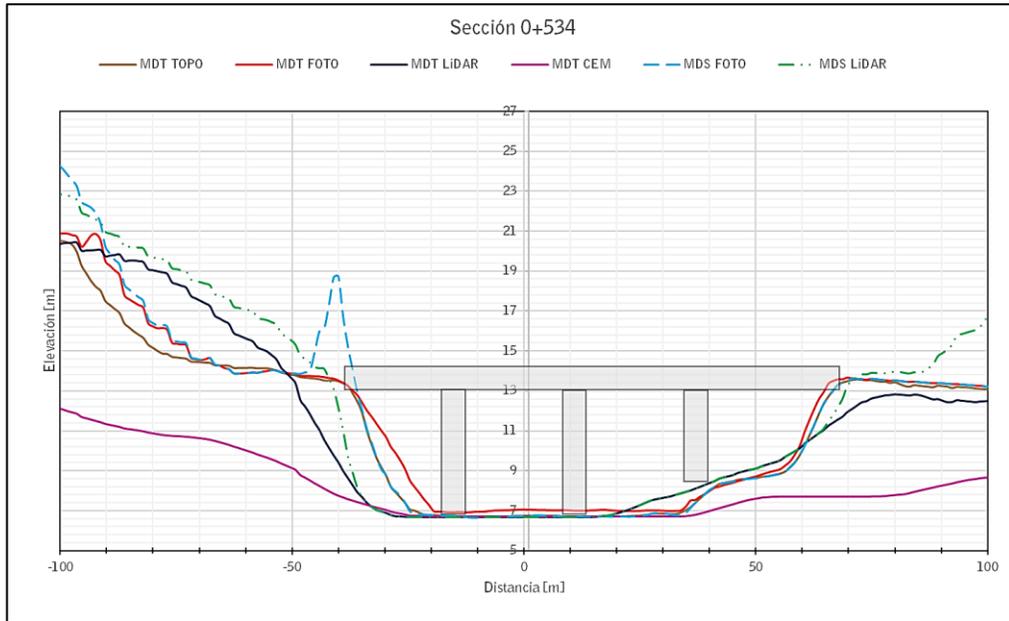


Figura 39. Elevaciones de terreno natural en la sección el puente (Grupo 1)

4.1.2 Velocidades en la zona de estudio (Grupo 1)

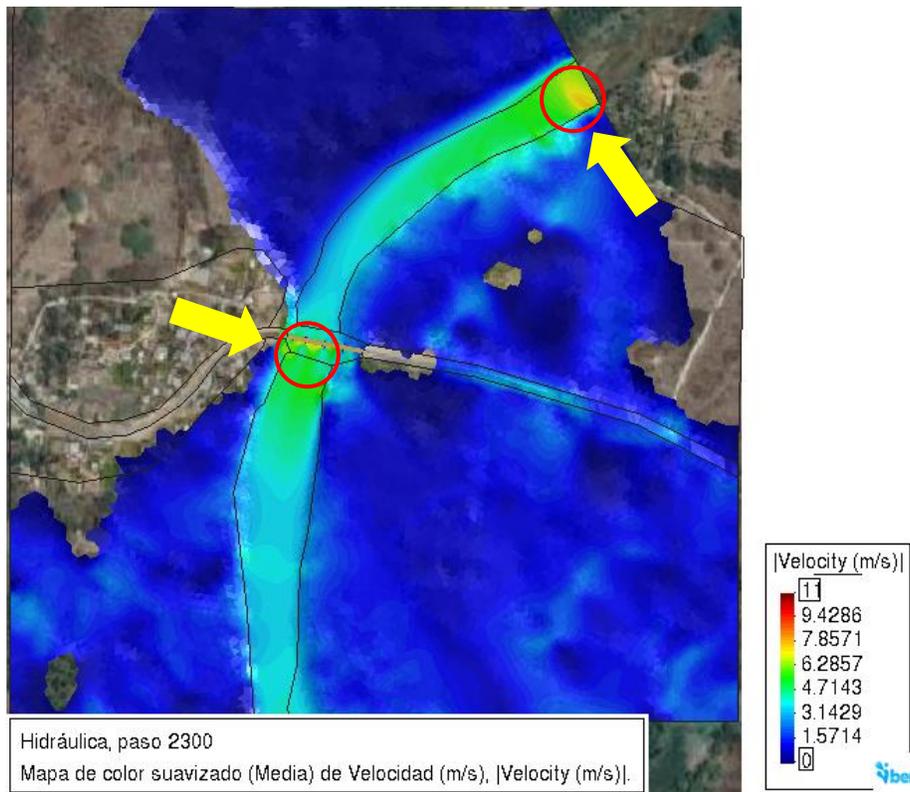


Figura 40. Velocidades en la zona de estudio para el MDT LiDAR_1

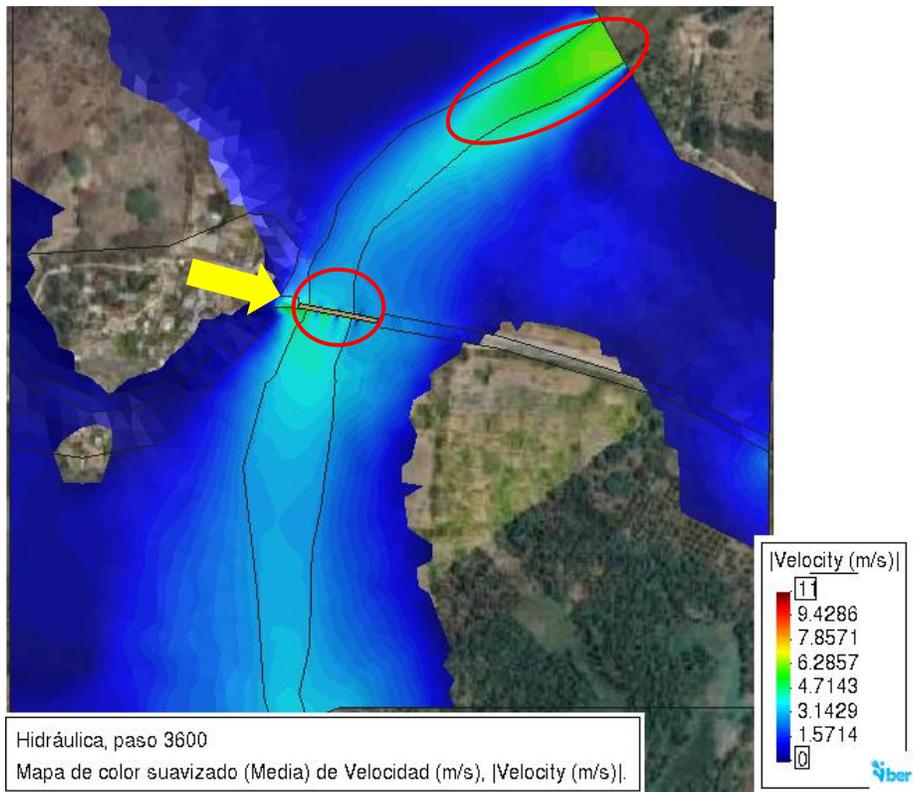


Figura 41. Velocidades en la zona de estudio para el MDT CEM_1

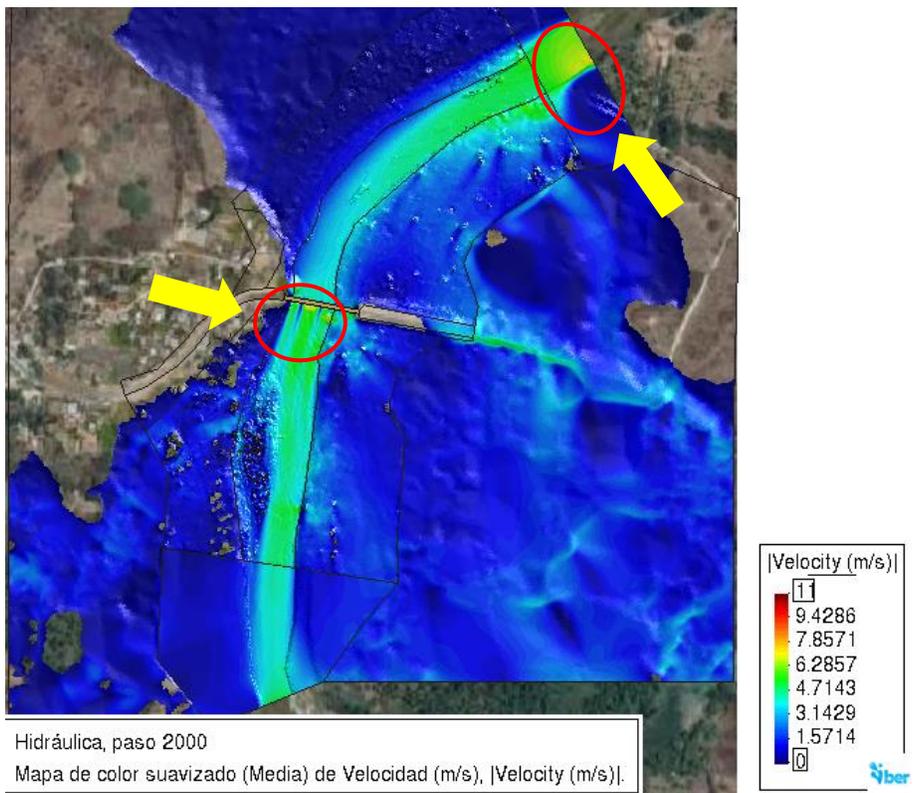


Figura 42. Velocidades en la zona de estudio para el MDT FOTO_1

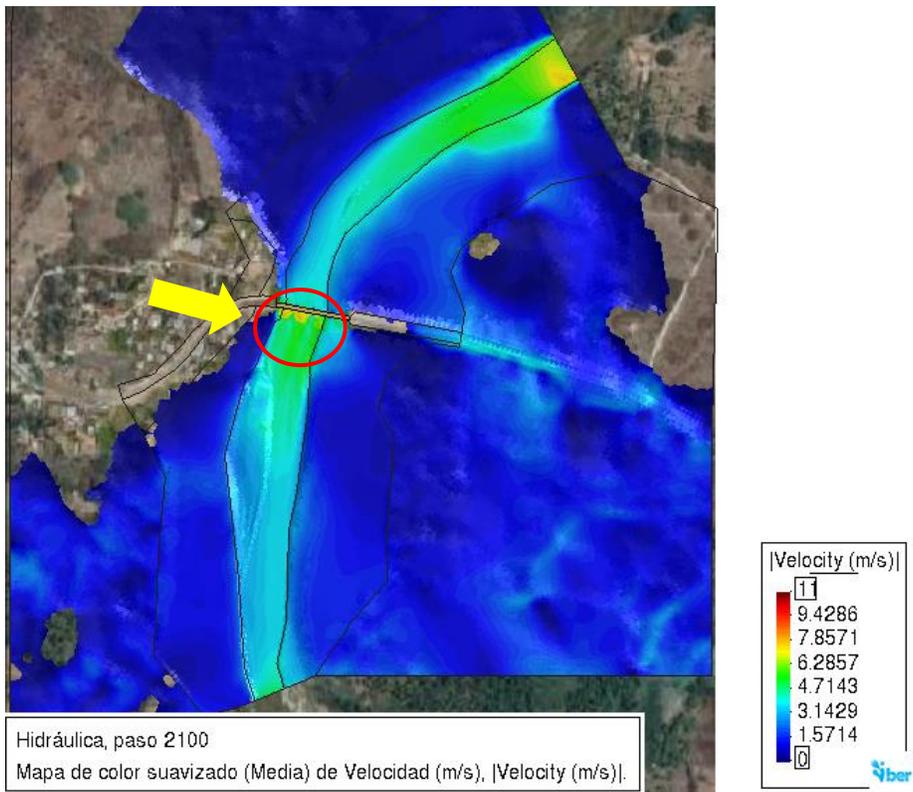


Figura 43. Velocidades en la zona de estudio para el MDT TOPO_1

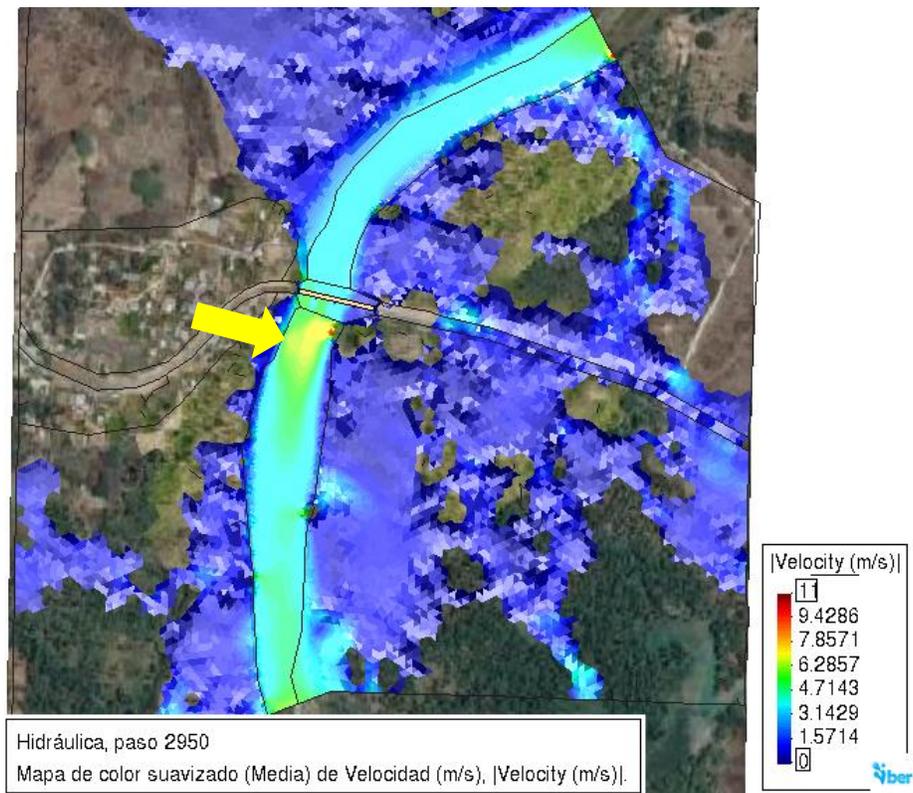


Figura 44. Velocidades en la zona de estudio para el MDS LiDAR_1

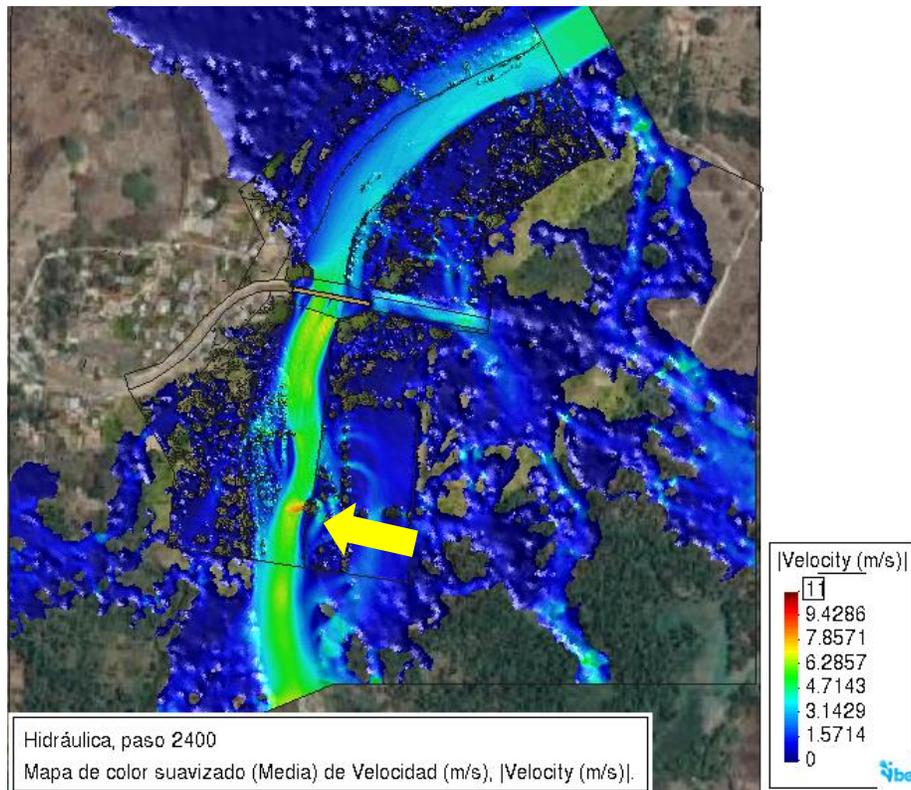


Figura 45. Velocidades en la zona de estudio para el MDS FOTO_1

En la zona de estudio, las velocidades del flujo varían según el tipo de Modelo Digital de Elevación (MDE) utilizado:

MDT LiDAR_1: Se registran velocidades de hasta 7 m/s a lo largo del cauce, con los valores más altos observados en la entrada del cauce y en la sección del puente Copala (Figura 40).

MDT CEM_1: En esta área de estudio, las velocidades máximas alcanzan cerca de 6 m/s, siendo las secciones más afectadas la del puente y el inicio del tramo aguas arriba (Figura 41).

MDT FOTO_1: Las velocidades cercanas a 7 m/s se registran tanto en la entrada del cauce como en la sección del puente. En la mayor parte del cauce, se observan velocidades elevadas de hasta 6 m/s (Figura 42).

MDT TOPO_1: La velocidad máxima alcanzada es de aproximadamente 7.5 m/s, principalmente aguas abajo del puente, mientras que, a lo largo del cauce, las velocidades suelen alcanzar los 6 m/s (Figura 43).

MDS LiDAR_1: Se registran velocidades superiores a 7 m/s aguas abajo del puente Copala (Figura 44).

MDS FOTO_1: La velocidad máxima observada es cercana a 8 m/s, concentrándose en la zona aguas abajo del puente (Figura 45).

Las elevadas velocidades observadas en la entrada del cauce pueden no ser completamente precisas debido a las condiciones de contorno implementadas en el modelo.

4.1.3 Tirantes en la zona de estudio (Grupo 1)

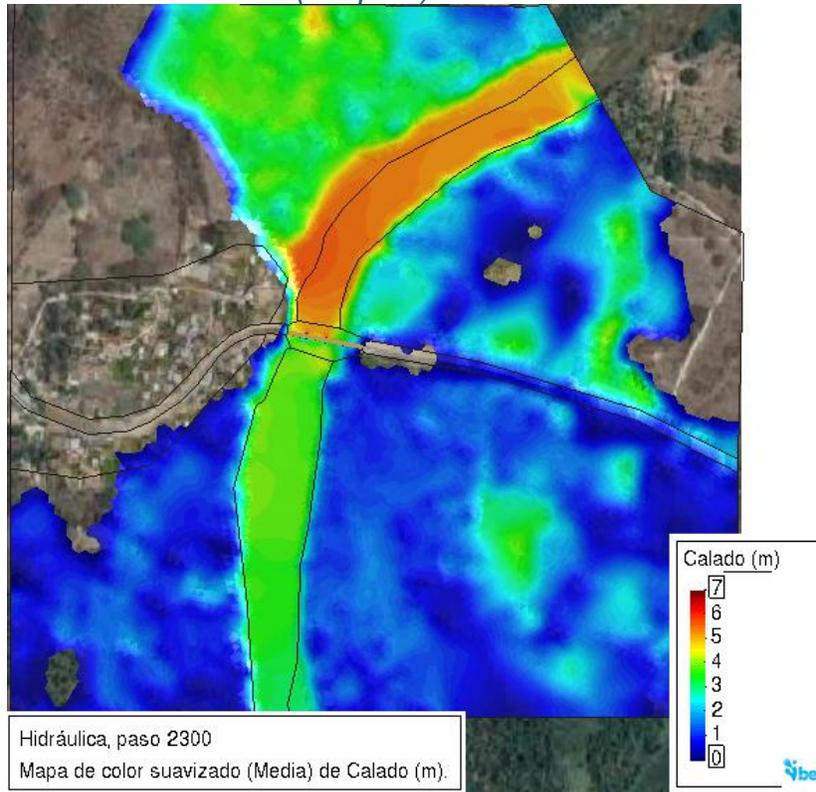


Figura 46. Tirantes en la zona de estudio para el MDT LiDAR_1

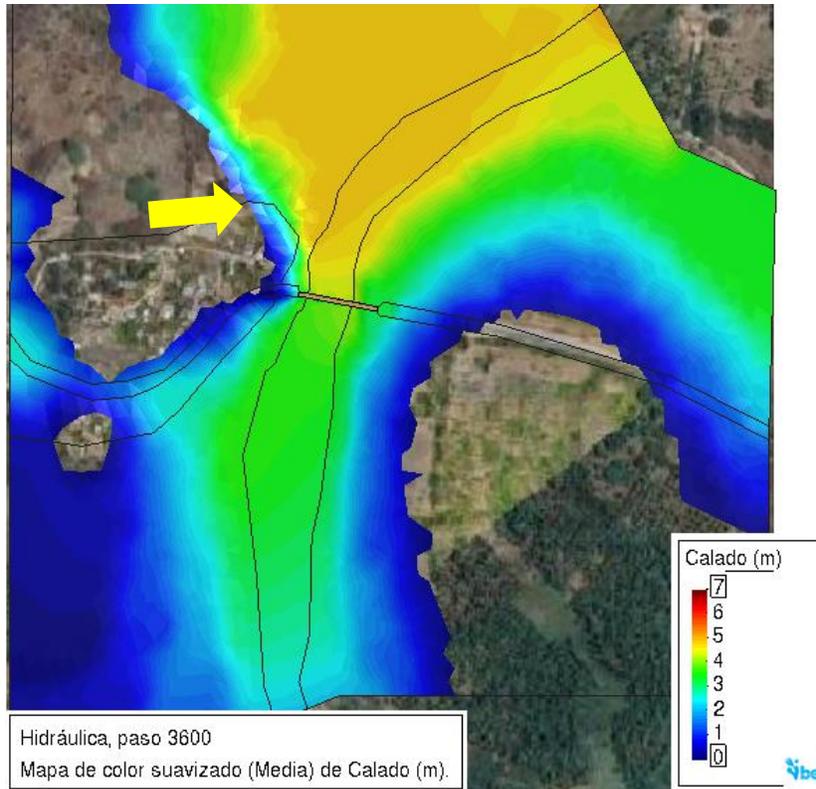


Figura 47. Tirantes en la zona de estudio para el MDT CEM_1

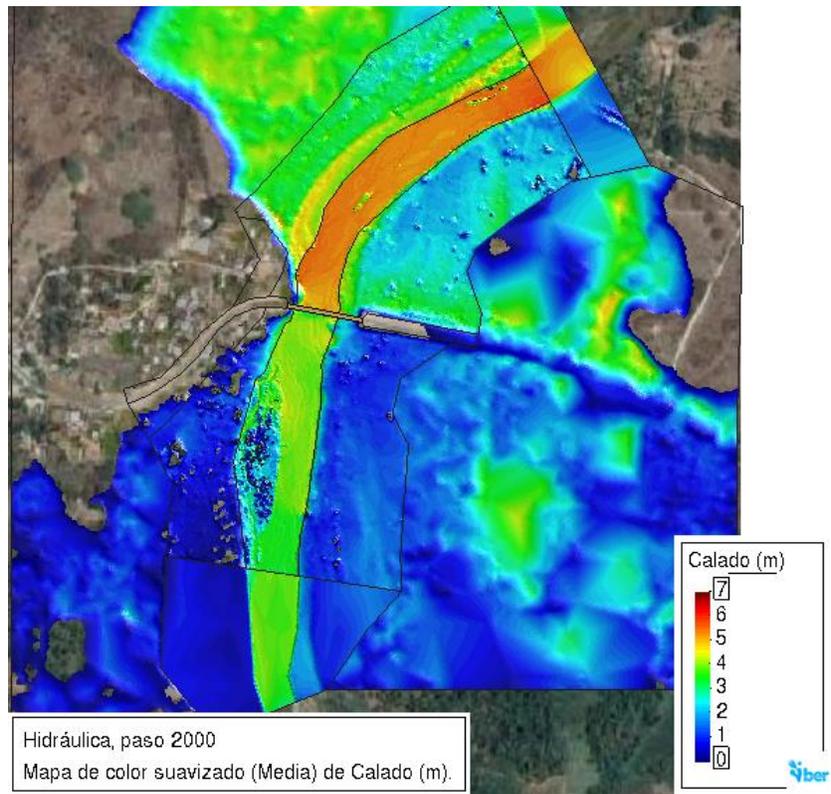


Figura 48. Tirantes en la zona de estudio para el MDT FOTO_1

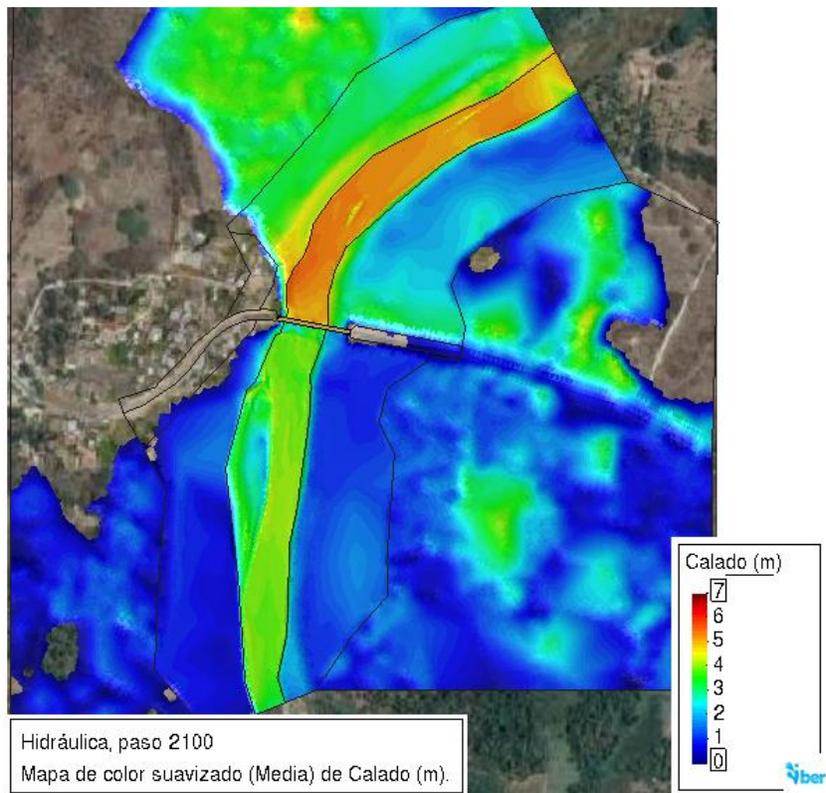


Figura 49. Tirantes en la zona de estudio para el MDT TOPO_1

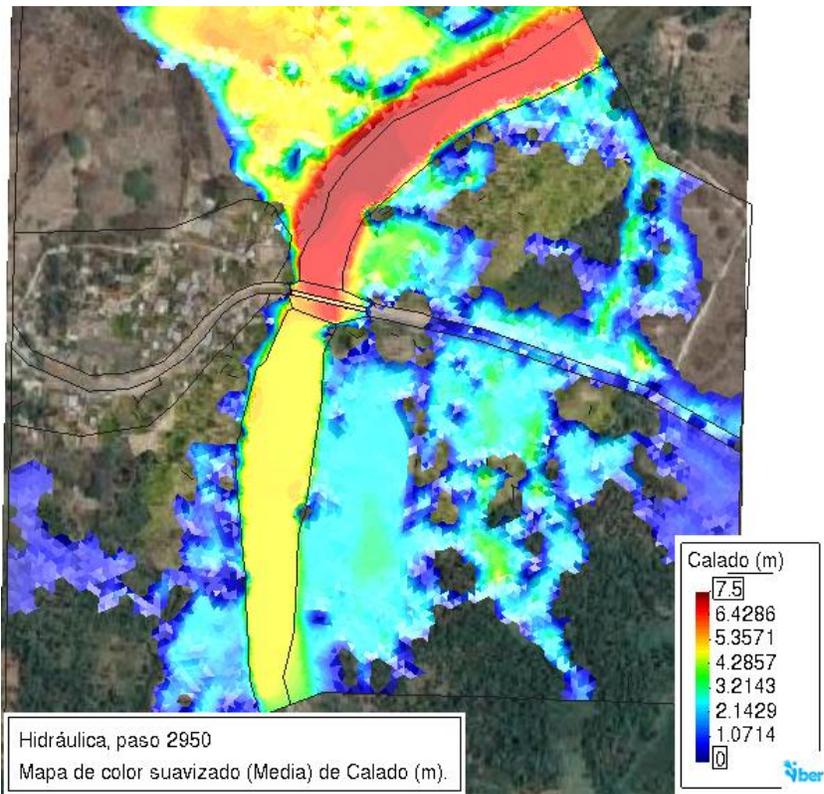


Figura 50. Tirantes en la zona de estudio para el MDS LiDAR_1

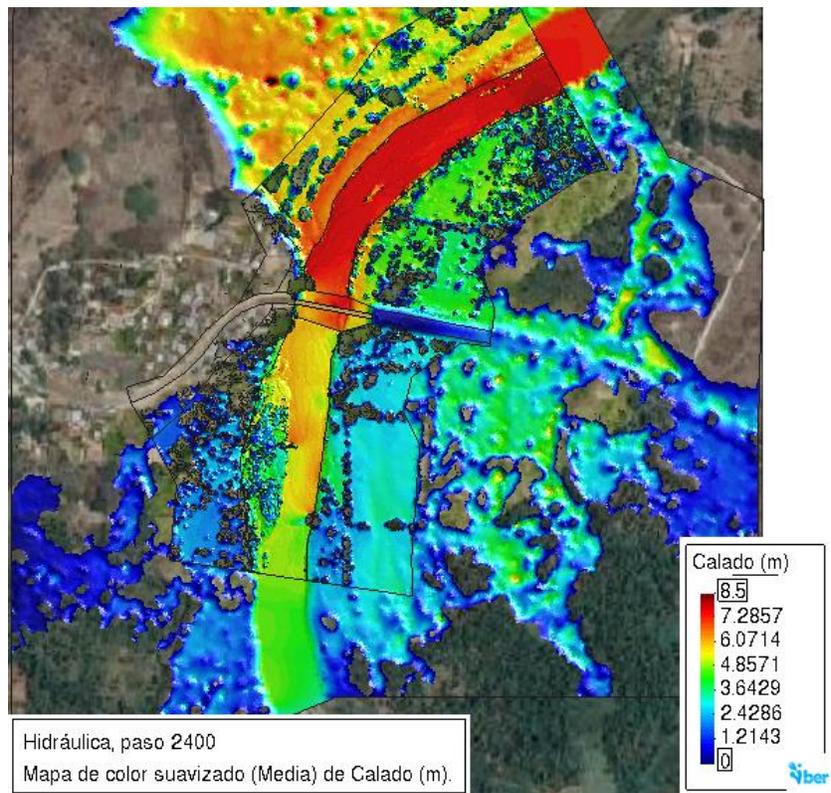


Figura 51. Tirantes en la zona de estudio para el MDS FOTO_1

Los tirantes de agua varían significativamente según el MDE utilizado en las simulaciones:

MDT LiDAR_1: En la zona aguas arriba del puente, el tirante de agua alcanza un máximo de 5.5 metros, disminuyendo gradualmente hacia aguas abajo hasta llegar a 3 metros (Figura 46).

MDT CEM_1: Se observan tirantes máximos de aproximadamente 5 metros en la zona de estudio, tanto aguas arriba como en la llanura de inundación (Figura 47).

MDT FOTO_1: Los tirantes máximos alcanzan alrededor de 6 metros en la zona aguas arriba del puente, disminuyendo hasta 3 metros en la sección aguas abajo (Figura 48).

MDT TOPO_1: El modelo de topografía muestra tirantes de hasta 5.5 metros aguas arriba del puente, reduciéndose a 3 metros en la zona de cauce aguas abajo (Figura 49).

MDS LiDAR_1: Los tirantes máximos registrados son de 7.5 metros, observándose desde el inicio del cauce principal hasta la sección después del puente (Figura 50).

MDS FOTO_1: El modelo digital de superficie indica tirantes significativos a lo largo del cauce principal, alcanzando hasta 8 metros (Figura 51).

4.1.4 Error relativo (Grupo 1)

Se calculó el error relativo para la velocidad y el tirante de agua en las modelaciones realizadas (Tabla 13), tomando los valores al centro de la sección del puente (Figura 52 y Figura 53).

Los errores máximos en las modelaciones se derivan de los modelos digitales de superficie (MDS LiDAR_1 y MDS FOTO_1), con errores superiores al 50 % para el tirante y un rango de 5 % a 10 % para la velocidad, lo cual podría indicar daños significativos en la estructura. En cuanto a los modelos digitales de terreno, se observan errores máximos del 11 % para el tirante y del 16 % para la velocidad en la modelación MDT CEM_1, seguido por la modelación MDT FOTO_1 con errores del 1.2 % y 0.5 % para tirante y velocidad, respectivamente. En general, se destaca que los errores mínimos se registraron en la modelación MDT LiDAR_1 para el tirante y del MDT FOTO_1 para la velocidad.

Tabla 13. Comparación de tirantes y velocidad (Grupo 1)

Tipo	y (m)	v (m/s)	er (y) %	er (v)%
MDT TOPO_1	4.38	5.37	---	---
MDT LiDAR_1	4.413	5.565	0.753	3.631
MDT FOTO_1	4.328	5.344	1.187	0.484
MDT CEM_1	3.897	4.498	11.027	16.238
MDS LiDAR_1	6.389	5.222	45.868	2.756
MDS FOTO_1	6.658	5.714	52.009	6.406

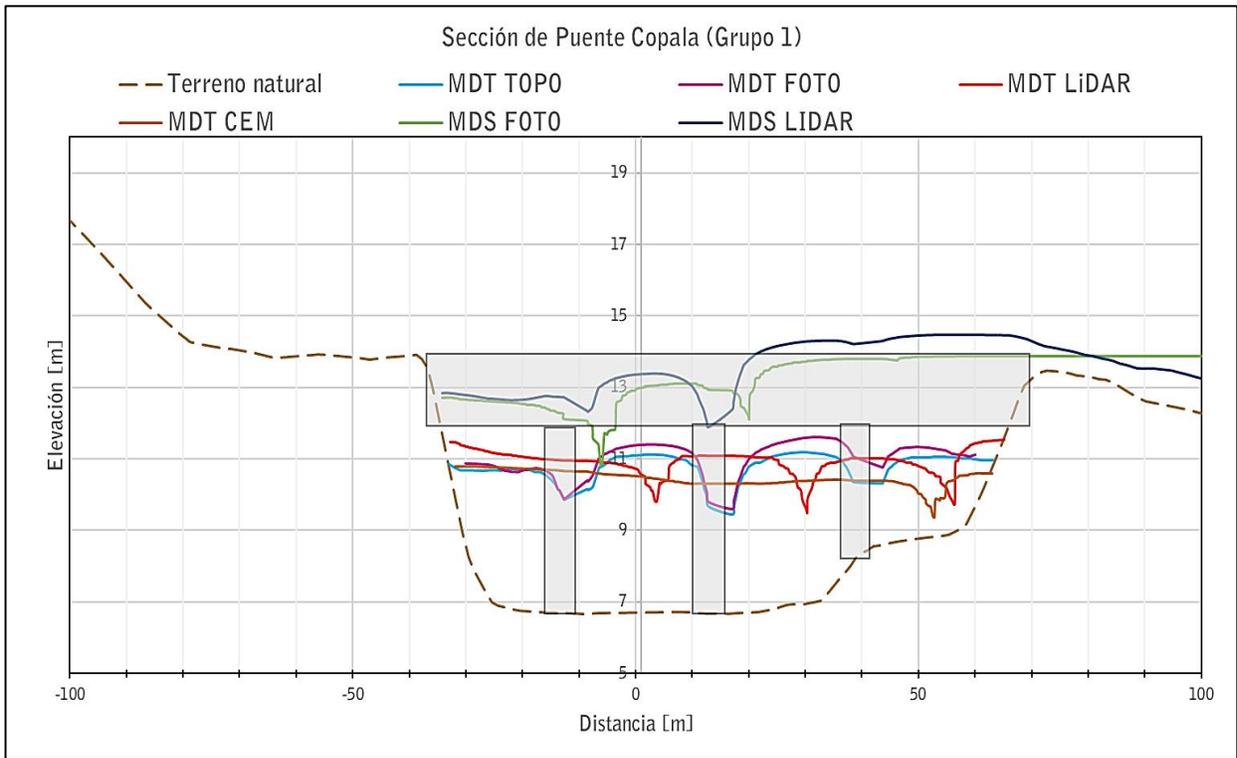


Figura 52. Profundidades en la sección del puente (Grupo 1)

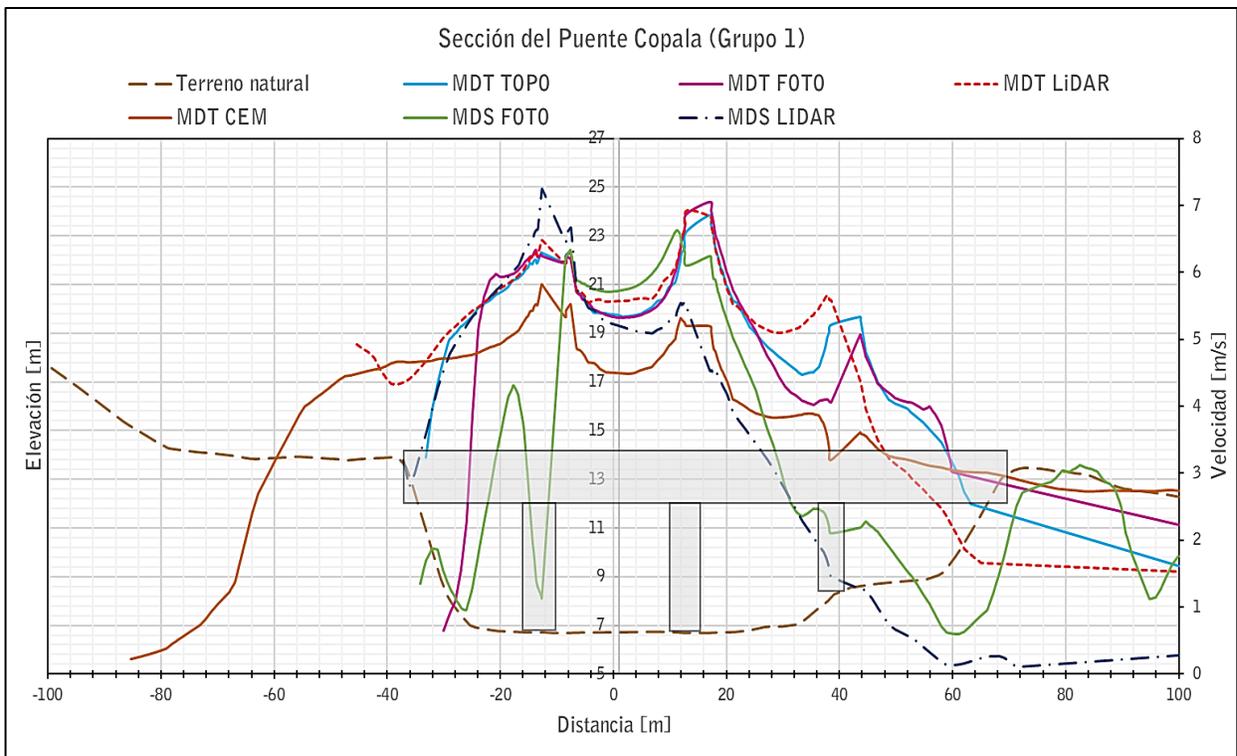


Figura 53. Velocidad en la sección del puente (Grupo 1)

La Tabla 14 muestra los niveles de agua obtenidos en cada una de las modelaciones. Se observa que, a partir de la simulación MDT CEM_1, el nivel del borde libre es de 1.402 m. En contraste, las modelaciones MDS LiDAR_1 y MDS FOTO_1 indican que el nivel de agua alcanza los 13 msnm, superando por 1 m el nivel de lecho inferior.

Tabla 14. Nivel de agua en la sección del puente

Modelación	NSLA (msnm)	Bordo libre (m)
MDT TOPO_1	11.089	0.911
MDT LiDAR_1	11.122	0.878
MDT FOTO_1	11.37	0.63
MDT CEM_1	10.598	1.402
MDS LiDAR_1	13.363	-1.363
MDS FOTO_1	13.054	-1.054

Además, se calculó el error relativo para el tirante y la velocidad del agua, como se presenta en la Tabla 15, y se analizó en el centro de la sección aguas arriba del puente (Figura 54 y Figura 55). La Tabla 15 muestra que el error mínimo entre los MDT se registró con la modelación MDT FOTO_1, mientras que el error máximo correspondió a la modelación MDT CEM_1. En general, los errores máximos tanto para el tirante como para la velocidad se observaron en la modelación MDS FOTO_1.

Tabla 15. Comparación de tirantes y velocidad para la sección aguas arriba (Grupo 1)

Tipo	y (m)	v (m/s)	er (y) %	er (v)%
MDT TOPO_1	4.98	4.12	---	---
MDT LiDAR_1	5.13	4.30	2.987	4.285
MDT FOTO_1	4.95	4.16	0.549	0.757
MDT CEM_1	4.36	3.55	12.493	14.034
MDS LiDAR_1	6.85	4.39	37.565	6.349
MDS FOTO_1	7.02	4.98	40.965	20.854

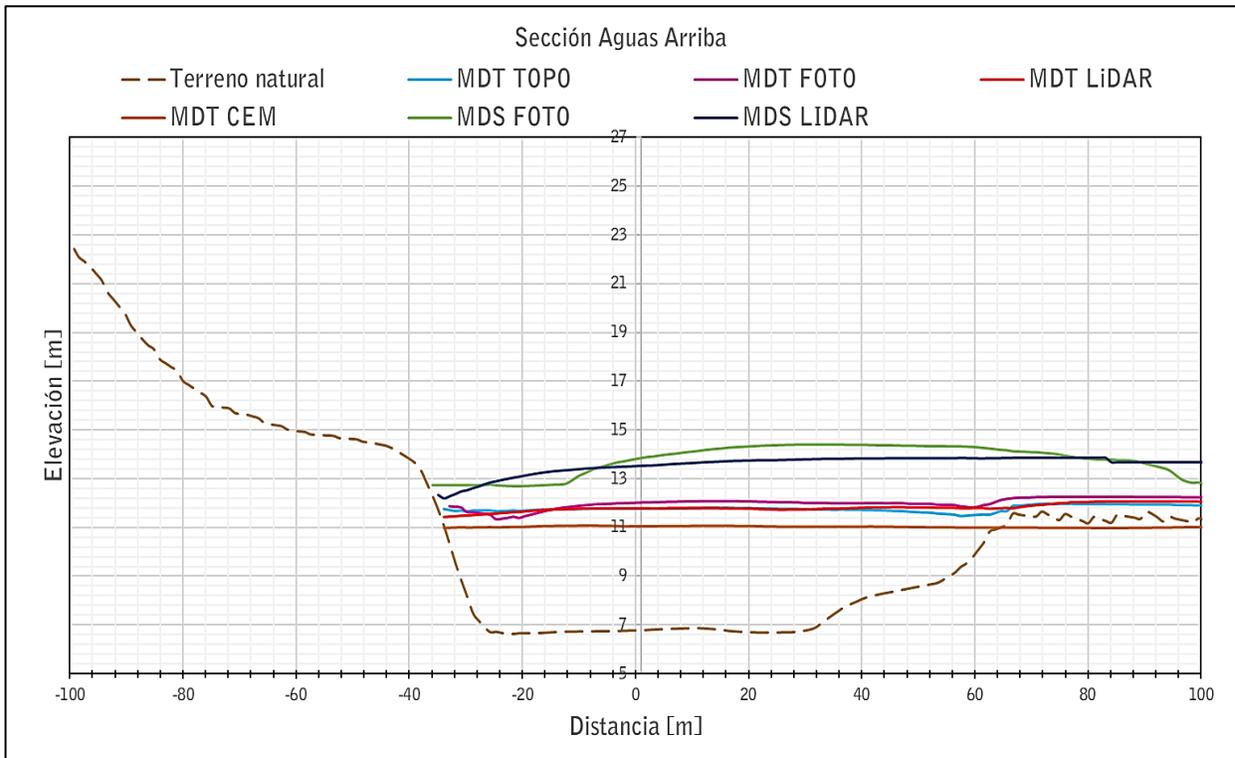


Figura 54. Profundidades en la sección aguas arriba (Grupo 1)

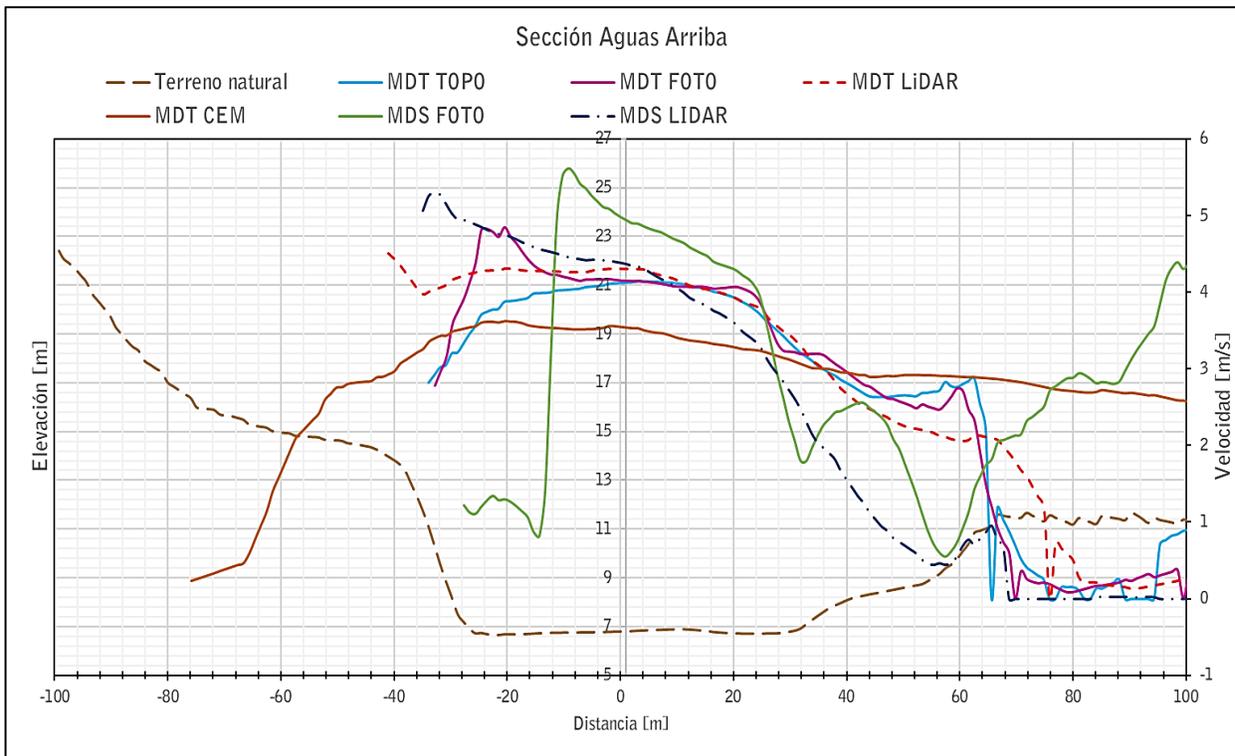


Figura 55. Velocidad en la sección aguas arriba (Grupo 1)

4.2 Resultados obtenidos de las modelaciones del Grupo 2

Se han generado perfiles de elevación del terreno a lo largo del eje del cauce utilizando los resultados de las seis modelaciones del grupo 2, las cuales se caracterizan por tener el mismo tamaño de malla. Además, se han obtenido mapas que muestran el tirante y la velocidad del agua, junto con los errores relativos asociados a estas variables hidráulicas.

4.2.1 Elevaciones presentadas en el cauce (Grupo 2)

La Figura 56 presenta los perfiles obtenidos del cauce principal. En el perfil obtenido a partir del modelo digital de elevación tipo CEM, se observa que el cauce mantiene un valor constante de 6.7 m a lo largo de toda su extensión. Por otro lado, los perfiles obtenidos mediante LiDAR muestran una variación de 0.5 m aguas abajo del puente, mientras que, en el caso de la Fotogrametría, esta diferencia de 0.5 m se mantiene constante a lo largo de todo el tramo. Además, se pueden observar cambios bruscos en el terreno natural del cauce en los modelos digitales de elevación obtenidos mediante fotogrametría, LiDAR y topografía.

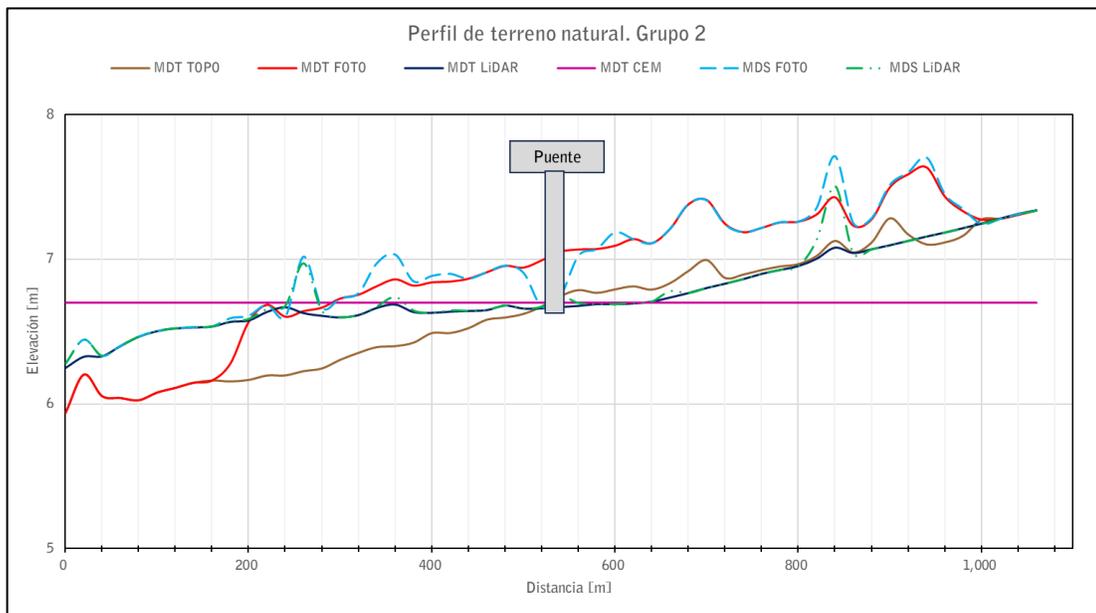


Figura 56. Perfil de terreno natural (Grupo 2).

La Figura 57 ilustra las elevaciones obtenidas en la sección del puente utilizando distintos Modelos Digitales de Elevación (MDE). Se evidencia una diferencia notable en el área representada entre los MDT y los MDS provenientes de la misma fuente. Específicamente, el MDT del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) muestra una sección casi plana. En contraste, las secciones de terreno obtenidas a partir de los MDS de fotogrametría y LiDAR son las que más se acercan a la topografía real (MDT TOPO) en la zona del caudal.

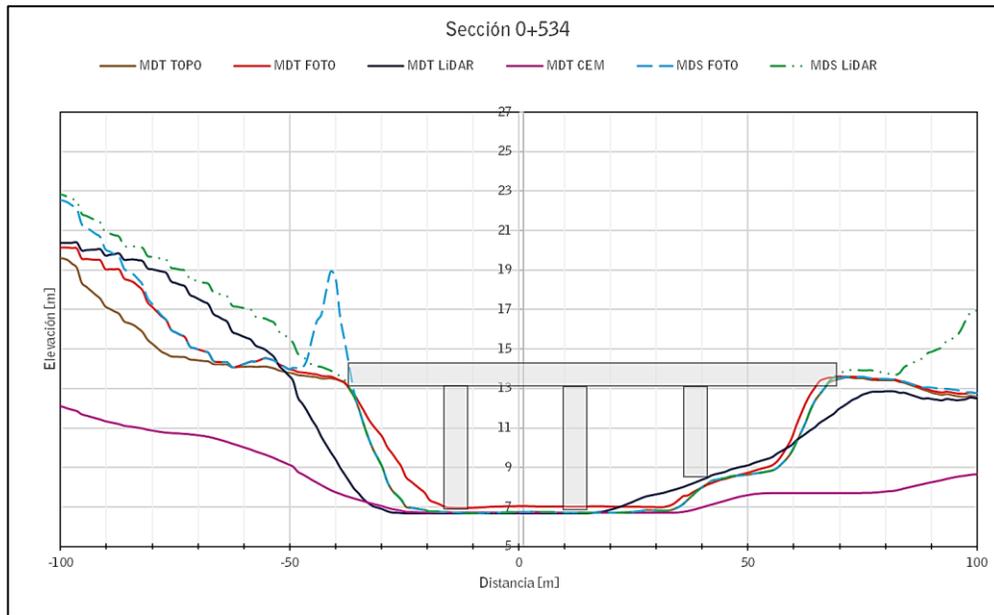


Figura 57. Elevaciones de terreno natural en la sección el puente (Grupo 2)

4.2.2 Velocidades en la zona de estudio (Grupo 2)

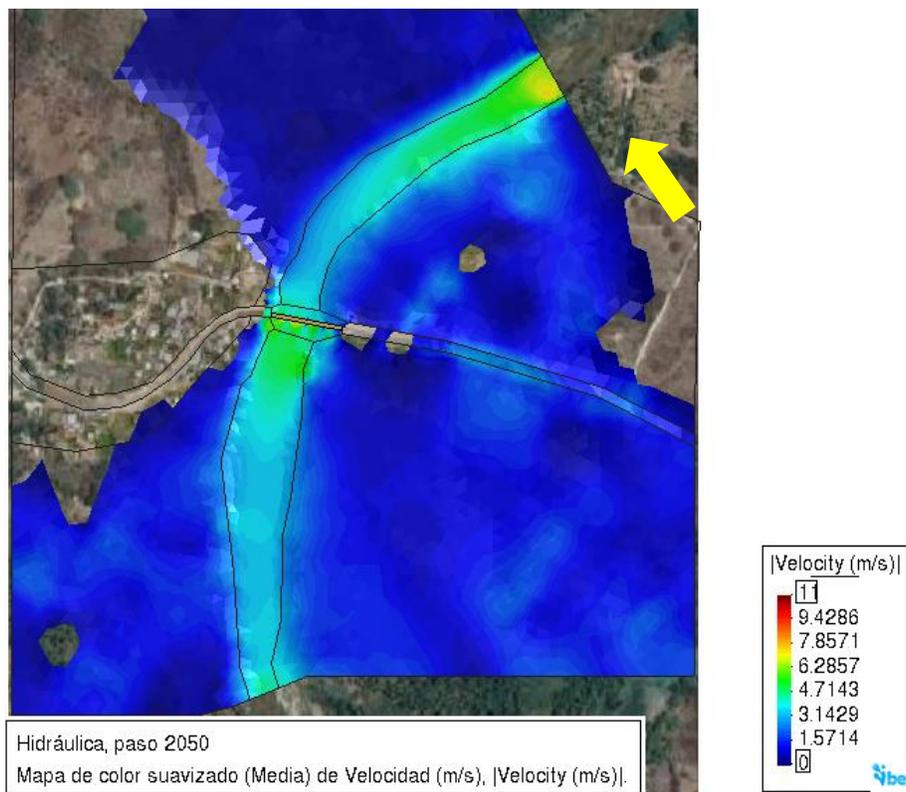


Figura 58. Velocidades en la zona de estudio para el MDT LiDAR_2

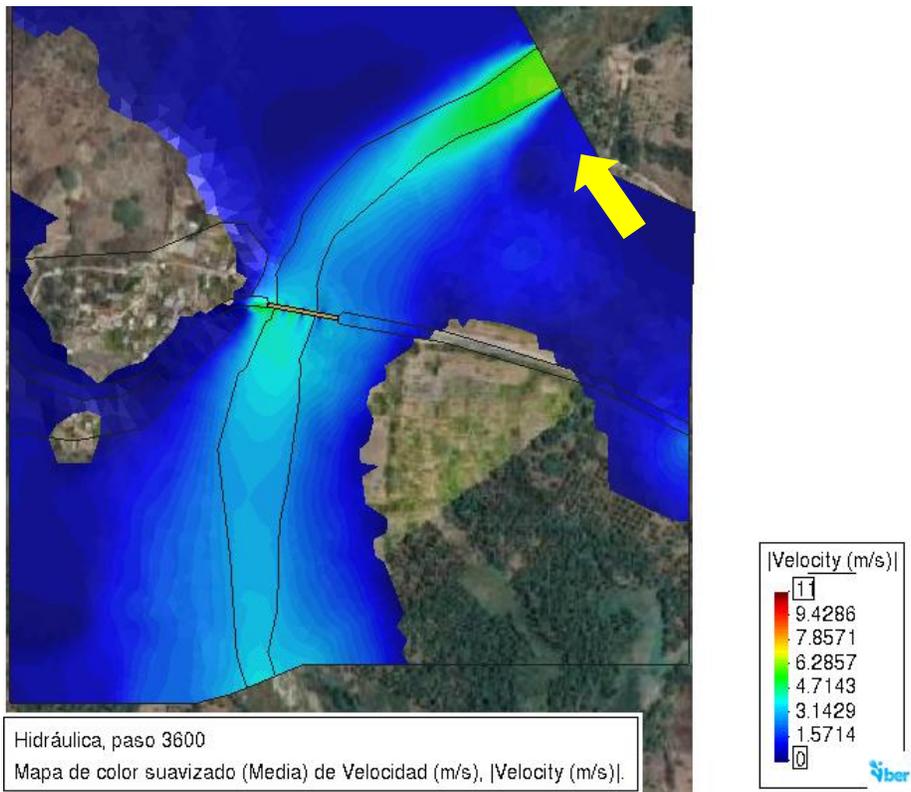


Figura 59. Velocidades en la zona de estudio para el MDT CEM_2

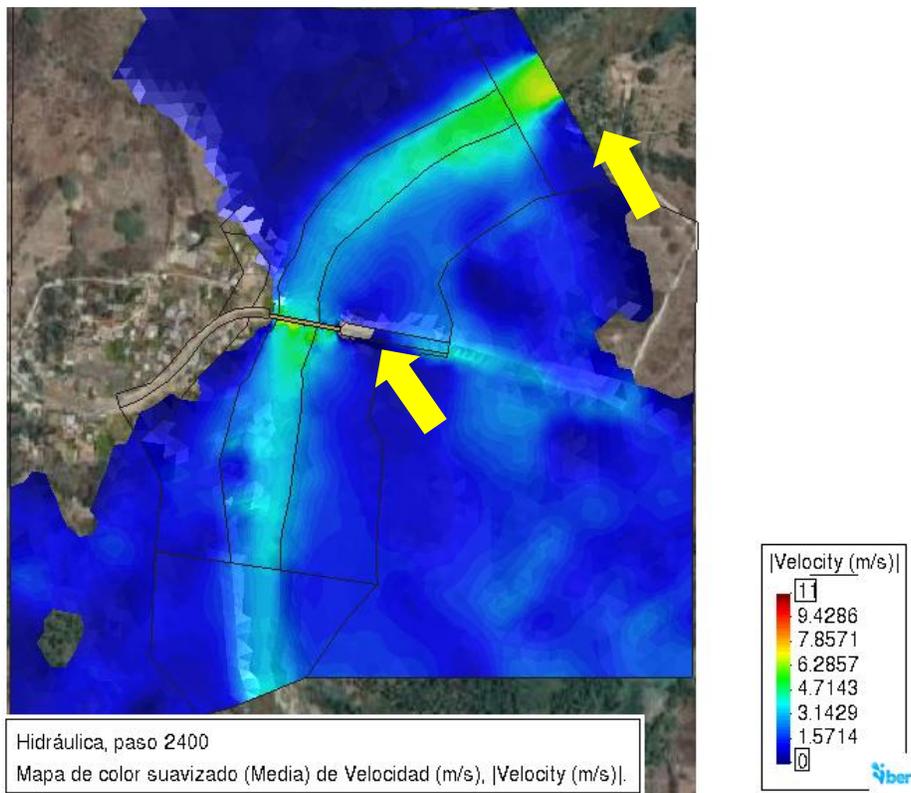


Figura 60. Velocidades en la zona de estudio para el MDT FOTO_2

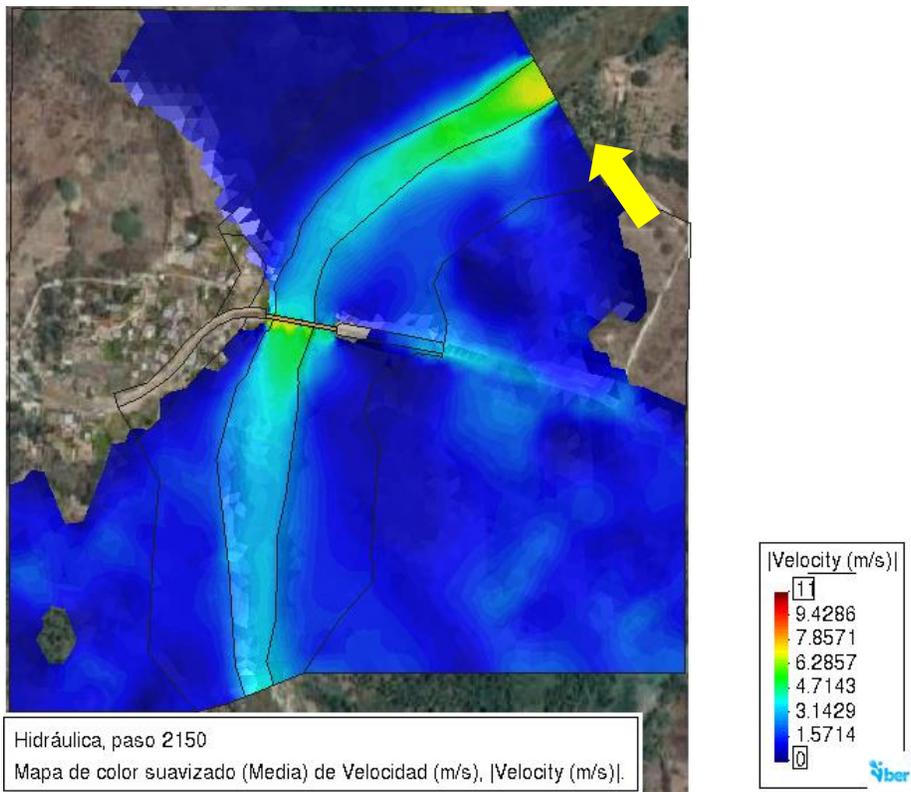


Figura 61. Velocidades en la zona de estudio para el MDT TOPO_2

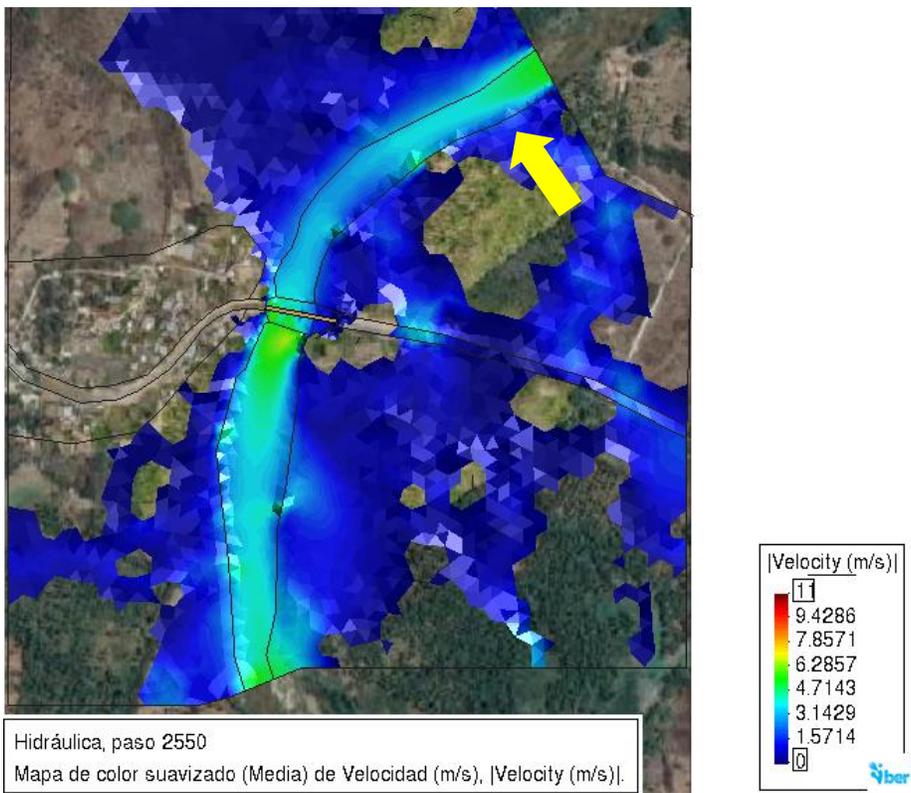


Figura 62. Velocidades en la zona de estudio para el MDS LiDAR_2

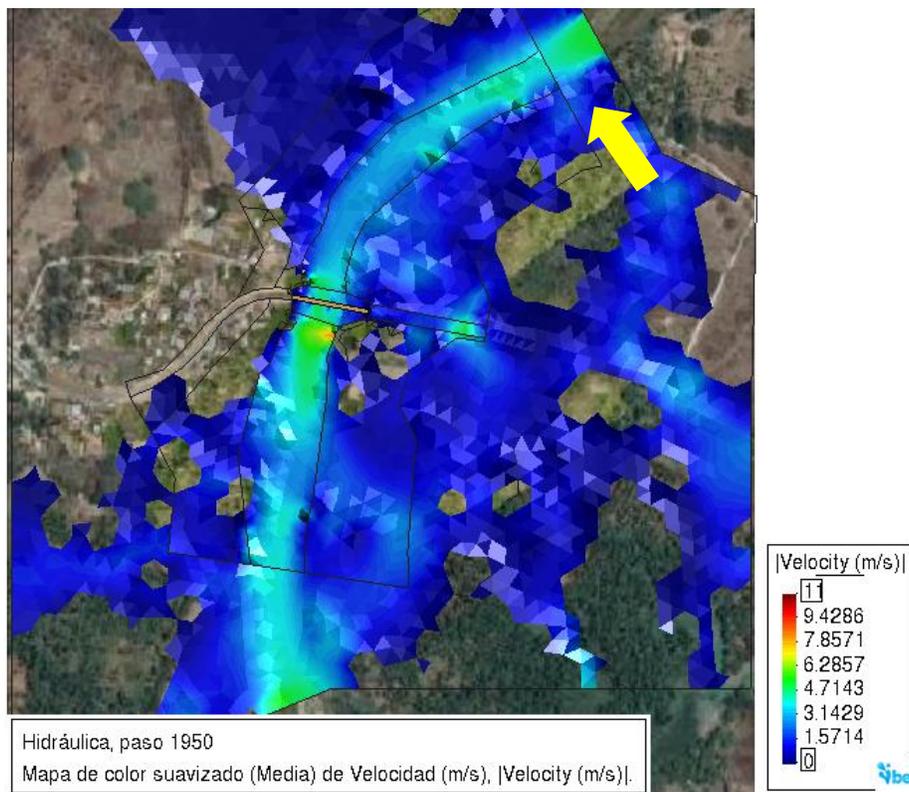


Figura 63. Velocidades en la zona de estudio para el MDS FOTO_2

Para la zona de estudio, las velocidades del flujo presentan variaciones notables según el MDE utilizado:

MDT LiDAR_2: La velocidad máxima es de aproximadamente 7.5 m/s al inicio del cauce, disminuyendo gradualmente hacia aguas abajo hasta alcanzar valores mínimos de 2 m/s después del puente (Figura 58).

MDT CEM_2: Las velocidades máximas se encuentran en los primeros metros del cauce, alcanzando hasta 6.5 m/s (Figura 59).

MDT FOTO_2: Se registran velocidades máximas de 7 m/s tanto en la entrada del cauce como en el centro del puente Copala (Figura 60).

MDT TOPO_2: Las velocidades llegan a 7.5 m/s en los primeros metros del cauce principal, disminuyendo hacia aguas abajo con valores mínimos de hasta 2 m/s (Figura 61).

MDS LiDAR_2: Se observan velocidades notablemente altas en la zona del cauce, alcanzando hasta 7 m/s aguas abajo del puente (Figura 62).

MDS FOTO_2: La velocidad máxima registrada es de 11 m/s, concentrándose en la zona aguas abajo del cauce y disminuyendo conforme avanza el flujo (Figura 63).

Los altos valores de velocidad observados en la entrada del cauce pueden no ser completamente precisas debido a las condiciones de contorno implementadas en el modelo.

4.2.3 Tirantes en la zona de estudio (Grupo 2)

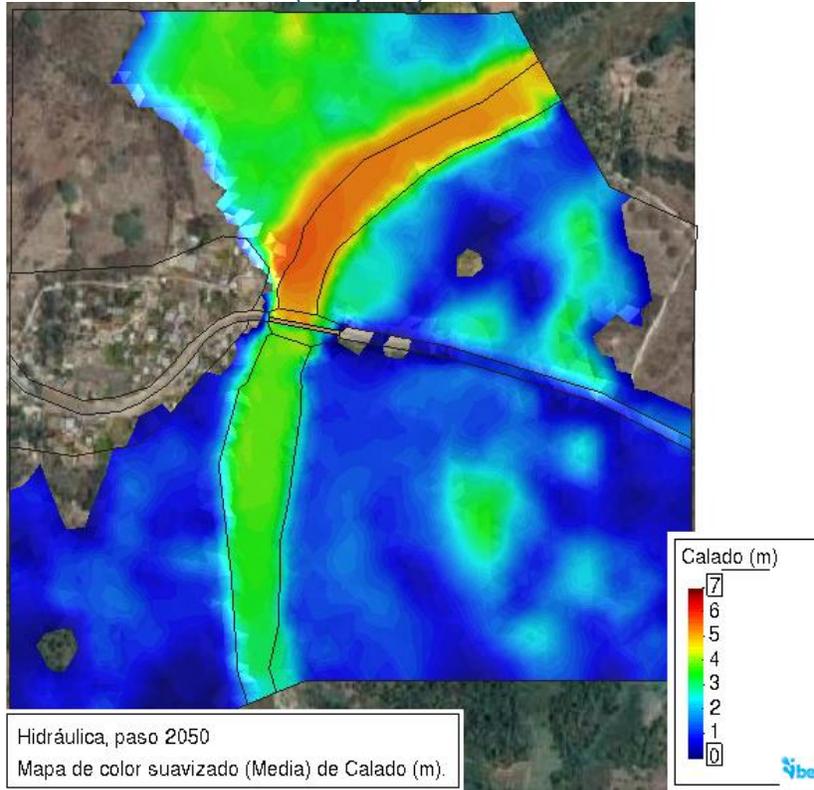


Figura 64. Tirantes en la zona de estudio para el MDT LiDAR_2

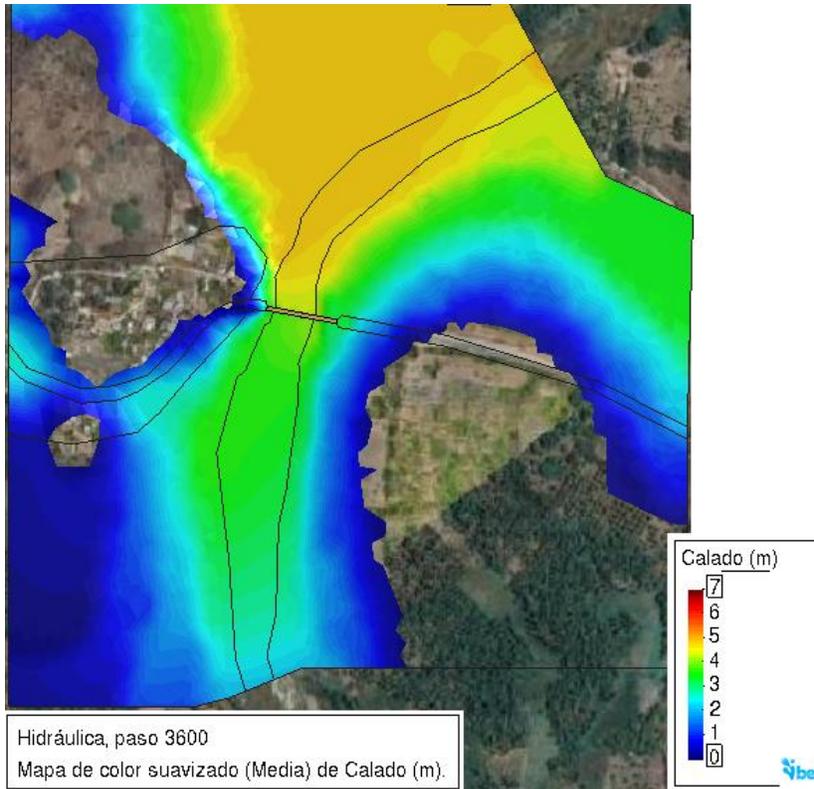


Figura 65. Tirantes en la zona de estudio para el MDT CEM_2

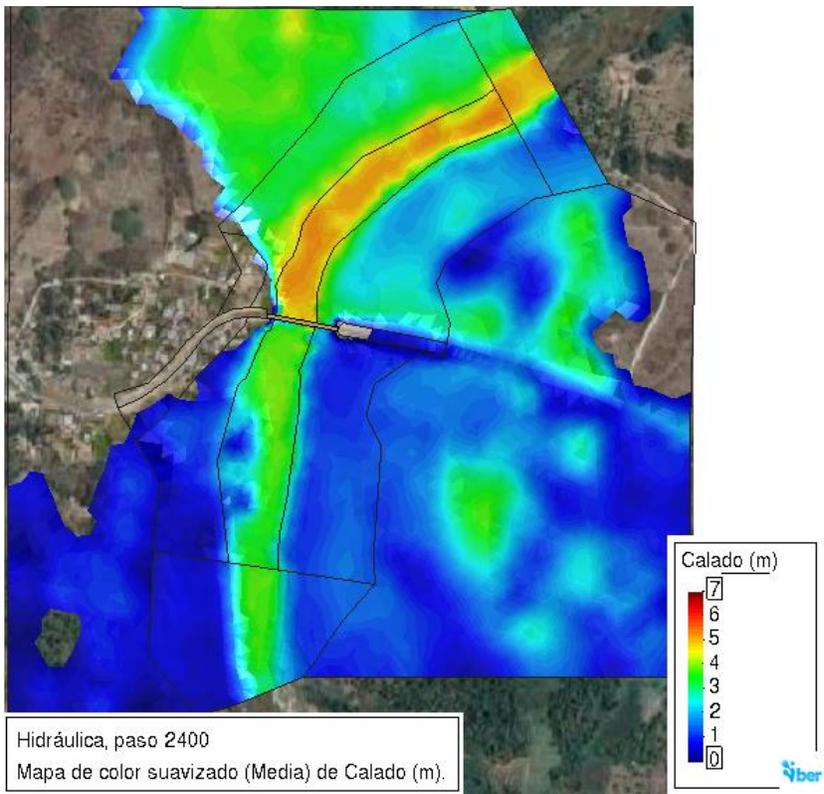


Figura 66. Tirantes en la zona de estudio para el MDT FOTO_2

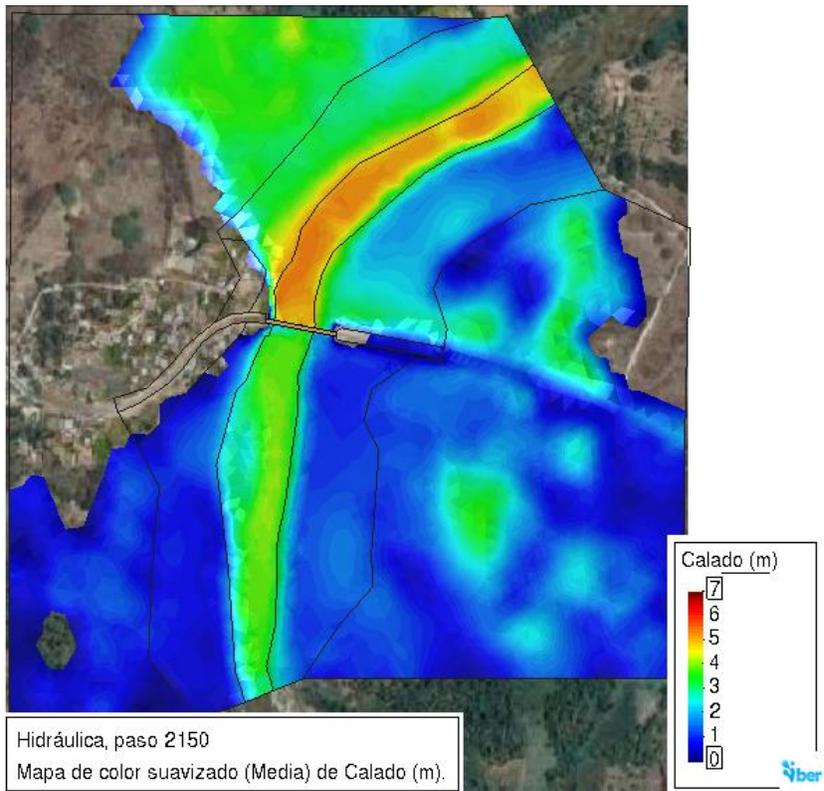


Figura 67. Tirantes en la zona de estudio para el MDT TOPO_2

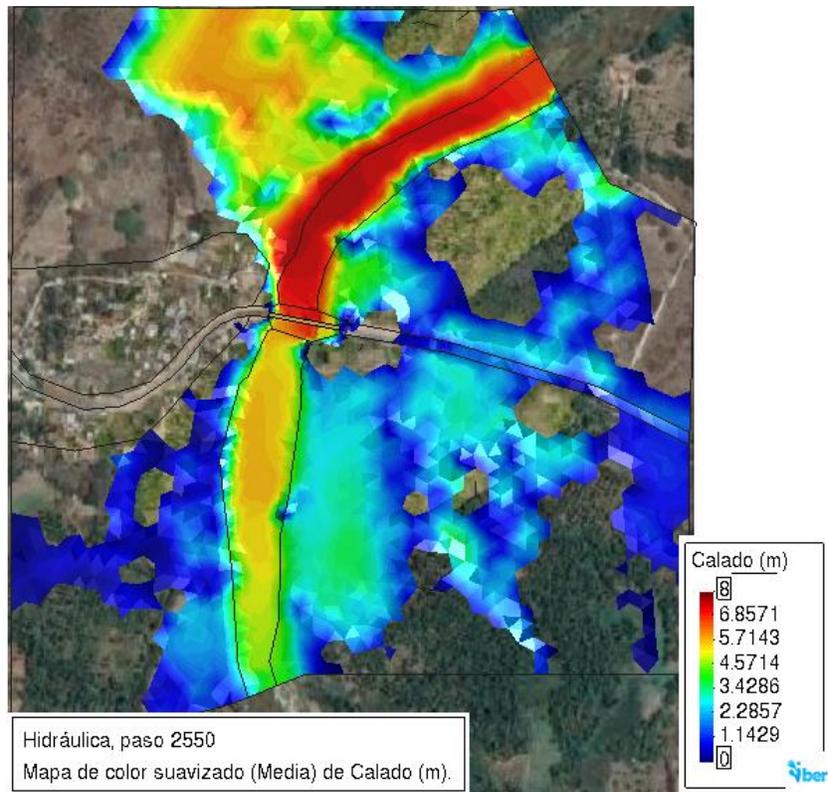


Figura 68. Tirantes en la zona de estudio para el MDS LiDAR_2

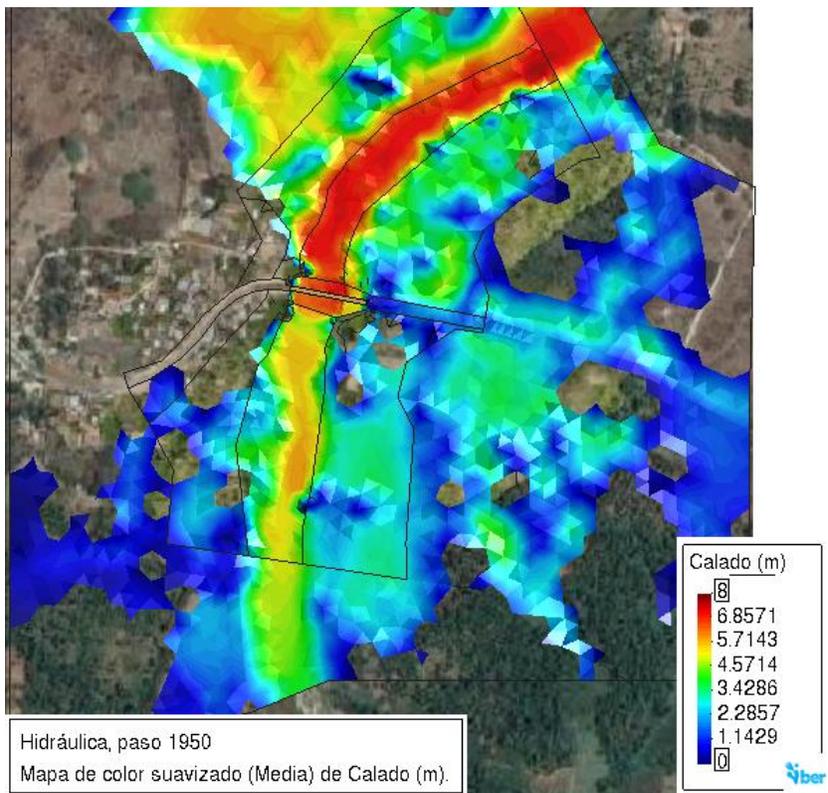


Figura 69. Tirantes en la zona de estudio para el MDS FOTO_2

Los tirantes de agua obtenidos de las distintas simulaciones varían según el Modelo Digital de Elevación utilizado:

MDT LiDAR_2: Los tirantes máximos se registran aguas arriba del puente, alcanzando hasta 5.5 metros, y disminuyen gradualmente a aproximadamente 3 metros aguas abajo (Figura 64).

MDT CEM_2: Se observan tirantes máximos de alrededor de 5 metros en la zona de estudio, tanto en el cauce aguas arriba del puente como en la llanura de inundación (Figura 65).

MDT FOTO_2: En algunas áreas del cauce aguas arriba del puente, los tirantes alcanzan casi 5.5 metros (Figura 66).

MDT TOPO_2: Los tirantes de agua en la zona de estudio llegan hasta 5.5 metros en el cauce aguas arriba del puente (Figura 67).

MDS LiDAR_2: Los valores máximos de tirante observados son de 8 metros en la zona aguas arriba del puente, disminuyendo a aproximadamente 5.5 metros a medida que se avanza aguas abajo (Figura 68).

MDS FOTO_2: Se registran tirantes máximos de hasta 8 metros desde el inicio del cauce hasta la sección del puente, con una reducción gradual a medida que se avanza hacia aguas abajo (Figura 69).

4.2.4 Error relativo (Grupo 2)

El error relativo se calculó utilizando los resultados obtenidos de las diferentes modelaciones, tomando como referencia la MDT TOPO_2, para las variables hidráulicas de tirante y velocidad, registradas al centro de la sección del puente (Tabla 16). La Figura 70 y Figura 71, muestran las variables hidráulicas para la zona del puente.

El error máximo en los modelos digitales de terreno se registró en la modelación basada en CEM, con un 6.8% para el tirante y un 16.9% para la velocidad. El error mínimo en el tirante se observó en la modelación con MDT FOTO_2, mientras que para la velocidad fue del 1.16% utilizando MDT LiDAR_2. En cuanto a los modelos digitales de superficie, se encontraron errores superiores al 50% para el tirante y entre un 7% y un 11% para la velocidad.

Tabla 16. Comparación de tirantes y velocidad (Grupo 2).

Tipo	y (m)	v (m/s)	er (y) %	er (v)%
MDT TOPO_2	4.186	5.411	---	---
MDT LiDAR_2	4.332	5.474	3.488	1.164
MDT FOTO_2	4.066	5.345	2.867	1.220
MDT CEM_2	3.897	4.498	6.832	16.892
MDS LiDAR_2	6.508	5.035	55.471	6.949
MDS FOTO_2	6.500	4.833	55.280	10.682

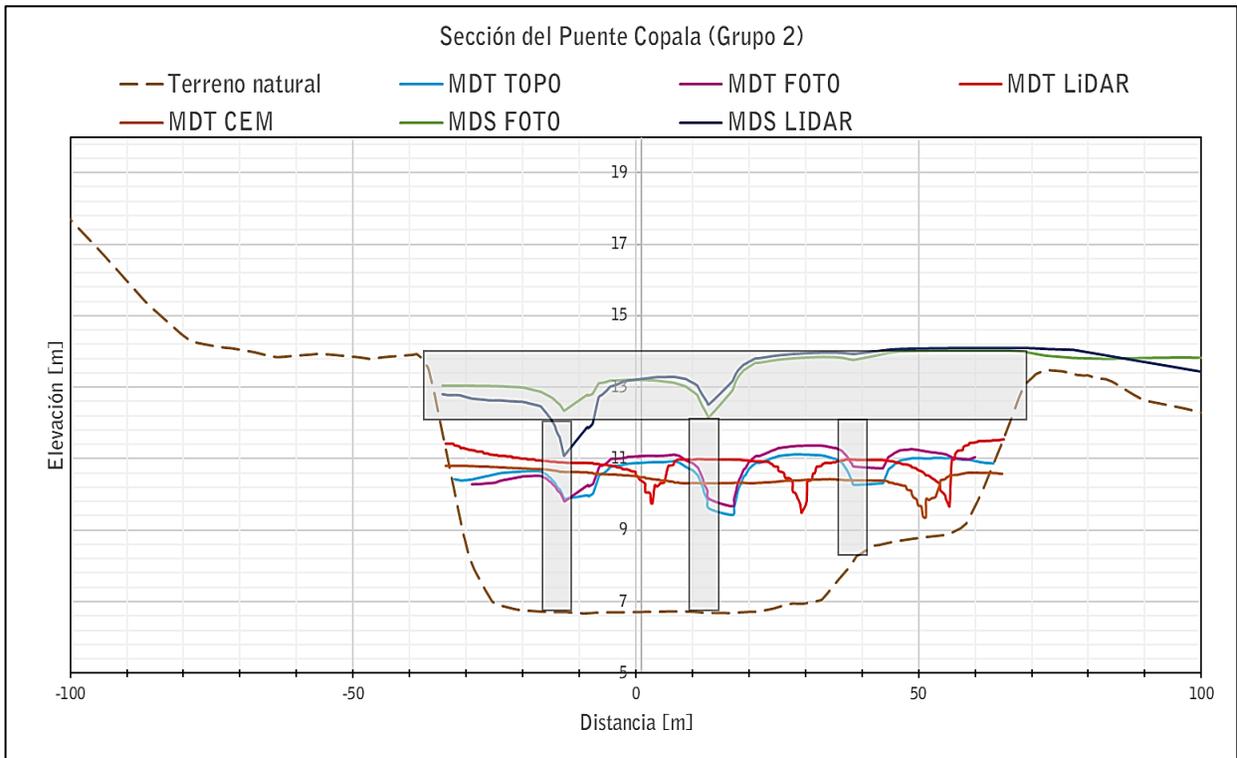


Figura 70. Profundidades en la sección del puente (Grupo 2).

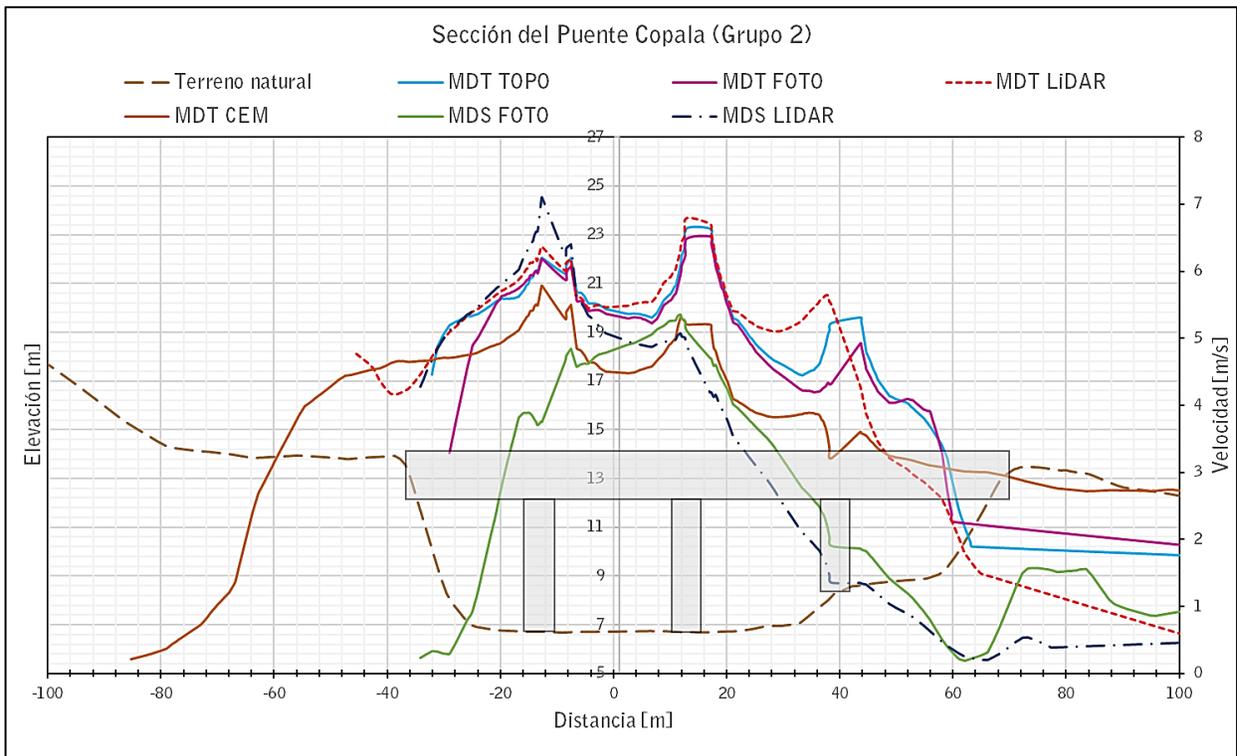


Figura 71. Velocidad en la sección del puente (Grupo 2).

Los niveles de agua obtenidos a partir de las modelaciones realizadas se muestran en la Tabla 17. Se observa que, los niveles de agua obtenidos mediante los MDS, superan por más de un metro el lecho inferior de la losa, mientras que el máximo bordo libre se obtuvo a partir de la modelación MDT CEM_1.

Tabla 17. Nivel de agua en la sección del puente

Modelación	NSLA (msnm)	Bordo libre (m)
MDT TOPO_1	11.675	0.325
MDT LiDAR_1	11.832	0.168
MDT FOTO_1	11.566	0.434
MDT CEM_1	11.056	0.944
MDS LiDAR_1	13.726	-1.726
MDS FOTO_1	13.352	-1.352

El análisis también tomó en cuenta los resultados de la sección aguas arriba del puente (Tabla 18). Se observó que la modelación MDT LiDAR_2 presentó el menor error en la variable de tirante, mientras que la modelación MDT FOTO_2 mostró el menor error en cuanto a velocidad. Por otro lado, la modelación MDT CEM_2 resultó en los errores máximos entre todas las modelaciones MDT. Además, las modelaciones realizadas con MDS revelaron errores significativos; en particular, la MDS LiDAR_2 presentó grandes errores en el tirante, y la MDS FOTO_2 mostró errores considerables en la velocidad.

Tabla 18. Comparación de tirantes y velocidad para la sección aguas arriba (Grupo 1)

Tipo	y (m)	v (m/s)	er (y) %	er (v)%
MDT TOPO_2	4.90	3.94	---	---
MDT LiDAR_2	5.04	4.16	2.962	5.686
MDT FOTO_2	4.74	4.00	3.312	1.695
MDT CEM_2	4.36	3.55	11.068	9.944
MDS LiDAR_2	6.96	4.06	42.130	3.137
MDS FOTO_2	6.54	4.55	33.531	15.674

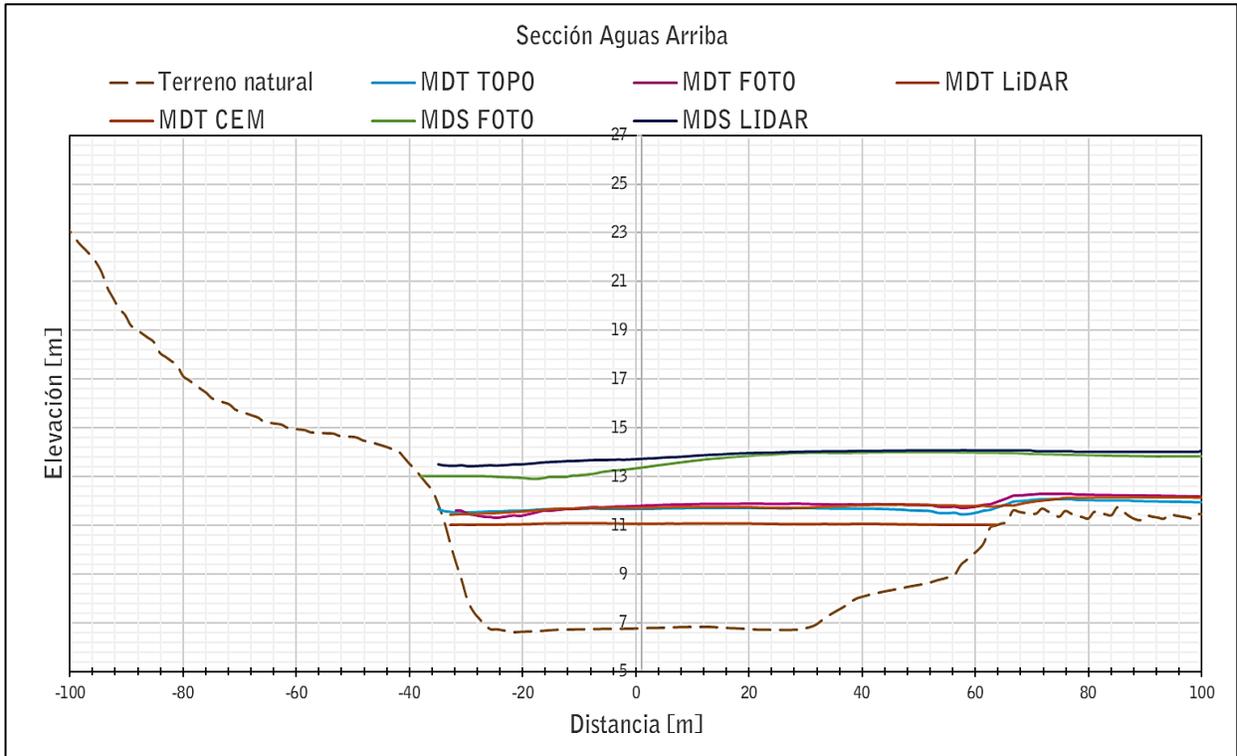


Figura 72. Profundidades en la sección aguas arriba (Grupo 2)

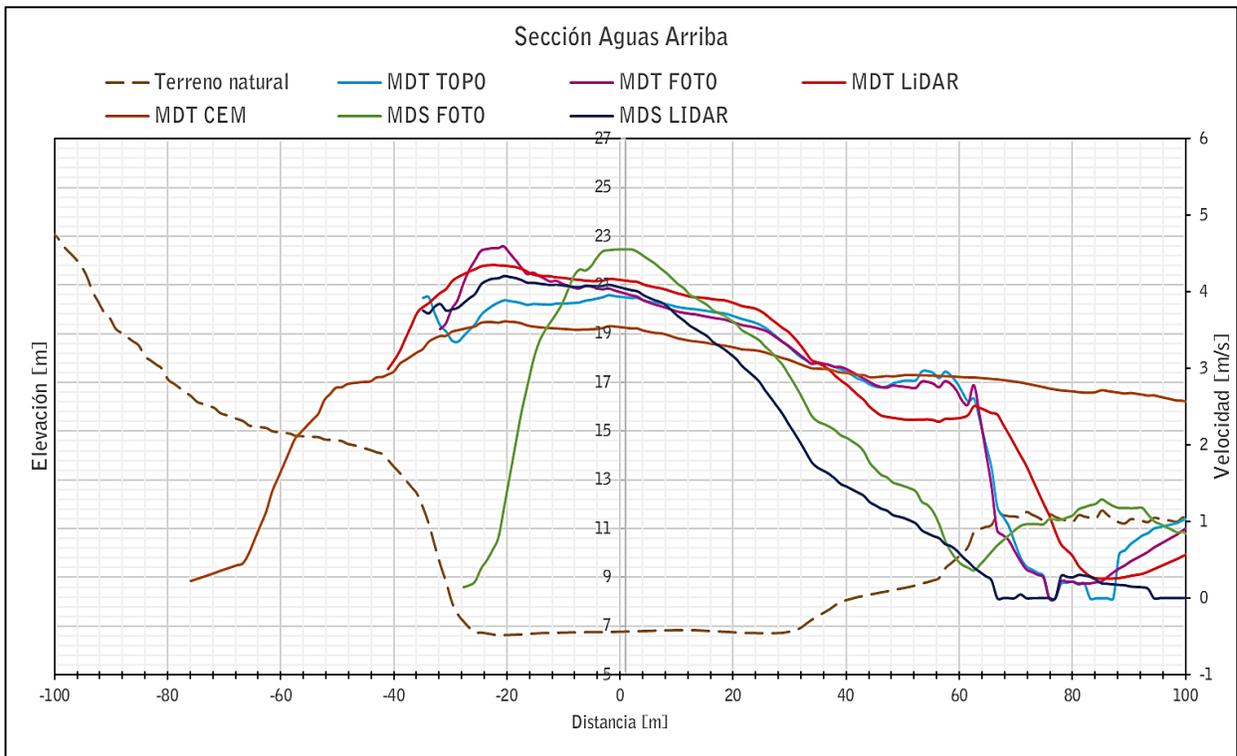


Figura 73. Velocidades en la sección aguas arriba (Grupo 2)

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con objeto de conocer el comportamiento de las variables hidráulicas para el puente Copala, conformado por 4 claros de 23.8 m, así como pilas de aproximadamente 1.3 m de diámetro. Se realizaron 12 simulaciones manteniendo igualdad de condiciones hidráulicas con el fin de comparar los resultados, a partir del empleo de diferente resolución topográfica, siendo un CEM (15 m), LiDAR (5 m), fotogrametría (5 cm) y topografía (2 m).

El levantamiento topográfico se realizó obteniendo secciones a cada 20 m, abarcando 500 m aguas arriba y 500 aguas abajo, haciendo uso de estación total. Durante el levantamiento se observó un cauce poco sinuoso, con fondo plano y una profundidad de agua de aproximadamente 0.5 m.

Las simulaciones se agruparon en dos tipos:

- En el grupo 1 se emplearon diferentes tamaños de malla para cada una de las modelaciones, establecida a partir de la resolución máxima de cada uno de los modelos digitales de elevación, a manera de proponer un tamaño adecuado para optimizar recursos de cálculo.
- Para el grupo 2 se utilizó el mismo tamaño de malla en todas las modelaciones, el cual se estableció considerando la mínima resolución entre los MDE, que en nuestro caso corresponde al CEM de 15 m.

Se consideró un área de estudio de 88 hectáreas, utilizando 4 usos de suelo diferente (cauce, carretera, zona urbana y llanuras), con una longitud de cauce de 1,060 m y un ancho de aproximadamente 65 m. Además, se establecieron valores de rugosidad de 0.035 para el cauce, 0.045 en llanuras, 0.02 en la carretera y 0.15 para la zona urbana, así como un gasto de diseño de 2,169 (m³/s), correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años calculado mediante el método de Hidrograma Unitario Triangular, esto con base en la norma N-PRY-CAR-1-06-004/18.

Las variables hidráulicas obtenidas en la sección del puente a partir de las modelaciones del grupo 1 muestran que los errores máximos se derivan del MDS LiDAR_1 y MDS FOTO_1, con errores superiores al 50 % para el tirante y un rango de 5 % a 10 % para la velocidad, lo cual podría indicar daños significativos en la estructura. Por otro lado, en los MDT, se observan errores máximos del 11 % para el tirante y del 16 % para la velocidad en la modelación MDT CEM_1. Se destaca que los errores mínimos se registraron en la modelación MDT LiDAR_1 para el tirante y en la modelación MDT FOTO_1 para la velocidad.

A partir de la evaluación de los errores relativos en el grupo 2, para la sección del puente, se encontró que el error máximo en los MDT se registró en la modelación basada en MDT CEM_2, con un 6.8% para el tirante y un 16.9% para la velocidad. El menor error en el tirante se observó en la modelación utilizando MDT FOTO_2, mientras que para la velocidad fue del 1.16% utilizando MDT LiDAR_2. En cuanto a los MDS, se encontraron errores superiores al 50% para el tirante y entre un 7% y un 11% para la velocidad.

Similar a lo descrito anteriormente, ocurre con las variables obtenidas en una sección aguas arriba del puente. Es posible observar que en el caso del Grupo 1, los errores máximos resultan a partir de los MDS, principalmente del MDS FOTO_1, con error mayor al 40% para el tirante y de aproximadamente 21% en el caso de la velocidad. En cuanto a los modelos digitales de terreno, el MDT CEM_1, arroja errores del 12% y 14%, para tirante y velocidad,

respectivamente, mientras que el error mínimo se da a partir de la modelación MDT FOTO_1, con error del 0.5 % y 0.75% para tirante y velocidad, respectivamente.

En cuanto al Grupo 2, en la sección aguas arriba del puente, para las simulaciones a partir de los modelos digitales de superficie, se muestran errores máximos de tirante del 42% de la modelación MDS LiDAR_2 y del 16% para la variable de velocidad de la modelación MDS FOTO_2. En cuanto a los MDT empleados, se observa que el error máximo tanto para tirante como velocidad resulta de la modelación MDT CEM_2, con el 11% y 10%, respectivamente, mientras que el error mínimo de tirante con el 3% surge de la modelación MDT LiDAR_2 y de 1.6% para la velocidad con la modelación MDT FOTO_2.

Se analizaron los niveles de agua observados en cada simulación para la sección del puente. En el Grupo 1, los niveles de agua superan en más de 1 m el nivel del lecho inferior para los Modelos Digitales de Superficie (MDS). En contraste, para los Modelos Digitales del Terreno (MDT), los niveles de agua se mantienen por debajo del lecho inferior, con bordos libres de 1.4 metros en el caso del MDT CEM_1 y de 0.878 m para el MDT LiDAR_1. Este último valor es el que más se aproxima al obtenido mediante el MDT TOPO_1.

Para el Grupo 2, se analizaron los niveles de agua observados en cada simulación para la sección del puente. En este grupo, MDS mostraron niveles de agua que superan en más de 1.3 m el nivel del lecho inferior. En contraste, los MDT indicaron que los niveles de agua se mantienen por debajo del lecho inferior, con bordos libres de 0.94 m en el caso del MDT CEM_1 y de 0.434 m para el MDT LiDAR_1. Este último valor es el más cercano al obtenido mediante el MDT TOPO_1.

Comparando los resultados entre el Grupo 1 y 2, se hace evidente la importancia de asignar tamaños de malla acorde a las resoluciones que proporcionan cada uno de los modelos digitales de elevación, con lo cual se logra extraer la mayor información disponible para la zona de estudio. Un ejemplo de esto es la comparación entre los resultados del MDT TOPO_1 y el MDT TOPO_2, donde se observa un aumento de aproximadamente 0.5 metros en el nivel de agua, lo que indica un mayor riesgo para la estructura.

El modelo obtenido por fotogrametría proporciona la resolución más alta, sin embargo, en la zona de mayor importancia, en este caso la zona de propagación, los valores de elevación obtenidos del MDT presentan una diferencia de aproximadamente 0.5 m con respecto a la topografía, debido a que, probablemente no se obtienen las elevaciones correctas del fondo del cauce, sino del espejo de agua. Por lo tanto, dicho método, si es recomendable, pero en zonas de aportación, condiciones de baja abundancia de vegetación y levantamiento de cauces en temporada de estiaje como sucedió en este caso.

Se recomienda utilizar los resultados derivados del modelado MDT TOPO_1, debido al procedimiento empleado en la obtención del modelo digital de terreno. Este proceso incluyó un levantamiento topográfico en campo, conforme a lo establecido en la norma N-PRY-CAR-1-06-002/18, que especifica secciones cada 20 m, abarcando el ancho del cauce y hasta 30 m como mínimo. El levantamiento se extendió al menos 500 metros aguas arriba y 500 metros aguas abajo del cauce, utilizando una estación total. Además, se consideró el uso de imágenes satelitales para áreas de llanura de inundación extensas, superiores a 1 kilómetro.

Aunque la norma menciona específicamente el uso de estación total, es importante tener en cuenta los avances tecnológicos. El uso de un GPS en modo RTK proporciona información confiable, con resultados que apenas difieren en pocos milímetros o a veces centímetros de

los obtenidos con estación total, lo cual contribuye a reducir los tiempos de levantamiento en campo. Este enfoque permitiría obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE) con más información.

Es importante mencionar que la normativa no especifica cómo deben asignarse las condiciones de frontera para las modelaciones hidráulicas 2D. Por lo tanto, se recomienda que la condición de entrada sea asignada en la sección transversal donde comienza el cauce, en dirección de aguas arriba hacia aguas abajo. Para la salida, se sugiere utilizar una condición tipo vertedor o de régimen crítico siempre y cuando se haya comprobado, que la influencia de la condición de frontera no se propague ni afecte con relevancia la zona de interés, asignando la sección transversal al final del cauce y parte perimetral de la llanura de inundación aguas abajo.

Si se elige utilizar resultados derivados de un modelo diferente al obtenido mediante levantamientos directos, existe el riesgo de subestimar posibles eventos futuros como socavaciones, o en el extremo opuesto, incurrir en costos de construcción elevados debido a una sobrevaloración. En muchas ocasiones, es difícil acceder a información detallada obtenida de levantamientos topográficos, por lo que se puede recurrir a datos obtenidos mediante fotogrametría. Sin embargo, se deberá tener en cuenta que se requiere también del nivel de detalle suficiente para modelar estructuras importantes como puentes.

Es fundamental considerar los errores asociados con las elevaciones obtenidas y cómo estos pueden influir en la precisión de las predicciones de la zona de propagación. El uso de MDE proporcionados por instituciones como INEGI también conlleva riesgos de cálculo de variables hidráulicas incorrectas. Por lo tanto, se recomienda el uso de MDE de fuentes oficiales mexicanas (INEGI) únicamente para zonas de aportación que tienen una menor influencia en los resultados finales.

REFERENCIAS

- Instituto de Ingeniería . (2013). Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración. *GEOS, Vol. 33, No. 2*, 332-349.
- Aparicio Mijares, F. J. (2003). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez Cendón, M., . . . Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10.
- Burgos, V., & Salcedo, A. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. *Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, 1(10). Obtenido de <http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje1/1.11.pdf>
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2020). CONAGUA. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- CONAGUA. (2023). CONAGUA. Obtenido de <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/guerrero/guerrero.html>
- CONAGUA. (2023). *Estaciones climatológicas*. Obtenido de <https://sih.conagua.gob.mx/climas.html>
- Del Río, S. O., Gómez, C. F., López, C. N., Saenz, E. J., & Espinoza, F. A. (2020). Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de Drones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(2), 14. Obtenido de : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193963490001>
- Díaz, M. (2013). *Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2*. Doctoral dissertation, Universidad de Almería.
- Domínguez, M. R., Arganis, J. M., & Carrizosa, E. E. (2007). *Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana. Tomos I al IV*. Informe Técnico. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Encalada Guachún, J. R., & Jara Jara, R. D. (2010). *Implementación del Modelo Hidráulico HEC GeoRAS*. Cuenca: Universidad de cuenca.
- INEGI. (2010). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#descargas>
- INEGI. (2012). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>
- INEGI. (2012). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2012). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>
- INEGI. (s.f.). *Modelos Digitales de Elevación (MDE)-Descripción*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>

- M. Sanz-Ramos, L. C.-G.-A.-H. (2022). *Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, Iber. More than 2D Hydraulic modelling*. Obtenido de https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b
- Marquina, J., & Mogollón R., A. (2018). Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica venezolana*, 59(1), 42-52.
- Martinez Ruíz, R., González Gámez, F., & Gordo Murillo, C. (2001). Análisis de las Metodologías habituales para la generación de Modelos Digitales de Terreno. *Mapping*(71), 86-92.
- Mishra, S. K., & P. Singh, V. (2003). Soil Conservation service curve number (SCS-CN) Methodology. *Water Science and Technology Library*, 84-104.
- NASA. (s.f.). *Búsqueda de datos terrestres*. Obtenido de [https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?p=C1711961296-LPCLOUD&pg\[0\]\[v\]=f&pg\[0\]\[gsk\]=-start_date&q=ASTGTMV003&gdf=Cloud%2BOptimized%2BGeoTIFF%2B%2528COG%2529!GeoTIFF!ASCII%2B-%2BTIFF!ASCII&lat=0.0703125](https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?p=C1711961296-LPCLOUD&pg[0][v]=f&pg[0][gsk]=-start_date&q=ASTGTMV003&gdf=Cloud%2BOptimized%2BGeoTIFF%2B%2528COG%2529!GeoTIFF!ASCII%2B-%2BTIFF!ASCII&lat=0.0703125)
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, M. (2016). Modelación Hidrodinámica del tramo Medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 3(2), 95-101. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/11847>
- Pachas L., R. (2009). EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO: USO DEL GPS Y ESTACIÓN TOTAL. *Universidad de los Andes*, VIII, 29-45.
- Razo, A. P. (2018). *Modelación Numérica de ríos. Análisis 1D-2D*. CDMX: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- SAGARPA. (s.f.). *Topografía aplicada a obras COUSSA*. Colegio de Postgraduados.
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., . . . Aragón-Hernández, J. L. (2022). *Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, Iber. More than 2D Hydraulic*. 1-67.
- Taylor, A. B., & Schwarz, H. E. (1952). Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, Volume 33, Issue 2, 235-246.
- Torres Nieto, Á., & Villate Bonilla, E. (2000). *Topografía* (4a ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- UNAM. (21 de Enero de 2009). *Atlas Climático Digital de México*. Obtenido de <https://atlasclimatico.unam.mx/acdm/visualizador>
- Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Alfaomega.