



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CAMPUS I**

**“SIMULACIÓN EN 2 DIMENSIONES CON IBER Y HEC-RAS, PARA  
RÍOS DE PLANICIE, CASO DE ESTUDIO RÍO USUMACINTA.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA**

**PRESENTA**

**DORIAN TOLEDO VELÁZQUEZ PS1520**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; NOVIEMBRE DEL 2022.**



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.  
04 de noviembre del 2022  
Oficio No. F.I.01.1849/2022

**C. DORIAN TOLEDO VELÁZQUEZ**  
**ALUMNO DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA**  
**CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

**“SIMULACIÓN EN DOS DIMENSIONES CON IBER Y HEC RAS PARA RÍOS DE PLANICIE, CASO DE ESTUDIO RÍO USUMACINTA”.**

CERTIFICO el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”**

  
**DR. JOSÉ ALONSO FIGUEROA GALLEGOS**  
**ENCARGADO DE DIRECCIÓN**



Ccp. Dra. Daisy Escobar Castillejos. Coordinadora de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería. UNACH.  
Archivo/minutario  
JAFG/DEC/tcpg\*



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.**

El (la) suscrito (a) Darion Toledo Velázquez  
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Simulación en 2 dimensiones con IBER y HE-RAS, para ríos de Planicie caso de estudio río Usumacinta."  
presentada y aprobada en el año 2022 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 17 días del mes de noviembre del año 2022.

Darion Toledo Velázquez  
Nombre y firma del Tesista o Tesistas

---

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Objetivo General.....	7
1.3. Objetivos Específicos. ....	7
1.4. Justificación.....	8
1.5. Alcance.....	9
1.6. Antecedentes.....	9
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	17
2.1. Modelos en dos dimensiones ventajas de la simulación 2D.....	17
2.2. Modelos Matemáticos.....	18
2.3. HEC – RAS. ....	19
2.4. Capacidades y ventajas del Modelo HEC – RAS 2D .....	20
2.5. IBER.....	24
2.6. Capacidades y ventajas del Modelo IBER 2D.....	24
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	27
3.1 Ecuaciones a resolver en los modelos en dos dimensiones. ....	27
3.1.1. HEC – RAS 2D.....	27
3.1.2. IBER.....	28
3.2. Esquemas numéricos.....	30
3.2. Morfología fluvial. ....	32
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	35
4.1 Metodología.....	35
4.1.1. Materiales y Método para las simulaciones. ....	36
4.1.2. Pre proceso.....	36

---

4.1.3. Simulación numérica en el programa HEC-RAS.....	43
4.1.4. Configuraciones iniciales del Modelo en HEC-RAS.....	44
4.1.5. Geometría del Modelo.....	45
4.1.6. Generación del mallado del área de estudio HEC-RAS.....	47
4.1.7. Valor del coeficiente de rugosidad “n” de Manning. ....	48
4.1.8. Condiciones Iniciales del tramo aguas arriba y aguas abajo. ....	48
4.1.9. Simulación numérica en el programa IBER.....	52
4.1.10. Geometría del Modelo.....	53
4.1.11. Condiciones de contorno. ....	54
4.1.12. Condiciones iniciales.....	56
4.1.13. Generación del Mallado del área de estudio IBER.....	56
4.1.14. Configuración del modelo numérico.....	57
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>58</b>
5.1. Análisis de Resultados .....	58
5.1.1. Resultados simulación HEC-RAS. ....	58
5.1.2. Resultados simulación IBER. ....	60
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>63</b>
6.1. Conclusiones.....	63
6.2. Recomendaciones.....	64
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>66</b>
7.1. Referencias .....	66

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas de Inundación tomadas a través de imágenes de satélite. Elaborada con información del IPCET, (2022). .....	11
Figura 2. Climatología Chiapas (CONAGUA, 2020).....	12
Figura 3. Climatología Tabasco (CONAGUA, 2020). .....	13
Figura 4. Precipitación promedio mes de noviembre (CONAGUA, 2020). .....	14
Figura 5. Anomalías de precipitación (CONAGUA, 2020).....	15
Figura 6. Niveles en el río Usumacinta 2020. Elaborado con información de la CONAGUA. ....	16
Figura 7. Ubicación del punto de Aforo, estación hidrométrica Boca del Cerro. Elaboración propia. ....	16
Figura 8. Interfaz del Módulo RAS Mapper. Elaboración propia.....	20
Figura 9. Diseño de mallado. HEC-RAS 2D Flow Modeling (2020), (p 17). .....	22
Figura 10. Descripción de la terminología de la malla computacional de modelado HEC-RAS 2D. HEC-RAS User’s Manual 2022, (p. 134). ....	23
Figura 11. Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izquierda) y 3D (derecha), (E. Bladé, et al, 2014). ....	32
Figura 12. Cauce trenzado. Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003).....	33
Figura 13. Cauce meandriforme: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución (derecha). Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003). ....	33
Figura 14. Corte natural de un meandro. Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003). .....	34
Figura 15. Cuenca de río Usumacinta. Elaboración propia. ....	35
Figura 16. Diagrama de desarrollo del MDE. Elaboración propia.....	37
Figura 17. Modelo Digital de Elevación. Elaboración propia. ....	42
Figura 18. Modelo Digital de Elevación formato .TIFF. Elaboración propia.....	43
Figura 19. Diagrama de desarrollo del modelo en HEC-RAS. Elaboración propia.....	44
Figura 20. Proyección de la ventana de trabajo. HEC-RAS 6.1 (2022).....	45
Figura 21. Vista del MDE en HEC-RAS. Elaboración propia.....	46
Figura 22. Mapa base. Elaboración propia.....	46
Figura 23. Generación del mallado. Elaboración propia.....	47

---

Figura 24. Detalle del mallado, centro del cauce. Elaboración propia.....	48
Figura 25. Condición de entrada. Elaboración propia. ....	49
Figura 26. Condición de salida. Elaboración propia. ....	49
Figura 27. Vista general de la geometría. Elaboración propia.....	50
Figura 28. Hidrograma de la avenida presentada del mes de noviembre a diciembre del 2020. Elaboración propia.....	51
Figura 29. Ajuste por mayoración de la avenida más adversa. Elaboración propia. ....	51
Figura 30. Condiciones de simulación. HEC-RAS 6.1 (2022). ....	52
Figura 31. Diagrama de desarrollo del modelo en IBER. Elaboración propia. ....	53
Figura 32. Superficie NURBS. Elaboración propia. ....	54
Figura 33. Hidrograma de ingreso, tiempo en segundos. IBER 2.3 (2022). ....	55
Figura 34. Generación de malla IBER. Elaboración propia. ....	57
Figura 35. Configuración modelo de la simulación. IBER 2.3 (2022). ....	57
Figura 36. Resultados obtenidos de profundidades en HEC-RAS. Elaboración propia. ....	59
Figura 37. Resultados obtenidos de velocidades en HEC-RAS. Elaboración propia. ....	60
Figura 38. Resultados obtenidos de profundidades en IBER. Elaboración propia.	61
Figura 39.. Resultados obtenidos de velocidades en IBER. Elaboración propia. ...	62

---

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Datos de Obras de infraestructura. 2014. Elaborado con datos del PROHTAB.....	10
Tabla 2. Principales limitaciones en los modelos físicos y matemáticos. Cisneros I. P. (2017).....	19
Tabla 3. Capacidades y ventajas del Modelo 2 HEC-RAS. Elaborada con datos de Lluen, W. (2015).....	20
Tabla 4. Capacidades y ventajas del Modelo 2D IBER. Elaborado con datos del Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones (2022), (E. Sanz-Ramos, et al, 202). .....	24
Tabla 5. Listado de las cartas de MDE descargadas del INEGI. Elaboración propia. ....	37
Tabla 6. Condiciones que incluye el programa IBER. Manual de referencia Iber (2014).....	55



---

# CAPÍTULO 1

## 1.1. Introducción.

Las inundaciones son efectos secundarios generadas por eventos hidrometeorológicos extremos que se presentan a través de ciclones tropicales, frentes fríos, lluvias convectivas y el paso de ondas tropicales, que, particularmente para el caso de estudio de este trabajo de tesis, son las lluvias que año con año afectan a los Estados de Chiapas y Tabasco. El río Usumacinta es el más extenso y caudaloso a nivel Nacional, por lo que representa un nivel de riesgo alto en el incremento de nivel del cauce, sobre todo en las zonas bajas de su cuenca. El incremento del nivel del cauce del río Usumacinta provoca afectaciones como: inundaciones en áreas de cultivo, infraestructura y sobre todo a las zonas urbanas que se encuentran en los Estados antes mencionados. El cauce del río Usumacinta tiene una cantidad extensa de meandros además que en las zonas bajas se conecta con diversos sistemas lagunares originando un comportamiento lento y complejo en su trayecto.

Existen diversos Para simular las avenidas extraordinarias en los cauces, existen diversos modelos hidráulicos que permiten interpretar el comportamiento de las avenidas máximas en diversos ríos, con esto, se pueden obtener resultados confiables, aplicables en el desarrollo de obras hidráulicas que permitan disminuir el impacto de los crecientes sobre la sociedad. que sean de alto beneficio para las poblaciones que se encuentran sobre las márgenes de los cauces, la generación de mapas de inundaciones para que sean tomadas en cuenta en los planes de desarrollo urbano, el aprovechamiento de extracción de materiales de manera adecuada, así como diversos usos en los que estos resultados pueden ser aplicados. Asimismo, la aplicación de estos modelos son de gran utilidad para la calibrar avenidas reales y lograr obtener un pronóstico hidrológico que permita anticipar las afectaciones durante los eventos de precipitaciones extremas.

---

### **1.1. Objetivo General.**

Determinar el comportamiento de las inundaciones presentadas en el año 2020 en la planicie Tabasqueña y la parte noreste del estado de Chiapas, mediante el análisis del comportamiento del cause del río Usumacinta, utilizando los modelos Bidimensionales IBER y HEC-RAS.

### **1.2. Objetivos Específicos.**

- Estimar el comportamiento de las inundaciones presentadas en el año 2020 debido a diferentes eventos hidrometeorológicos presentadas en la cuenca del río Usumacinta.
- Aplicar el modelado hidráulico bidimensional utilizando programas de uso libre, IBER y HEC-RAS, en un tramo del río tomando como referencia desde la estación hidrométrica Boca del Cerro a la confluencia con el río Grijalva.
- De resultados realizar una comparación de las ventajas y complejidades de cada modelo.
- Comparar los resultados obtenidos de los tirantes y velocidades de acuerdo a los programas utilizados.
- Observar los resultados obtenidos con la topografía del INEGI en escala 1:5,000.

---

### **1.3. Justificación.**

La complejidad que se presenta en el análisis del comportamiento de un río es permanente debido a la dinámica natural y antrópica a la que es expuesta por tanto, en este tema de investigación solo nos enfocaremos en estimar las inundaciones máximas que se presentaron en el año 2020, así como las diferencias en la dinámica de modelación de los programas IBER Y HEC-RAS. Además es de gran relevancia conocer el alcance del uso de la información ráster de INEGI en escala 1: 5,000, esto debido a los altos costos que implicaría realizar un levantamiento topobatimétrico del cauce principal y las llanuras de inundación.

---

#### **1.4. Alcance.**

Este trabajo de investigación tiene como alcance, establecer el modelo que mejor se ajusta a la evolución de las inundaciones presentadas en el año 2020 en la planicie Tabasqueña y el noreste del estado de Chiapas, además, conocer el comportamiento del cauce del río Usumacinta a partir de información topográfica del INEGI.

#### **1.5. Antecedentes.**

En los Estados de Chiapas y Tabasco año con año la problemática de las inundaciones es evidente debido a la dinámica hidrometeorológica que existe en estos Estados, principalmente en Tabasco, por lo tanto se han realizado diversos estudios que buscan disminuir el riesgo por inundaciones.

En los años cincuenta, se creó la Comisión del río Grijalva, la cual se encargó de realizar las primeras obras importantes de protección contra inundaciones, agua potable, alcantarillado, caminos, puentes y otras obras hidráulicas en la planicie tabasqueña. La comisión construyó la Presa Netzahualcóyotl (Malpaso), fue el primer paso para mitigar las inundaciones aguas abajo sobre la planicie tabasqueña, el Plan Chontalpa, el Plan Balancán-Tenosique y el Proyecto integral de la Isla (PROHTAB, 2014).

En el año de 1978, se realizaron estudios del proyecto del cauce de alivio Samaria-Golfo de México, el cual fue proyecto para una obra hidráulica de protección contra inundaciones en el Estado de Tabasco (PROHTAB, 2014).

En los setenta, la Secretaría de Recursos Hidráulicos, de la mano con la Residencia de Obras Hidráulicas de Pequeña Irrigación de la misma secretaría, estableció el Plan Chontalpa, realizando obras de control de inundaciones y la construcción de obras de drenaje y riego. Asimismo, se creó el Plan Balancán-Tenosique, ambos planes con el objetivo de tener un mejor control y manejo de los suelos inundables de la planicie tabasqueña y desarrollar condiciones que favorecieran el mejor

---

rendimiento en el cultivo de los habitantes emplazados en dicha zona (PROHTAB, 2014).

A consecuencia de las inundaciones del año 1999, entre los años 2000 y 2010, plantearon el desarrollo de un proyecto para evitar los efectos que las inundaciones provocaron. En el cual surgió el Proyecto Integral Contra Inundaciones (PICI), (PROHTAB, 2014). El PICI se concibió como un proyecto integral que buscó resolver las graves consecuencias producidas por los frecuentes fenómenos hidrometeorológicos.

En el año 2007 se presentó una inundación que provocó grandes daños, en donde el presidente en ese entonces implementó el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), el cual manejó objetivos a corto, mediano y largo plazo en los cuales se incluyó prevenir riesgos de inundaciones, salvaguardar la integridad física y material de los habitantes de la ciudad de Villahermosa.

De acuerdo a la disponibilidad de recursos, los municipios del estado de Tabasco han construido cárcamos de bombeo, con la finalidad de desalojar aguas pluviales, construyendo y desazolvando drenes, protecciones marginales y estructuras de control (PROHTAB, 2014).

A lo largo de los años las obras se han construido (tabla 1), con un objetivo principal que es el manejar el agua pluvial y fluvial, con fines de aprovechamiento o de protección contra inundaciones, a continuación, se mencionan las obras de infraestructura que se construyen con diferentes objetivos (PROHTAB, 2014).

*Tabla 1. Datos de Obras de infraestructura. 2014. Elaborado con datos del PROHTAB.*

<b>Obras de protección</b>	<b>Aprovechamientos hidráulicos</b>
Bordos de defensa	Suministro de agua potable
Cauce de alivio	Producción de energía eléctrica
Estructuras de control	Riego agrícola
Obras de drenaje pluvial	Acuicultura
Escotaduras sobre las márgenes de los ríos	Navegación fluvial
Cauces piloto	Fines recreativos
Protecciones marginales	Conservación de especies (ANP's)

En el año 2020 debido a una serie de eventos Tormentas tropicales y frentes fríos, que se presentaron en la planicie tabasqueña y norte de Chiapas especialmente el mes de noviembre, lo que provoco severas inundaciones derivadas del desbordamiento de los ríos de la Sierra, y Bajo Grijalva, anegando a zonas de cultivo, ganadería y a la población como se observa en la figura 1.

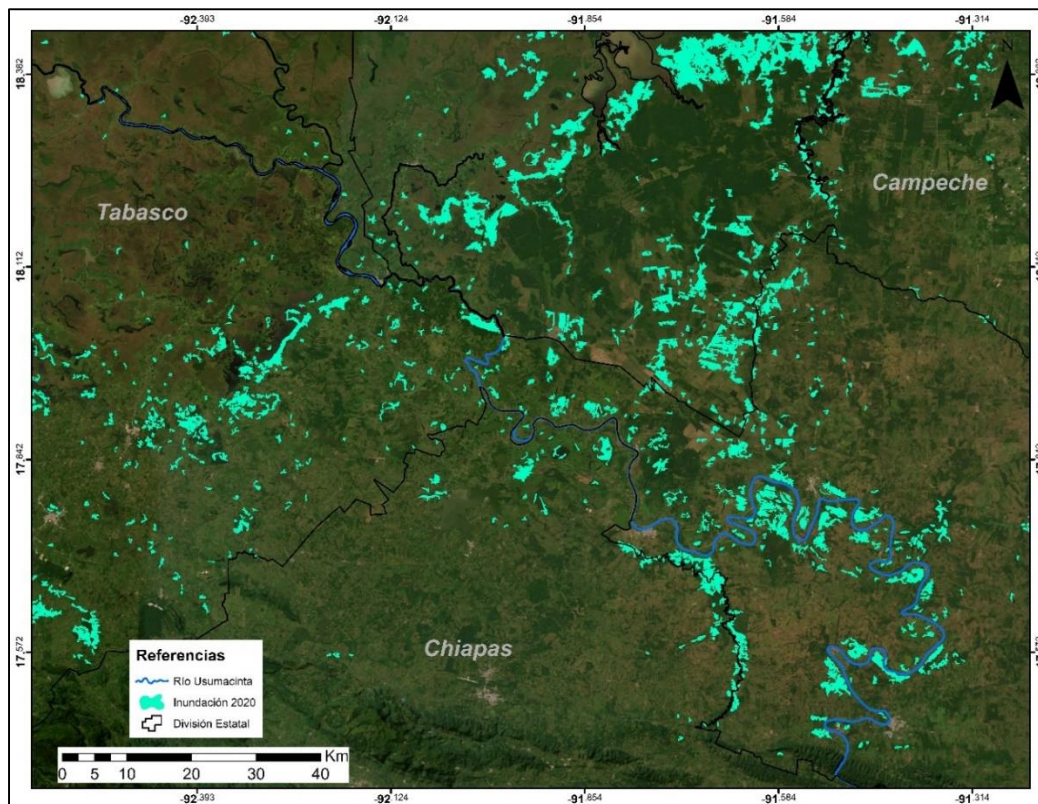


Figura 1. Zonas de Inundación tomadas a través de imágenes de satélite. Elaborada con información del IP CET, (2022).

En la figura 1 se muestran las zonas de inundaciones para la zona de la planicie tabasqueña y norte de Chiapas, este archivo (kml) proporcionada por el Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco.

Noviembre es el mes en el que concluye la temporada de ciclones tropicales y la temporada de lluvia sobre el sureste mexicano, no obstante, noviembre del año 2020 fue uno de los más difíciles, esto como resultado de la interacción de frentes fríos con ciclones tropicales en el suroeste del golfo de México y noroeste del mar

Caribe, con ello, la lámina de lluvia regional fue de 289.3 mm con anomalía de 129.2% con respecto a la lluvia media del mes 126.8 mm, (CONAGUA, 2020).

En Chiapas la lluvia acumulada solo se encuentra 0.2% por debajo de la media en el período (1957.3 mm) figura 2.

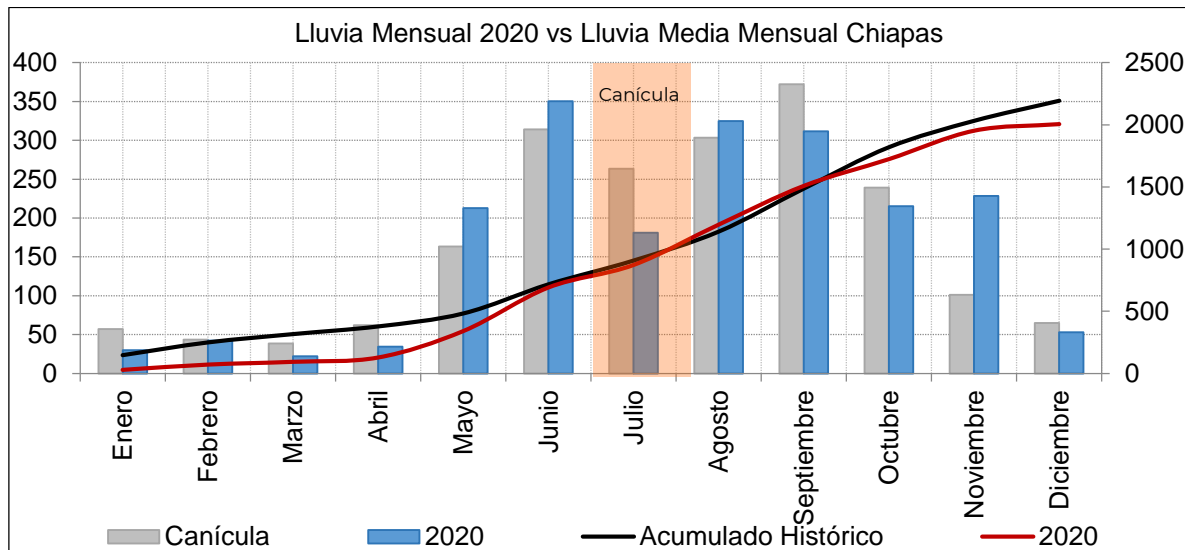


Figura 2. Climatología Chiapas (CONAGUA, 2020).

La precipitación acumulada para el estado de Tabasco fue de 585.4 mm (+176%) de los 212.1 mm de lluvia media y para Chiapas fue de 228.5 mm (+126%) de los 101.1 mm de lluvia media, es decir, llovió más del doble en cada Estado. En la curva masa se observa que al mes de noviembre en Tabasco existe un superávit de 34%; se han generado 2,723.9 mm de los 2,032.2 mm que indica la media para el período y en Chiapas la lluvia acumulada solo se encuentra 0.2% por debajo de la media en el período 1957.3 mm, (CONAGUA, 2020) figura 3.

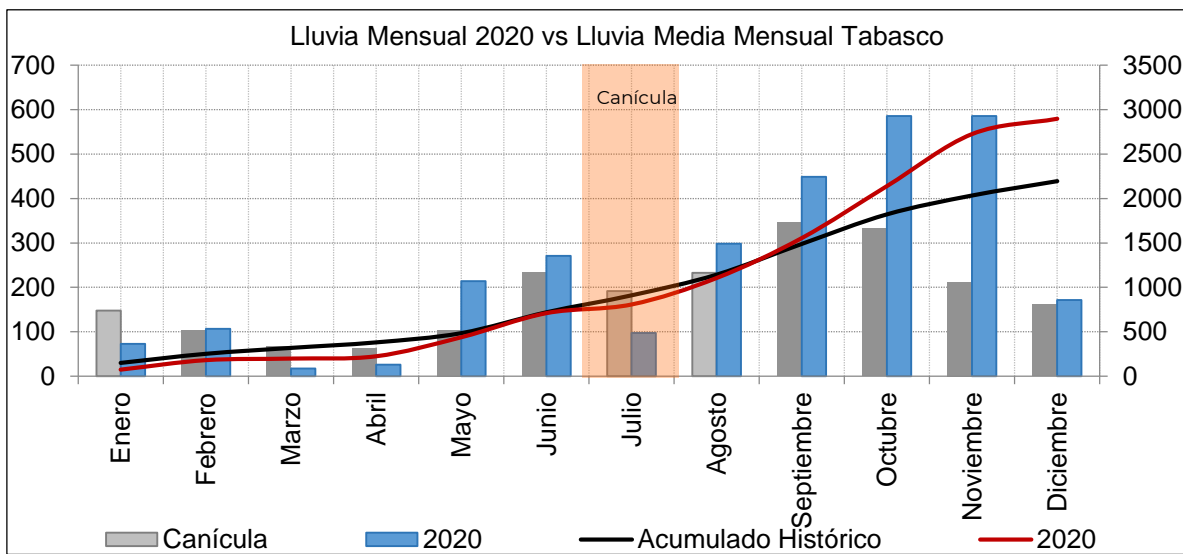


Figura 3. Climatología Tabasco (CONAGUA, 2020).

En la figura 4 se muestra la distribución espacial de la lluvia promedio del mes de noviembre, con acumulados de 1, 200 mm para la zona Norte del Estado y de 500 a 850 mm para la zona de la cuenca baja del río Usumacinta (Climatología CONAGUA, 2020).



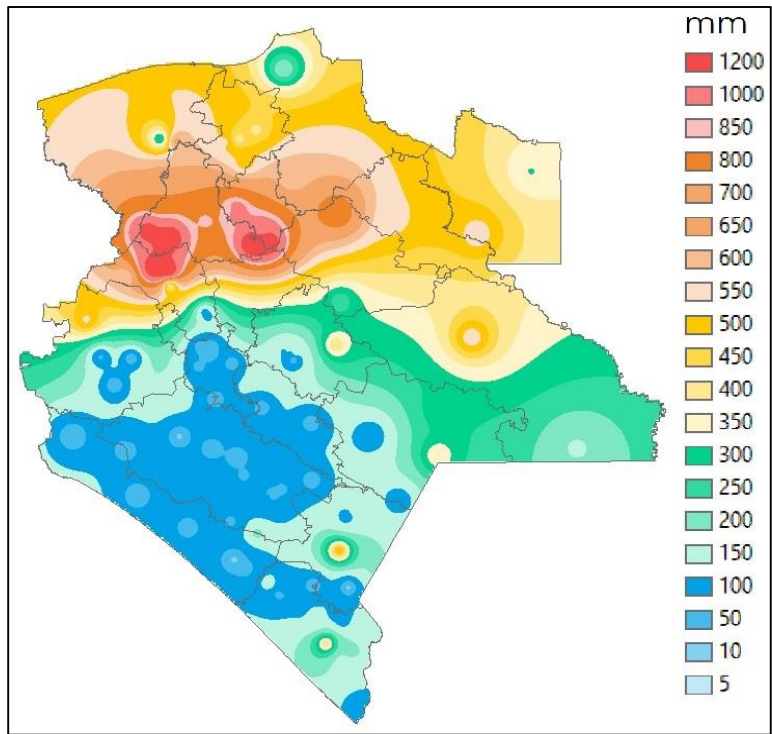


Figura 4. Precipitación promedio mes de noviembre (CONAGUA, 2020).

Respecto a la lluvia media para cada Estado los tonos cafés indican lluvias por debajo de la media y los tonos verdes indican lluvia arriba de la media, los tonos blancos reflejan condiciones de lluvia dentro de los parámetros de lluvia media del mes, es decir, hubo un superávit en las condiciones de lluvia a nivel general para ambos Estados, como se observa en la figura 5 (Climatología CONAGUA, 2020).

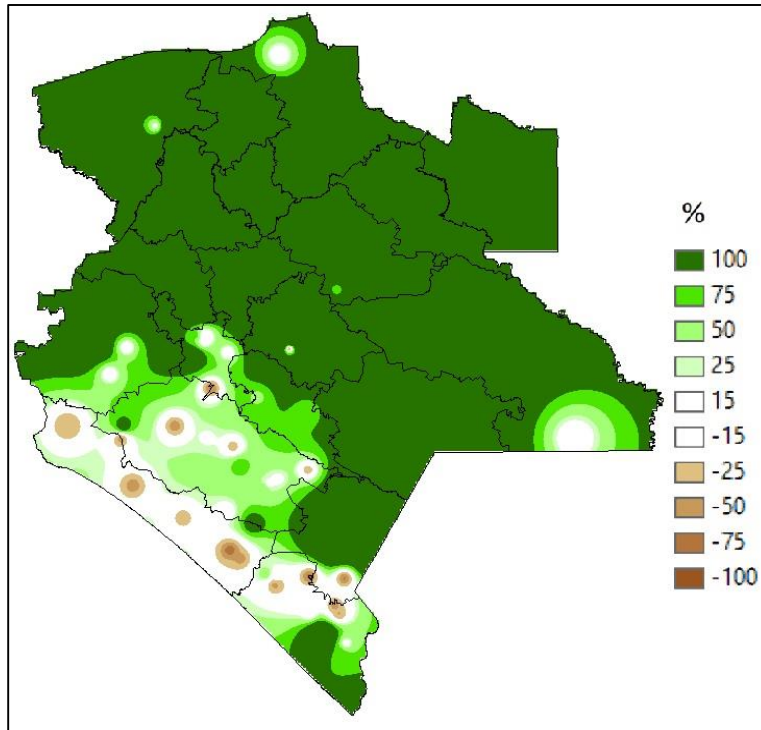


Figura 5. Anomalías de precipitación (CONAGUA, 2020).

Derivado de las lluvias del Frente Frío 11 y la Tormenta Tropical Eta, los niveles del río Usumacinta ascendieron hasta superar su Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO, 19.21 msnm), en donde el nivel máximo que se presentó en la creciente fue la elevación 22.17 msnm, el nivel que se mantuvo por 13 horas, posteriormente, el nivel comenzó a descender paulatinamente. De este modo, los niveles del río se mantuvieron por arriba del NAMO hasta el día 10, como resultado de los decrementos diarios del orden de 0.30 a 0.40 m a partir de su cambio de tendencia, debido a la disminución de los acumulados de lluvias en la parte alta de la cuenca de río Usumacinta.

La elevación máxima alcanzada superó el nivel máximo registrado en el año 2008, esta asociado a un gasto máximo de 8,141.8 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un Período de Retorno (Tr) de 100 años medidos en la estación hidrométrica Boca del Cerro (figura 7); durante este mismo evento también se superó el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME, 21.57 msnm) el día 22 de noviembre y los niveles se mantuvieron por arriba del NAME hasta el día 03 de diciembre cuando comenzaron a descender (Figura 6).

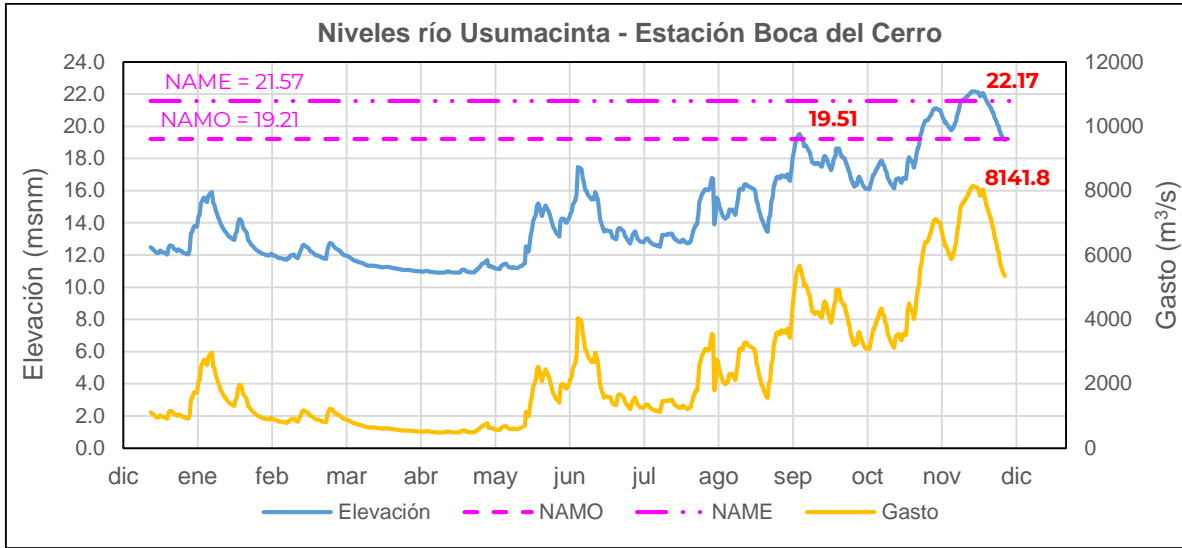


Figura 6. Niveles en el río Usumacinta 2020. Elaborado con información de la CONAGUA.

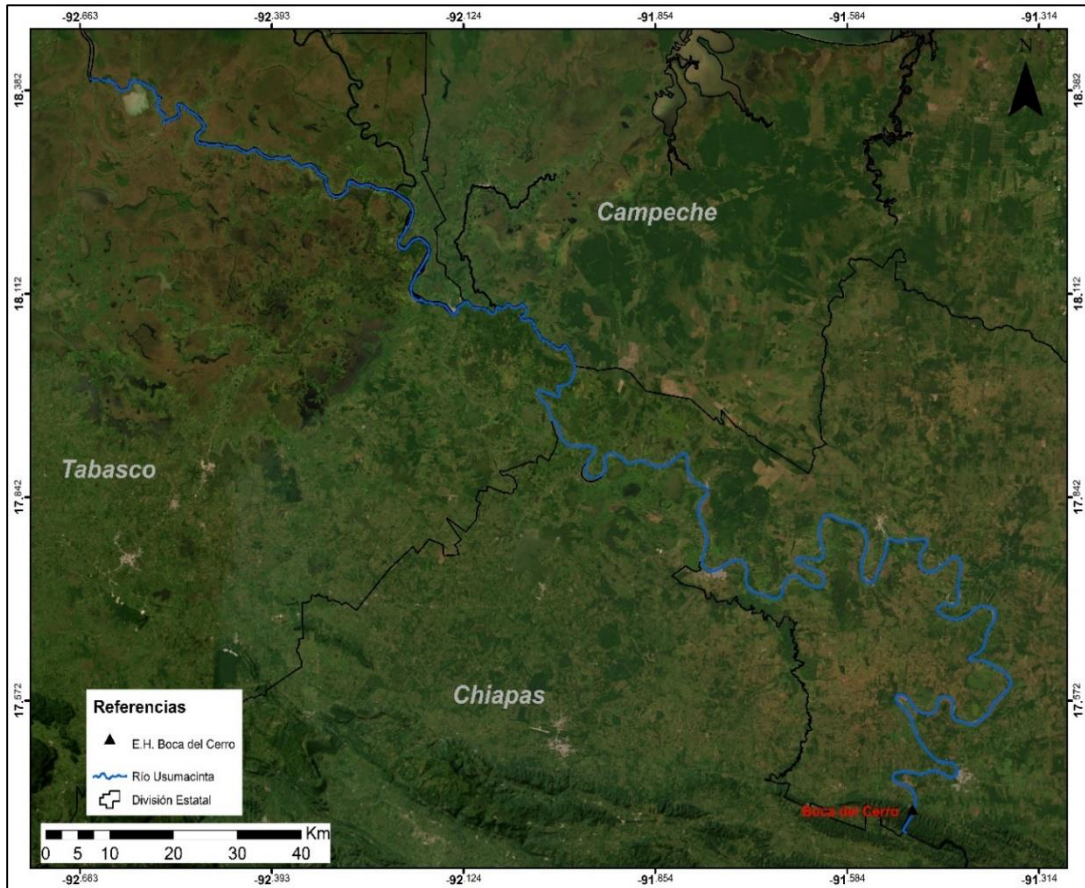


Figura 7. Ubicación del punto de Aforo, estación hidrométrica Boca del Cerro. Elaboración propia.

---

## CAPÍTULO 2

Los modelos bidimensionales calculan los resultados hidráulicos en ubicaciones dentro de una malla establecida, que cubre la extensión geográfica de un río y una llanura de inundación. Un modelo hidráulico no es más que una representación digital de un río u otra vía el cual que se utiliza para analizar el comportamiento hidráulico del sistema.

### **2.1. Modelos en dos dimensiones ventajas de la simulación 2D.**

En la actualidad, los avances en materia de ingeniería hidráulica han sido de gran ayuda permitiendo simular fenómenos reales haciendo posible el análisis de problemas vinculados a esta misma, permitiendo evaluar diferentes escenarios para la toma de decisiones y contribuir al incremento de información que permita el diseño y propuesta de obras que sean de beneficio para la población.

Los modelos matemáticos de simulación hidráulica de inundaciones, permiten establecer hipótesis realistas o previsibles que nos ofrezcan cierto grado de confianza y seguridad en la toma de decisiones, haciendo énfasis en el ordenamiento territorial en torno a los ríos o para definir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia (Brugal, 2010).

Las simulaciones hidráulicas representan el análisis y la relación que existe entre la topografía del cauce de un río, los volúmenes de agua, así como la influencia sobre las obstrucciones y obras hidráulicas que se presentan en el trayecto del cauce; resultando ser una herramienta muy útil para los temas antes mencionados y proponer soluciones a problemas en el manejo del cauce natural. Existen diversas funciones en lo que se utiliza la simulación hidráulica tal es el caso de los estados de carga de una red de distribución de los sistemas de agua potable; diseño de obras hidráulicas, estructuras de salida de los embalses, zonas federales, llanuras o zonas de inundación, entre otras.

---

## 2.2. Modelos Matemáticos.

Son aquellos que representan de una manera simplificada el fenómeno que ocurre en el prototipo por medio del uso de ecuaciones o expresiones matemáticas (Cisneros, 2017).

### Existen tres modelos matemáticos:

*“Modelos determinísticos.* Los procesos físicos involucrados se expresan a través de relaciones funcionales determinísticas en los que no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

*Modelos estocásticos.* Los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias que involucran el fenómeno en estudio.

*Modelos de simulación numérica.* Son modelos en los que se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de frontera, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos. Ambos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finito de puntos discretos en dicho dominio, llamados nodos. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación” (Cisneros, 2017).

“Algunas diferencias entre los modelos físicos y los modelos matemáticos están dadas principalmente por las limitaciones a la que ven sometidas durante su ejecución, por lo general, los modelos físicos son deseables para investigar configuraciones locales del flujo mientras que los modelos numéricos son deseables para simular procesos de flujo a gran escala” (Cisneros, 2017).

Tabla 2. Principales limitaciones en los modelos físicos y matemáticos. Cisneros I. P. (2017).

Modelos Físicos	Modelos Matemáticos
Tamaño del modelo (espacio en el laboratorio)	Capacidad de almacenamiento en la memoria de la computadora
Caudal de bombeo	Velocidad del cálculo
Carga hidráulica (capacidad de bombeo)	Conjunto incompleto de ecuaciones
Leyes de similitud	Hipótesis de turbulencias
Escala mínima del modelo (tensión superficial, viscosidad, rugosidad)	En ecuación de simplificación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exactitud de relaciones supuestas</li> <li>• Disponibilidad de coeficientes</li> </ul>
Tamaño del modelo (límite superior)	Resolución espacio-tiempo (límite inferior)
Método de medida y recolección de datos	Estabilidad numérica, convergencia del cálculo numérico.

Para este caso de estudio nos basaremos en los modelos matemáticos IBER y HEC-RAS, y con base en lo resultados compararemos los resultados obtenidos de las manchas o llanuras de inundación que se generen.

### 2.3. HEC – RAS.

HEC – RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), es un modelo numérico de dominio público, basado en la hipótesis del flujo unidimensional para flujos en régimen permanente, no permanente, transporte de sedimentos y calidad del agua desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (U. S. Army Corps of Engineers), (HEC-RAS User´s Manual, 2022). En este trabajo de investigación se utilizará la versión 6.1 la cual trae incluida la extensión RAS Mapper que realiza llanuras de inundación, en este caso para la zona de estudio de interés, ya que proporciona herramientas muy específicas para la modelización hidráulica, tiene un gran número de capacidades geoespaciales para trabajar con ellos, además permite utilizar herramientas para editar las capas de datos de los Shapefiles genéricos. No sólo se pueden visualizar los resultados de HEC-RAS, sino que se puede simbolizar y consultar la información de muchas formas para ayudar en el análisis de la modelización hidráulica del río.

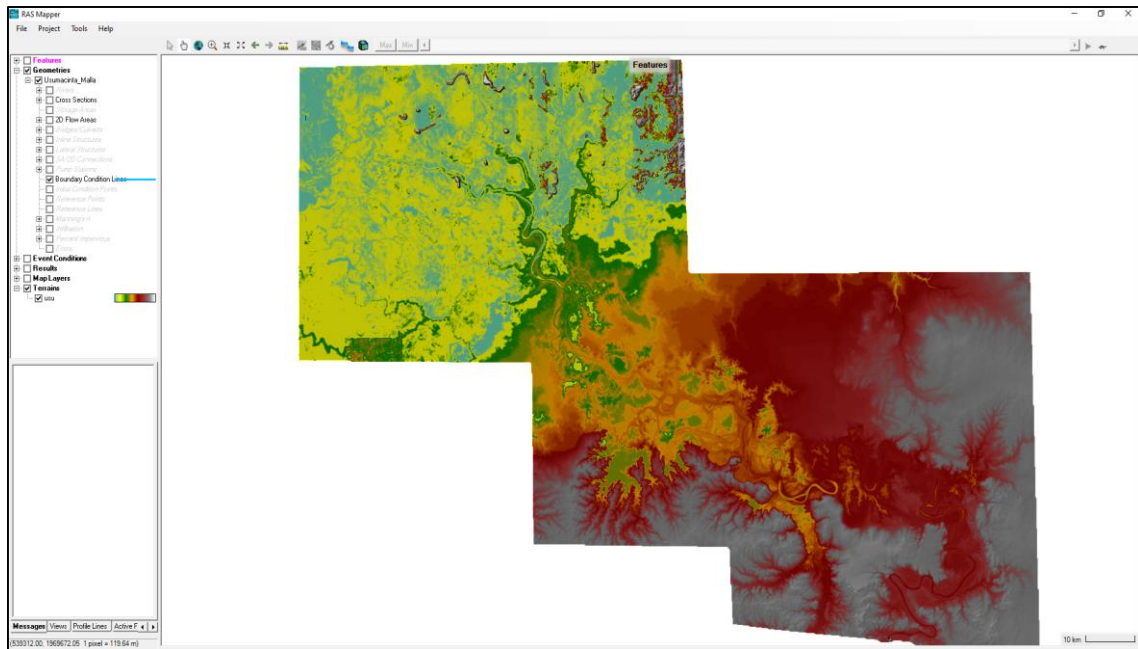


Figura 8. Interfaz del Módulo RAS Mapper. Elaboración propia.

## 2.4. Capacidades y ventajas del Modelo HEC – RAS 2D

Tabla 3. Capacidades y ventajas del Modelo 2 HEC-RAS. Elaborada con datos de Lluen, W. (2015).

Proceso	Resultado
Modelación en 1D y 2D o la combinación de ambas	Permite al usuario trabajar en amplios sistemas de ríos, utilizando el modelo 1D en un cauce y el modelo 2D en un afluente, donde se requiere un mayor detalle
Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D	Permite elegir entre cada las ecuaciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>Onda Difusa, permite que el software procese la información de forma rápida con mayor estabilidad.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saint-Venant, son aplicables de manera más amplia en la resolución de problemas</li> </ul>
Volumen Finito Implícito	Incrementa la mejora en la estabilidad y robustez sobre las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos, así como el manejo adecuado de flujo en regímenes Subcrítico, Supercritico y Mixto.
Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelo 1D y 2D	Permite la retroalimentación directo en cada paso de tiempo entre los elementos de flujo 1D y 2D
Mallas computaciones estructuradas y no estructuradas	<p>El programa fue diseñado para trabajar con mallas no estructuradas, pero puede trabajar con mallas estructuradas. Las celdas pueden ser triángulos, rectángulos cuadrados o polígonos de 8 lados como máximo, figura 2</p> <p>La celda que compone a una malla computaciones tiene las siguientes propiedades: Centro de Celda, Contorno de Celda y Puntos de Contorno de Celda, figura 3</p>
Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computacionales 2D	Cada celda y contorno es pre-procesada con la finalidad de obtener tablas de propiedades hidráulicas en el terreno subyacente empleado en la modelización.
Mapas detallados de inundación y animaciones de los mismos	Ofrece la posibilidad de visualizar mapas de zonas inundadas, así como



	la animación del flujo de agua cuando acontece la inundación.
Solución del esquema numérico basado en multiprocesadores	La solución obtenida de la modelización, ha sido programada para que aproveche los procesadores que tiene el ordenador, lo que permite que se ejecute más rápido si solo se empleara uno.
Permite Trabajar con procesadores de 64 y 32 Bits	Puede trabajar en procesadores de 64 y 32 Bits, sabiendo que un procesador de 64 Bits se ejecutara de manera más rápida y que maneja gran cantidad de datos.

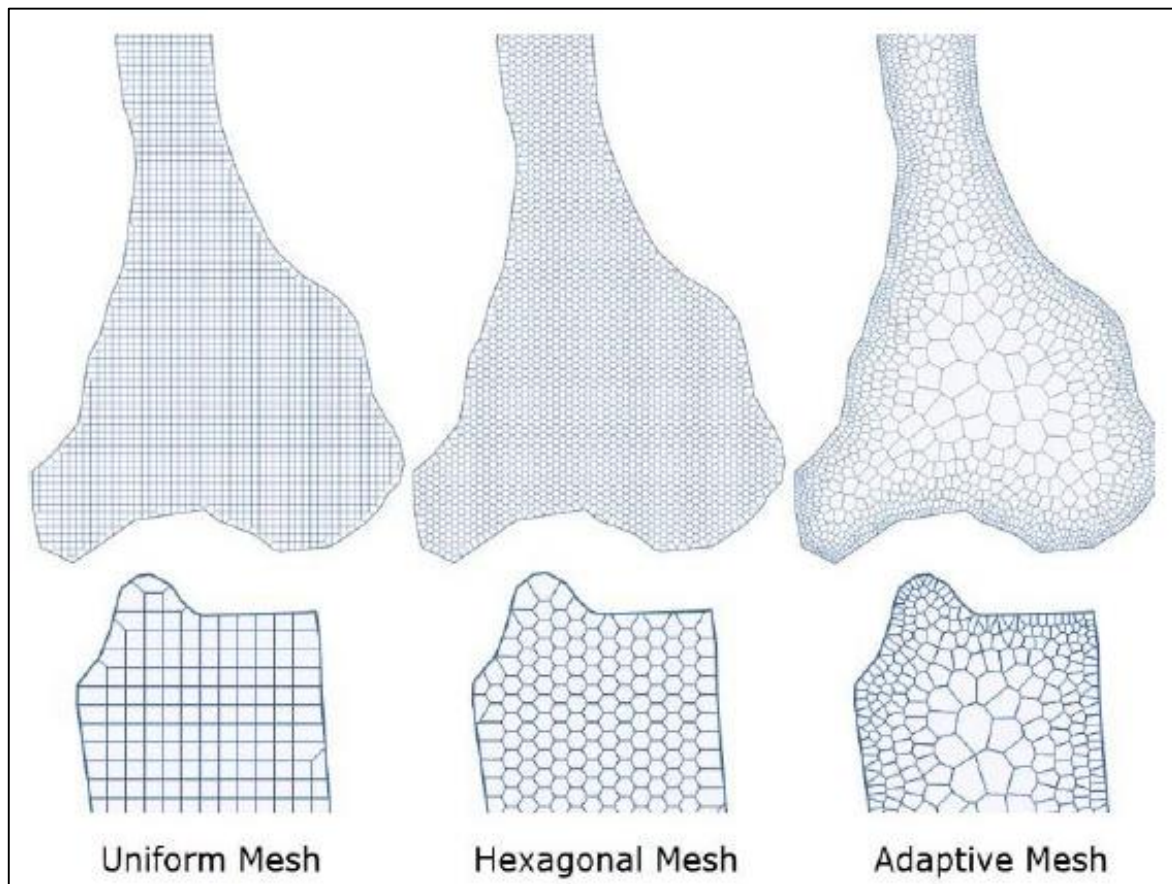


Figura 9. Diseño de mallado. HEC-RAS 2D Flow Modeling (2020), (p 17).

---

La terminología de HEC-RAS para describir la malla computacional para el modelado 2D comienza con el Área de Flujo 2D. El Área de Flujo 2D define el límite para el cual se realizarán los cálculos 2D. Se crea una malla de cálculo (o cuadrícula de cálculo) dentro del Área de Flujo 2D. Cada celda dentro de la malla computacional tiene las siguientes tres propiedades:

- Centro de la celda: El centro de cálculo de la celda. Aquí es donde se calcula la superficie del agua para la celda.
- Caras de la celda: Son las caras de los límites de la celda. Las caras son generalmente líneas rectas, excepto a lo largo del límite exterior del Área de Flujo 2D, en el que una cara de la celda puede ser una línea multipunto.
- Puntos de la cara de la celda: Los puntos de la cara de la celda (FP) son los extremos de las caras de la celda.

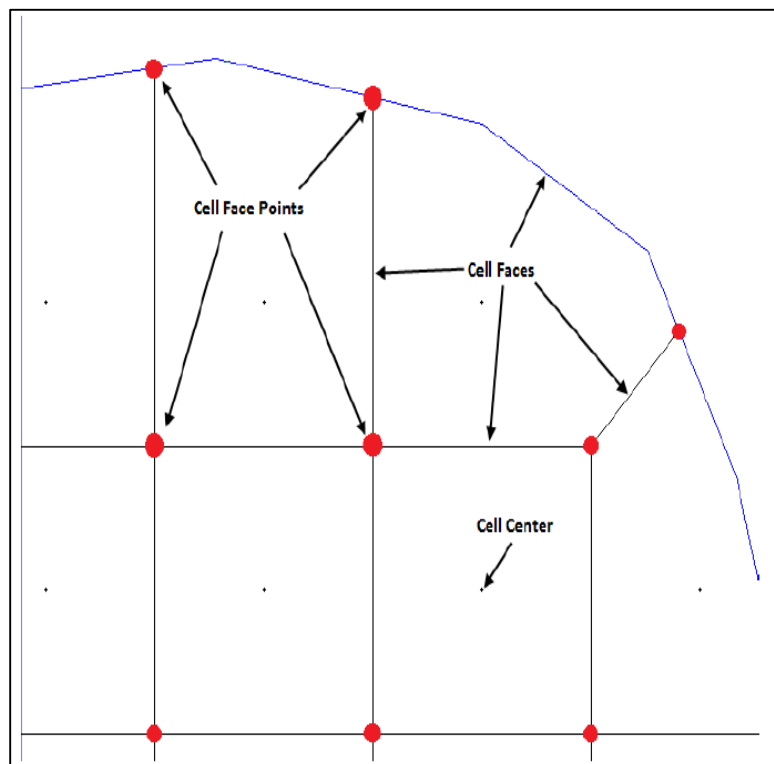


Figura 10. Descripción de la terminología de la malla computacional de modelado HEC-RAS 2D. HEC-RAS User's Manual 2022, (p. 134).

---

## 2.5. IBER.

“IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. La aplicación del programa IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios” (Manual de referencia hidráulico, 2014).

“El modelo IBER actualmente consta varios módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, transporte de sedimentos, drenaje urbano, hidrología, erosión de laderas por escorrentía, transporte de sedimentos no uniforme (mezclas). Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de IBER, da solución a ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad” (Manual de referencia hidráulico, 2014).

## 2.6. Capacidades y ventajas del Modelo IBER 2D.

*Tabla 4. Capacidades y ventajas del Modelo 2D IBER. Elaborado con datos del Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones (2022), (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).*

<b>Proceso</b>	<b>Resultado</b>
Módulo hidrodinámico	Constituye la base de IBER, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de Saint Venant 2D)

Módulo de turbulencia	Permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, para aguas someras con diferente grado de complejidad
Módulo de transporte de sedimentos	Resuelve las ecuaciones de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo
Módulo de drenaje urbano	La principal función del módulo es el cálculo, en una dimensión, de la propagación del flujo a través de las rejillas de alcantarillado o también la salida de la red de superficie en episodios de intensas lluvias, además es compatible con el modelo IBER existente.
Módulo de hidrología	Permite calcular la transformación lluvia-escorrentía en toda la cuenca, utilizándolo como un modelo hidrológico distribuido en cuencas de pequeño y mediano tamaño, trabaja con la misma malla de cálculo que el módulo hidrodinámico
Módulo de erosión en laderas por escorrentía	Determina las diferentes zonas en las que se puede producir erosión del suelo de una cuenca y cuantificar la misma, además de evaluar la evolución de las concentraciones de sólidos en suspensión de los cauces de la red fluvial
Módulo de transporte de sedimento no uniforme (mezclas)	Realiza la simulación numérica de: el acorazamiento del lecho, erosiones diferenciales por las distintas granulometrías, o la clasificación del

---

	material del fondo en diferentes zonas según la capacidad de arrastre.
--	--

---

## CAPÍTULO 3

### 3.1 Ecuaciones a resolver en los modelos en dos dimensiones.

La modelación de la propagación de avenidas en ríos resuelve las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones se deducen a partir de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido en general. Para un fluido incompresible e isótropo, como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes para el movimiento instantáneo, y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las ecuaciones de Reynolds, su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio y el esquema numérico sería complejo, pero sobre todo muy costoso computacionalmente (E. Sanz-Ramos, et al, 202).

Las características del flujo de agua en cauces naturales permiten simplificar estas ecuaciones generales, de modo que de las ecuaciones de Reynolds, integrando en la profundidad y por lo tanto eliminando la dimensión vertical, se obtienen las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, validas cuando el flujo que se quiere analizar presenta carácter bidimensional, con velocidades verticales pequeñas, pendientes del fondo del cauce suaves y en general predominio de las dimensiones horizontales sobre la vertical (E. Bladé, et al, 2012). La mayor parte de los modelos de dos dimensiones, resuelven las ecuaciones de Sain-Venant, Por lo que se menciona parte del proceso de cálculo de estas ecuaciones.

#### 3.1.1. HEC – RAS 2D

El tipo de malla que emplea el software para la modelización de flujo en 2D, existe la necesidad de elegir un paso de tiempo computacional adecuado que funcione bien con la malla. HEC-RAS 2D, hace referencia a dos formas para elegir el valor de éste parámetro. Estas se basan en el Número de Courant, y se aplicará según

---

se emplee la ecuación de Saint Venant u Onda Difusa para resolver el modelo, como se muestra en la Ec. 1 (Lluen, W., 2015):

Ecuación difusa:

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Máximo valor de C= 3.0

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Máximo Valor de C=5.0

Donde  $C$  es el número de Courant,  $V$  la velocidad de flujo,  $\Delta T$  paso de tiempo computacional y  $\Delta X$  promedio de tamaño de celda.

### 3.1.2. IBER.

#### Ecuaciones de Saint Venant en 2D.

“En el módulo de drenaje urbano, los cálculos en dos dimensiones se realizan en base a las ecuaciones de aguas someras, o ecuaciones de Saint Venant 2D, que se describen en detalle en el Manual de Referencia Básico. Se repiten aquí por completitud, incluyendo los términos que representan las componentes de precipitación e infiltración y con la fórmula de Manning para representar la fricción, el cual se muestran en las ecuaciones 3, 4 y 5:” (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).

---


$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial X} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_x \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_y \quad (\text{Ec. 5})$$

“Donde  $h$  es el calado de agua  $q_x$  y  $q_y$  son las dos componentes del caudal unitario,  $|q|$  es un 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 y  $n$  es el coeficiente de Manning” (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).

### Ecuaciones de Saint Venant en 1D

“La deducción de las ecuaciones de Saint Venant en 1D se realiza directamente aplicando las leyes de conservación de la masa y cantidad de movimiento a un volumen de control considerando una sección arbitraria y canal no prismático, resultando en un sistema de ecuaciones que, se escriben en las ecuaciones 6 y 7:” (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gI_2 + gA(S_0 - S_f) \quad (\text{Ec. 7})$$

“Donde  $A$  es el área de una sección mojada,  $Q$  el caudal circulante,  $S_0$  la pendiente del terreno  $S_f$  la pendiente de fricción o motriz,  $I_1$  la contribución



---

de las fuerzas de presión del contorno y las tres últimas ecuaciones 8, 9 y 10, se expresan de la siguiente manera.” (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).

$$S_f = \frac{v^2 n^2}{R_h^{\frac{4}{3}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$I_1 = \int_0^h (h - n) b(x, \eta) d\eta \quad (\text{Ec. 9})$$

$$I_2 = \int_0^h (h - n) \frac{\partial b(x, \eta)}{\partial x} d\eta \quad (\text{Ec. 10})$$

“Donde  $n$  es el coeficiente de fricción de Manning,  $R_h$  el radio hidráulico, para canales prismáticos, aunque tenga una sección cualquiera, el término  $I_2$  es idénticamente igual a cero” (E. Sanz-Ramos, et al, 2022).

### 3.2. Esquemas numéricos.

“Modelos bidimensionales, en dos dimensiones el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular. Lo habitual es que las mallas estén formadas por triángulos o cuadriláteros” figura 11 (E. Blade, et al, 2014).

“Para resolver numéricamente el flujo en lámina libre en ríos se deben resolver las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento del agua. En función de la aproximación espacial, estas

---

ecuaciones se particularizan de distintas maneras. La simplificación a una dimensión resulta en las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales, que suelen deducirse de considerar conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento entre dos secciones contiguas del río. En dos dimensiones las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales se obtienen generalmente de las ecuaciones de Navier-Stokes, realizando primero un promedio temporal (ecuaciones de Reynolds) y luego promediando en la profundidad. En 3D se suelen resolver directamente las ecuaciones de Reynolds” (E. Blade, et al, 2014).

“En 1D es importante también la aproximación temporal que se realice. Si se opta por régimen permanente, lo más sencillo es resolver la ecuación del régimen gradualmente variado con el método paso a paso o similar, como se detalla en el Manual de Referencia Hidráulico de Hec-Ras, mientras que en régimen variable es necesario resolver las ecuaciones generales del flujo variable en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. La ecuación del régimen variable es un reto numérico considerable comparado con la ecuación del régimen gradualmente variado, y en muchas ocasiones requiere de simplificaciones o métodos numéricos que pueden implicar resultados menos precisos en zonas con cambios de régimen, o bien para hidrogramas puntiagudos (E. Blade, et al, 2014).

“Para resolver las ecuaciones de Saint Venant (en 1D o 2D) y las de Reynolds (en 3D) se han usado tradicionalmente distintas familias de métodos numéricos: diferencias finitas, volúmenes finitos o elementos finitos. La técnica de diferencias finitas es la más simple pero requiere de una discretización espacial más rígida. Posteriormente, para conseguir esta mayor flexibilidad, se desarrollaron métodos de elementos finitos, que se siguen utilizando con buenos resultados en 2D y 3D, aunque la tendencia actual se decanta hacia los métodos en volúmenes finitos. El uso con éxito del método de los volúmenes finitos para la resolución de las ecuaciones del flujo en lámina libre en régimen rápidamente variado y en

---

geometrías irregulares se produjo a finales de la década de los 90 (Vázquez-Cendón, 1999). Las principales ventajas del método son que utiliza una discretización muy intuitiva, que es un método conservativo y por lo tanto muy adecuado a las ecuaciones que se están resolviendo (conservación de la masa y de la cantidad de movimiento).

Además existen varios esquemas numéricos de tipo volúmenes finitos capaces de capturar discontinuidades como resaltos hidráulicos y frentes de onda sin ningún tratamiento especial de las ecuaciones en la zona donde se producen”, (E. Blade, et al, 2014).

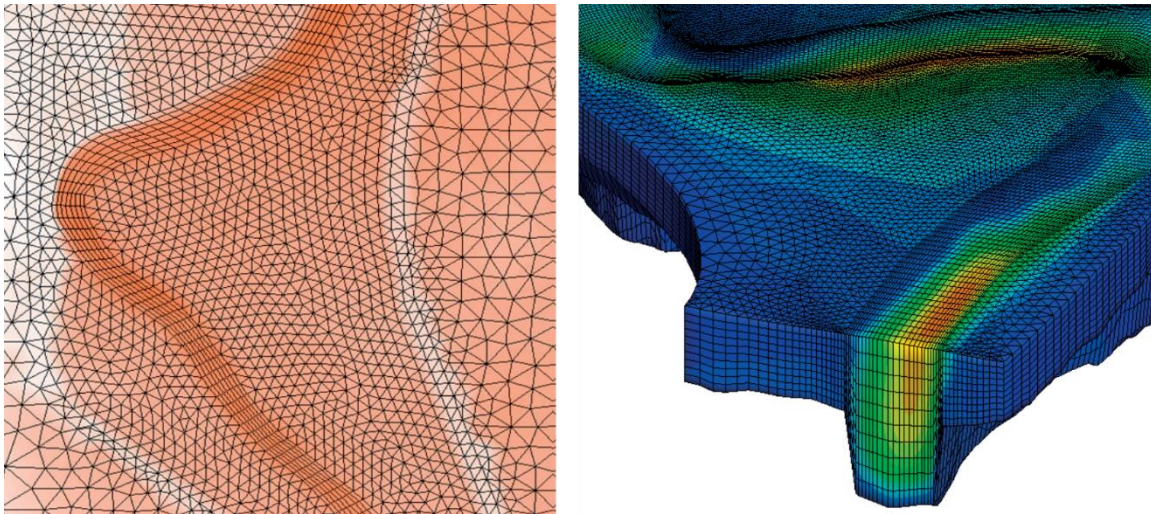


Figura 11. Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izquierda) y 3D (derecha), (E. Bladé, et al, 2014).

### 3.2. Morfología fluvial.

“Naturalmente es raro encontrar cauces rectos y regulares. En cambio, se distinguen dos morfologías fluviales típicas. La primera es el cauce trenzado, el cual es un cauce muy ancho compuesto por una multiplicidad de cauces menores entrelazados en el sentido de que una crecida puede cambiarlos considerablemente. Su presencia se asocia a una gran capacidad de transporte sólido. Dicho de otro modo, una corriente muy cargada de

sedimentos es propensa a formar un cauce trenzado, esto ocurre, en cauces de montaña con pendiente alta y sedimento grueso” (M. Juan, 2003).

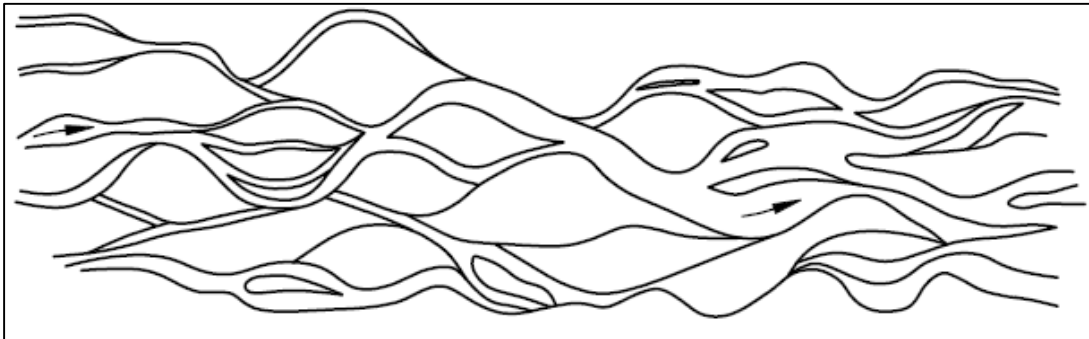


Figura 12. Cauce trenzado. Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003).

“En la figura 13 se observa la segunda morfología es la de un cauce sinuoso o con meandros. El cauce es único, pero forma curvas. Se ha observado en laboratorio que una corriente de agua y sedimento circulando sobre un cauce aluvial recto da lugar a meandros a partir de la más mínima imperfección de la alineación recta o por una causa externa accidental. La ondulación en planta se acompaña de una asimetría en las secciones transversales, ya que el calado es mayor junto a la orilla cóncava o exterior y menor junto a la orilla convexa o interior. Los meandros presentan una evolución que consiste en una progresión o desplazamiento en dirección aguas abajo y una profundización a costa de las orillas, en dirección perpendicular a la anterior” (M. Juan, 2003).

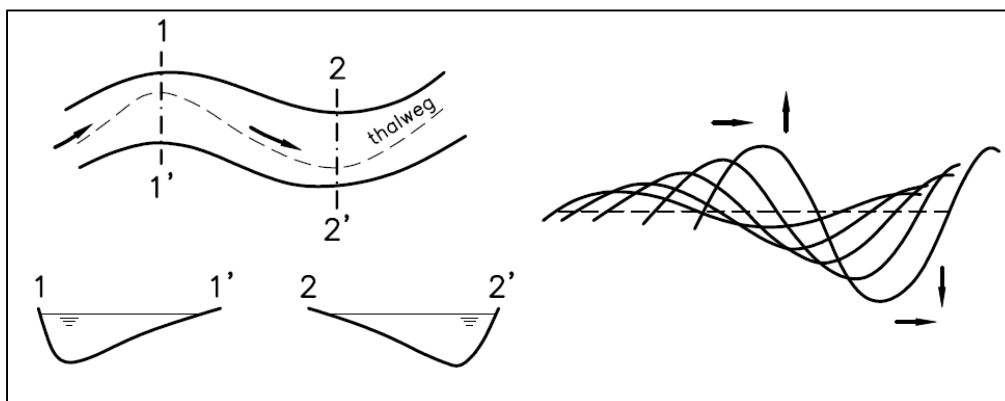


Figura 13. Cauce meandriforme: morfología (planta y secciones transversales vistas en el sentido de la corriente) y evolución (derecha). Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003).

---

“La evolución de los meandros depende de la resistencia de las orillas a la erosión. En el caso de ríos que escurren por llanos aluviales poco resistentes, donde no existe restricción a la “libertad” de esta evolución, los meandros se mueven grandes distancias. Los meandros irregulares pueden ser señal de orillas resistentes. El punto final de la evolución “libre” de un meandro es el encuentro en el “cuello” para formar un atajo y el abandono de los lóbulos” (M. Juan, 2003).

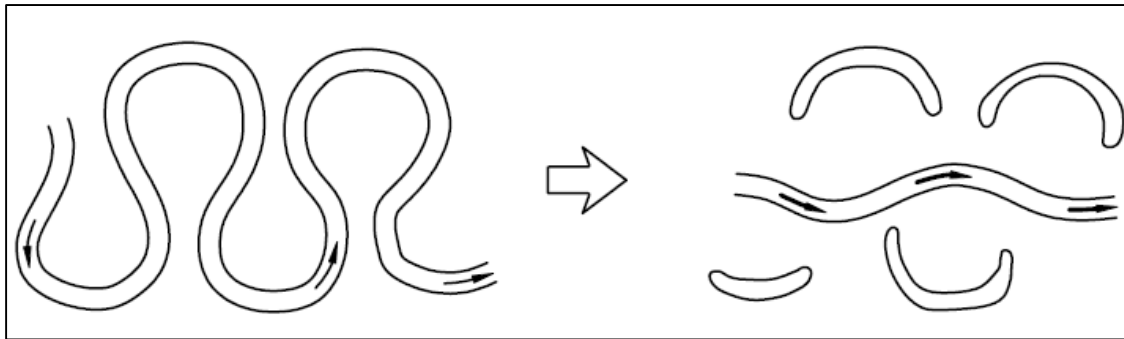


Figura 14. Corte natural de un meandro. Ingeniería Fluvial (M. Juan, 2003).

“Puede mencionarse que son particularmente inestables los ríos que se desarrollan sobre abanicos aluviales, de piedemonte o deltas. Estas formaciones son planicies aluviales a modo de abanicos, bien sea a la salida de tramos de río encajados o bien en la desembocadura a un cuerpo de agua” (M. Juan, 2003).

El río Usumacinta es la representación de una morfología de un cauce sinuoso o con meandros y bastante extenso desde el punto de análisis para este tema, por lo que el tamaño de mallado que se utilizó para la modelación fue de 1.5 km

---

## CAPÍTULO 4

### 4.1 Metodología.

La Cuenca del río Usumacinta nace en la República de Guatemala y su punto de salida es con la confluencia del Río Grijalva, en México, consta de un área aproximada de 73,381.09 km<sup>2</sup>, su cauce principal tiene una longitud de 1,134.49 km, el 48 % del área total se encuentra en territorio mexicano y el 52% en territorio guatemalteco, como se observa en la figura 15.

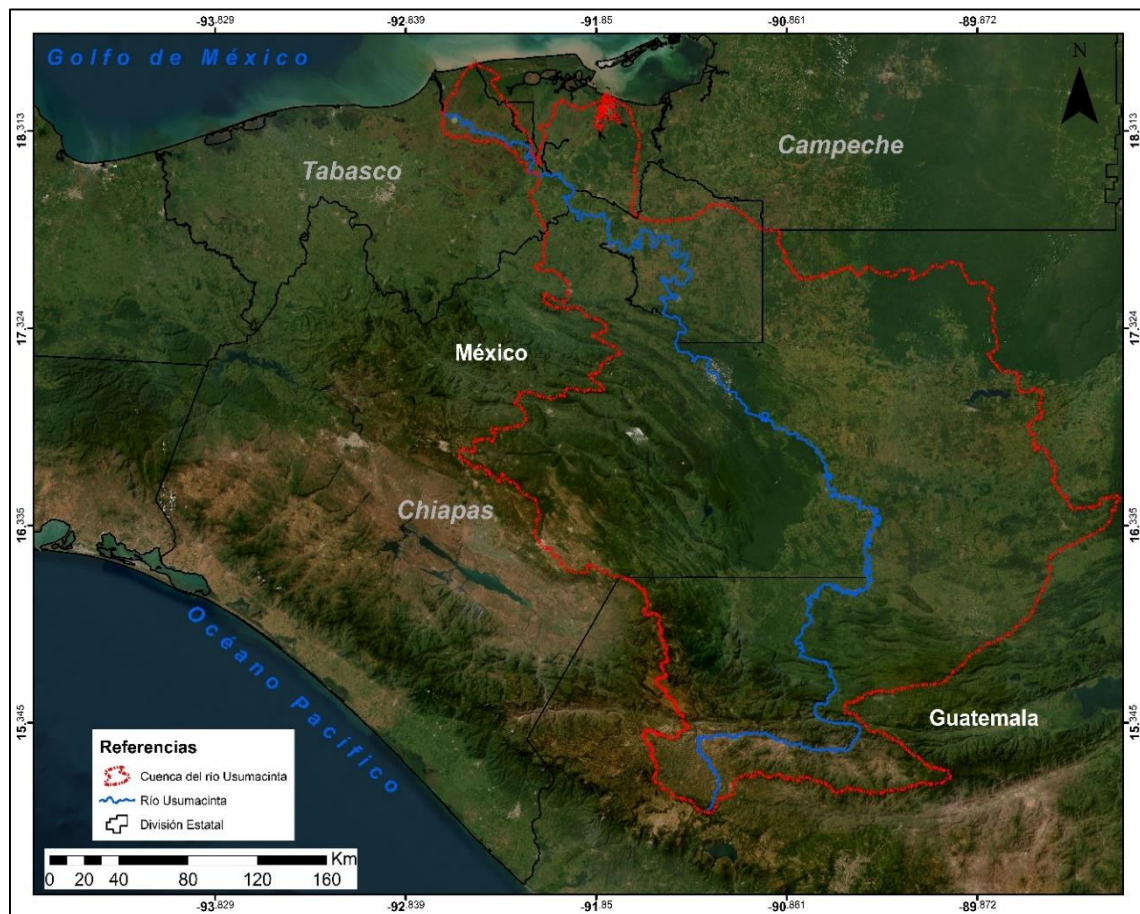


Figura 15. Cuenca de río Usumacinta. Elaboración propia.

---

#### **4.1.1. Materiales y Método para las simulaciones.**

Se trata de dos programas de simulaciones gratuitos, por lo que su uso lo ha llevado a constantes actualizaciones para mejorar e incluir herramientas para su uso exploración.

Como ya se mencionó anteriormente HEC-RAS realiza las modelizaciones basado en la hipótesis del flujo unidimensional para flujos en régimen permanente, no permanente, transporte de sedimentos y calidad del agua; e IBER, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. Ambos permiten calcular niveles de agua y velocidades en las dos direcciones horizontales del espacio (x, y) en ríos, estuarios, canales, llanuras de inundación y obras hidráulicas.

#### **4.1.2. Pre proceso.**

Los insumos para generar la simulación en ambos programas IBER Y HEC-RAS, es necesario contar con un Modelo Digital de Elevación (DEM), por lo que es necesario descargar dicho modelo de las plataformas existentes, como lo son el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Alaska Satellite Facility (ASF), y OpenTopography, INEGI en la actualidad maneja diferentes resoluciones de pixel la más actual por el momento con resoluciones a 5 x 5 m, ASF maneja pixeles de 12 x 12 m y OpenTopography resoluciones de 30 x 30 m.

Todas son válidas ya que cumplen con el objetivo para su uso y aplicación, para nuestro caso de estudio se utilizó el DEM del INEGI, con resolución a 5 m como se observa en la figura 17.

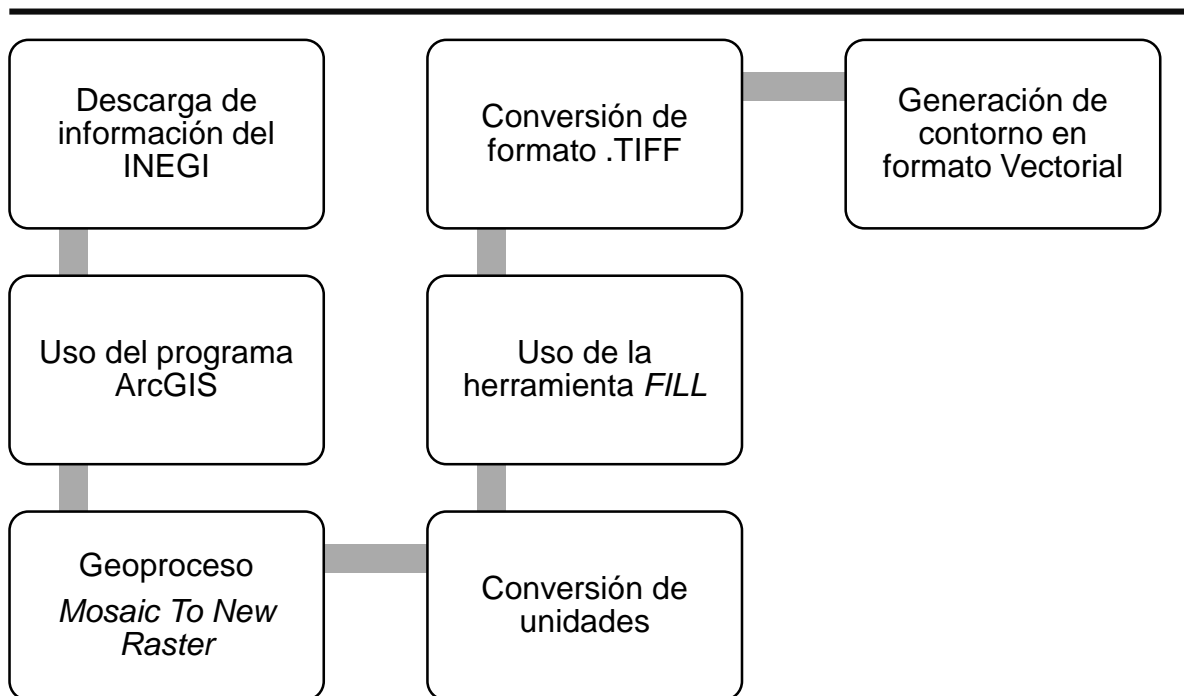


Figura 16. Diagrama de desarrollo del MDE. Elaboración propia.

Debido a que los modelos digitales de elevación vienen divididos con claves de identificaciones se realizó el proceso de unión de 295 cartas las cuales se enlistan en la tabla 5 el dicho manejo se realizó en el programa ArcGIS.

Tabla 5. Listado de las cartas de MDE descargadas del INEGI. Elaboración propia.

N°	Formato	clave	N°	Formato	clave
1	GRID	e15b74a1_mt	101	GRID	e15d15f2_mt
2	GRID	e15b74d4_mt	102	GRID	e15d15f1_mt
3	GRID	e15b74d3_mt	103	GRID	e15d15e4_mt
4	GRID	e15d24a3_mt	104	GRID	e15d15e3_mt
5	GRID	e15d23c4_mt	105	GRID	e15d15e1_mt
6	GRID	e15d23c3_mt	106	GRID	e15d15d4_mt
7	GRID	e15d23b4_mt	107	GRID	e15d15d2_mt
8	GRID	e15d23b3_mt	108	GRID	e15d15c4_mt
9	GRID	e15b74d2_mt	109	GRID	e15d15c3_mt
10	GRID	e15b74d1_mt	110	GRID	e15d15c2_mt
11	GRID	e15b74a4_mt	111	GRID	e15d15c1_mt
12	GRID	e15b74a3_mt	112	GRID	e15d15b3_mt



<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>	<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>
13	GRID	e15b74a2_mt	113	GRID	e15d15b2_mt
14	GRID	e15b85d1_mt	114	GRID	e15d15b1_mt
15	GRID	e15d34c3_mt	115	GRID	e15d15a4_mt
16	GRID	e15d34c1_mt	116	GRID	e15d15a2_mt
17	GRID	e15d34b4_mt	117	GRID	e15b85f3_mt
18	GRID	e15d34b2_mt	118	GRID	e15b85e4_mt
19	GRID	e15d24f3_mt	119	GRID	e15b85e3_mt
20	GRID	e15d24e4_mt	120	GRID	e15b85e1_mt
21	GRID	e15d23b2_mt	121	GRID	e15b85d4_mt
22	GRID	e15d23b1_mt	122	GRID	e15b85d2_mt
23	GRID	e15b85f1_mt	123	GRID	e15d25d1_mt
24	GRID	e15b85e2_mt	124	GRID	e15d15a3_mt
25	GRID	e15b84f2_mt	125	GRID	e15d14a2_mt
26	GRID	e15b84f1_mt	126	GRID	e15b73c4_mt
27	GRID	e15d12b2_mt	127	GRID	e15b73c2_mt
28	GRID	e15d12b1_ms	128	GRID	e15b73c1_mt
29	GRID	e15d12a2_mt	129	GRID	e15b73b2_mt
30	GRID	e15d12a1_mt	130	GRID	e15b73b1_mt
31	GRID	e15b82e4_mt	131	GRID	e15b73a2_mt
32	GRID	e15b82e3_mt	132	GRID	e15b73a1_mt
33	GRID	e15b82d4_mt	133	GRID	e15b72c2_mt
34	GRID	e15b82d3_mt	134	GRID	e15d13f2_mt
35	GRID	e15d16a2_mt	135	GRID	e15d13c4_mt
36	GRID	e15b85f4_mt	136	GRID	e15d13c2_mt
37	GRID	e15d16a1_mt	137	GRID	e15b83f4_mt
38	GRID	e15d35a4_mt	138	GRID	e15b83f2_mt
39	GRID	e15d35a1_mt	139	GRID	e15b83c4_mt
40	GRID	e15d34c4_mt	140	GRID	e15b83c2_mt
41	GRID	e15d34c2_mt	141	GRID	e15b73f4_mt
42	GRID	e15b86d4_ms	142	GRID	e15b73f2_mt
43	GRID	e15b86d2_ms	143	GRID	e15b82f4_mt
44	GRID	e15d35c4_mt	144	GRID	e15b82f3_mt

<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>	<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>
45	GRID	e15d35a3_mt	145	GRID	e15b82f2_mt
46	GRID	e15d16a4_mt	146	GRID	e15b82f1_mt
47	GRID	e15b86d3_mt	147	GRID	e15b82e2_mt
48	GRID	e15b86d1_mt	148	GRID	e15b82d2_mt
49	GRID	e15b85f2_mt	149	GRID	e15b82d1_mt
50	GRID	e15d15e2_mt	150	GRID	e15b82b3_mt
51	GRID	e15d15b4_mt	151	GRID	e15b82a4_mt
52	GRID	e15b85d3_mt	152	GRID	e15b82a3_mt
53	GRID	e15b84f4_mt	153	GRID	e15b82e1_mt
54	GRID	e15d36a4_mt	154	GRID	e15b82c3_mt
55	GRID	e15d36a3_mt	155	GRID	e15b72f1_mt
56	GRID	e15d36a2_mt	156	GRID	e15b72e4_mt
57	GRID	e15d36a1_mt	157	GRID	e15b72e2_mt
58	GRID	e15d35c3_mt	158	GRID	e15d24b2_mt
59	GRID	e15d35c2_mt	159	GRID	e15d24b1_mt
60	GRID	e15d35c1_mt	160	GRID	e15d24a4_mt
61	GRID	e15d35b4_mt	161	GRID	e15d24a2_mt
62	GRID	e15d35b3_mt	162	GRID	e15d24a1_mt
63	GRID	e15d35b2_mt	163	GRID	e15d23c1_mt
64	GRID	e15d35b1_mt	164	GRID	e15d15d3_mt
65	GRID	e15d35a2_mt	165	GRID	e15d15d1_mt
66	GRID	e15d26d4_mt	166	GRID	e15d24f1_mt
67	GRID	e15d26d3_mt	167	GRID	e15d24e2_mt
68	GRID	e15d26d2_mt	168	GRID	e15d24c4_mt
69	GRID	e15d26d1_mt	169	GRID	e15d24c3_mt
70	GRID	e15d26a4_mt	170	GRID	e15d24c2_mt
71	GRID	e15d26a3_mt	171	GRID	e15d24b4_mt
72	GRID	e15d26a2_mt	172	GRID	e15d24b3_mt
73	GRID	e15d26a1_mt	173	GRID	e15d25d3_mt
74	GRID	e15d25f4_mt	174	GRID	e15d25a3_mt
75	GRID	e15d25f3_mt	175	GRID	e15d25a1_mt
76	GRID	e15d25f2_mt	176	GRID	e15d24f4_mt

<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>	<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>
77	GRID	e15d25f1_mt	177	GRID	e15d24f2_mt
78	GRID	e15d25e4_mt	178	GRID	e15b72a1_mt
79	GRID	e15d25e3_mt	179	GRID	e15b72a3_mt
80	GRID	e15d25e2_mt	180	GRID	e15b72a2_mt
81	GRID	e15d25e1_mt	181	GRID	e15b72a4_mt
82	GRID	e15d25d4_mt	182	GRID	e15b72b1_mt
83	GRID	e15d25d2_mt	183	GRID	e15b72b2_mt
84	GRID	e15d25c4_mt	184	GRID	e15b72b3_mt
85	GRID	e15d25c3_mt	185	GRID	e15b72b4_mt
86	GRID	e15d25c2_mt	186	GRID	e15b72c1_mt
87	GRID	e15d25c1_mt	187	GRID	e15b72c3_mt
88	GRID	e15d25b4_mt	188	GRID	e15b72c4_mt
89	GRID	e15d25b3_mt	189	GRID	e15b72d1_mt
90	GRID	e15d25b2_mt	190	GRID	e15b72d3_mt
91	GRID	e15d25b1_mt	191	GRID	e15b72d2_mt
92	GRID	e15d25a4_mt	192	GRID	e15b72d4_mt
93	GRID	e15d25a2_mt	193	GRID	e15b72e1_mt
94	GRID	e15d16d4_mt	194	GRID	e15b72e3_mt
95	GRID	e15d16d3_mt	195	GRID	e15b72f2_mt
96	GRID	e15d16d2_mt	196	GRID	e15b72f3_mt
97	GRID	e15d16d1_mt	197	GRID	e15b72f4_mt
98	GRID	e15d16a3_mt	198	GRID	e15b73a3_mt
99	GRID	e15d15f4_mt	199	GRID	e15b73a4_mt
100	GRID	e15d15f3_mt	200	GRID	e15b73b3_mt

<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>	<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>
201	GRID	e15b73b4_mt	251	GRID	e15b84e3_mt
202	GRID	e15b73c3_mt	252	GRID	e15b84e4_mt
203	GRID	e15b73d1_mt	253	GRID	e15b84f3_mt
204	GRID	e15b73d2_mt	254	GRID	e15d12c1_mt
205	GRID	e15b73d3_mt	255	GRID	e15d12c2_mt

<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>	<b>N°</b>	<b>Formato</b>	<b>clave</b>
206	GRID	e15b73d4_mt	256	GRID	e15d13a1_mt
207	GRID	e15b73e1_mt	257	GRID	e15d13a2_mt
208	GRID	e15b73e2_mt	258	GRID	e15d13b1_mt
209	GRID	e15b73e3_mt	259	GRID	e15d13b2_mt
210	GRID	e15b73e4_mt	260	GRID	e15d13b3_mt
211	GRID	e15b73f1_mt	261	GRID	e15d13b4_mt
212	GRID	e15b73f3_mt	262	GRID	e15d13c1_mt
213	GRID	e15b82a1_mt	263	GRID	e15d13c3_mt
214	GRID	e15b82a2_mt	264	GRID	e15d13e1_mt
215	GRID	e15b82b1_mt	265	GRID	e15d13e2_mt
216	GRID	e15b82b2_mt	266	GRID	e15d13e3_mt
217	GRID	e15b82b4_mt	267	GRID	e15d13e4_mt
218	GRID	e15b82c1_mt	268	GRID	e15d13f1_mt
219	GRID	e15b82c2_mt	269	GRID	e15d13f3_mt
220	GRID	e15b83a1_mt	270	GRID	e15d13f4_mt
221	GRID	e15b82c4_mt	271	GRID	e15d14a1_mt
222	GRID	e15b83a2_mt	272	GRID	e15d14b1_mt
223	GRID	e15b83a3_mt	273	GRID	e15d14a4_mt
224	GRID	e15b83a4_mt	274	GRID	e15d14a3_mt
225	GRID	e15b83b1_mt	275	GRID	e15d14b2_mt
226	GRID	e15b83b2_mt	276	GRID	e15d14b3_mt
227	GRID	e15b83b3_mt	277	GRID	e15d14b4_mt
228	GRID	e15b83b4_mt	278	GRID	e15d14c1_mt
229	GRID	e15b83c1_mt	279	GRID	e15d14c2_mt
230	GRID	e15b83c3_mt	280	GRID	e15d14c3_mt
231	GRID	e15b83d1_mt	281	GRID	e15d14c4_mt
232	GRID	e15b83d2_mt	282	GRID	e15d14d1_mt
233	GRID	e15b83d3_mt	283	GRID	e15d14d2_mt
234	GRID	e15b83d4_mt	284	GRID	e15d14d3_mt
235	GRID	e15b83e1_mt	285	GRID	e15d14d4_mt
236	GRID	e15b83e2_mt	286	GRID	e15d14e1_mt
237	GRID	e15b83e3_mt	287	GRID	e15d14e2_mt

N°	Formato	clave	N°	Formato	clave
238	GRID	e15b83e4_mt	288	GRID	e15d14e3_mt
239	GRID	e15b83f1_mt	289	GRID	e15d14e4_mt
240	GRID	e15b83f3_mt	290	GRID	e15d14f1_mt
241	GRID	e15b84a1_mt	291	GRID	e15d14f2_mt
242	GRID	e15b84a2_mt	292	GRID	e15d14f3_mt
243	GRID	e15b84a3_mt	293	GRID	e15d14f4_mt
244	GRID	e15b84a4_mt	294	GRID	e15d15a1_mt
245	GRID	e15b84d1_mt	295	GRID	e15d23c2_mt
246	GRID	e15b84d2_mt			
247	GRID	e15b84d3_mt			
248	GRID	e15b84d4_mt			
249	GRID	e15b84e1_mt			
250	GRID	e15b84e2_mt			

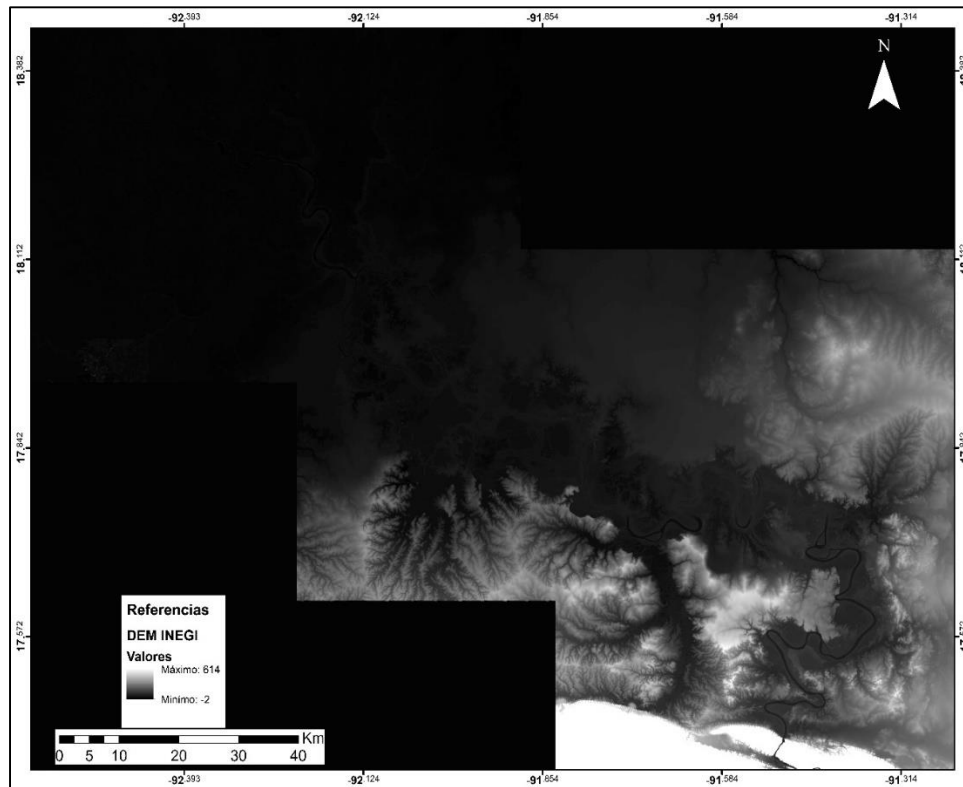


Figura 17. Modelo Digital de Elevación. Elaboración propia.

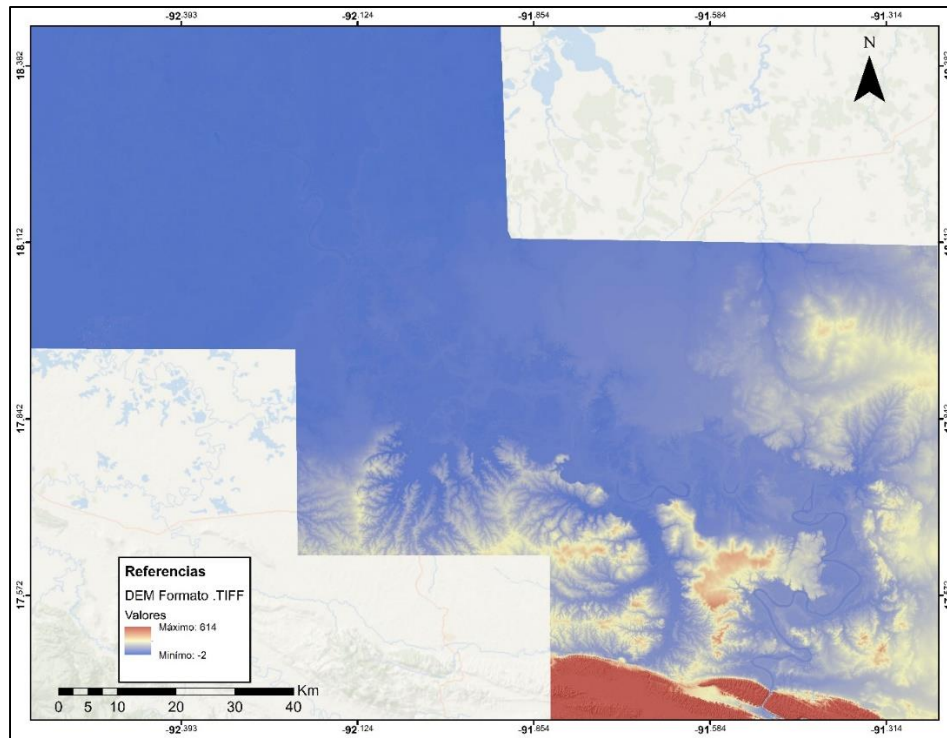


Figura 18. Modelo Digital de Elevación formato .TIFF. Elaboración propia.

#### 4.1.3. Simulación numérica en el programa HEC-RAS.

La simulación conlleva una serie de pasos, pero uno de los importantes debido a los problemas de simulación no es compatible con la región y hora de México, por lo que es necesario modificarlo a la región de Estados Unidos de América.

A continuación, se presenta un esquema del proceso de construcción que se utilizó para la simulación del tramo del río Usumacinta.

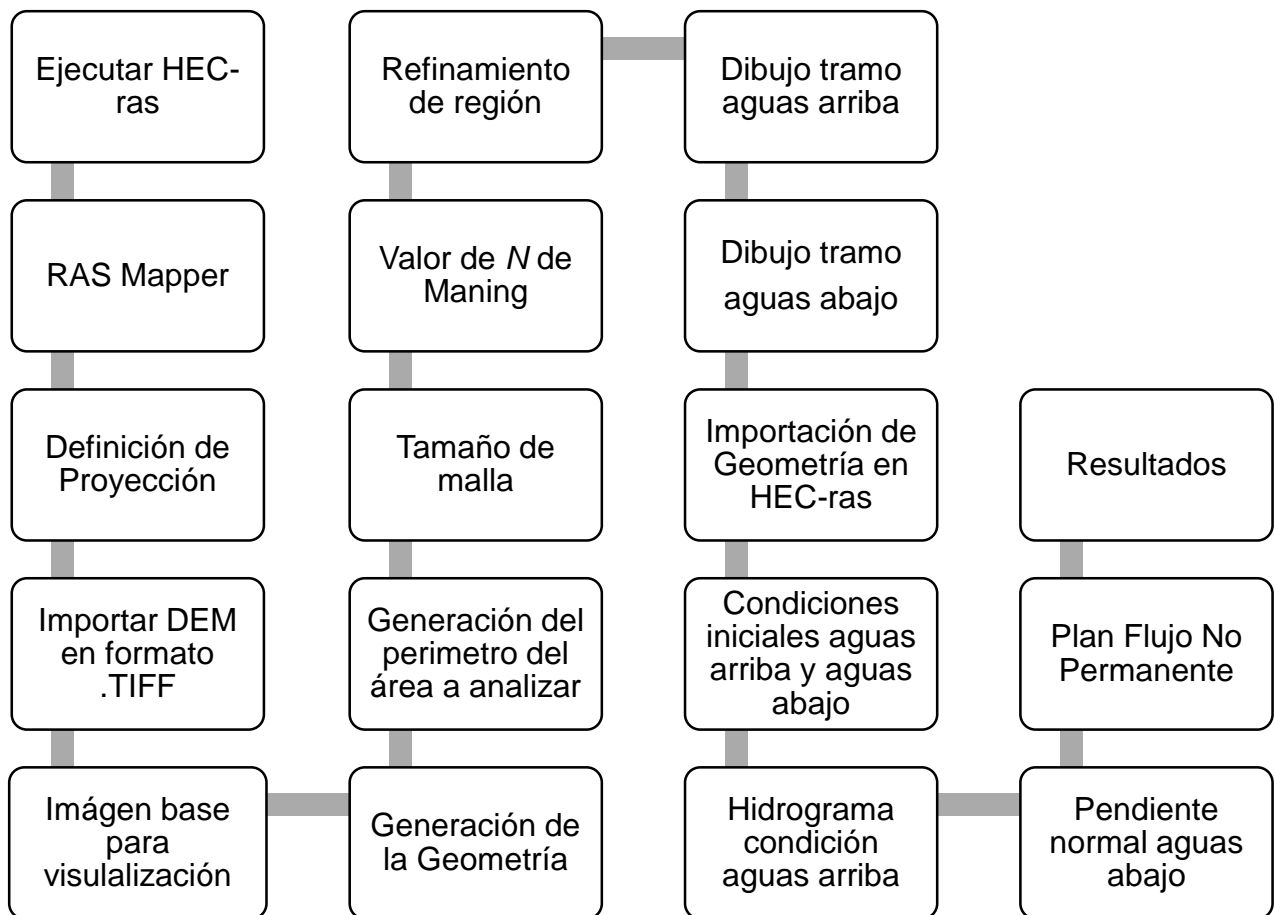


Figura 19. Diagrama de desarrollo del modelo en HEC-RAS. Elaboración propia.

#### 4.1.4. Configuraciones iniciales del Modelo en HEC-RAS.

Para el proceso de desarrollo del modelo, es necesario utilizar la herramienta RAS Mapper, en la cual haremos la mayor parte del procedimiento para obtener el resultado deseado. Una vez ejecutada dicha herramienta procederemos a dar una referencia espacial a nuestra vista, en este caso utilizaremos la referencia espacial *WGS 1984 UTM Zone 15N*. HEC-RAS Mapper, siempre que se especifique el sistema de referencia espacial para el proyecto, sólo puede tener una proyección, por lo tanto, las geometrías deben estar en la misma proyección.

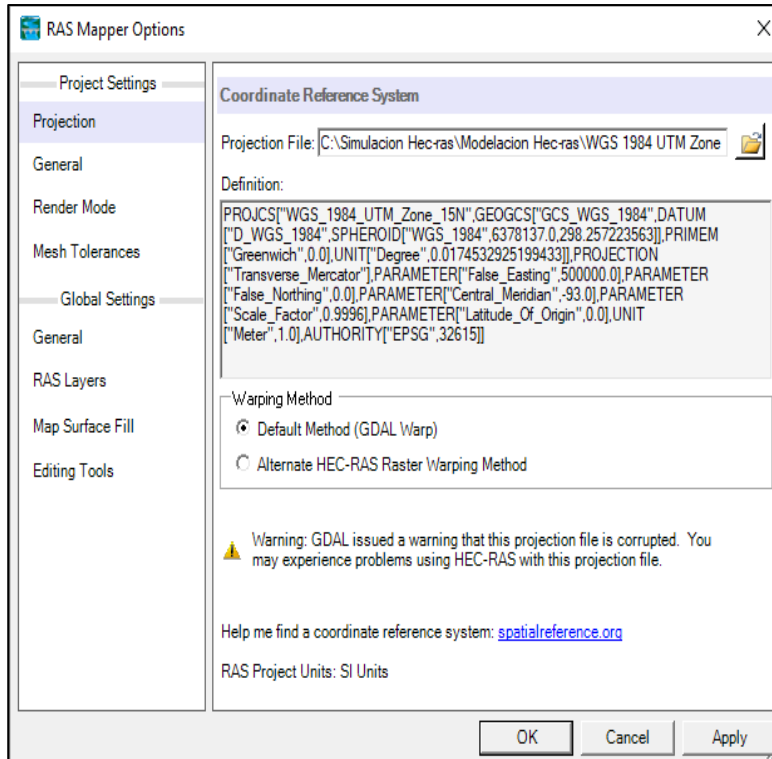


Figura 20. Proyección de la ventana de trabajo. HEC-RAS 6.1 (2022).

#### 4.1.5. Geometría del Modelo.

Posteriormente procedemos a importar nuestro RASTER del terreno en formato *.TIFF*, es importante mencionar que debe de ser en dicho formato, si no es así, el programa no lo reconocerá como válido, finalizando de la siguiente forma.



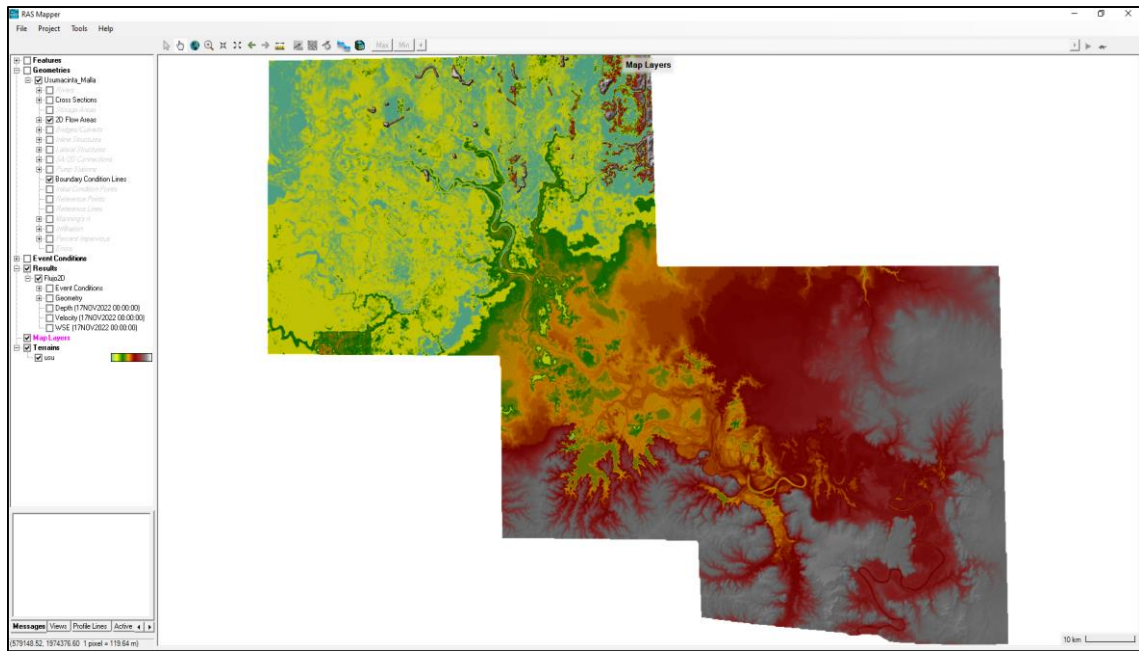


Figura 21. Vista del MDE en HEC-RAS. Elaboración propia.

Importar una imagen base de la zona, nos permite reconocer de mejor manera la zona de estudio, la dirección del flujo del cauce principal, localidades, zonas urbanas, afluentes entre otros aspectos geográficos y antrópicos que forman parte importante del proceso de modelado.

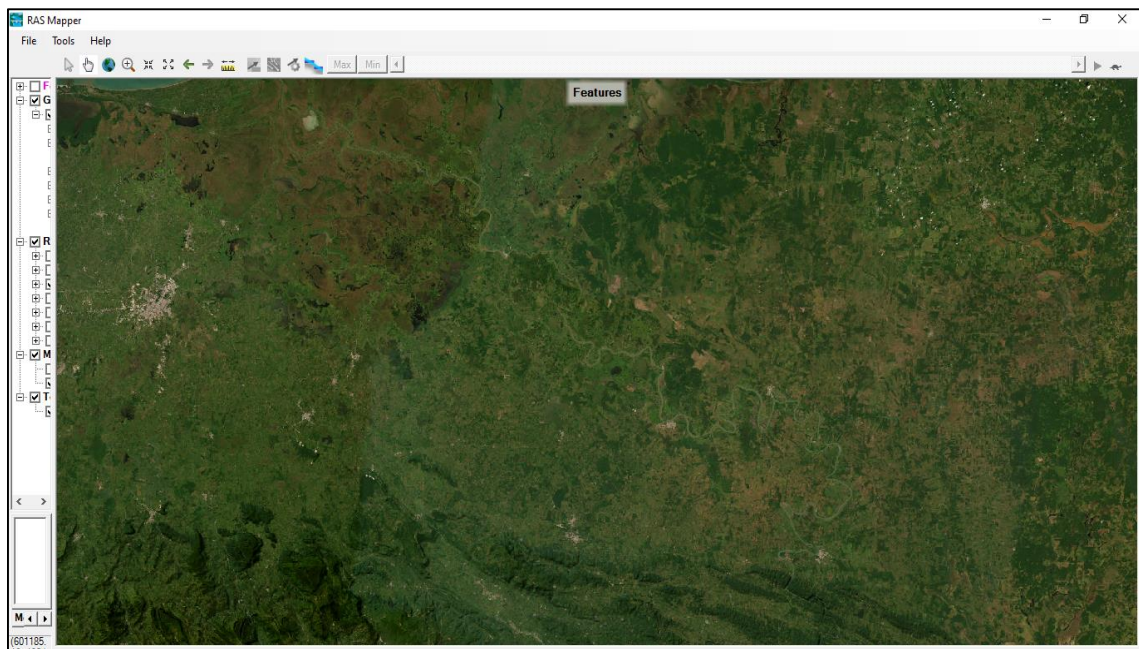


Figura 22. Mapa base. Elaboración propia.

---

Para cada geometría que se cree, habrá una capa que represente el río, XS, cruces, áreas de almacenamiento y áreas de flujo 2D. Además, habrá capas que se calculan a partir de los datos de base - Líneas de ribera, Líneas de Borde de Río, y la Superficie de Interpolación XS.

#### 4.1.6. Generación del mallado del área de estudio HEC-RAS.

Como se conoce desde hace muchos años la dinámica de las cuencas siempre ha sido un constante cambio debido a factores naturales o antrópicos, esto conlleva a que los cauces se modifiquen a lo largo de su trayecto, principalmente sobre las partes medias y bajas. Y como se mencionó anteriormente debido a que el cauce del río Usumacinta a analizar es sinuoso o con meandros, además de ser extenso, desde el punto de vista hidráulico se determinó que el tamaño de malla a utilizar sería de 1.5 km, lo que permitirá una “mayor” rapidez en la ejecución del modelo.

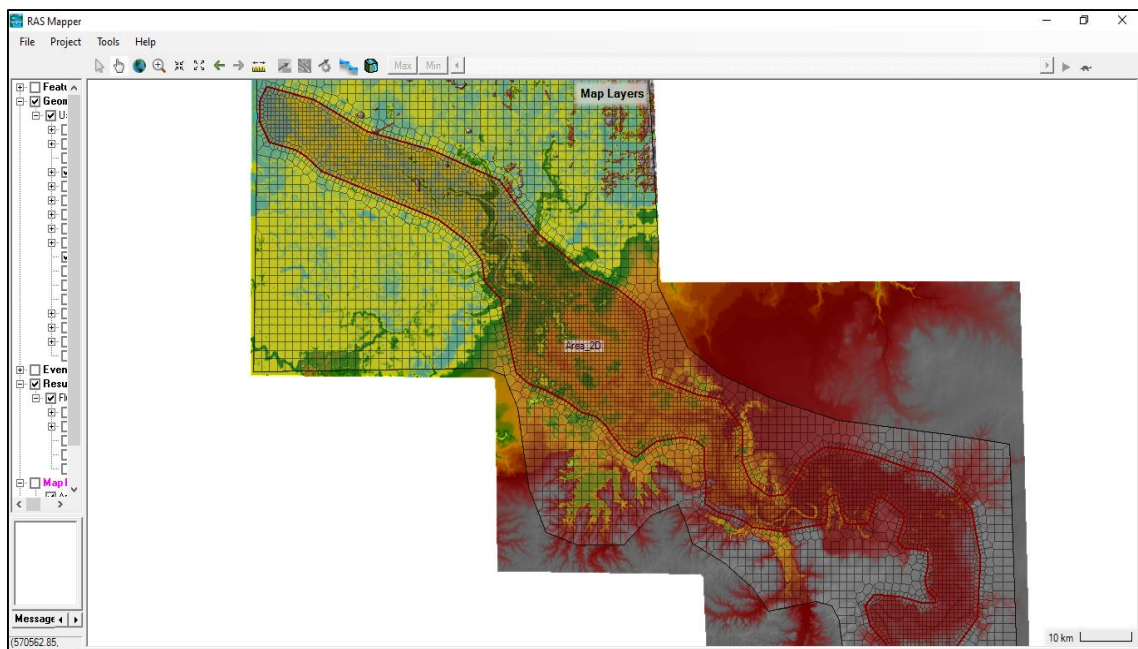


Figura 23. Generación del mallado. Elaboración propia.

Debido al tamaño del cauce, así como las diferentes áreas de regulación que existen (zonas lagunares), se realizó un refinamiento de la malla tomando gran parte de las márgenes del cauce utilizando un tamaño de 0.5 km.

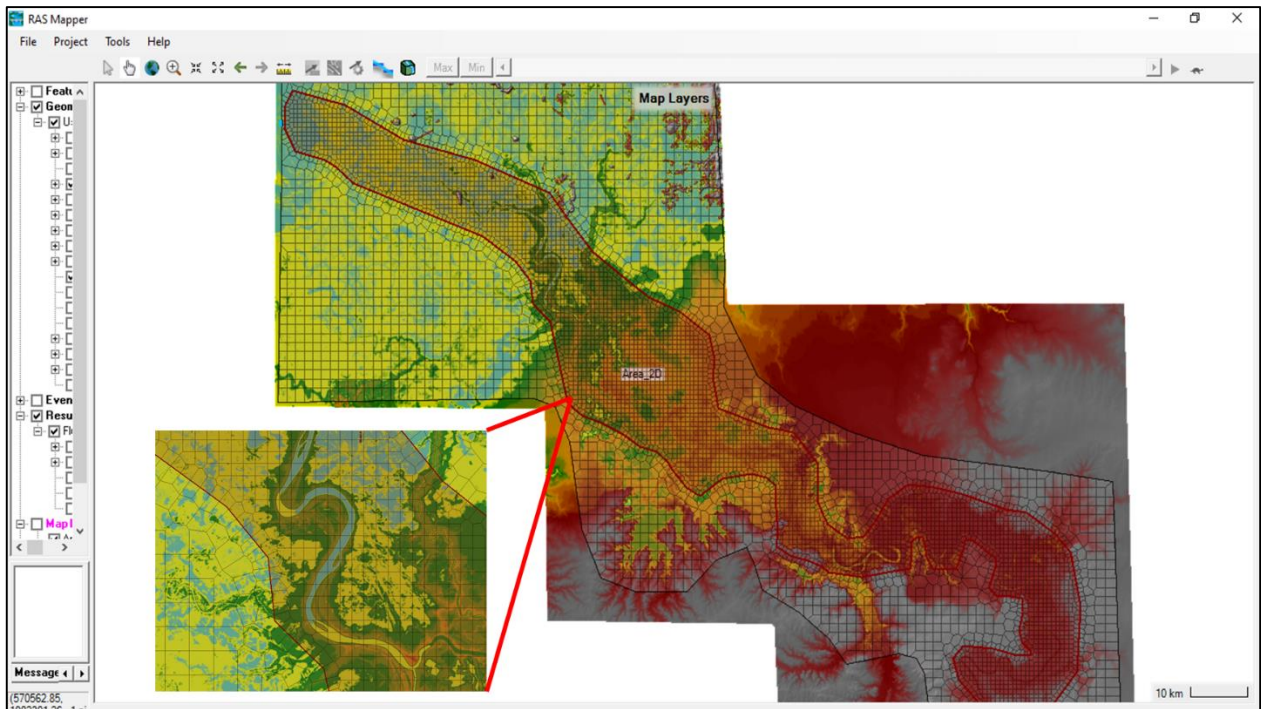


Figura 24. Detalle del mallado, centro del cauce. Elaboración propia.

#### 4.1.7. Valor del coeficiente de rugosidad “n” de Manning.

Asimismo, el valor de “n” de Manning que se utilizó fue el de 0.025, coeficiente para corrientes de agua propuesto por Chow en 1994, para todo el tramo, es importante mencionar que, para mejorar este proceso de modelación, que puede servir como otro tema de investigación, es la generación de una capa vectorial con las asignaciones por cada valor de “n” por donde drena el cauce, esto debido al tamaño del área y los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación.

#### 4.1.8. Condiciones Iniciales del tramo aguas arriba y aguas abajo.



Es necesario indicar un tramo de ingreso aguas arriba sobre la estación hidrométrica Boca del Cerro, y un tramo aguas abajo que es la salida en este caso es la confluencia del río Usumacinta con el río Grijalva.

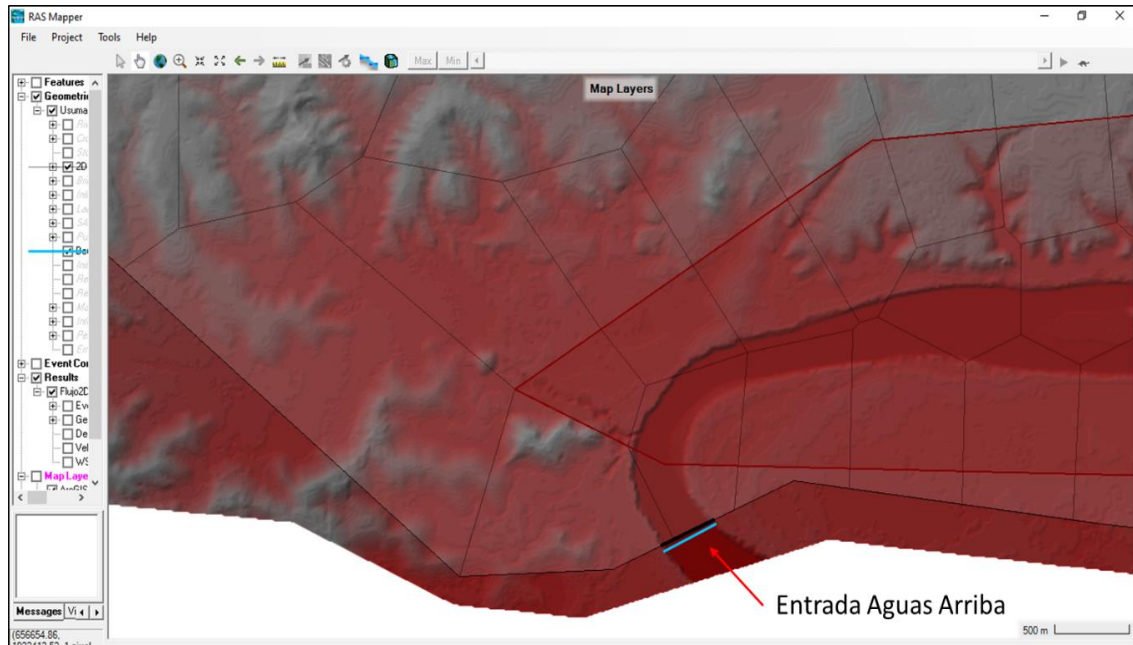


Figura 25. Condición de entrada. Elaboración propia.

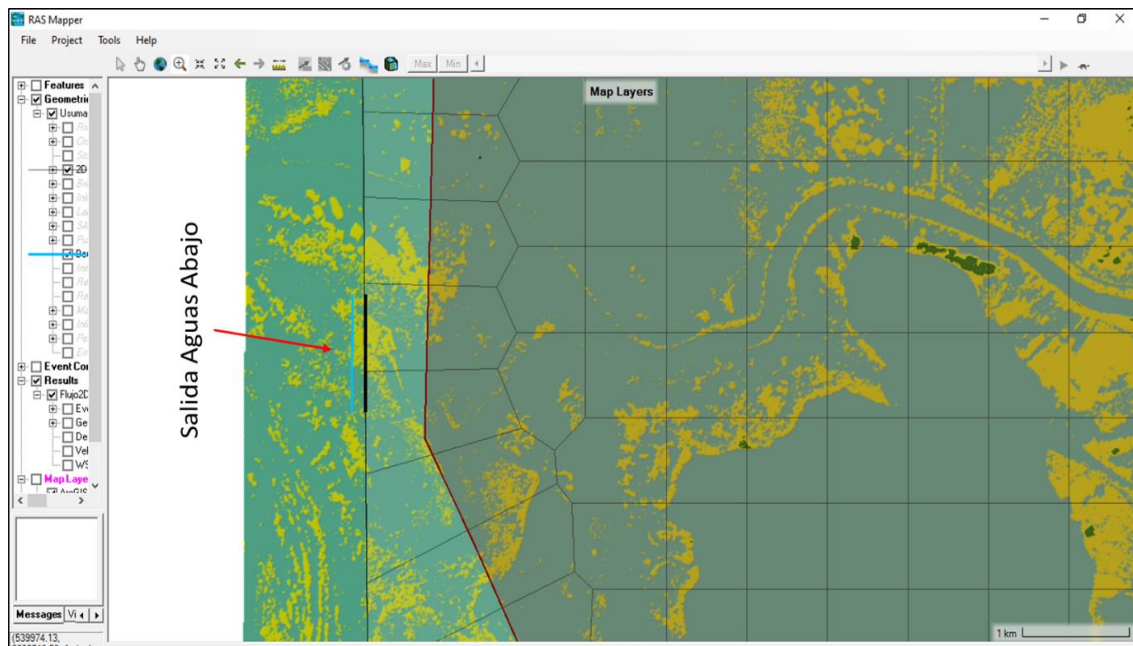


Figura 26. Condición de salida. Elaboración propia.

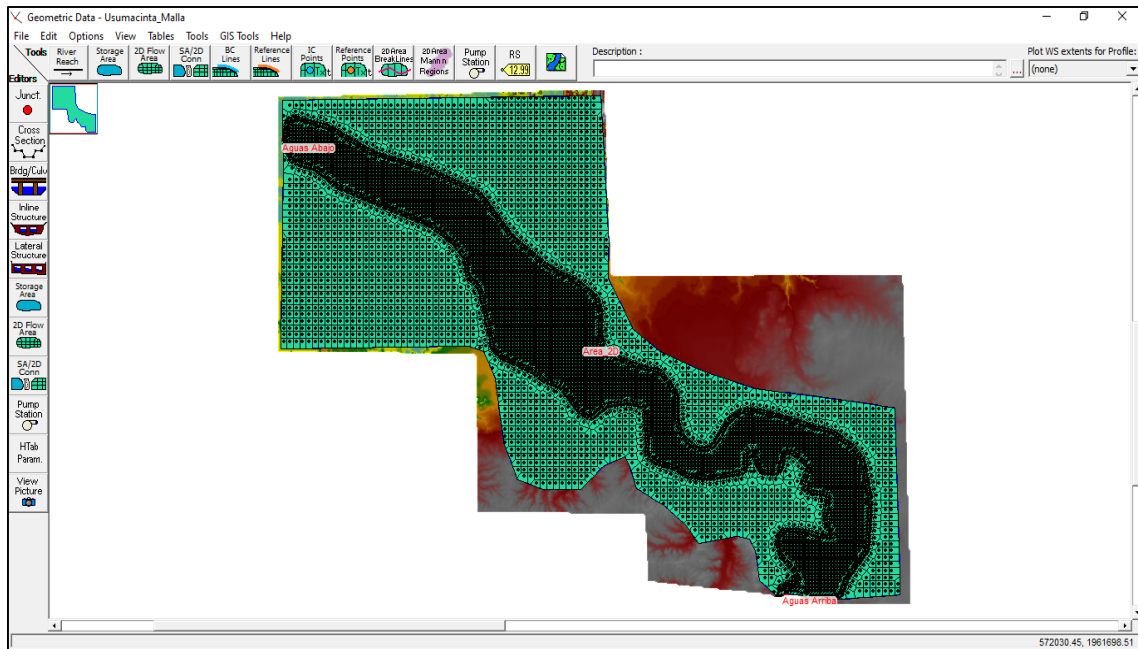


Figura 27. Vista general de la geometría. Elaboración propia.

Para la condición aguas arriba fue necesario realizar el cálculo y el ajuste del Hidrograma horario real registrado en el año 2020, actualmente es la avenida máxima registrada en la cuenca. Asimismo, se aplicó la técnica de mayoración de la avenida más adversa registrada (Domínguez et al., 1980), la cual consiste en seleccionar la avenida máxima registrada, que puede considerarse bajo cierto criterio como la más adversa. Una vez elegida, se construye un hidrograma adimensional, donde cada ordenada se obtiene como  $Q_i/Q_p$  para  $i=1$  hasta la duración  $d$  (horas o días). Posteriormente, el objetivo es estimar los eventos de diseño  $Q_T$  para diferentes períodos de retorno  $T$  en años, en el cual se realizó un análisis de frecuencias a los gastos máximos anuales y, mediante un criterio de ajuste, seleccionamos aquella distribución de probabilidad que mejor describa el comportamiento de la muestra analizada. Finalmente para obtener la avenida de diseño se multiplicaron las ordenadas  $Q_i/Q_p$  del hidrograma adimensional por el valor estimado de  $Q_T$ , obteniendo así una avenida con las mismas características de la más adversa registrada, solo que más grande (Escalante C., Reyes L., 2002).

Derivado del análisis mencionado anteriormente utilizamos la avenida de diseño para un Tr de 100 años, la cual se asemeja a la presentada en el 2020, como se observa en la figura 29.

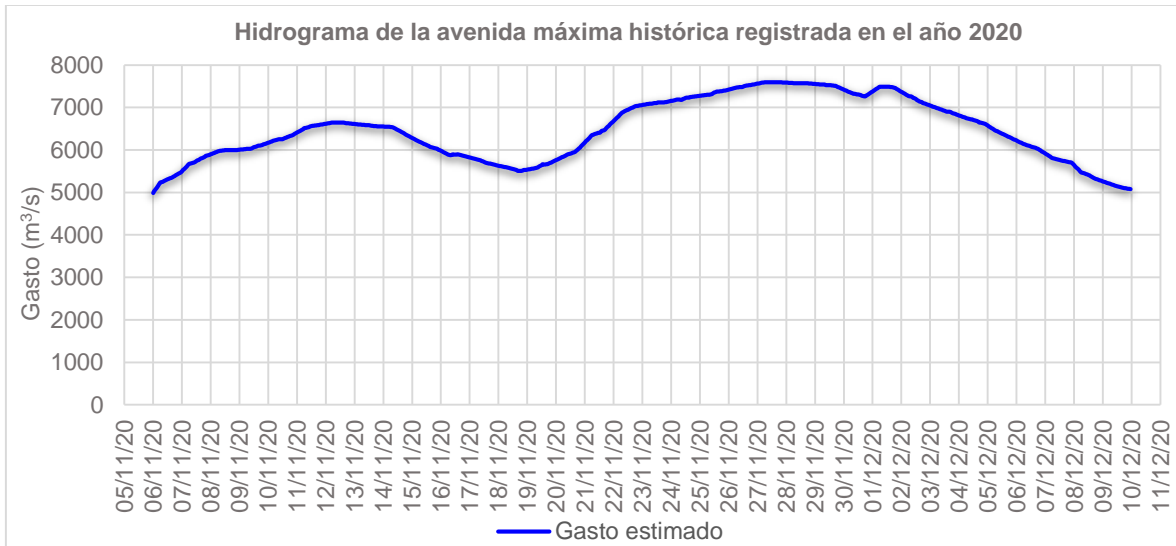


Figura 28. Hidrograma de la avenida presentada del mes de noviembre a diciembre del 2020. Elaboración propia.

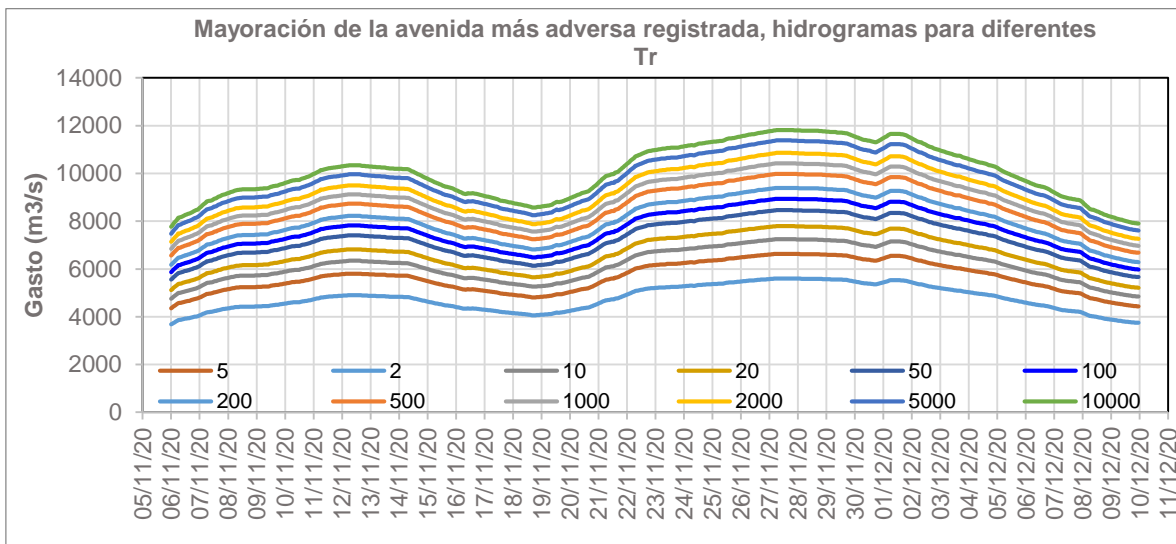


Figura 29. Ajuste por mayoración de la avenida más adversa. Elaboración propia.

La opción de profundidad normal o pendiente normal sólo puede utilizarse como condición de frontera aguas abajo para un tramo abierto. Esta opción utiliza la ecuación de Manning para estimar una etapa para cada flujo calculado. Para utilizar

---

este método se introdujo una pendiente de fricción, para el tramo en las proximidades de la condición límite, el cual fue de 0.01.

El último paso a realizar antes de correr el modelo es asignarle las condiciones del análisis del flujo, es decir, el tiempo de simulación que deseamos trabajar, por lo tanto, como el propósito es ver como se comportó la inundación del 2020, y dicho evento de inundación duro alrededor de 2 a 3 meses por arriba de su NAMO (19.21 m.s.n.m), en esta ocasión se tomó el tiempo del hidrograma máximo de ese año el cual duro 34 días, 816 horas de simulación.

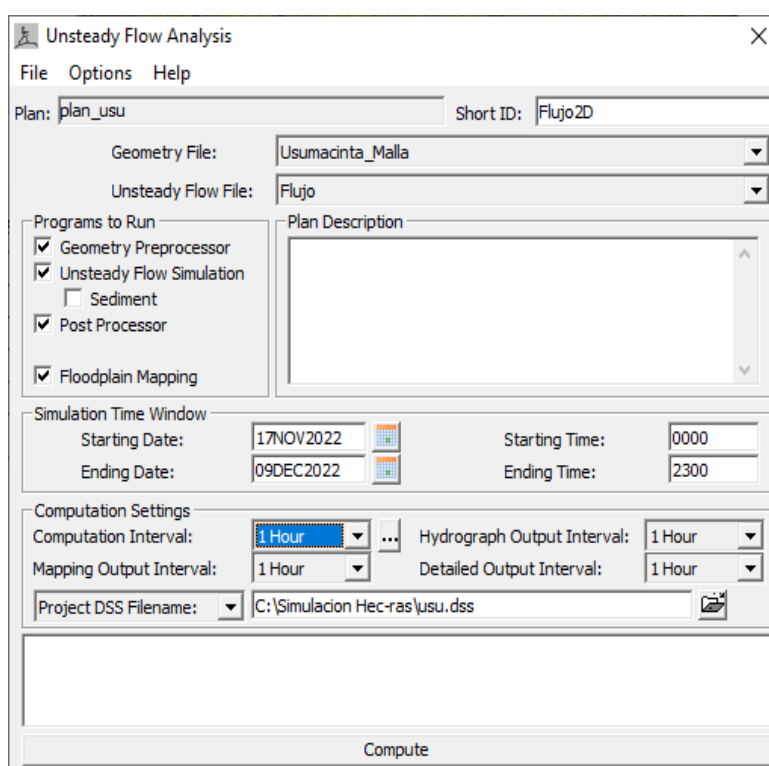


Figura 30. Condiciones de simulación. HEC-RAS 6.1 (2022).

#### 4.1.9. Simulación numérica en el programa IBER.

El proceso de construcción del modelo en IBER, es relativamente sencillo, debido a los insumos que utilizaremos, en si la corrida final es la que más se demora debido a la gran cantidad de iteraciones que realiza, así como la capacidad del equipo en donde se pretende ejecutar la simulación.

A continuación, se presenta un esquema general de como es el proceso de desarrollo de dicho modelo.

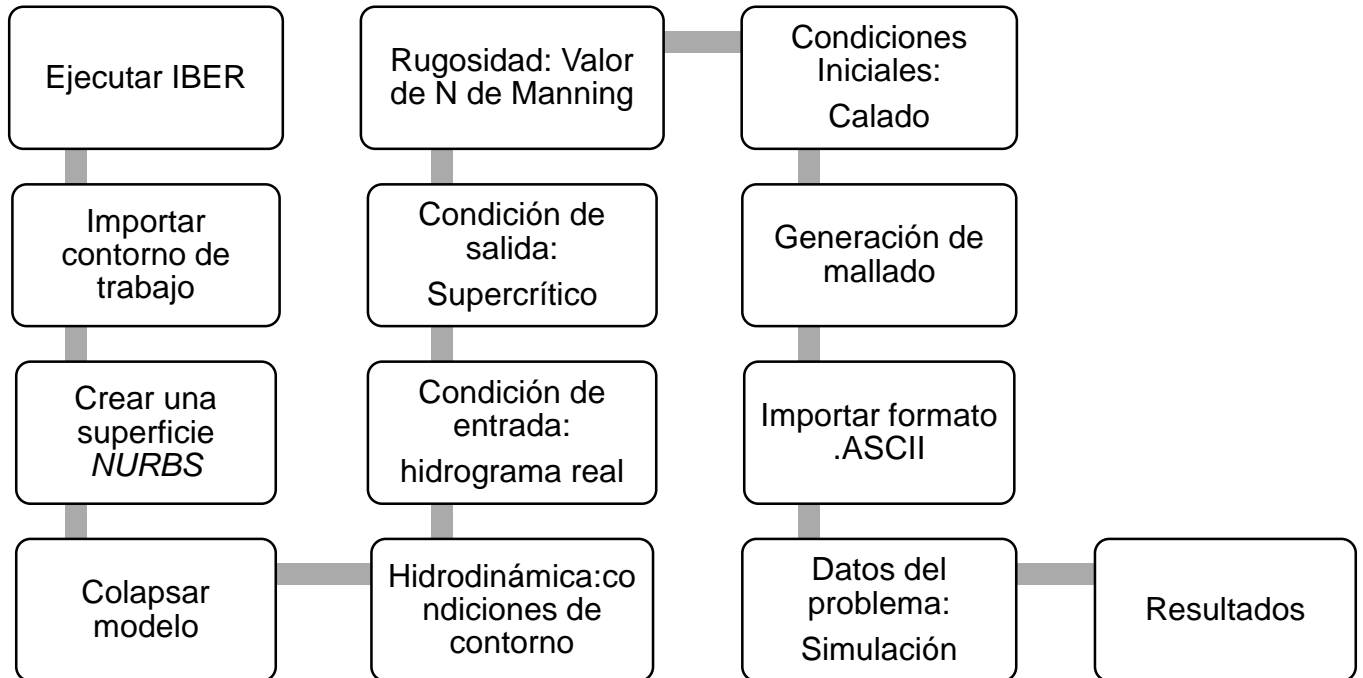


Figura 31. Diagrama de desarrollo del modelo en IBER. Elaboración propia.

Uno de los principales procesos en IBER es la construcción de la malla, ya que es uno del proceso que necesita tiempo al momento de la simulación numérica. Ya que para un río la geometría es irregular y compleja, así que en ambos programas se requiere de un mallado eficiente.

#### 4.1.10. Geometría del Modelo.

IBER necesita de un contorno en formato vectorial para poder definir nuestra zona de análisis, como se observa en la figura 32, es por eso que al importar dicho archivo el proceso que se realiza posteriormente es crear una superficie NURBS (Non Uniform Rational B-Splines), como el terreno forma una superficie suficientemente suave, IBER considera las superficies como entidades NURBS, Este método puede



proporcionar mallas de gran calidad cuando la superficie resultante es bien condicionada.

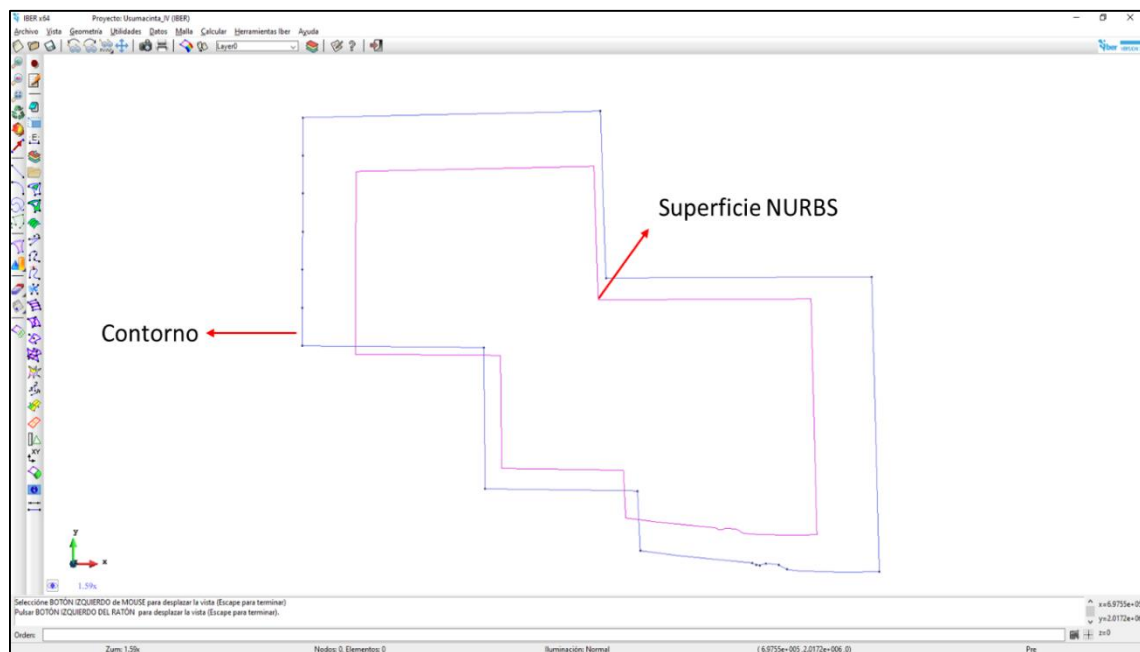


Figura 32. Superficie NURBS. Elaboración propia.

#### 4.1.11. Condiciones de contorno.

La hidrodinámica, en el apartado de condiciones de contorno se refiere a las condiciones de entrada tanto de aguas arriba como de aguas abajo, para establecer estas condiciones, como lo hicimos con HEC-RAS utilizaremos el Hidrograma para un Tr de 100 años para la condición aguas arriba y para la condición aguas abajo, manejaremos una salida con régimen Supercrítico/crítico como se indica en la tabla 6, en el cual no es necesaria una condición, el ingreso de insumos al programa debe no debe ser de forma horaria, si no en segundos, figura 33.

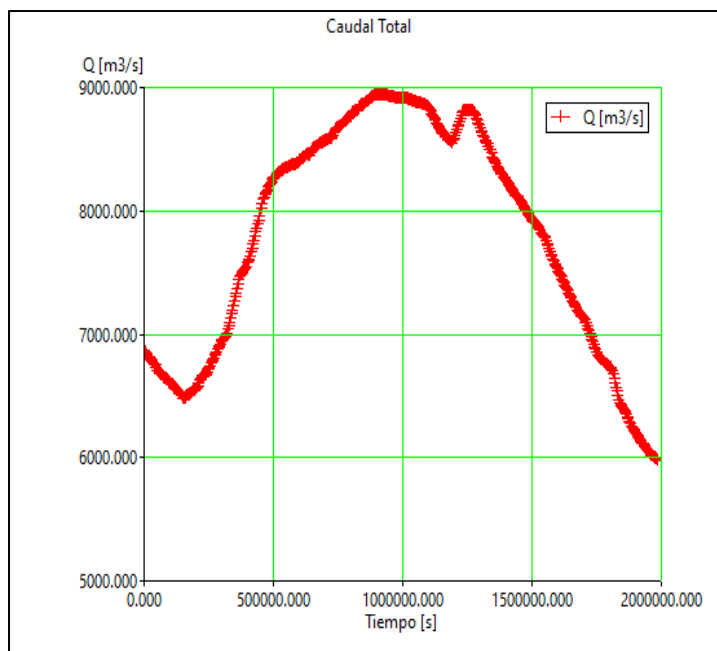


Figura 33. Hidrograma de ingreso, tiempo en segundos. IBER 2.3 (2022).

Tabla 6. Condiciones que incluye el programa IBER. Manual de referencia Iber (2014).

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

---

#### **4.1.12. Condiciones iniciales.**

Las condiciones iniciales, se refiere a la cantidad de agua que existe en el modelo cuando inicia la simulación, la asignación de cota de agua o calado a la superficie de control, para nuestro caso utilizamos el valor de 0.0, suponiendo que se encuentra en condiciones secas.

Rugosidad del terreno, el coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro importante, ya que es la responsable de la resistencia al flujo, el programa tiene la opción de importar un archivo como el programa HEC-RAS asignando los respectivos valores del coeficiente de rugosidad, en este caso como se mencionó anteriormente utilizaremos un valor constante de 0.025.

#### **4.1.13. Generación del Mallado del área de estudio IBER.**

La generación de la malla es uno de los procesos que necesita tiempo al momento de la simulación, debido a la geometría de los ríos ya que es irregular y compleja. IBER utiliza una malla de cálculo, la cual está compuesta por formas de triángulos o cuadriláteros. La generación de mallas puede ser: estructuradas y no estructuradas, en forma de triángulos rectángulos o RTIN (Rectangular Triangular Irregular Network) regulares con la totalidad de puntos de un modelo de terreno digital MDT o importadas. Para este tema de investigación utilizaremos la generación de malla no estructurada debido a que permite un mallado de geometrías complejas formadas por más de 3 lados de manera muy eficiente.

Para el caso de estudio de este tema de investigación se utilizó un tamaño de malla de 0.5 km, debido a que es la que se adaptó mejor a la topografía del terreno, así como el proceso de iteración del modelo.

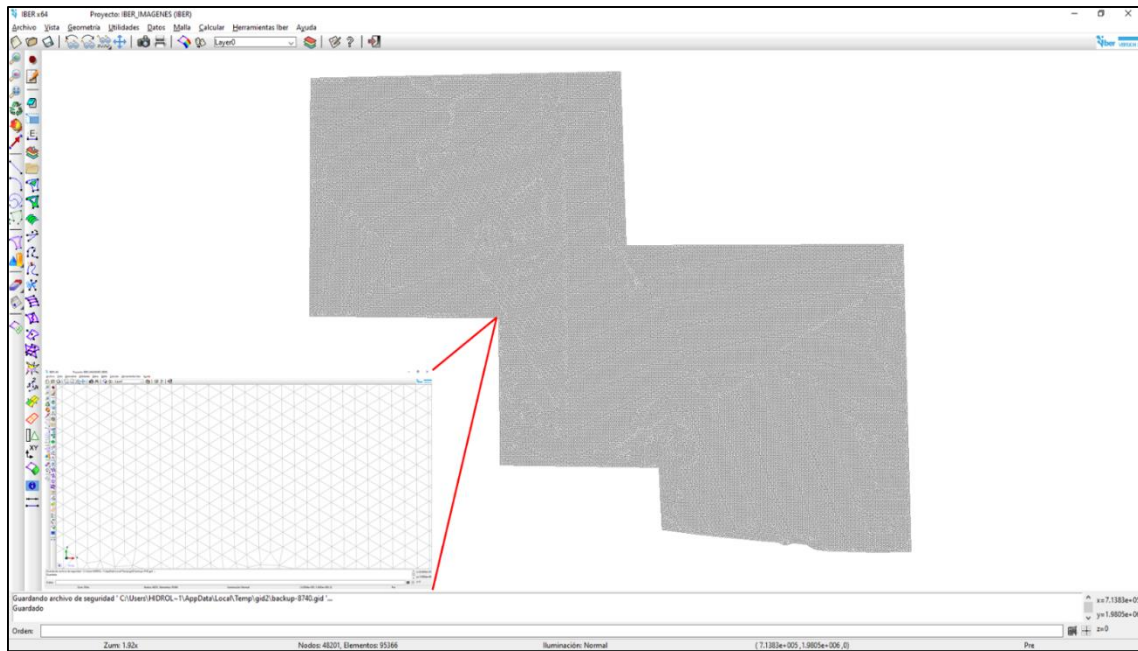


Figura 34. Generación de malla IBER. Elaboración propia.

#### 4.1.14. Configuración del modelo numérico.

La configuración del modelo, debe de ingresarse la información del tiempo máximo de simulación, es decir, el tiempo total en que tarda el hidrograma de la avenida del Tr de 100 años. Además, es necesario designar un valor de intervalo para la visualización de resultados e información del proceso de cálculo.

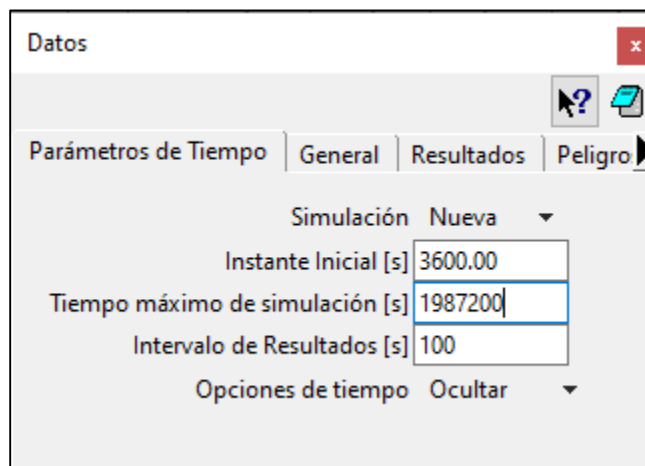


Figura 35. Configuración modelo de la simulación. IBER 2.3 (2022).

---

## CAPÍTULO 5

### 5.1. Análisis de Resultados

Las simulaciones se realizaron con el objetivo de plasmar cómo se comportan simulaciones con los mismos insumos de ingreso, demostraron principalmente que existen diferentes herramientas permitan la toma de decisiones y el uso adecuado de la información para la toma de decisiones o realiza proyectos, además de ver el comportamiento en ríos de planicie con poca pendiente.

Además, se simuló en ambos programas el Hidrograma para un Periodo de Retorno de 100 años, el cual se asemeja a la avenida máxima histórica presentada en el año 2020.

Un punto importante a detallar es que la simulación contó con el mínimo de insumos requeridos para generar una corrida hidráulica, asimismo la deficiencia del Modelo Digital de Elevación con una cantidad extensa de errores que limitan los resultados a obtener.

#### 5.1.1. Resultados simulación HEC-RAS.

El proceso de simulación duro menos de 5 minutos (debido a que se utilizó el método de la onda difusiva para resolver las ecuaciones de Saint Venant en 2D), y obtuvimos que los tirantes van desde los 0.0 a los 11 metros de profundidad, cabe mencionar, que el río Usumacinta en la parte baja de su cuenca drena por una gran cantidad de sistemas lagunares que se conectan lo que provoca funciona como zona de regulación ante incrementos de nivel, como se observa en el figura 36, existen zonas en las que no se presentaron inundaciones y otras en las que si se presentaron de acuerdo al resultado de simulación.

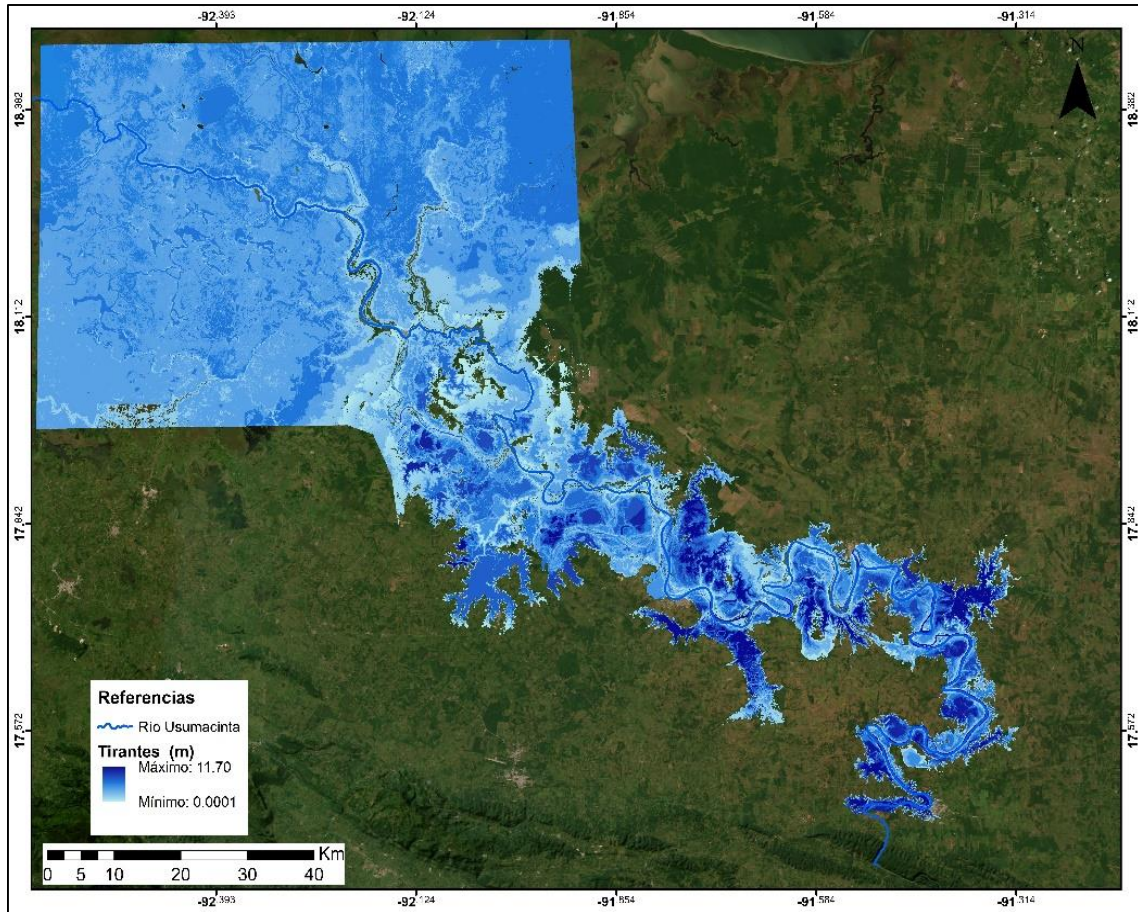


Figura 36. Resultados obtenidos de profundidades en HEC-RAS. Elaboración propia.

Las velocidades oscilar de 0.0064 a 5.65 m/s, como se observa aguas arriba, sobre la parte inicial del modelado así como en la parte final, el resto de los tramos se encuentran con velocidades por debajo de lo 2.00 m/s, figura 37.



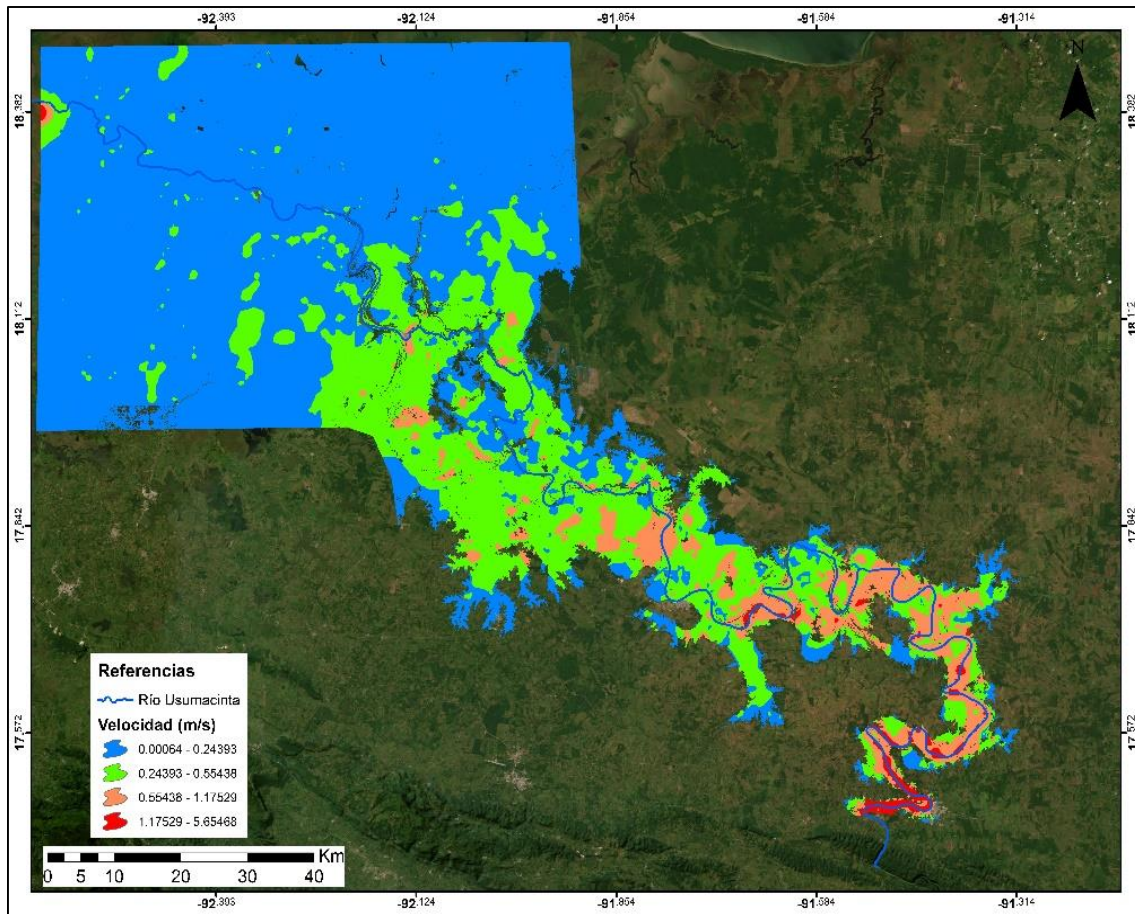


Figura 37. Resultados obtenidos de velocidades en HEC-RAS. Elaboración propia.

### 5.1.2. Resultados simulación IBER.

El proceso de simulación duro de 10 horas, y se obtuvieron que los tirantes van desde los 0.0 a los 11 metros de profundidad, como se observa en la figura 38, existen zonas en las que no se presentaron inundaciones y otras en las que, si se presentaron de acuerdo al resultado de simulación, sobre todo aguas arriba del cauce.

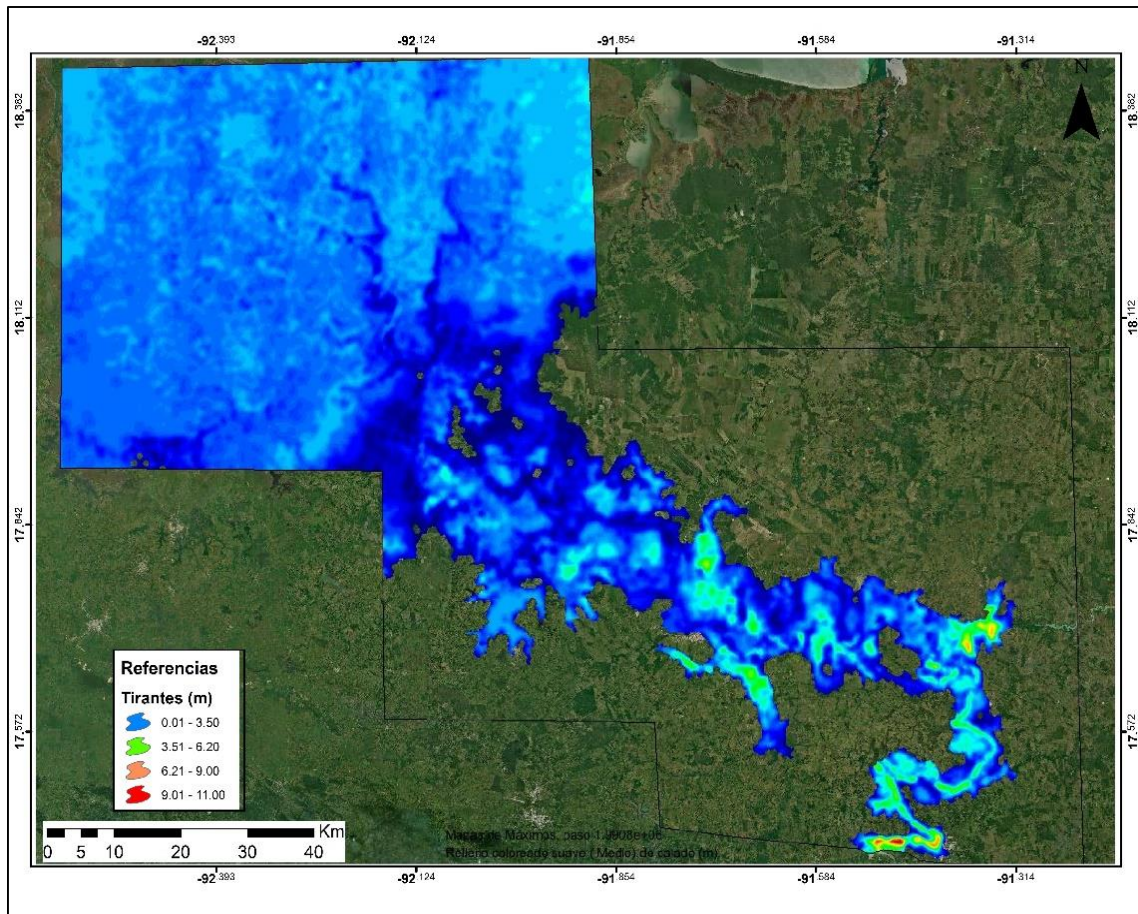


Figura 38. Resultados obtenidos de profundidades en IBER. Elaboración propia.

Respecto a las velocidades estas fueron del orden de 0.27 a 2.44 m/s, sobre la parte alta y media del tramo simulado, como se observa en la figura 39.



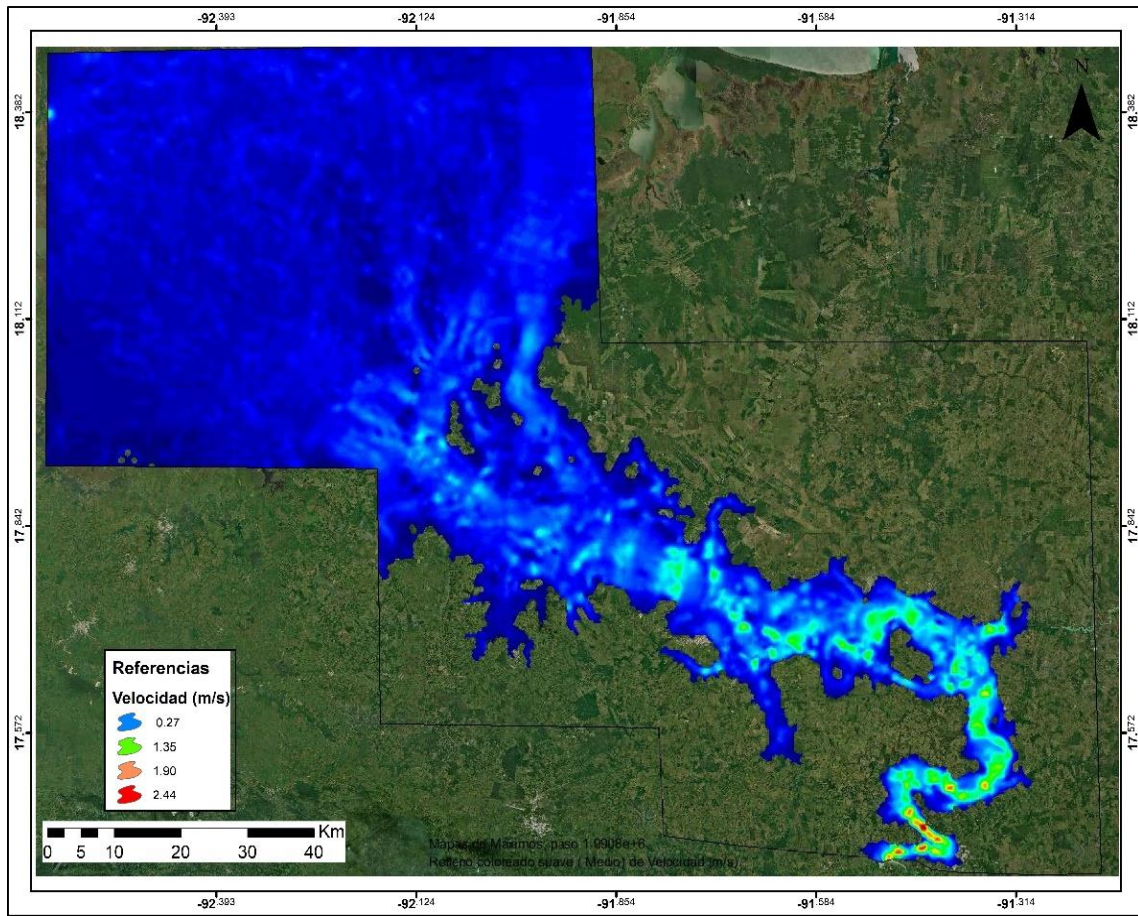


Figura 39.. Resultados obtenidos de velocidades en IBER. Elaboración propia.

---

## CAPÍTULO 6

### 6.1. Conclusiones.

- La generación de mapas temáticos para el río Usumacinta permite conocer una aproximación de la inundación presentada en el año 2020, velocidades y tirantes máximos.
- HEC-RAS e IBER son programas que permiten el desarrollo de modelos numéricos en dos dimensiones para el tránsito del flujo a lámina libre en cauces naturales.
- Con base en los resultados obtenidos para cada simulación se observó que ambos generan una llanura de inundación correspondiente al Modelo Digital del Terreno que tengan como base, como se observa en las figuras 36 y 38, no reconocen solo el tramo del cauce, si no los puntos bajos en los que el programa asume que existen zonas bajas y las rellena automáticamente.
- El comportamiento de simulación en los ríos de planicie es complejo debido a la poca pendiente, y en este caso a la cantidad inmensa de sistema lagunares que se conectan sobre la parte baja, lo que provoca que el tránsito sea más complejo.
- Los dos modelos se asemejaron en los tirantes, por lo que podemos tomar como base inicial de posibles zonas de inundaciones para tomarlas en cuenta, respecto a las velocidades HEC-RAS presentó las mayores velocidades del flujo.
- Las cartas ráster 1:5,000 de INEGI pudieron representar una topobatimetría y topografía de zonas de inundación, con una calidad de simulación aceptable, debido que se entiende que el área de inundación es de varios kilómetros cuadrados y se requeriría una cantidad de recursos económicos para un levantamiento más preciso.

---

## 6.2. Recomendaciones.

- La información requerida como base para el desarrollo de modelos numéricos debe ser de calidad, actualizada y con un detalle aceptable, considerando que la información proviene de diversas fuentes, por lo que es necesario homologarlas.
- Uno de los principales temas a desarrollar es la creación de una capa vectorial que detalle los valores de “ $n$ ” de escurrimiento en dicha zona.
- Para el caso de estudio del río Usumacinta, es necesario realizar una segunda simulación, con topografía de detalle, tanto del cauce como de las cuencas aportadoras, ya que en su trayecto existen diversos cauces que confluyen con éste, como lo son el río Chacamax, San Pedro, el sistema lagunar Playas de Catazajá, y los sistemas lagunares cercanos a su delta, así como utilizar el uso de las demás herramientas que trae cada programa.
- Generar simulaciones por tramos que faciliten la dinámica e iteración de los programas, así como el tiempo de simulación.
- Los modelos bidimensionales son aplicables para el estudio de los fenómenos hidráulicos que se presentan en ríos de llanura de inundación con presencia de meandros y zonas donde se producen desbordamientos laterales generando inundaciones
- Para el caso de la simulación en IBER, es necesario poseer un ordenador con suficiente capacidad para minimizar el tiempo y construcción del modelo, para este tema de investigación se utilizó un equipo de 6 núcleos con 8 Gb de memoria RAM, haciendo un total de poco más de 360 horas, debido a las diferentes corridas que se generan.
- Se recomienda ampliamente continuar con temas de investigación, que generen una validación en campo de los coeficientes de rugosidad, así como el proceso detallado de simulación de la cuenca.
- Debido a que la información ráster utilizada fue de escala 1:5,000, se espera que con la información a escalas menores los valores obtenidos de tirantes y velocidades y zonas inundables mejoren. Esto se dará cuando las

---

imágenes satelitales generen modelos de más precisión llegando incluso a píxeles de 1 m.

---

## CAPÍTULO 7

### 7.1. Referencias

E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz y A. Coll (20 de noviembre de 2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos par Cálculo y Diseño de Ingeniería, (30), (Número 1), 1-10 [Iber-Herramienta de simulación de modelado fluvial - Blade et al 2012a - Scipedia](#)

E. Bladé, L. Cea, G. Corestein (28 de julio de 2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. Ingeniería del Agua. <http://iwaponline.com/IA/article-pdf/18/1/71/577403/ia20143144.pdf> byguest

Brugal, A. (septiembre de 2010). El coeficiente de Manning y el cambio de precisión de los MDT en la simulación hidráulica (XXXI), (Número3), 1-7.

Escalante C. A., Reyes L. (2002). Análisis Conjunto de Eventos Hidrológicos (Eds). Técnicas Estadísticas en Hidrología (2002, primera edición).

Comisión Nacional del Agua (2014). Estudio para el Proyecto Hidrológico para Proteger a la Población de Inundaciones y Aprovechar Mejor el Agua (PROHTAB).

Comisión Nacional del Agua (2020). Resumen Climatológico Mensual para los Estados de Chiapas y Tabasco.

Cisneros I. P. (2017). Estudio en modelo físico de las características del punto de inyección del vertedor escalonado de la Presa de almacenamiento Zapotillo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Guaya, C. I. (2018). Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la provincia de Manabí aplicando el programa IBER. Escuela Politécnica Nacional.

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (2014). Manual de referencia hidráulico IBER. Modelización bidimensional delo flujo en lámina libre en aguas poco profundas. <https://www.iberaula.es/vnews/21/2716/manual-v30>

---

López, L. (2017). Procedimiento para la simulación hidráulica a partir del software ArcGIS y HEC-RAS para eventos extremos máximos. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Lluén W.E. (2015). Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Martín, J. (Ed.). (2003). Ingeniería Fluvial (segunda edición). (Centre de Publicacions del Campus Nord).

Ramírez, S. D., Tevera, J. C. (2019). Estudio de las velocidades y tirantes frente al embarcadero de Chiapa de corzo y dentro del Cañón del Sumidero, para resolver la problemática de la basura acumulada en las aguas del Grijalva del Parque Nacional del Cañón del Sumidero”. Universidad Autónoma de Chiapas. Tesis de pregrado de la UNACH. Facultad de Ingeniería.

Ramos, S. R., Cea, L., Bladé, Gómez D., Sañudo E. (13 de julio 2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. [Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones - Sanz-Ramos et al 2022b - Scipedia](#).

US Army Corps Of Engineers (2022). HEC-RAS User’s Manual (versión 6.3) <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/hgt/latest>