



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELAMIENTOS
HIDRÁULICOS NUMÉRICOS DE INUNDACIONES
FLUVIALES, CAJAMARCA 2020”

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniero Civil

Autores:

Elvimar Alaya García
Wilson Gustavo Riquero Miranda

Asesor:

Ing. Anita Elizabet Alva Sarmiento

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

A Dios y a nuestras familias por su apoyo incondicional y por brindarnos valores que nos permitieron desarrollarnos personalmente y en el futuro como profesionales de calidad.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a todas las personas que nos apoyaron a lo largo de la carrera e impulsaron en nosotros la superación y motivación.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema	20
1.3. Objetivos	21
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	21
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	21
1.4. Hipótesis	21
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	22
2.1. Tipo de investigación	22
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	22
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	25
2.4. Procedimiento	27
CAPÍTULO III. RESULTADOS	30
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	42
4.1. Discusión.....	42
4.2. Conclusiones.....	48
REFERENCIAS.....	51
ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Grupo de estudio seleccionado.....	23
Tabla 2	Tipo de estudio seleccionado.....	30
Tabla 3	Año de publicación de estudios seleccionados.....	31
Tabla 4	Herramienta más usada en levantamiento topográfico.....	32
Tabla 5	Modelo Digital más usado.....	32
Tabla 6	Consideración de Batimetría.....	33
Tabla 7	Cálculo de parámetros geomorfológicos.....	34
Tabla 8	Cálculo de caudales más empleado.....	34
Tabla 9	Software de modelamiento más empleado.....	35
Tabla 10	Dimensión de modelamiento más común.....	36
Tabla 11	Esquema numérico más usado.....	37
Tabla 12	Ecuaciones de cálculo más empleadas.....	37
Tabla 13	Malla más empleada.....	38
Tabla 14	Cálculo del coeficiente de Manning.....	39
Tabla 15	Calibración de modelo.....	39
Tabla 16	Características referentes a la topografía.....	40
Tabla 17	Características referentes al modelamiento hidrológico.....	41
Tabla 18	Características referentes al modelamiento hidráulico.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aproximación 1D / Aproximación 2D	17
Figura 2 Malla de modelamiento 2D / Malla de modelamiento 3D	17
Figura 3 Gráfico de tipo de estudios seleccionados.....	30
Figura 4 Gráfico del año de publicación de los estudios seleccionados.....	31
Figura 5 Gráfico de herramienta más usada en levantamiento topográfico	32
Figura 6 Gráfico de Modelo Digital más usado	33
Figura 7 Gráfico de consideración de Batimetría	33
Figura 8 Gráfico del método de cálculo de parámetros geomorfológicos.....	34
Figura 9 Gráfico de cálculo de caudales más empleado	35
Figura 10 Gráfico de software de modelamiento más empleado.....	36
Figura 11 Gráfico de dimensión de modelamiento más común.....	36
Figura 12 Gráfico del esquema numérico más usado	37
Figura 13 Ecuaciones de cálculo más empleadas.....	38
Figura 14 Gráfico de malla más empleada	38
Figura 15 Gráfica de cálculo de coeficiente de Manning	39
Figura 16 Gráfico de calibración de modelo.....	40

RESUMEN

Se realizó un estudio cuyo objetivo fue determinar las principales características para un óptimo modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales y la metodología más común usada, se desarrolló una investigación descriptiva en la cual se seleccionaron 20 trabajos para formar el grupo de estudio, estos fueron sometidos a criterios de inclusión y exclusión. Se utilizaron dos fichas como instrumentos de recolección de datos, la primera para datos generales y la segunda para datos específicos. Los resultados muestran el procedimiento más común para realizar un modelamiento hidráulico respecto a la topografía, modelamiento hidrológico e hidráulico, dentro de estos se evaluaron diversos parámetros, así mismo, se describen las características óptimas encontradas en cada estudio analizado, estas se clasifican también respecto a la topografía, hidrología e hidráulica. Por lo tanto, se concluye que los parámetros más comunes en un modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales son: emplear información topográfica brindada por entidades, páginas de internet o de trabajos anteriores, emplear un modelo digital de terreno (MDT), no considerar la batimetría, utilizar parámetros geomorfológicos ya dados por otras investigaciones o de otra fuente, calcular los caudales máximos con el apoyo de un software, utilizar HEC – RAS para el modelamiento hidráulico, realizar un modelo unidimensional, emplear el esquema de volúmenes finitos, plantear el modelo con ecuaciones de Saint Venant, emplear la malla que por defecto usa el software, estimar el coeficiente de Manning mediante tablas y no calibrar el modelo.

Palabras clave: Modelamiento hidráulico, modelamiento numérico, inundaciones fluviales.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En el Perú las inundaciones son frecuentes, los modelamientos hidráulicos son muy empleados actualmente para tener una aproximación a las consecuencias de dichos fenómenos (SENAMHI, 2018). Dentro de los desastres naturales, las inundaciones son a nivel mundial las más destructivas en relación a la economía y mortalidad, como ejemplo tenemos que entre los años 2000 y 2006 produjeron la muerte de más de 290 000 personas, afectaron a 1 500 millones y generaron pérdidas monetarias de 422 000 millones de dólares aproximadamente; los daños son mayores en áreas urbanas ya que hay una concentración más grande de personas e infraestructura en comparación a las zonas rurales. (CENEPRED, 2014).

Sierra (2018), menciona que no es sencillo el comportamiento de los ríos en un evento extraordinario como lo es una inundación, por tal motivo los modelamientos informáticos hidráulicos son muy recomendables debido a su eficiencia y costo; las áreas inundables que se obtienen sirven para identificar la vulnerabilidad de la zona y poder estimar los posibles daños ocasionados. Mayta y Mamani (2018) agregan que los eventos extremos de precipitaciones pueden ser los desencadenantes de daños por inundaciones, son situaciones como estas las que dejan en evidencia la importancia de los modelamientos, ya que estos nos ayudan a predecir comportamientos futuros. Además, es importante mencionar que según CENEPRED (2014), las inundaciones son peligros generados por fenómenos de origen hidrometeorológico y oceanográfico, como factores condicionantes (relacionados al ámbito geográfico de estudio) tenemos la geología, geomorfología,

fisiografía, hidrología y edafología, mientras que como factores desencadenantes (aquellos que pueden generar peligros) tenemos los hidrometeorológicos, geológicos e inducidos por el ser humano.

Ramos y Pacheco (2017) nos indican que el estudio de las cuencas hidrográficas ha tenido un considerable progreso debido a la implementación de modelos hidrológicos e hidráulicos, dentro de los cuales algunos han tenido una buena aceptación debido a sus acertadas aproximaciones. Mamani (2014) añade lo siguiente:

Los modelos matemáticos permiten atender algunos fenómenos hidrológicos e hidráulicos y la manipulación del software permiten predecir el comportamiento futuro del río con una serie de condicionantes y limitaciones del mismo software. Para que un modelo sea válido se quiere que la información utilizada sea confiable y completa y el modelo utilizado represente realmente el comportamiento de esa corriente en las circunstancias en que ocurre la inundación, en el sitio donde se realiza el análisis (p. 8).

A continuación, se presentan estudios con cierto parecido a lo que se realizará en esta investigación, de esta forma al final del trabajo se podrán comparar nuestros resultados con los obtenidos en otras realidades.

Vásquez (2003), en su investigación denominada: “Modelación numérica en hidráulica”, la cual tuvo como objetivo describir los modelos empleados, sus características como dimensionalidad, capacidad de regímenes a modelar, método de cómputo, contornos y otros. Realizó el estudio mediante revisión literaria referente al

tema y descripción de todo lo encontrado, llegó a la conclusión de que el avance tecnológico ha permitido optimizar factores como tiempo y facilidad para el modelado, esto debido a que con el procesamiento computacional se acelera la generación del mallado necesario para el modelamiento, se tienen procesos eficientes y competitivos que desplazan otros métodos como los modelos a escala. Además, menciona que los cálculos manuales para estudios hidráulicos de puentes ya no deberían ser aceptados, ya que se tienen a disposición libre softwares como HEC-RAS, FESWMS Y BRISTARS que tienen funciones específicas para tales estudios y al ser métodos computacionales son superiores al cálculo manual.

Años después se planteó una investigación similar llevada a cabo por Bladé et al. (2014), en su artículo científico denominado: “Modelización numérica de inundaciones fluviales” publicado en Ingeniería del Agua, el cual tuvo como objetivo describir diferentes metodologías de modelización numérica de inundaciones fluviales y para ello realizaron una caracterización de los modelamientos hidráulicos numéricos describiendo principalmente los unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales y abarcaron también temas referentes a transportes de sedimentos, flujos en estructuras y la integración de modelos hidrológicos e hidráulicos. Llegaron a la conclusión que para la época en que realizaron el estudio estaban emergiendo los modelamientos bidimensionales y tridimensionales, siendo el unidimensional el más consolidado; los resultados que se podían obtener con cada uno dependían de la experiencia del modelador, la cantidad de datos disponibles y las particularidades de cada situación. Además, recalcan la importancia de los modelamientos como herramientas fundamentales para estudios de riesgo.

Como estudios centrados en parámetros de dimensión tenemos los siguientes que muestran comparaciones de modelos 1D, 2D y cuasi-2D; el primero elaborado por Timbe y Willems (2011) en su investigación: “Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones” publicada en la revista MASKANA, la cual tuvo como objetivo evaluar la precisión de la modelación de crecidas en las llanuras de inundación, para ello se comparó una modelación cuasi 2D usando un modelo 1D con un modelo 2D completo, los modelos se probaron para 3 eventos históricos de inundaciones. Se emplearon los modelos MIKE FLOOD, MIKE 11/MIKE 11 GIS Y MIKE 21, se llegó a la conclusión que MIKE FLOOD para alcanzar las mismas áreas de inundación de MIKE 11/MIKE 11 GIS tiene que calcular mayores profundidades de inundación y en el caso de MIKE 21 presenta niveles de inundación más altos y relativamente constantes. MIKE FLOOD presenta como una desventaja considerable los altos requerimientos de hardware que conllevan un mayor tiempo de procesamiento, este modelo puede ser empleado para áreas específicas y en un número limitado de eventos concretos de crecidas. Explican además que para su caso concreto en el río Dender el modelo cuasi-2D debería aplicarse para áreas grandes y simulaciones continuas de largo plazo, las diferencias entre este modelo y el 2D no son significativas.

Como segundo estudio tenemos el realizado por Gutiérrez (2018), en su tesis denominada: “Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional en el análisis de inundaciones en el río Virú”, la cual tuvo como objetivo realizar la comparación del modelamiento hidráulico del río Virú utilizando el modelo unidimensional HEC-RAS, HEC-GeoRAS y el modelo bidimensional Iber, esto para determinar las zonas vulnerables a inundación. Para tal fin realizó una

secuencia de tres etapas importantes, trabajo de pre-campo para tener consideraciones iniciales antes de ir a la zona de estudio, trabajo de campo para recopilar los datos necesarios e identificar puntos críticos y finalmente el trabajo de gabinete para procesar toda la información. Obtuvo como resultados que con el programa HEC-RAS se tiene un área de inundación de 13 ha., lo cual determina un aproximado en pérdidas económicas de S/ 3 743 879. 31 mientras que con el programa Iber se tiene un área de inundación de 17 ha., lo cual da un estimado en pérdidas económicas de S/ 5 240 860.98. Como principal conclusión nos menciona que para modelar un río con caudal estable los modelamientos unidimensionales cumplen perfectamente para las solicitaciones, pero para modelar inundaciones, huaycos y desbordes los modelos bidimensionales son más eficientes.

Finalmente, un estudio que muestra una comparación poco estudiada referente a los modelamientos hidráulicos es la hecha por Agudelo et al. (2018), en su artículo científico publicado en Tecnología y ciencias del agua denominado: “Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación”, el cual tuvo como objetivo comparar un modelo de tránsito de flujo unidimensional mediante su aplicación en el software HEC-RAS con un modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales artificiales empleando el software MatLab. Su desarrollo se dio en las partes altas del río Bogotá y los datos de flujo fueron tomados por la Corporación autónoma Regional de Cundinamarca; para comparar cuantitativamente los resultados emplearon indicadores estadísticos como error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio (MSE), error medio porcentual absoluto (MAPE), raíz cuadrada de la MSE, coeficiente de correlación de Pearson (CC) y coeficiente de correlación de concordancia, emplearon Hydrotest para medir

el coeficiente de eficiencia. Llegaron a la conclusión de que los modelos de redes neuronales artificiales tienen una mayor aproximación a valores reales, los modelos físicos desvarían con valores de caudales altos, las pruebas estadísticas mostraron valores que reflejaban pronósticos acertados y concordancia entre los datos reales y simulados, esto debido a que el estudio utilizó mayoritariamente datos de caudales medios y bajos para los dos modelos.

Ahora es importante mencionar algunos términos y teorías esenciales para poder comprender el trabajo a realizarse y diferenciar ciertos aspectos, es así que tenemos:

Las inundaciones muchas veces se dan como consecuencia de lluvias intensas en las que se supera la capacidad de transporte del río, lo cual ocasiona un desborde del cauce y posteriormente daños sobre los terrenos, viviendas u otro tipo de infraestructura que se encuentre en el área de inundación, en el peor de los casos provocan la pérdida de vidas humanas. Existen varios modelos hidráulicos que permiten representar el flujo del río y de esta forma tomar medidas de prevención adecuadas, entre ellos uno de los más empleados es HEC – RAS. (Pérez et al., 2010, p. 2).

Máximas avenidas, “Elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un nivel máximo, desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad.” (Núñez, 2017, p. 15).

López (1997) señala que la hidráulica se basa en el estudio del equilibrio, estática y dinámica de los fluidos en medios abiertos o cerrados, es así que podemos

entender que dentro de estas condiciones se estudian los canales, tuberías, ríos u otros. (Citado en Triviño y Ortiz, 2004). Para el desarrollo de esta investigación se ha limitado el estudio de la hidráulica a un medio en específico como son los ríos.

Según la Autoridad Nacional del Agua: “Los resultados de la simulación hidráulica deben demostrar los parámetros hidráulicos del río entre ellos tirantes máximos, velocidades máximas, mapa de áreas, pendientes y niveles” (2016, p. 6).

Delgado (2016) nos dice que existen diversos tipos de modelos para hacer una representación hidráulica y dentro de los más resaltantes tenemos dos grupos:

1. Modelos físicos: aquellos que realizan la representación física mediante un modelo a escala que supone un comportamiento real, pero en un tamaño comúnmente reducido.
2. Modelos matemáticos: aquellos que emplean expresiones matemáticas como ecuaciones o fórmulas mediante las cuales se puede tener un mejor entendimiento de un suceso futuro, encontramos 3 diferentes subcategorías en este tipo de modelo, estos son:
 - a. Modelo determinístico: no se tienen en cuenta los aspectos probabilísticos de ocurrencia del fenómeno, los procesos físicos se dan mediante relaciones determinísticas.
 - b. Modelo estocástico: los casos se estudian empleando variables aleatorias y probabilísticas.
 - c. Modelos numéricos: emplean ecuaciones diferenciales, métodos numéricos como aquellos basados en diferencias finitas, que posibilitan el desarrollo de procesos que no se podrían resolver con cálculo simple; o elementos finitos, método computacional que permite crear una malla de uniones triangulares o

cuadrangulares, donde en cada nodo se busca hallar valores de velocidad o nivel de agua, este proceso se da gracias al álgebra lineal, ecuaciones diferenciales e integrales.

Dentro de los modelos numéricos encontramos a la mayoría de softwares de modelación hidráulica, por ejemplo, HEC-RAS.

Iber, es un programa de “modelización numérica del flujo de agua y sedimentos en ríos y estuarios, que utiliza esquemas numéricos avanzados especialmente estables y robustos en cualquier situación, pero especialmente adecuadamente paraca flujos discontinuos y en concreto paraca cauces torrenciales y regímenes irregulares” (Bladé et ál., 2012, p. 1). Además, este es un software libre que es distribuido en inglés y español por su página oficial.

HEC-RAS, cuyo significado es Hydrological Engineering Center – River Analysis Sistema. “Este software permite al usuario realizar un flujo constante unidimensional, cálculos de flujo inestable unidimensional y bidimensional, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil y modelado de la temperatura del agua / calidad del agua.” (Hydrologic Engineering Center, s. f.). Es un programa ideal para trabajos referentes a inundaciones ya que permite calcular la velocidad de flujo, nivel de crecida de aguas y otros parámetros relacionados. (Delgado, 2016, p. 8).

Para realizar el modelamiento de Hec-Ras es necesario contar con datos topográficos del terreno (para el modelamiento bidimensional un MDT), información

hidrológica, mapa de uso de suelos y rugosidad, finalmente las condiciones de contorno para el modelo. (Delgado, 2016, p. 15).

Respecto al software **SOBEK**, según el instituto independiente de investigación aplicada en el campo del agua y el subsuelo Deltares (2021) tenemos que:

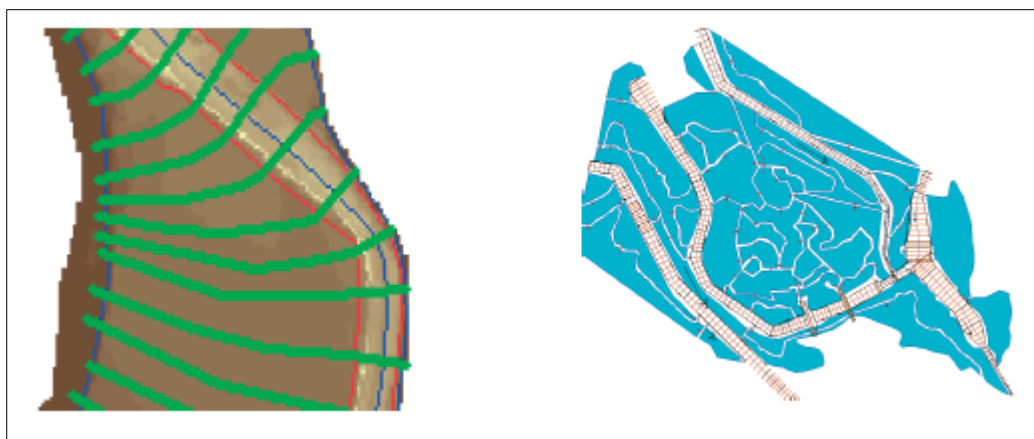
Es una potente suite de modelos para la previsión de inundaciones, optimización de sistemas de drenaje, control de sistemas de riego, diseño de desbordes de alcantarillado, morfología de ríos, intrusión de sal y calidad de aguas superficiales. Los módulos dentro de la suite de modelado SOBEK simulan los flujos complejos y los procesos relacionados con el agua en casi cualquier sistema. Los módulos representan fenómenos y procesos físicos de forma precisa en sistemas de red unidimensionales (1D) y en cuadrículas horizontales bidimensionales (2D). Es la herramienta ideal para guiar al diseñador en el uso óptimo de los recursos.

Bladé et al. (2014) nos menciona también que dentro de los modelamientos numéricos podemos estudiar una situación con aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) y tridimensional (3D). Los modelamientos unidimensionales han sido los más usados desde que empezaron a darse los modelamientos numéricos en ríos, se tienen 3 hipótesis para este caso, la primera es que el flujo del río se da en el sentido del eje del río y perpendicularmente a las secciones transversales, la segunda que la cota de agua es constante en cada sección y la tercera que la velocidad de agua también es constante para cada sección. Los modelos Cuasi-2D incorporan la llanura

de inundación y son recomendables para conocer el nivel de la lámina de agua y el cálculo de la laminación generada por las llanuras de inundación. Los modelos bidimensionales (2D) incorporan al análisis una malla regular, irregular, estructurada o no estructurada que representa el relieve de la zona y permite un análisis más completo. Finalmente, los modelos tridimensionales no son tan comunes en el estudio de inundaciones fluviales por la gran demanda de requisitos computacionales y los millones de elementos necesarios para conformar la malla de cálculo, por lo que generalmente este tipo de modelos son aplicados en otras realidades.

Figura 1

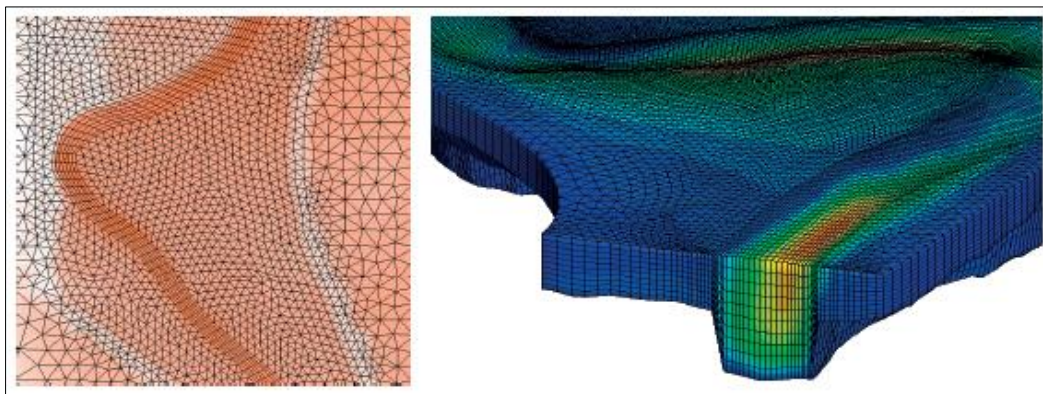
Aproximación 1D / Aproximación 2D



Fuente: Bladé et al. (2014)

Figura 2

Malla de modelamiento 2D / Malla de modelamiento 3D



Fuente: Bladé et al. (2014)

Dentro de los métodos de cálculo numéricos computacionales podemos encontrar 3 que son: el Método de Elementos Finitos (MEF), “esta técnica general para hallar soluciones numéricas de sistemas de ecuaciones diferenciales e integrales, es esencialmente útil y versátil para acomodar geometrías complejas, permitiendo acomodar el tamaño y la forma de los elementos a las necesidades de modelación”. (Delgado, 2016, p. 4).

Método de Diferencias Finitas (MDF) que “son capaces de simular algunos procesos que son imposibles de resolver mediante el cálculo simple. Se trata del método numérico clásico que resuelve ecuaciones diferenciales” (Delgado, 2016, p. 4).

Método de Volúmenes Finitos (MVF), “tiene una mayor estabilidad y robustez que las tradicionales técnicas de diferencias finitas. Además, cabe destacar, que con el uso de volúmenes finitos se consigue que el mojado y secado de las zonas del río, tenga una gran estabilidad”. (Delgado, 2016, p. 9).

Los softwares de modelado no tienen problemas con los flujos permanentes, es decir, aquellos que mantienen constancia en sus variables hidráulicas, sin embargo, cuando se trata de flujos no permanentes la situación es un poco más complicada, ya que las magnitudes cambian con el transcurso del tiempo y su cálculo es más complejo; por lo tanto, este tipo de flujos es de importante estudio para el caso de variaciones en el flujo de un río y transporte de sedimentos. Vásquez (2003).

Al igual que los flujos permanentes, el flujo subcrítico también es de fácil aplicación en un software, pero el flujo supercrítico es de difícil procesamiento pues existen variaciones, saltos hidráulicos y ondas de choque. En un río muchas veces existen ambos tipos de flujo alternadamente y aquí podemos encontrar errores de precisión en el cálculo. El número de Froude determina si un flujo es subcrítico o supercrítico, si este valor es menor a 1 estaremos en el primer caso y si es mayor a 1 en el segundo. Vásquez (2003).

Debido a la íntima relación entre los modelos hidrológicos e hidráulicos es necesario también hablar de estos para poder contextualizar mejor la investigación.

Referente al modelamiento hidrológico sabemos que: “El elemento básico para el análisis hidrológico es la cuenca, lo que extrapolándolo a términos de modelización hidrológica se reduce a un modelo digital de elevaciones (MDE)” (García y Conesa, 2011, p. 111), con su procesamiento podemos obtener los parámetros hidrológicos necesarios para el modelado. Existe una variedad de funciones de distribución de probabilidad, por lo tanto es necesario seleccionarlas según las demandas del estudio hidrológico. Además, entre las pruebas de bondad de ajuste tenemos la de Kolmogorov – Smirnov y la Chi Cuadrada. (Sierra, 2018, p. 5).

Según la Autoridad Nacional del Agua, en la publicación del Reglamento para la Delimitación y Mantenimiento de Fajas Marginales en Cursos Fluviales y Cuerpos de Agua Naturales y Artificiales se establece que para el cálculo de caudales máximos se debe considerar un tiempo de retorno de 50 años si el cauce del río

colinda con terrenos agrícolas y 100 años si colinda con alguna población o ciudad.

La información estadística empleada no debe ser mayor a 20 años. (2016, p. 2).

Después de todo lo mencionado anteriormente queda claro que el tema es importante y de cuidado pues cuando se trata de prevención de daños y vidas humanas los procedimientos empleados deben ser sumamente cuidadosos y cumplir con las diferentes normativas según sea el país. La presente investigación pretende encontrar la metodología más óptima para realizar un modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales en ríos, esto es de interés aplicativo para un ingeniero civil ya que los estudios hidráulicos son importantes en proyectos de puentes u obras de arte, de esta forma se dará un aporte que permitirá diferenciar entre los diferentes tipos de modelamientos y cuál es el más conveniente de acuerdo a las diferentes situaciones que se puedan presentar, la cantidad de datos y los resultados necesarios según convenga, luego de caracterizar todo lo referente al tema de modelización hidráulica se presentará un manual en el cual se mostrarán todos los aspectos encontrados que son imprescindibles para llevar a cabo un modelamiento hidráulico con valores acertados.

1.2. Formulación del problema

¿Qué características determinan que los modelamientos hidráulicos numéricos de inundaciones fluviales sean óptimos y cuál es la metodología más común en el modelamiento numérico?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar las principales características para un óptimo modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar información de modelamientos hidráulicos de inundaciones fluviales.
- Elaborar fichas de recopilación de información.
- Determinar los parámetros más comunes que son empleados en el modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales mediante un análisis estadístico y descriptivo.
- Determinar en cada estudio seleccionado las características que definieron la calidad de sus resultados.
- Elaborar una guía referente a las características óptimas encontradas para realizar un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales.

1.4. Hipótesis

Las características para realizar un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales óptimo son: realizar un nuevo levantamiento topográfico y uso de Dron con modelo digital de terreno, el uso del método racional para el cálculo de caudales máximos y el empleo del programa Iber. El procedimiento más común para el modelamiento hidráulico es emplear imágenes satelitales, usar un software para el modelo hidrológico y finalmente utilizar un modelamiento 2D del río.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Según Oblitas (2018), autor de la guía de investigación científica de la facultad de ingeniería nuestra investigación según su propósito es aplicada pues está bien delimitada y tiene como fin resolver una interrogante; según la profundidad es descriptiva pues el objetivo es describir una variable dependiente en una población definida; según la naturaleza de datos es cuantitativa – cualitativa, ya que algunos datos son cuantificables y otros no; por la manipulación de variables es no experimental debido a que se trabajará con hechos de experiencia directa no manipulados y tiene como base la observación.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

De acuerdo con las características de nuestro trabajo no existe población ni muestra, en su lugar se tiene un grupo de estudio que está conformado por 20 estudios seleccionados por los criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión:

- Tiempo: Publicación entre los años 2010 y 2020.
- Palabras clave: Relación directa con cada una de nuestras palabras clave
- Idioma: Publicaciones en español e inglés.
- Tipo de Documento: Artículos y tesis.

Criterios de exclusión:

- Investigaciones incompletas.
- Estudios repetidos.
- Fuera del rango de años seleccionados.
- Sin relación directa con palabras clave.

Tabla 1

Grupo de estudio seleccionado.

Nº	Autor	Título del estudio
1	Víctor H. Burgos Jorge A. Maza	Modelación numérica del riesgo por inundaciones en El Rodeo, Catamarca
2	Jorge Luis Sanchez Lozano Jose Javier Oliveros-Acosta César Antonio Cardona-Almeida Cesar Garay	Modelación hidráulica del río Magdalena en SOBEK
3	Trujillo Ortiz, Hamilton Velásquez Reyna, Jesus Alverto	Estudio de hidráulica fluvial y simulación del comportamiento, en avenidas máximas, del río Jequetepeque tramo Infiernillo-Pellejito de 19 km de longitud. Provincia de Pacasmayo, departamento de La Libertad - 2015
4	Alfredo Ramos Moreno José Antonio Pacheco Fontalvo	Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frio, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena
5	Ellis, E. A. Romero, J. A Hernández, I.U Gallo, C. A Alanís, J. L.	Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz
6	Jildibrán Ike Núñez Silva	Identificación de zonas urbanas propensas a riesgos por inundación ante máximas avenidas del río Uctubamba en el centro poblado Naranjitos, Amazonas
7	González-Aguirre, J.C. Vázquez-Cendón, M.E Alavez-Ramírez, J.	Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa México usando el código IBER
8	Jose Leonel Ramos Lopinta	Identificación de zonas con riesgo a inundación por máximas avenidas probables del río Majes en el tramo Dique - Punta Colorada, Arequipa - Perú
9	Jhonny I. Pérez Jairo R. Escobar Jose M. Fragozo	Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia
10	Carlos Salazar-Briones Michelle Hallack-Alegría Alejandro Mungaray-Moctezuma	Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias

N°	Autor	Título del estudio
11	Carlos Alberto Mayta Rojas Efrain Roger Mamani Maquera	Modelación hidráulica de la defensa de Calana con el fin de determinar la vulnerabilidad ante máximas avenidas
12	Luiza Paula da Silva Tavares Jorge Barbosa da Costa Francine de Almeida Kalas Jader Lugon Junior	Modelado hidrológico de la cuenca del río Macaé utilizando el MOHID Land
13	Yuri Alexander Tito Quispe	Modelamiento hidráulico del río Cañete sector puente Socsialtura puente colgante (9 km), con fines de diseño de defensas ribereñas
14	Hans Wilbert Sierra Lopinta	Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente.
15	Hipolito Mamani Pacompia	Modelamiento de máximas avenidas que generan riesgo de inundación en la ciudad de Ayaviri – Puno
16	Ccancapa Puma, Joel	Modelamiento hidrológico e hidráulico aplicado a la delimitación de la faja marginal Yumina - Socabaya (km 12 +500) y protección contra inundaciones en máximas avenidas en el distrito de Socabaya, Provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa
17	Alejandro Delgado Parra	Modelización 1D, 1D/2D y 2D de la inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación HEC-RAS 5.0
18	Ana Paola Coma Laimito	Simulación hidrológica e hidráulica del río Tambo Sector Santa Rosa, distrito de Cocachacra, provincia de Islay, departamento de Arequipa.
19	Kevin Alexander Cardich Motta	Modelación de máximas avenidas en la cuenca del río Lurín utilizando modelos hidrológico e hidráulico.
20	Marco Rafael Zafra Rabanal	“Modelamiento hidráulico del río Cascasén, tramo ciudad de San Marcos, con fines de prevención de inundaciones”

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

La técnica empleada para el desarrollo de la investigación es la revisión documental, ya que con ella se obtienen las investigaciones para conformar el grupo de estudio y poder realizar el análisis de variables, relaciones entre ellas, características, observación de metodologías y toda evaluación que contribuya a la posterior descripción.

Los instrumentos de recolección de datos son fichas, la **primera ficha** denominada “**Ficha de Datos Generales**” (ver anexo 01) tiene como función ayudar a esquematizar los datos generales de cada estudio, su nombre, autor, número de estudio, tipo de estudio (tesis o artículo), objetivos, metodología empleada, y finalmente las conclusiones; de esta forma se tendrá la síntesis de lo más importante en cada investigación. La **segunda ficha** denominada “**Ficha de Datos Específicos**” (ver anexo 02) ayudará a tener un conocimiento más centrado de la metodología empleada en los trabajos analizados, aquí podremos detallar características como los instrumentos empleados para el levantamiento topográfico (estación total – dron – GPS diferencial – otros), el modelo digital usado (modelo digital de terreno “MDT – modelo digital de elevación “MDE” – modelo digital de superficie “MDS”), consideración de batimetría (sí – no); dentro del modelamiento hidrológico el cálculo parámetros geomorfológicos (fórmulas - uso de ArcGis – otros), cálculo de caudales (método Racional - empleo de software – otros); dentro del modelamiento hidráulico el software usado (HEC-RAS – Iber – Sobek – otros), dimensión del modelo (1D – 2D – Cuasi 2D – 3D), esquema numérico (diferencias finitas - elementos finitos -

volúmenes finitos), ecuaciones principales (Saint Venant – Onda Difusa – Reynolds – otro), malla (estructurada – no estructurada – regular – irregular), coeficiente de Manning (tabla– Cowan – por defecto - otros), si se ha calibrado el modelo o no. Luego de la lectura minuciosa de cada estudio se extraerán las principales características positivas y negativas encontradas para que finalmente después de un análisis de todo el documento se recuperen la o las características más óptimas que influyen para realizar un óptimo modelamiento hidráulico. De esta forma se podrán analizar posteriormente las relaciones, similitudes y diferencias entre todos los trabajos.

Cada ficha cuenta con encabezado y pie de página para mostrar los datos de las personas encargadas de llenarlos, la fecha en que fueron completados y la validación con nombre, fecha y firma por parte de la asesora.

Técnicas e instrumentos de análisis de datos:

La técnica a emplear es la estadística descriptiva pues esta permite la recolección, análisis y caracterización de datos mediante tablas, cuadros estadísticos, resúmenes, entre otros. Debido a la naturaleza de esta investigación esta técnica es la más acertada para concretar los objetivos planteados.

El instrumento de análisis es el software de cálculo Microsoft Excel, mediante el cual se procesarán en hojas de cálculo los parámetros considerados en las fichas de recolección de datos, se realizarán los cálculos estadísticos y sus gráficos correspondientes para facilitar el análisis y las conclusiones.

2.4. Procedimiento

Para la **recolección de datos**, primero se seleccionaron las investigaciones que fueron incluidas en el grupo de estudio, para ello se siguen los criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente, estos trabajos son encontrados en diferentes plataformas de bases de datos en línea. Luego, con la ayuda de la “Ficha de Datos Generales” se extrajo el tipo de estudio analizado, el año de publicación, los autores, el título del trabajo, el resumen, los objetivos, la metodología empleada para el modelamiento hidráulico y las conclusiones; con la “Ficha de Datos Específicos” se estudiaron las siguientes características:

1. La topografía

Herramienta: estación total, dron topográfico u otro instrumento, la presentación se hace a través de un gráfico estadístico.

El modelo digital: empleo de modelo digital del terreno (MDT), modelo digital de elevación (MDE) o modelo digital de superficie (MDS), la presentación se hace a través de un gráfico estadístico.

Consideración de la batimetría: sí – no, la presentación se hace a través de un gráfico estadístico.

2. Modelamiento hidrológico

Cálculo de parámetros hidrológicos: Mediante fórmulas, con empleo de ArcGis, por defecto según el software u otros métodos; presentación en gráfico estadístico.

Cálculo de caudales: método Racional, uso de software u otros; presentación en gráfico estadístico.

3. Modelamiento hidráulico

Software: HEC-RAS, Iber, SOBEK, otros; presentación a través de un gráfico estadístico.

Dimensión: 1D, 2D, Cuasi-2D y 3D; también presentado en gráfico estadístico.

Esquema numérico: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos, presentado en un gráfico estadístico.

Ecuaciones: Saint Venant, Onda Difusa, Reynolds, otro; presentado en un gráfico estadístico.

Malla: estructurada, no estructurada, regular o irregular; presentado en un gráfico estadístico.

Rugosidad: Manning, Cowan, otro; presentado en un gráfico estadístico.

Calibración: sí, no; presentado en un gráfico estadístico.

4. Características del modelamiento

Análisis de las características óptimas para el modelamiento hidráulico.

Para el **análisis de datos**, primero se recopila la información de los 20 estudios en hojas de cálculo para luego procesar los datos estadísticamente. Con la ayuda de la primera ficha se cuantificaron el número de estudio, tipo de estudio (tesis o artículo) y el año de publicación, estos fueron procesados y presentados en gráficos estadísticos. Con la ayuda de la segunda ficha de recolección de datos se determinan los porcentajes para cada característica descrita y se analizan las principales que influyeron en los resultados, esto depende de cada estudio, ya que en cada uno los casos no son exactamente iguales.

Luego del procesamiento y análisis de datos se realiza la **discusión** mediante la comparación de resultados y metodología con los antecedentes, se describen las limitaciones e implicancia del trabajo; para la **conclusión** se verifica el cumplimiento de la hipótesis y los objetivos para mostrar lo que se ha obtenido con la investigación.

Como **resultado** de todo el análisis y evaluación se realiza una guía, en la que se describe todo el proceso para realizar un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales y además se recopilan todas las características encontradas que influyen en el óptimo desarrollo del modelamiento.

Los **aspectos éticos** considerados para el desarrollo de este trabajo son la veracidad para socializar los resultados encontrados, la integridad intelectual para dar reconocimiento a los autores que desarrollaron las teorías, métodos o conceptos aplicados, la objetividad en cada procedimiento, la responsabilidad social como servicio a la sociedad, el respeto a los derechos fundamentales la persona, el respeto al medio ambiente pues no se perjudicará ni contaminará ningún espacio. Además, la realización de este trabajo no contempla la experimentación con personas o animales para lograr su fin.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En este capítulo veremos los resultados obtenidos luego de completar y analizar los datos recopilados en la Ficha de Datos Generales y Ficha de Datos Específicos. Estos resultados servirán para responder a la pregunta de la investigación y poder brindar un aporte al área de ingeniería civil relacionada con modelamientos hidráulicos de inundaciones fluviales.

Como primer punto, de la “Ficha de Datos Generales” tenemos lo siguiente:

Tabla 2

Tipo de estudio seleccionado

Tipo de Estudio	Cantidad	Porcentaje (%)
Tesis	12	60%
Artículo	8	40%
Total	20	100%

Figura 3

Gráfico de tipo de estudios seleccionados

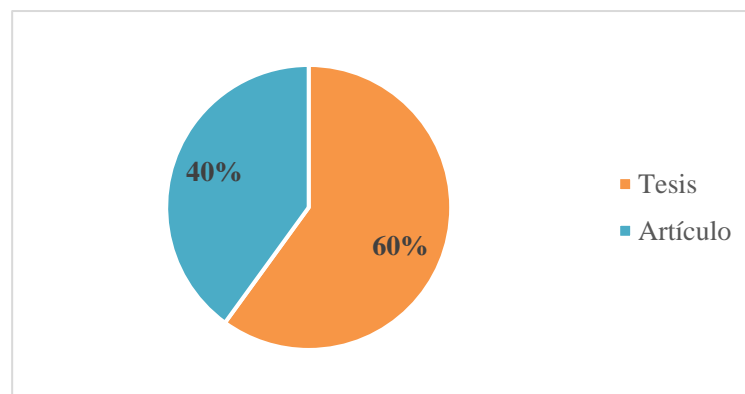


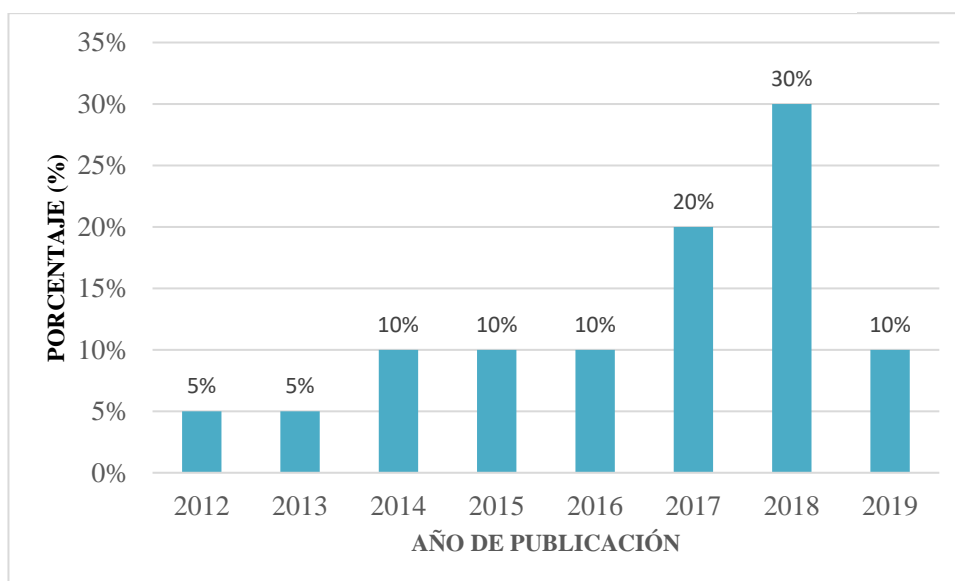
Tabla 3

Año de publicación de estudios seleccionados

Año de publicación	Cantidad	Porcentaje (%)
2012	1	5%
2013	1	5%
2014	2	10%
2015	2	15%
2016	2	10%
2017	4	15%
2018	6	30%
2019	2	10%
Total	20	100%

Figura 4

Gráfico del año de publicación de los estudios seleccionados



Como segundo punto, presentamos los resultados obtenidos de la “Ficha de Datos Específicos”, gracias a esta ficha podemos analizar los métodos y procedimientos más comunes para el modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales, también podemos describir las principales características reconocidas en cada estudio para un futuro modelamiento óptimo.

Referente a la topografía tenemos lo siguiente:

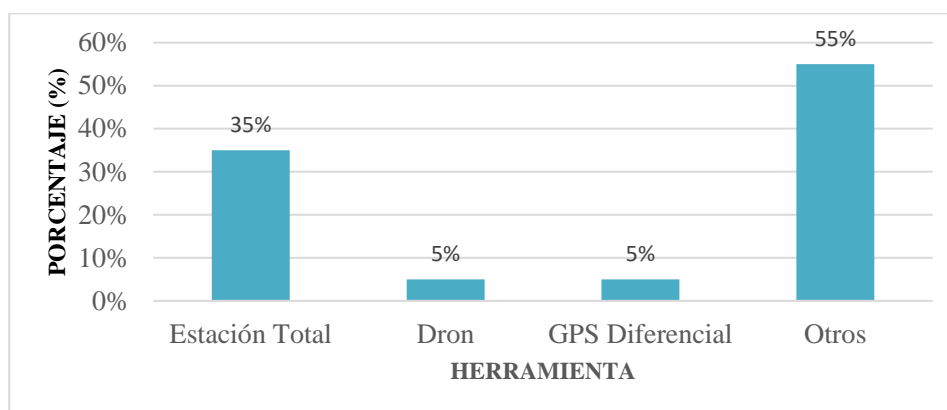
Tabla 4

Herramienta más usada en levantamiento topográfico

Herramienta	Cantidad	Porcentaje (%)
Estación Total	7	35%
Dron	1	5%
GPS Diferencial	1	5%
Otros	11	55%
Total	20	100%

Figura 5

Gráfico de herramienta más usada en levantamiento topográfico



Dentro del término “Otros” se encuentran los estudios que no emplearon herramientas propias, sino que utilizaron datos topográficos de estudios anteriores o emplearon solo información cartográfica, mas no realizaron su propio levantamiento de la zona de estudio.

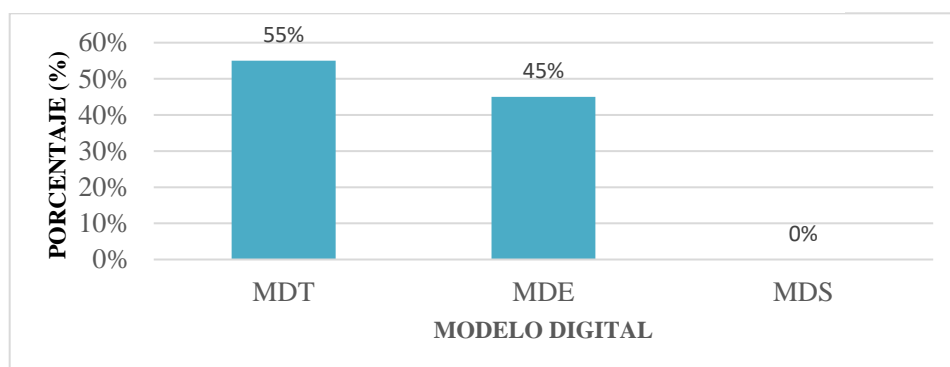
Tabla 5

Modelo Digital más usado

Modelo Digital	Cantidad	Porcentaje (%)
MDT	11	55%
MDE	09	45%
MDS	0	0%
Total	20	100%

Figura 6

Gráfico de Modelo Digital más usado



Notamos que ningún estudio empleó un Modelo Digital de Superficie, con porcentajes equilibrados tenemos un 55% que empleó Modelo Digital del Terreno y un 45% un Modelo Digital de Elevaciones.

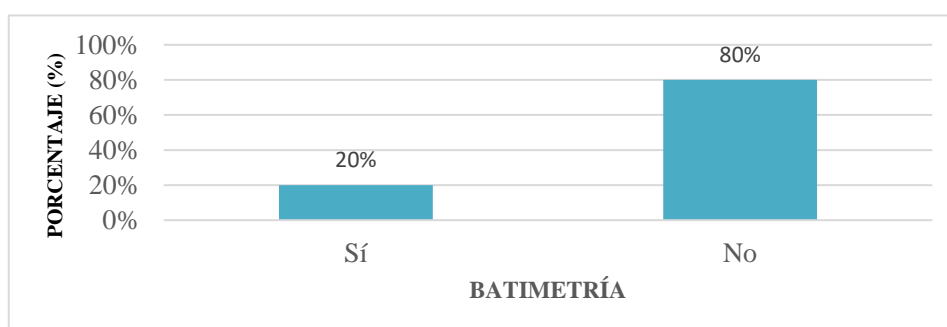
Tabla 6

Consideración de Batimetría

Batimetría	Cantidad	Porcentaje (%)
Sí	4	20%
No	16	80%
Total	20	100%

Figura 7

Gráfico de consideración de Batimetría



Se encontró que el 80% de los estudios no consideró la batimetría en la elaboración de su modelamiento, solo los datos topográficos de la superficie e información cartográfica.

Referente al modelamiento hidrológico tenemos lo siguiente:

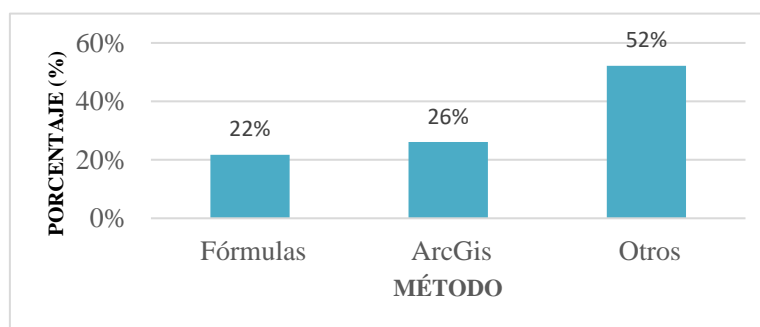
Tabla 7

Cálculo de parámetros geomorfológicos

Método	Cantidad	Porcentaje (%)
Fórmulas	5	22%
ArcGis	6	26%
Otros	12	52%
Total	23	100%

Figura 8

Gráfico del método de cálculo de parámetros geomorfológicos



El término “Otros” se refiere a estudios que emplearon datos ya calculados de los parámetros geomorfológicos brindados por asociaciones, de trabajos anteriores o algunos no consideraron este paso en su desarrollo, solo se basaron en el modelamiento hidráulico sin tomar en cuenta el hidrológico, el 26% utilizó el software ArcGis y el 22% calculó los parámetros en hojas de Excel y con ayuda de planos en AutoCAD.

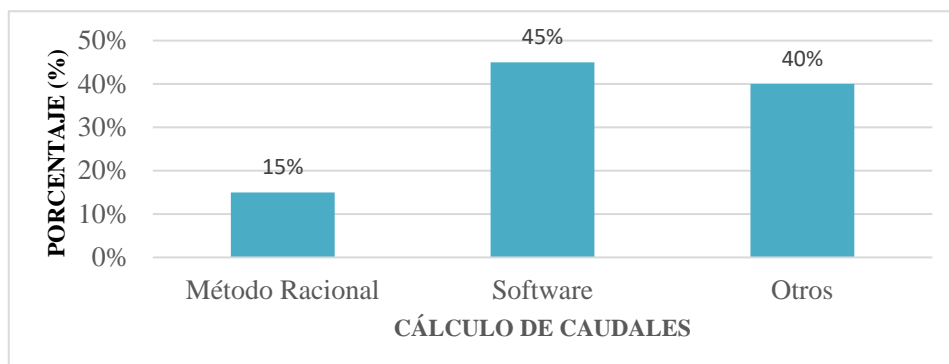
Tabla 8

Cálculo de caudales más empleado

Cálculo de caudales	Cantidad	Porcentaje (%)
Método Racional	3	15%
Software	9	45%
Otros	8	40%
Total	20	100%

Figura 9

Gráfico de cálculo de caudales más empleado



Se encontró que el 45% de estudios realiza el cálculo de caudales mediante el empleo de un software (por ejemplo, HEC-HMS), el 40% referente al término “Otros” utiliza métodos como el de hidrogramas unitarios, sintéticos o complejos y solamente el 15% emplea el método racional.

Referente al modelamiento hidráulico tenemos lo siguiente:

Tabla 9

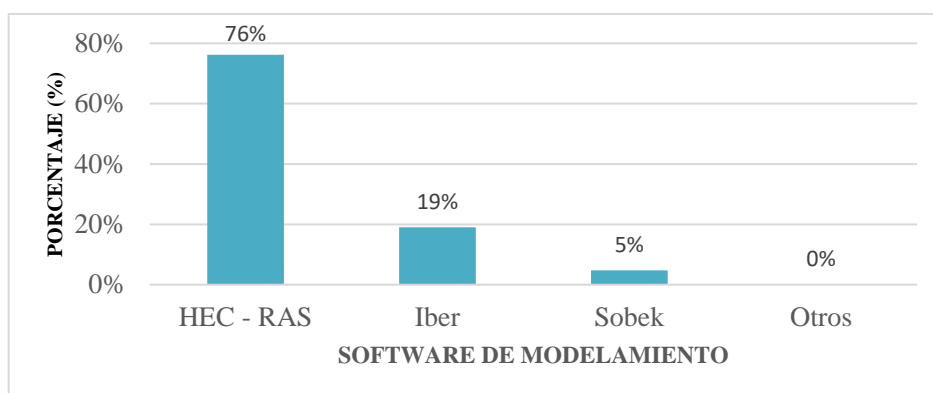
Software de modelamiento más empleado

Software de modelamiento	Cantidad	Porcentaje (%)
HEC - RAS	16	76%
Iber	4	19%
Sobek	1	5%
Otros	0	0%
Total	21	100%

Nota. Un estudio realizó el modelamiento en dos softwares.

Figura 10

Gráfico de software de modelamiento más empleado



Con una notable diferencia el 76% de estudios emplea el software HEC-RAS, en segundo lugar, tenemos el empleo de Iber, con un 19%; el software Sobek solo fue empleado una vez y representa el 5%. No se encontró otro software empleado.

Tabla 10

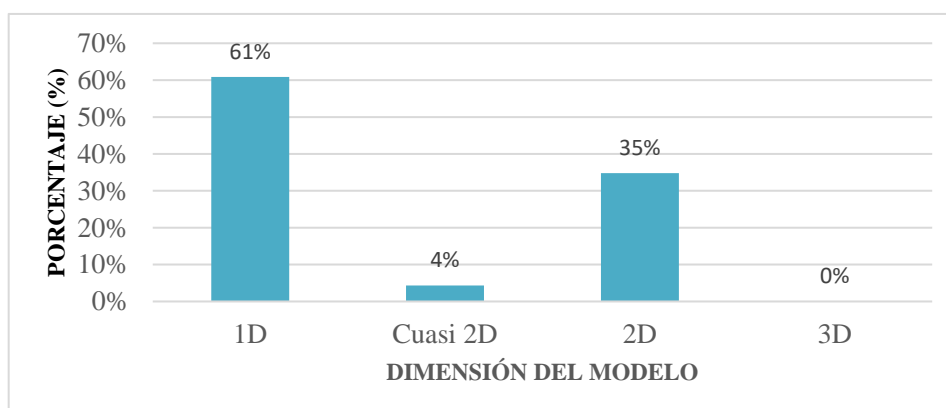
Dimensión de modelamiento más común

Dimensión de modelo	Cantidad	Porcentaje (%)
1D	14	61%
Cuasi 2D	1	4%
2D	8	35%
3D	0	0%
Total	23	100%

Nota. Algunos estudios realizaron el modelamiento en más de una dimensión.

Figura 11

Gráfico de dimensión de modelamiento más común



El modelamiento unidimensional es el más empleado con un 61%, el bidimensional representa el 35%, el Cuasi 2D fue empleado una vez y representa el 4%. Finalmente, no se encontraron estudios que realicen un modelamiento tridimensional.

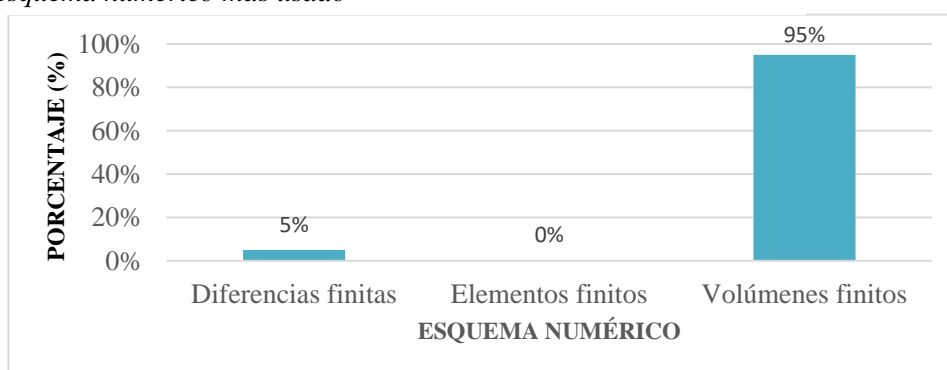
Tabla 11

Esquema numérico más usado

Esquema numérico	Cantidad	Porcentaje (%)
Diferencias finitas	1	5%
Elementos finitos	0	0%
Volúmenes finitos	19	95%
Total	20	100%

Figura 12

Gráfico del esquema numérico más usado



El esquema numérico de volúmenes finitos representa el 95%, el de diferencias finitas solo fue empleado una vez y representa el 5%, por otra parte, ningún estudio empleó el esquema de elementos finitos.

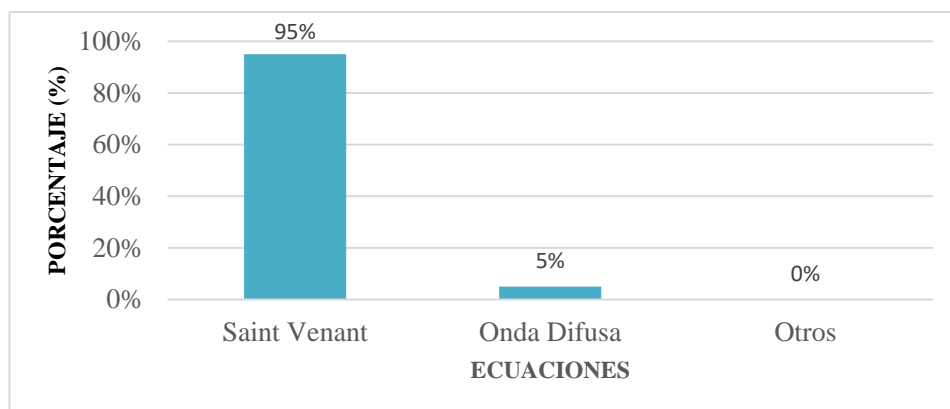
Tabla 12

Ecuaciones de cálculo más empleadas

Ecuaciones	Cantidad	Porcentaje (%)
Saint Venant	19	95%
Onda Difusa	1	5%
Otros	0	0%
Total	20	100%

Figura 13

Ecuaciones de cálculo más empleadas



Las ecuaciones de Saint Venant son más empleadas con un porcentaje de 95%, las de onda difusa solo se usaron una vez y representa el 5%, no se encontró el empleo de otro tipo de ecuaciones.

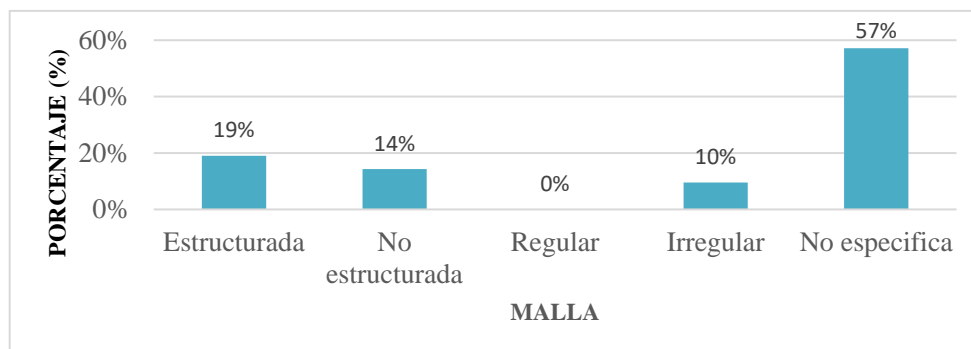
Tabla 13

Malla más empleada

Malla	Cantidad	Porcentaje (%)
Estructurada	4	19%
No estructurada	3	14%
Regular	0	10%
Irregular	2	57%
No especifica	12	
Total	21	100%

Figura 14

Gráfico de malla más empleada



El 57% de estudios no detallan el tipo de malla usada, 19% usó una malla estructurada, 14% no estructurada, 10% malla irregular y finalmente, no hay registro alguno que se haya usado malla regular.

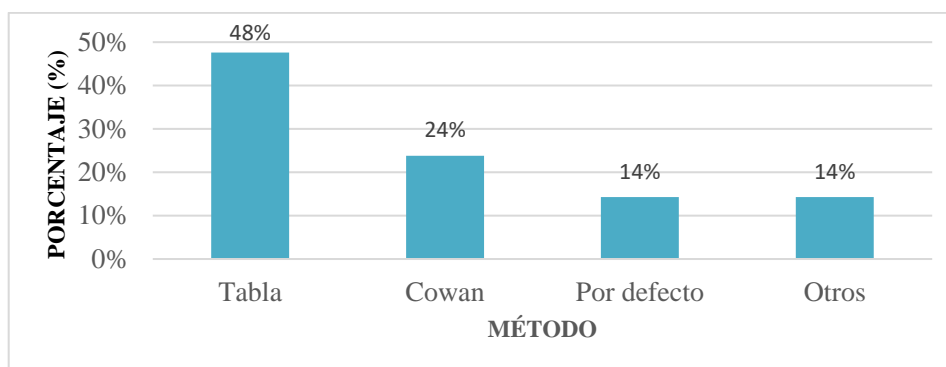
Tabla 14

Cálculo del coeficiente de Manning

Coefficiente de Manning	Cantidad	Porcentaje (%)
Tabla	10	48%
Cowan	5	24%
Por defecto	3	14%
Otros	3	14%
Total	21	100%

Figura 15

Gráfica de cálculo de coeficiente de Manning



El 48% de estudios empleó tablas para la estimación del coeficiente de Manning, 24% emplearon la fórmula de Cowan, 14% emplearon otros métodos y también con el mismo porcentaje, se dejó los coeficientes que por defecto el programa estimó.

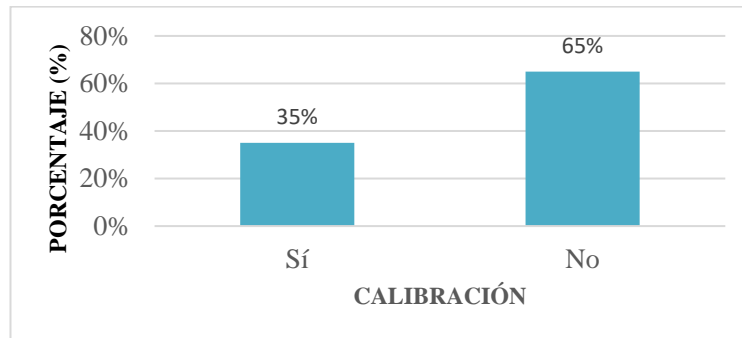
Tabla 15

Calibración de modelo

Calibración	Cantidad	Porcentaje (%)
Sí	7	35%
No	13	65%
Total	20	100%

Figura 16

Gráfico de calibración de modelo



El 65% de los estudios no consideró la calibración de su modelo, solamente el 35% tuvo esta consideración.

A continuación, presentamos las características más resaltantes que contribuyen a un óptimo modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales

Tabla 16

Características referentes a la topografía

Características óptimas

Hacer uso del Modelo Digital de Elevación (DEM), ya que toma mayor uso de áreas de prevención a desastres naturales y por las mejoras que han tenido en los últimos años

No caer en la sobresaturación de detalle, se debe establecer claros los objetivos de evaluación de riesgo de inundación para determinar la escala de trabajo (global, nacional o regional o micro, y recursos óptimos para la modelación. Evitar una generalización excesiva que pueda obviar elementos morfológicos del terreno propios de la llanura de inundación.

Se deberá realizar para las zonas críticas un mayor detalle de la topografía del cauce y de las áreas colindantes.

Determinar la rugosidad para cada zona y no asumir una sola para todo el tramo modelado, este parámetro es muy importante para obtener resultados más acertados.

Tabla 17

Características referentes al modelamiento hidrológico

Características óptimas
En caso de no contar con suficientes datos hidrométricos e hidrológicos el empleo de herramientas SIG contribuyen como herramientas efectivas y eficientes
En una zona con pocas estaciones climatológicas y registros históricos de información hacer uso del análisis Regional de Frecuencia (ARF) con enfoque en los L-momentos ya que permite alimentar un modelo hidrológico e hidráulico
Se deberá considerar tomar la información de estaciones automáticas o productos satelitales de precipitación con registros horarios sobre todo para el diseño de tormentas y lluvias máximas de 24 horas. El uso de una estación limnimétrica nos ayudará a tomar datos de caudales horarios que servirán para la validación del modelo hidráulico e hidrológico, además es de suma importancia para lecturas de caudales máximos diarios instantáneos (para modelados con régimen no permanente)

Tabla 18

Características referentes al modelamiento hidráulico

Características óptimas
Un modelamiento hidráulico deberá ser calibrado y validado con buena información histórica
Deberá diseñar e implementar un sistema de manejo de información adaptado a las necesidades del proyecto en el cual sea fácil monitorear y rastrear ejercicios de simulación anteriores.
El modelamiento 3D es muy apropiado cuando existen obras de arte a considerar, hacer uso de él si se cuenta con los recursos adecuados.
Un modelamiento hidráulico será óptimo cuando en su recolección de datos tenga suficientes estaciones hidrometeorológicas para obtener hietogramas y caudales bases de mayor confiabilidad y que nuestros resultados puedan ser los más reales posibles.
La mejor opción para resolver un modelado de inundaciones óptimo y poder dar así una respuesta eficiente es el esquema numérico de primer orden, porque garantiza estabilidad, precisión y bajo coste computacional.
Los parámetros o puntos más importantes es configurar el tamaño de malla y el paso de tiempo de cómputo en la simulación 2D, para poder tener una adecuada relación entre espacio, velocidad y tiempo. Dicha relación debe ser menor o igual a la unidad.
Se debe aplicar el modelo bidimensional (2D), ya que es más preciso a pesar de que tome un poco más de tiempo en su procesamiento los resultados se ajustarán mejor a la realidad.
Es importante complementar los estudios de modelamientos hidráulicos de inundaciones incluyendo el análisis de sedimentación y erosión para verificar el comportamiento del cauce y el riesgo ante colapsos de edificaciones cercanas a la orilla.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

El objetivo general de este trabajo fue el de determinar las principales características para un óptimo modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales y la metodología más común usada, para este último punto se elaboraron tablas y gráficos estadísticos.

Respecto a la topografía, en la **tabla 4** notamos que 11 de los 20 estudios seleccionados no realizaron el levantamiento topográfico, sino que emplearon datos de estudios anteriores o solo información cartográfica brindada por asociaciones, esto representa un problema pues no se sabe con certeza la confiabilidad de los datos y, por lo tanto, del modelamiento final. De la **tabla 5**, además de los resultados, se encontró que no existe una definición estandarizada para cada término y lo que unos autores consideran como Modelo Digital de Terreno, Modelo Digital de Elevaciones y Modelo Digital de Superficie, otros autores no lo consideran de la misma forma, sin embargo, todos trabajan con las elevaciones del terreno sin tener en cuenta la vegetación, edificaciones u otros, excepto cuando se requiere considerar en el modelamiento obras como puentes, muros de contención, etc.. En la **tabla 6** se demuestra que la batimetría es considerada en un número mínimo de estudios a pesar de que este parámetro es muy importante pues nos permite conocer las profundidades del río, pero es muy notable que la gran mayoría de estudios lo deja de lado.

Respecto a la hidrología, en la **tabla 7**, de parámetros geomorfológicos, al igual que en la tabla 4, vemos que es usual que quién realiza una modelación tome datos de otros trabajos ya realizados en su zona de estudio, esto puede facilitar y agilizar los

procedimientos, pero se depende de la precisión que otros hayan podido tener, o no. De la **tabla 8** deducimos que la mayoría realiza el cálculo de caudales con el empleo de un software debido a que optimiza el tiempo de cálculo y si se sabe programar los resultados serán muy fiables para continuar con el modelamiento, cada vez los cálculos manuales quedan en un segundo plano, el avance tecnológico permite estas ventajas.

De la **tabla 9** vemos que es predominante el empleo de HEC – RAS para realizar los modelamientos hidráulicos numéricos, esto puede ser debido a que es un software libre con muchas décadas de uso y a que en sus nuevas actualizaciones permite el modelado 2D, sin embargo, ahora también existen softwares como Iber, un software libre muy potente que está tomando notoriedad y tiene una interfaz más dinámica. Por otro lado, los softwares de paga como Sobek no tienen tanta incidencia debido a sus altos costos y poca accesibilidad para las personas. De la **tabla 10** sabemos que es más común el modelamiento en una dimensión, sin embargo, este no representa la topografía adecuadamente, el flujo es una línea recta y su calibración no es factible. El modelamiento en dos dimensiones es el segundo más empleado, para realizarlo se necesita obligatoriamente de una superficie, no evalúa la componente en “z” de la velocidad y puede generar más demanda computacional que el modelado 1D. Solo un estudio realizó el modelamiento Cuasi 2D, que es un intermedio entre el 1D y el 2D. Ningún estudio empleó el modelamiento en tres dimensiones, este es el más complicado, ya que no se puede realizar en una simple computadora y la cantidad de datos para llevarlo a cabo es muy grande. El empleo de cada uno depende del tipo de proyecto que realicemos, su magnitud, lo que deseamos saber, los recursos disponibles y la cantidad de datos con que contamos. En la **tabla 11** vemos que el esquema numérico de volúmenes finitos representa el 95% pues los softwares HEC – RAS e Iber lo emplean para sus cálculos, esto representa una

ventaja frente a aquellos que emplean los otros dos esquemas numéricos que presentan más deficiencias y poca flexibilidad. De la **tabla 12** tenemos que las ecuaciones que permiten la resolución a los problemas planteados en un modelamiento hidráulico son las de Saint Venant, pero en el caso de HEC – RAS se puede elegir entre estas o emplear las ecuaciones de Onda Difusa, solo se encontró un estudio que usó Onda Difusa. En la **tabla 13** vemos que el 57% de estudios no detallan el tipo de malla usada, esto puede ser porque no consideraron las ventajas y desventajas de una sobre la otra y emplearon alguna al azar o porque utilizaron por defecto la malla que el programa asumió, de cualquier forma, siempre es importante la consideración respecto a la malla que emplearemos, pues de esta depende el tiempo de cálculo y la precisión de los resultados. En la **tabla 14**, respecto al coeficiente de Manning vemos que es estimado en la mayoría de casos con la ayuda de tablas que permiten conocer los valores para distintos tipos de suelo y cobertura, en segundo lugar, tenemos al cálculo con la ecuación de Cowan, los demás estudios utilizaron los valores que por defecto el programa asume cuando se realiza el modelamiento y también emplearon valores de otros estudios realizados anteriormente.

Finalmente, en la **tabla 15** vemos que el 65% de los estudios no consideró la calibración de su modelo, es decir, las mediciones no tienen un patrón de referencia comprobado con datos históricos para dar validez a los procedimientos, lo recomendado sería que todo modelamiento sea calibrado, sin embargo, a veces no se cuenta con información histórica para hacerlo. Para mostrar las características óptimas que se extrajeron del grupo de estudio se clasificó según su relación a la topografía (**tabla 16**), modelamiento hidrológico (**tabla 17**) y modelamiento hidráulico como tal (**tabla 18**), estas características son importantes para poder tomar decisiones cuando se desee realizar un

modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales y escoger las que mejor se adecuen a nuestra realidad.

Respecto a la interpretación comparativa con otros estudios, tenemos en primer lugar a Vásquez (2003), quien en su trabajo: “Modelación numérica en hidráulica”, realiza la revisión literaria del tema con el objetivo de describir los modelos empleados y sus características, sus descripciones y sugerencias para trabajos posteriores concuerdan con lo hallado en esta investigación, actualmente el empleo de softwares está ampliamente difundido y ha remplazado los cálculos manuales, nuestros resultados demuestran la preferencia de los softwares frente al cálculo manual, ya que estos representan una notable superioridad en el tiempo de cálculo y con el avance de la tecnología hoy se pueden modelar diferentes tipos de estructuras como puentes, muros de contención, alcantarillados, etc., que están considerados dentro del tramo analizado para el modelamiento hidráulico.

De la misma forma como describieron Bladé et al. (2014) en su artículo denominado: “Modelización numérica de inundaciones fluviales” notamos que actualmente el modelo unidimensional es el más usado, sin embargo, el modelo bidimensional viene tomando más notoriedad con el paso de los años, el desarrollo de nuevos métodos de cálculo y la disponibilidad de datos para el usuario. No se encontró ningún modelamiento tridimensional en los estudios analizados, pero de acuerdo a lo propuesto por los otros autores, sabemos que puede ser la mejor alternativa para tramos cortos que tengan obras de arte a considerar y se cuente con datos y recursos computacionales suficientes, el tiempo de cálculo es muy extendido a comparación con los modelamientos 1D y 2D. Es innegable

también, la importancia de los modelamientos para estudios de riesgo que posteriormente sirven como medida de prevención.

Timbe y Willems (2011) en su investigación: “Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones” hacen comparaciones entre los modelos MIKE FLOOD, MIKE 11/MIKE 11 GIS Y MIKE 21, en esta investigación no se encontraron trabajos que empleen esos softwares, sin embargo, entre HEC-RAS e Iber (que sí fueron empleados en los estudios seleccionados) tenemos que ambos emplean el esquema de volúmenes finitos, sin embargo, HEC – RAS puede realizar modelamientos 1D, 2D y Cuasi 2D, puede utilizar ecuaciones de Saint Venant y de Onda Difusa, mientras que Iber solo realiza modelamientos en 2D y emplea las ecuaciones de Saint Venant. Antes de realizar algún modelamiento es importante estudiar las características de todos los softwares que tenemos a disposición, de esta forma encontraremos el más adecuado para nuestras necesidades.

Gutiérrez (2018), en su tesis denominada: “Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional en el análisis de inundaciones en el río Virú”, como principal conclusión nos menciona que para modelar un río con caudal estable los modelamientos unidimensionales cumplen perfectamente para las solicitudes, pero para modelar inundaciones, huaycos y desbordes los modelos bidimensionales son más eficientes, en este trabajo se encontró que se debe aplicar el modelo bidimensional (2D), ya que es más preciso a pesar de que tome un poco más de tiempo en su procesamiento los resultados se ajustarán mejor a la realidad, pero es lógico que para un modelamiento con un caudal estable y un terreno de condiciones homogéneas es mucho más acertado emplear

un modelamiento unidimensional pues es más rápido y en estas condiciones muy adecuado.

Por último, Agudelo et al. (2018), en su artículo científico denominado: “Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación” hacen una comparación entre HEC-RAS con un modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales artificiales empleando el software MatLab; en esta investigación no se encontró ningún estudio que emplee modelos de inteligencias artificiales, por lo que este puede ser un punto de complementación para futuras investigaciones, el ampliar los estudios seleccionados para tener una mayor diversidad de softwares y así poder tener más comparaciones que servirán para posteriores trabajos.

El trabajo está limitado a la descripción de las principales características para un óptimo modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales mas no a la realización del modelamiento como tal, el trabajo se podría complementar al realizar el modelamiento teniendo en cuenta las características óptimas encontradas para posteriormente describir como experiencia personal los procedimientos y resultados. Otra limitación en la realización de la investigación fue que algunos estudios no detallaban cada parámetro que se consideró evaluar, en algunos casos ni siquiera figuraba dentro de los procedimientos, por lo que fue necesario añadir un casillero de “No específica” dentro de las fichas de recolección de datos. Otro impedimento para un desarrollo más rápido de este trabajo fue que no se contaba con una persona experta en el tema para poder orientar con más acierto los parámetros evaluados o las fichas de recolección de datos.

Como consecuencia de la investigación, la recopilación y análisis de información se desarrolló una guía (ver **anexo 03**), en la cual se describe el procedimiento para realizar un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales y además la recopilación de las características que lo hacen óptimo.

La guía comprende las siguientes partes:

1. Portada
2. Índice
3. Introducción
4. Procedimiento de un modelamiento hidráulico
5. Recomendaciones

4.2. Conclusiones

La hipótesis no es rechazada en su totalidad, ya que se encontró que sí es óptimo realizar un nuevo levantamiento topográfico del lugar, especialmente en zonas críticas, el MDT es más adecuado debido a su amplitud y mejoras en los últimos años. Respecto al modelamiento hidrológico, es más aceptado utilizar un software debido a sus ventajas sobre el cálculo manual. Dentro del modelamiento hidráulico, no se puede afirmar con certeza la superioridad de Iber respecto a otros programas, debido a que las condiciones de modelado son variables. Fue acertada la suposición de que el procedimiento más común es emplear imágenes satelitales, pero no es cierto que lo más común es emplear un modelo bidimensional, por el contrario, el más común es el modelo unidimensional.

La recopilación de información de modelamientos hidráulicos de inundaciones fluviales dejó como resultado 20 trabajos que fueron el objeto de estudio de esta tesis, entre ellos tenemos a 11 tesis y 9 artículos. Los estudios fueron obtenidos de las siguientes bases

de datos: Dialnet, EBSCO, Google académico, ProQuest, Redalyc y finalmente de Tecnología y Ciencias del Agua; todos fueron seleccionados mediante criterios de inclusión y exclusión.

Se elaboraron dos fichas de recopilación de información, la primera denominada “Ficha de Datos Generales” y la segunda “Ficha de Datos Específicos”, con la ayuda de estas fichas pudimos extraer la información necesaria para obtener los resultados y su posterior análisis. Para realizar un trabajo descriptivo es muy importante que las fichas de recolección de información estén bien estructuradas, pues el desarrollo del trabajo depende de esto. El número de fichas y su contenido deben ser analizados cuidadosamente y preferentemente revisadas por un experto antes de su aplicación. Las fichas que contienen la información de los estudios se encuentran en los **anexos 04 y 05**.

Los parámetros más comunes en un modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales son: emplear información topográfica brindada por entidades, páginas de internet o de trabajos anteriores realizados en la misma zona, emplear un modelo digital de terreno (MDT), no considerar la batimetría, utilizar parámetros geomorfológicos ya dados por otras investigaciones o de otra fuente, calcular los caudales máximos con el apoyo de un software, utilizar HEC – RAS para el modelamiento hidráulico, realizar un modelo unidimensional, emplear el esquema de volúmenes finitos, plantear el modelo con ecuaciones de Saint Venant, emplear la malla que por defecto usa el software, estimar el coeficiente de Manning mediante tablas y no calibrar el modelo.

Se obtuvieron 20 características que definen un óptimo modelamiento hidráulico de inundaciones fluviales, se extrajo una por cada estudio analizado, podemos ver los

resultados en las **tablas 16, 17 y 18**. Estas características son importantes pues al ser aplicadas en la realización de un modelamiento pueden brindar mejores resultados, los cuales son imprescindibles en la toma de decisiones respecto a futuras obras de mitigación de desastres.

Se elaboró una guía en la cual se describe el procedimiento para realizar un modelamiento hidráulico numérico de inundaciones fluviales y el principal aporte de este trabajo que son las características óptimas encontradas para realizar dicho modelamiento. La guía se puede visualizar en el **anexo 03**.

REFERENCIAS

- Agudelo-Otálora, L. M., Moscoso-Barrera, W. D., Paipa-Galeano, L. A., & Mesa-Sciarrotta, C. (2018b). Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación. *Tecnología y ciencias del agua*, 09(4), 209-236. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-09>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos naturales y artificiales*. <http://www.ana.gob.pe/etiquetas/reglamento-para-la-delimitacion-y-mantenimiento-de-fajas-marginales-en-cursos-fluviales-y>
- Bladé-Castellet, E., Cea, L., y Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del agua*, 18(1), 68. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por inundaciones fluviales*. www.cenepred.gob.pe.
- Delgado Parra, A. (2016, septiembre). *Modelización 1d, 1d/2d y 2d de la inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación HEC-RAS 5.0i* [tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100140?show=full>

García Lorenzo, R., & Conesa García, C. (2011). Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas S.I.G, estudio aplicado al litoral sur de la región de Murcia. *Papeles de Geografía*, 53-54, 107-123.
<https://revistas.um.es/geografia/article/view/143471/128751>

Gutiérrez Reynaga, M. J. (2018). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional en el análisis de inundaciones en el río Virú* [tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3270>

Hydrologic Engineering Center. (s. f.). HEC-RAS. Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Centro de Ingeniería Hidrológica. Recuperado 18 de julio de 2020, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>

Mamani Pacompia, H. (2014). *Modelamiento de máximas avenidas que generan riesgo de inundación en la ciudad de Ayaviri – Puno*. [tesis de fin de grado, Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5450>

Mayta Rojas, C. A., & Mamani Maquera, E. R. (2018). *Modelación hidráulica de la defensa de Calaná con el fin de determinar la vulnerabilidad ante máximas avenidas* [tesis de fin de grado, Universidad Privada de Tacna].
http://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/UPT/549/1/Mayta_Rojas-Mamani_Maquera.pdf

Núñez Silva, J. I. (2017). *Identificación de zonas urbanas propensas a riesgos por inundación ante máximas avenidas del río Uctubamba en el centro poblado*

Naranjitos, Amazonas (tesis de fin de grado, Universidad Nacional de Cajamarca).

<http://eds.b.ebscohost.com/eds/viewarticle/render?data=dGJyMPPp44rp2%2fdV0%2bnjisfk5Ie46bJNr%2buTLCk63nn5Kx94um%2bTa2prUquqK44r6e4SbCwr1Cexss%2b8ujfhvHX4Yzn5eyB4rOvT7OmtkyvqbNipOLfhuWz44uk2uBV49rxet%2fppIzf3btZzJzfhvrb4ovg1%2fFGw63AScG7sE2k3O2K69fyVeTr6oTy2%2faM&vid=15&sid=1041fa10-76be-4cfe-b3c3-a04526787a51@pdc-v-sessmgr01>

Oblitas Cruz, J. (2018). *Guía de investigación científica 2018*. Facultad de ingeniería, Universidad Privada del Norte.

Pérez Burga, A., Weber, J., & Castellanos, Y. (2010). Efectos de la base cartográfica en la simulación hidráulica de las inundaciones fluviales. Caso de estudio. *Cuadernos del CURIHAM*, (16), 1-11. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7308319>

Ramos Moreno, A., y Pacheco Fontalvo, J. A. (2017). Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Frío, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), 156-178.
<https://search.proquest.com/docview/1999171027/fulltext/E3B3D77789404BCEPQ/1?accountid=36937>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2018, 11 diciembre). Nuevo mapa del SENAMHI permite conocer zonas inundables en el Perú. Consultado el 19 de septiembre de 2020.
<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=prensa&n=885>

Sierra Lopinta, H. W. (2018). *Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del río*

Pativilca, en flujo no permanente (tesis de fin de grado, Universidad Agraria La

Molina). <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3545>

SOBEK Suite. (2021, 12 enero). Recuperado 26 de julio de 2021, de

<https://www.deltares.nl/en/software/sobek/>

Timbe, L., & Willems, P. (2011b). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la

simulación de inundaciones. *MASKANA*, 2(1), 69-76.

<https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.06>

Triviño Pérez, A., & Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de

la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-

rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, (35), 67-83.

<https://doi.org/10.14198/ingeo2004.35.08>

Vásquez Ojeda, J. A. (2003). *Modelación numérica en hidráulica*. Recuperado de

<https://www.google.com/url?client=internal-element->


[cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.oocities.org/hidropi](https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.oocities.org/hidropi)

[ura/ModelNum.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwi2rpzq9PrrAhWHslkKHYktCLwQFjA](https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.oocities.org/hidropi)


[AegQIBBAB&usg=AOvVaw2m9f3sj35fF8kZ5QfhehkE](https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.oocities.org/hidropi)

ANEXOS

Anexo 01: Modelo de Ficha de Datos Generales

UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA		
FICHA DE DATOS GENERALES		
	TÍTULO:	“CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELAMIENTOS HIDRÁULICOS NUMÉRICOS DE INUNDACIONES FLUVIALES, CAJAMARCA 2020”
	TESISTAS:	ALAYA GARCÍA, ELVIMAR RIQUERO MIRANDA, WILSON GUSTAVO
	ASESOR:	ING. ANITA ELIZABETH ALVA SARMIENTO
	FECHA DE REGISTRO:	
TÍTULO DEL ESTUDIO:	<input type="text"/>	ESTUDIO N° : <input type="text"/>
		TIPO : <input type="checkbox"/> Tesis <input type="checkbox"/> Artículo
AÑO DE PUBLICACIÓN:	<input type="checkbox"/> 2010 <input type="checkbox"/> 2011 <input type="checkbox"/> 2012 <input type="checkbox"/> 2013 <input type="checkbox"/> 2014 <input type="checkbox"/> 2015 <input type="checkbox"/> 2016 <input type="checkbox"/> 2017 <input type="checkbox"/> 2018 <input type="checkbox"/> 2019	
AUTORES:	<input type="text"/>	
RESUMEN:	<input type="text"/>	
OBJETIVO GENERAL:	<input type="text"/>	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	<input type="text"/>	
METODOLOGÍA:	<input type="text"/>	
CONCLUSIONES:	<input type="text"/>	
	AUTOR 1	AUTOR 2
	NOMBRE: Elvimar Alaya García	NOMBRE: Wilson Gustavo Riquero Miranda
	FECHA:	FECHA:
	FIRMA:	FIRMA:
		ASESOR
		NOMBRE: Ing. Anita Elizabeth Alva Sarmiento
		FECHA:
		FIRMA:

Anexo 02: Modelo de Ficha de Datos Específicos

UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA			
FICHA DE DATOS ESPECÍFICOS			
	TÍTULO:	"CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELAMIENTOS HIDRÁULICOS NUMÉRICOS DE INUNDACIONES FLUVIALES, CAJAMARCA 2020"	
	TESISTAS:		ASESOR: ING. ANITA ELIZABETH ALVA SARMIENTO
			FECHA DE REGISTRO:
TÍTULO DEL ESTUDIO :		ESTUDIO N°:	
1. TOPOGRAFÍA:			
HERRAMIENTA:	<input type="checkbox"/> Estación Total	<input type="checkbox"/> Dron	<input type="checkbox"/> GPS Diferencial <input type="checkbox"/> Otros
MODELO:	<input type="checkbox"/> MDT	<input type="checkbox"/> MDE	<input type="checkbox"/> MDS
BATIMETRÍA	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	
2. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO			
CÁLCULO DE PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS :	<input type="checkbox"/> Fórmulas	<input type="checkbox"/> ArcGis	<input type="checkbox"/> Otros
CÁLCULO DE CAUDALES :	<input type="checkbox"/> Método Racional	<input type="checkbox"/> Software	<input type="checkbox"/> Otros
3. MODELAMIENTO HIDRÁULICO			
SOFTWARE:	<input type="checkbox"/> HEC - RAS	<input type="checkbox"/> Iber	<input type="checkbox"/> Sobek <input type="checkbox"/> Otros
DIMENSIÓN:	<input type="checkbox"/> 1D	<input type="checkbox"/> Cuasi 2D	<input type="checkbox"/> 2D <input type="checkbox"/> 3D
ESQUEMA NUMÉRICO:	<input type="checkbox"/> Diferencias finitas	<input type="checkbox"/> Elementos finitos	<input type="checkbox"/> Volúmenes finitos
ECUACIONES:	<input type="checkbox"/> Saint Venant	<input type="checkbox"/> Onda Difusa	<input type="checkbox"/> Otros
MALLA:	<input type="checkbox"/> Estructurada <input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> No estructurada <input type="checkbox"/> Irregular	<input type="checkbox"/> No especifica
MANNING:	<input type="checkbox"/> Tabla	<input type="checkbox"/> Cowan	<input type="checkbox"/> Por defecto <input type="checkbox"/> Otros
CALIBRACIÓN:	<input type="checkbox"/> Sí	<input type="checkbox"/> No	
CARACTERÍSTICAS DEL MODELAMIENTO		CARACTERÍSTICA ÓPTIMA	
NEGATIVAS			
POSITIVAS:			
AUTOR 1	AUTOR 2	ASESOR	
NOMBRE:	NOMBRE:	NOMBRE: Ing. Anita Elizabeth Alva Sarmiento	
FECHA:	FECHA:	FECHA:	
FIRMA:	FIRMA:	FIRMA:	