

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



**Revisión de estudios de inundabilidad mediante el uso de softwares de
modelamiento hidráulico, años 2017-2019**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Aracely Delgado Lopez

ASESOR

Hector Augusto Gamarra Uceda

<https://orcid.org/0000-0002-3653-1394>

Chiclayo, 2022

Índice

Resumen	3
Abstract	4
Introducción	5
Marco teórico	7
Antecedentes del problema	7
A nivel internacional	7
A nivel nacional	8
Bases teóricas científicas.....	11
Estudio hidrológico	11
Estudio de cuencas hidrográficas	11
Periodo de retorno	13
Análisis estadístico de datos hidrológicos	13
Tormenta de diseño	13
Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)	13
Tiempo de concentración	14
Hietograma de diseño.....	14
Estimación de caudales	14
Hidrogramas.....	14
Coeficiente de rugosidad.....	15
Modelamiento hidrológico	15
Modelamiento hidráulico	16
Materiales y métodos	17
Resultados y discusión	19
Conclusiones	21
Recomendaciones.....	22
Referencias	23
Anexos.....	25

Resumen

El presente trabajo de investigación consiste en la descripción de resultados de algunos estudios de inundaciones o identificación de zonas inundables que han usado softwares de modelamiento hidráulico. Para ello, se tomarán como base tesis o artículos, ya sea del ámbito nacional o internacional que se han sido presentadas dentro de los años 2017-2019. Asimismo, las variables analizadas son los datos que se han tomados en cuenta para cada estudio, tanto caudales máximos como períodos de retorno; los métodos o programas de análisis hidrológico y los softwares utilizados en el modelamiento hidráulico. Además, se tomará en cuenta los resultados obtenidos en cada estudio y las medidas de prevención sugeridas.

Palabras clave: inundación, software, hidrología, hidráulica.

Abstract

The present research work consists of the description of the results of some flood studies or the identification of flood zones that have used hydraulic modeling software. For this, theses or articles, either national or international, that have been submitted within the years 2017-2019 will be taken as a basis. Likewise, the variables analyzed are the data that have been taken into account for each study, both maximum flows and return periods; hydrological analysis methods or programs and software used in hydraulic modeling. In addition, the results obtained in each study and the suggested prevention measures will be taken into account.

Keywords: flood, software, hydrology, hydraulics.

Introducción

Los fenómenos de inundación han ido ocurriendo de una manera reiterada en el Perú y distintos países del mundo. Esto ha causado daños tanto en la humanidad como en la economía y ha afectado a infraestructuras de gran importancia. Según estudios [1] en los años 2003-2011 ocurrieron más de 200 inundaciones por año en el país. Por ello, el gobierno peruano ha venido trabajando a través de las distintas organizaciones como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), Ministerio del Ambiente (MINAM), entre otros; con el fin de mejorar la vulnerabilidad ante inundaciones.

Las inundaciones que más han marcado historia son las que ocurrieron en las épocas del fenómeno de El Niño, de los años 1982 – 1983, 1997 – 1998 y 2017. Pues dejaron grandes cantidades de personas damnificadas, afectados, desaparecidos y muertos; viviendas inhabitables y destruidas; además de terrenos de cultivo e infraestructura afectados. De acuerdo con INDECI, el fenómeno del Niño Costero afectó a 23 regiones del país, 1.7 millones de personas y 283000 perdieron sus viviendas. Asimismo, las regiones más afectadas fueron Piura, La Libertad y Lambayeque [2].

A causa de las intensas precipitaciones pluviales se produce el desborde de ríos y activación de quebradas, lo cual conlleva a una inundación. Es por ello que se realizan los estudios de inundaciones para definir las zonas vulnerables y a partir de ello tomar medidas de prevención. Para lo cual se realiza un modelo hidrológico para la obtención de caudales a partir de precipitaciones y un modelo hidráulico de simulación de flujo en canales, ríos, humedales, lagos, entre otros [3].

Con lo descrito anteriormente, se plantea la pregunta ¿Cuál es el principal aporte de softwares de modelamiento hidrológico e hidráulico en los estudios de inundaciones? Ante esta pregunta de investigación se definió como objetivo general Identificar el aporte de los softwares de modelamiento hidrológico e hidráulico en los estudios de inundaciones a partir de revisión bibliográfica. Así mismo, como objetivos específicos se establecieron los siguientes: identificar los softwares más usados en la simulación hidráulica de ríos; determinar el estado del conocimiento de los programas que se han utilizado en los estudios

de inundaciones; analizar los resultados de artículos o tesis seleccionados e identificar las fuentes de datos y las metodologías utilizadas tanto para análisis hidrológico e hidráulico.

La justificación de este trabajo viene enmarcada en los siguientes puntos: en cuanto al aspecto académico esta investigación permitió aportar conocimiento sobre el uso de los softwares de simulación hidrológica e hidráulica y la importancia de los sistemas de información geográfica en estudios de inundaciones.

Marco teórico

Antecedentes del problema

A nivel internacional

El estudio: “**Modelización 1D, 1D/2D y 2D de inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación HEC-RAS 5.0**”, muestra el estado de arte de la modelización hidráulica, este trabajo está enfocado el modelado de un meandro en el software HEC-RAS a partir de la información topográfica dispuesta en un Modelo Digital del Terreno (MDT), la información hidrológica para periodos de retorno de 10 y 100 años, mapas de uso de suelo y rugosidad y condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. El trabajo se llevó a cabo en etapas como: el preproceso, donde fue necesario el uso de ArcGIS para tratar la información del terreno y hallar las secciones transversales deseadas; luego se elaboraron hidrogramas aproximados que representen los caudales máximos para los periodos de retorno considerados. Por último, el uso del software HEC-RAS permitió al autor comprobar que se trata de una herramienta informática que es capaz de realizar complejas simulaciones bidimensionales, ya que pudo identificar las zonas de alto y bajo peligro ante inundaciones causadas por el río Llobregat [4].

En el artículo [5] “**Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, IBER Y FLOW 3D en la simulación hidráulica de un meandro en Colombia**”, se realizó con el objetivo de demostrar el alcance en simulación hidráulica de los tres modelos HEC-RAS, IBER Y FLOW 3D; es decir en una, dos y tres dimensiones respectivamente. El análisis tuvo como punto de partida la socavación causada por la evolución de un meandro que afectó al municipio de la Dorada (Caldas – Colombia), el cual está ubicado al margen occidental del río Magdalena.

Primero los datos correspondientes a topografía, batimetría y rugosidad fueron recolectados en campo durante las temporadas seca y lluviosa, en febrero y mayo del año 2018. Luego se realizó la modelación hidráulica teniendo en cuenta la geometría, rugosidad, mallado, condiciones de borde, tiempo de simulación y turbulencia según lo requerido en cada uno de los programas. En cuando a HEC-RAS, la geometría fue importada como un archivo GIS2RAS, el cual fue procesado en ArcGIS mediante la extensión HEC-GeoRAS; además se asignó un coeficiente de rugosidad en cada sección (norill. Occidental=0.032, ncauce= 0.0125 y norill. Orient= 0.039). En cuanto al mallado se consideró secciones de cálculo cada 5m y los

caudales ingresados fueron de 435 y 1822 m³/s. Asimismo, en IBER, la geometría se importó como un archivo ASII partiendo del DEM, mediante una conversión de formato por medio de ArcGIS 10.2; el coeficiente de Manning fue asignado mediante un mapa de rugosidad (ASCII) con los mismos valores anteriores; además la malla de cálculo fue de tipo no estructurada con elementos triangulares y cuadrados de 5m de lado y los caudales fueron ingresados en los nodos de contorno de la malla; también se consideró un tiempo de simulación de 32000 seg y una turbulencia. De la misma forma, en FLOW – 3D, se importó la geometría al igual que en IBER y en cuanto a la asignación de rugosidad fue de forma distinta a las anteriores, ya que se tuvo de convertir n a d_{50} mediante la ecuación de Manning-Strickler; también se consideró un tiempo de simulación de 13000 seg. y una turbulencia [5].

Así que, los resultados obtenidos fueron similares en HEC-RAS y FLOW-3D, ya que se compararon los valores de velocidad promedio y lámina de agua para los dos caudales considerados. Además, se determinó que FLOW 3D presentó resultados mayores a los otros dos programas y que el modelo IBER arrojó valores con una disimilitud significativa [5].

A nivel nacional

El estudio presentado por el SENAMHI [3] “**Evaluación de zonas de inundación utilizando un modelo hidrológico – hidráulico en Tumbes**”, se desarrolló con el fin de evaluar los softwares RRI y HEC-RAS e delimitar las áreas de inundación en un tramo del río Tumbes. Asimismo, el evento que despertó la idea de esta investigación fue la inundación del mes de abril del año 2017 durante el fenómeno del “Niño costero”. Para ello, se empleó información hidrológica de la cuenca del río Tumbes; se obtuvieron datos de precipitaciones de 5 estaciones de Ecuador y 5 del Perú.

Cabe señalar que el modelo RRI fueron necesarios los datos topográficos, datos de precipitación, un archivo de control del modelo para luego correrlo y validar los niveles simulados. Mientras que para HEC-RAS fueron necesarias las secciones transversales cada 500 metros y el DEM de la zona; las condiciones de contorno aguas abajo y aguas arriba, también, los caudales para distintos periodos de retorno. Con lo anterior se concluyó que el evento ocurrido en 2017 tiene un periodo de retorno de 3 años; y que el modelo hidráulico RRI identificó niveles bajos de altura de agua y no fue capaz de identificar los niveles observados en las estaciones El Tigre y Puente Tumbes; mientras que el software HEC-RAS permitió obtener a detalle en las áreas inundables y los identificó de manera precisa [3].

El trabajo de tesis [6] **“Identificación de áreas inundables mediante modelamiento hidráulico del río Chonta tramo de La Alameda La Chonta distrito de Los Baños del Inca”**, tuvo como objetivo principal verificar las áreas inundables del distrito de los Baños del Inca, mediante el modelamiento hidráulico del río Chonta en el programa Iber, con lo cual se obtuvieron las zonas inundables. Anterior a ello, se realizó un modelamiento hidrológico con datos de imágenes del satélite ASTER y curvas de nivel a partir de un trabajo de levantamiento topográfico, de manera que se determinaron las características geomorfológicas de la cuenca y se simularon los caudales mediante el método racional, conforme el riesgo de falla y la vida útil de las estructuras. Por último, se llegó a la conclusión de que la contracción del cauce del río en ese tramo es la principal causa de inundación.

En la tesis **“Vulnerabilidad de zonas críticas de inundación considerando cauce natural y cauce modificado por estructuras de protección Puente Punta Moreno aguas abajo, Trujillo”**

En este trabajo se realizó el estudio hidráulico en un tramo del río Chicama, empleando los softwares HEC-RAS 5.0.3 y ArcGIS. Y como resultado se generaron mapas de inundación para eventos de máximas avenidas para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, con lo cual se obtuvo la cantidad de hectáreas de inundación. Por ello se planteó la idea de defensas rivereñas como medida de protección de la infraestructura vial cercana y de las áreas agrícolas aledañas al margen del río [7].

En el trabajo de tesis: **“Identificación de zonas urbanas propensas a riesgos por inundación ante máximas avenidas del río Utcubamba en el Centro Poblado Naranjitos, Amazonas”**, cuyo objetivo fue identificar y cuantificar las áreas vulnerables a inundaciones, mediante el uso de modelamiento hidráulico en HEC-RAS 5.0.3 del río Utcubamba en el tramo 890.00 m, a lo largo del centro Poblado Naranjitos. El resultado fue la elaboración de mapas de inundaciones, donde se identificó que las zonas altamente vulnerables eran las que estaban ubicadas a la margen izquierda del río; además se determinó que las inundaciones afectan aproximadamente a 372 habitantes, 62 viviendas, 18.59 ha agrícolas, una institución educativa y a la red de alcantarillado [8].

El procedimiento que se llevó a cabo en este estudio fue: primero la información cartográfica fue obtenida del Instituto Geográfico Nacional en una escala 1/100000, con lo cual sirvió se delimitó la cuenca y se determinaron sus parámetros geomorfológicos, mediante AutoCAD

Civil 3D y ArgGIS. También se complementó con un trabajo de campo para el reconocimiento de las estructuras existentes. En cuanto a la información hidrometeorológica, esta fue obtenida de estudios anteriores de la cuenca. Asimismo, los caudales máximos fueron calculados mediante el método precipitación – escorrentía, a partir de datos de estaciones pluviométricas operadas por el SENAMHI, ya que en la zona no existen estaciones hidrométricas y con la ayuda del software HydroEsta se efectuó un análisis de consistencia de los registros históricos de precipitaciones. Luego, se emplearon mapas de uso de suelo brindado por el IGN y se extrajeron los datos mediante el software ArcGIS. Por último, se llegó a la conclusión de que el río Utcubamba se desborda prácticamente en todas sus secciones y esto es más notable en la progresiva 0+520.00 Km, por lo que se recomendó tomar medidas de protección contra las inundaciones tales como: la construcción de defensas ribereñas y reforzamiento de estribos del puente [8].

La tesis: **“Estudio de inundación de la zona correspondiente al distrito de Calango, provincia de Cañete, departamento de Lima, Mediante el uso de los modelos matemáticos HEC-HMS y HEC-RAS”**; este trabajo abarca el análisis hidrológico e hidráulico del río Mala en el tramo del distrito de Calango. Se realizó el análisis hidrológico mediante métodos de análisis probabilístico, así como la elaboración del hietograma de diseño. Luego se hizo la simulación hidrológica en HEC-HMS, donde se obtuvieron los caudales de diseño para períodos de retorno de 100 y 500 años. Por último, se realizó la simulación hidráulica con HEC-RAS a partir de las curvas de nivel del DEM de la NASA y se obtuvieron las zonas de inundación mediante ArcGIS [9].

En la tesis: **“Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio- tramo Ciudad de Cajamarca, con fines de prevención de inundaciones”** se realizó un estudio de inundación de dos zonas de la ciudad de Cajamarca por donde atraviesa la quebrada Calispuquio. Cabe mencionar que la topografía fue obtenida tanto de imágenes satelitales como de levantamiento con dron; además se realizó el análisis hidrológico mediante el método probabilístico Gumbel, donde se obtuvieron los caudales máximos para 50, 100, 200, 300 y 500 años de periodo de retorno. Asimismo, el modelamiento hidráulico se realizó en Iber 2D, con lo cual se obtuvieron las áreas de inundación. Por lo tanto, se recomendó tomar medidas de prevención como eliminación y limpieza del cauce del canal de la quebrada y aumentar la altura de los muros del canal [10].

Bases teóricas científicas

Estudio hidrológico

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones [11], el estudio hidrológico es necesario para el diseño de obras hidráulicas y para realizarlo se emplean con frecuencia programas que representan el comportamiento de la cuenca. Esto se realiza con el fin de tener conocimiento de comportamiento hidrológico, lo cual sirve para poder establecer las áreas vulnerables a los eventos hidrometeorológicos extremos, así como para prevenir daños en la infraestructura vial.

Información hidrológica y meteorológica

La información hidrológica y meteorológica para utilizar en los estudios son proporcionadas por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y en lugares que no se cuentan con información se recurrirá a las entidades encargadas de la administración de los recursos hídricos de la zona en estudio [11].

Máximas Avenidas

Para establecer la probabilidad de ocurrencia de una avenida de cierta magnitud es necesario un estudio de máximas avenidas. Por ello, también se pueden definir como fenómenos originados por el comportamiento aleatorio de las descargas de los ríos que van asociadas a una probabilidad de ocurrencia [11].

Estudio de cuencas hidrográficas

Morfología de la cuenca hidrográfica

- Área de la Cuenca: según Chereque [12], es la superficie proyectada en un plano horizontal. La cuenca se delimita mediante una línea divisoria imaginaria que separa las pendientes opuestas de las cúspides.
- Perímetro de la cuenca: se define como la distancia de la línea imaginaria o divisoria que delimita la cuenca.
- Longitud del cauce Principal: representa a la longitud de la cuenca que puede medirse como la longitud del eje de la cuenca.

- Forma de la cuenca: según Monsalve [13], este parámetro determina la distribución de las descargas de agua a lo largo del curso principal. Así mismo, para establecer la forma de la cuenca, es necesario calcular el coeficiente de compacidad (K_c) que se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia, cuya área es equivalente al área de la cuenca.

Sistema de drenaje

Este está constituido por el cauce principal y cauces tributarios. Los parámetros más representativos son los siguientes:

- Orden de los cauces: expresa el grado de los ramales de una cuenca y se determina de la siguiente manera: una corriente de primer orden pertenece a pequeños canales que no tienen tributarios; una de segundo orden hace referencia a cuando dos corrientes de primer orden se unen; de la misma forma, una de tercer orden es cuando dos corrientes de segundo orden se unen. Por último, una corriente de orden $n+1$, implica que dos cauces de orden n se unen [13].
- Densidad de corrientes (D_s): se define como el número de corrientes perennes por unidad de área. Una densidad de corrientes pequeñas se observa cuando los suelos son resistentes a la erosión o muy permeables, por lo contrario, cuando este valor es elevado corresponde a suelos fácilmente erosionables [14].
- Densidad de drenaje (D_d): este parámetro relaciona la longitud total de los cursos y el área total de la cuenca [14].

Características de relieve de la cuenca

- Pendiente media de la cuenca: de acuerdo con Monsalve [13], el método más completo es el de cuadrículas asociadas a un vector; el cual permite determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel de una cantidad de puntos dentro de la cuenca.
- Pendiente del cauce principal: es la característica que afecta directamente en el tiempo con la que se da la escorrentía superficial; es decir, a mayor pendiente mayor velocidad [13].

- Curva hipsométrica: conforme con Monsalve [13], ésta es una representación gráfica del relieve de la cuenca que asocia el valor de elevación, en las ordenadas, con el porcentaje de área acumulada, en abscisas.
- Rectángulo equivalente: hace referencia a un rectángulo con un área igual a la de la cuenca, de lados menor “l” y el lado mayor “L”. Este tiene igual distribución de alturas que la curva hipsométrica original de la cuenca [13].

Periodo de retorno

Según la referencia [11], es el tiempo en años, en que el valor del caudal pico es igualado o superado. Para adoptar este periodo se debe tener en cuenta la vida útil de la estructura que se pretende realizar y el riesgo de falla admisible.

Análisis estadístico de datos hidrológicos

Se emplean los métodos estadísticos con el objetivo de estimar precipitaciones o caudales máximos para distintos periodos de retorno. El manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje recomienda usar las distribuciones Normal, Log Normal, Gamma, Log Pearson, Gumbel y Log Gumbel y se elige la distribución que más se ajusta a los datos de acuerdo el resultado de la prueba de bondad de ajuste, las cuales son la X² y la Kolmogorov – Smirnov [11].

Tormenta de diseño

Se define como el modelo de precipitación determinista utilizado en el diseño de sistemas hidrológicos. Además, una tormenta de diseño se puede determinar por la profundidad de precipitación en un punto, empleando un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta [11].

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

De acuerdo con Chereque [12], es importante conocer la intensidad, duración y frecuencia de una tormenta. Asimismo, manifiesta que la intensidad se mide en mm/h y tiene un valor variable durante una tormenta; en cambio, la duración suele expresarse como la cantidad de minutos u horas entre el inicio y fin de la tormenta. También, señala que la frecuencia es la probabilidad de ocurrencia de una tormenta de una intensidad a un cierto periodo. Por lo tanto, las curvas IDF, son un elemento de diseño que conecta la intensidad de la lluvia, su duración, y la frecuencia con la que es probable que ocurra.

Por lo tanto, un procedimiento para elaborar las curvas IDF, es lo siguiente:

- Seleccionar las lluvias de mayor intensidad para diferentes periodos.
- Ordenar de mayor a menor.
- Asignar una probabilidad empírica a cada valor ordenado.
- Calcular el tiempo de retorno de cada valor y dibujar la curva IDF.

Tiempo de concentración

Menciona que es el tiempo que requiere una gota para realizar su recorrido desde el punto más lejano hasta el punto de salida de la cuenca y que para el cálculo de este parámetro [11], se puede usar los siguientes métodos:

- Método de Kirpich (1940)
- California Culverts Practice (1942)
- Izzard (1946)
- Federal Aviation Administration (1970)
- Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965)
- Ecuación de retardo (1973)

Hietograma de diseño

El método del Bloque Alterno es una de las formas para obtener la distribución temporal de las tormentas observadas, donde la profundidad de precipitación se determina durante n periodos de tiempo consecutivos, sobre una duración total, $T_d = n \cdot \Delta t$ [11].

Estimación de caudales

Si se tiene una cantidad suficiente de datos de aforo, se realiza un análisis estadístico de los caudales máximos anuales de la estación más cercana a la zona para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años. En caso de no contar con datos de aforo se debe utilizar los datos de precipitación como datos de entrada a la cuenca y que producen un caudal Q [11].

Hidrogramas

Según Chereque [12], se tiene a los hidrogramas unitarios y sintéticos; el primero representa la escorrentía directa resultante de 1cm de lluvia neta caída en t horas, generada uniformemente sobre el área de la cuenca a una tasa uniforme. Mientras que los hidrogramas

sintéticos se construyen en base a fórmulas empíricas y únicamente se emplean cuando se tienen cuencas sin registros con el fin de determinar el caudal pico y el tiempo base.

Coefficiente de rugosidad

Rocha [15], manifiesta que el coeficiente n depende no solo de la aspereza de la superficie sino que también intervienen otros factores tales como: las curvas, debido a que la presencia de curvas aumenta la resistencia; también la vegetación, pues su crecimiento puede alterar los valores de rugosidad especialmente en canales de tierra; además, las irregularidades, ya que los canales de tierra se caracterizan por tener una sección transversal irregular como consecuencia de depósitos de sedimentos y por último el tirante, dado que al aumentar el tirante disminuye el coeficiente n .

Modelamiento hidrológico

HEC-HMS

Este modelo matemático es un sistema de Modelado Hidrológico utilizado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas. El software contiene tanto los procedimientos tradicionales de análisis hidrológico como infiltración de eventos e hidrogramas unitarios. Además, incluye bases de datos, utilidades y herramientas de entrada de datos en una interfaz gráfica que permite al usuario obtener resultados de la simulación en un sistema de almacenamiento de datos (HEC-DSS) [16].

HidroEsta

Según Villón [17], el creador de este software afirma que es un instrumento que facilita los laboriosos cálculos y el proceso del análisis de la copiosa información que se deben realizar en los estudios hidrológicos. Este programa es capaz de calcular los caudales o precipitaciones de diseño, con un periodo de retorno dado y una determinada probabilidad de ocurrencia mediante métodos empíricos y estadísticos.

Modelamiento hidráulico

Sistema de Información Geográfica (SIG)

De acuerdo con Olaya [18], el 70% de la información que manejamos está georreferenciada, por lo que es bastante favorable el desarrollo de herramientas que utilizan dicha información como datos relativos de tiempo y espacio. Del mismo modo, la cartografía se ha vuelto una herramienta importante y de uso por todo tipo de usuarios. Por lo tanto, un SIG es un sistema de información que permite trabajar con información georreferenciada. Asimismo, permite la lectura, edición, almacenamiento y gestión de datos espaciales, así como el análisis de estos y la generación de resultados como mapas, gráficos, informes, entre otros.

ArcGIS

Según Orduña [19], es un sistema de información geográfica, que comprende una interfaz gráfica de usuario que permite cargar fácilmente datos espaciales para mostrarlos en forma de mapas, tablas y gráficos. También proporciona las herramientas necesarias para consultar y analizar los datos y presentar los resultados como un mapa.

HEC-RAS

Manifiesta que es un sistema de modelamiento que se utiliza para modelar canales naturales y artificiales, con lo cual es posible realizar un estudio de inundabilidad a través de un análisis de flujo permanente y no permanente unidimensional. Para ello se debe contar con datos de precipitación e intensidad que se obtiene de las curvas IDF y características de la cuenca [20].

IBER 2D

Según el Manual del Software [21], este es un modelo que simula un flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y los procesos medioambientales de la hidráulica fluvial, así como la simulación de rotura de presa, evaluación de inundaciones, y cálculos de transporte de sedimentos. Asimismo, se compone de los siguientes módulos de cálculo: módulo de transporte de sedimentos, hidrodinámico y módulo de turbulencia.

Materiales y métodos

Tipo de estudio y diseño de contrastación de hipótesis

La investigación es de tipo descriptiva y de diseño no experimental, pues se realizará un análisis en el que se identifica los distintos softwares usados en el estudio de inundaciones. Por lo que los resultados de esta investigación son a partir de estudios anteriores que se aplican para lograr los objetivos planteados.

Variables – operacionalización

VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR
Softwares de modelamiento hidráulico e hidrológico	Sistema informático	Períodos de retorno
		Caudales de diseño
		Mapas de inundaciones

Tabla 1: operacionalización de variables

Fuente: elaboración propia

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR
Estudio de Inundabilidad	Hidráulica e hidrológica	Datos de topografía y cartografía
		Datos hidrológicos
		rugosidad

Tabla 2: operacionalización de variable independiente

Fuente: elaboración propia

Población, muestra de estudio y muestreo

En este estudio se ha creído conveniente que la población son las investigaciones donde que se han desarrollado estudios de inundabilidad mediante el uso de programas de análisis hidrológico y softwares de simulación hidráulica. Se ha escogido como muestra los artículos o tesis realizados entre los años 2017 y 2019; a partir de ello se evaluará las variables.

Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

TÉCNICA	INSTRUMENTO	ELEMENTO DE LA POBLACIÓN
Análisis documental	Fichas de análisis de tesis y artículo (Ver anexos 1 y 2)	Tesis y artículos

Tabla: método de recolección de datos

Fuente: elaboración propia

Procesamiento para análisis de datos

Se realiza la búsqueda de tesis y artículos en distintas bases de datos, revistas, repositorios de tesis y otros. Luego esta información será seleccionada mediante las fichas de análisis, donde serán evaluadas las variables como: tanto caudales máximos como períodos de retorno; los métodos o programas de análisis hidrológico y los softwares utilizados en el modelamiento hidráulico. Además, se tomará en cuenta los resultados obtenidos en cada estudio y las medidas de prevención sugeridas.

Con lo anterior, se hará una estadística descriptiva para comprobar el aporte de los softwares de modelamiento hidrológico e hidráulico en los estudios de inundaciones, así como identificar las distintas fuentes de datos y las metodologías empleadas en cada estudio.

Resultados y discusión

Nº	TÍTULO	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	ANÁLISIS HIDRÁULICO	RESULTADOS
1	Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, IBER Y FLOW 3D en la simulación hidráulica de un meandro en Colombia.	No menciona	HECRAS 5.0.5, IBER 2.4.3 Y FLOW 3D 11.2	HEC-RAS y FLOW 3D dieron resultados similares en velocidad y lámina de agua, mientras que IBER presenta una disimilitud significativa.
2	“Modelación de inundaciones generadas por crecidas del río Blanco en la localidad de Chaitén, post eventos del 2008. Región de Los Lagos, Chile”	HEC-HMS 4.1	Iber 2.4.1	Para un T30 se alcanzó calados de hasta 2.6 m y no se producen inundaciones. Para un T100 los calados máximos fueron entre 3.5 y 3.9 m de profundidad y se produce un desvío del flujo a la izquierda del cauce aguas abajo.
3	Evaluación de zonas de inundación utilizando un modelo hidrológico – hidráulico en Tumbes.	HEC-HMS	RRI y HEC-RAS	El evento del fenómeno el Niño tiene un período de retorno de 3 años. HEC-RAS dio resultados con más detalle.
4	Identificación de áreas inundables mediante modelamiento hidráulico del río Chonta tramo de La Alameda La Chonta distrito de Los Baños del Inca	Datos obtenidos de otra tesis (2008)	Iber 2D	Se identificaron las calles de alta, media y baja peligrosidad
5	Vulnerabilidad de zonas críticas de inundación considerando cauce natural y cauce modificado por estructuras de protección Puente Punta Moreno aguas abajo, Trujillo	HidroEsta	HEC-RAS 5.0.3	112.61, 135.14, 162.17, 194.60 has para los periodos de retorno analizados.
6	Identificación de zonas urbanas propensas a riesgos por inundación ante máximas avenidas del río Utcubamba en el Centro Poblado Naranjitos, Amazonas	HidroEsta	HEC-RAS 5.0.3	Son afectados un promedio de 372 habitantes, 62 viviendas, 360.44 m de accesos, 18.59 ha de áreas agrícolas, la red de alcantarillado de la zona y la Institución Educativa principal.
7	Estudio de inundación de la zona correspondiente al distrito de Calango, provincia de Cañete, departamento de Lima, Mediante el uso de los modelos matemáticos HEC-HMS y HEC-RAS	HEC-HMS	HEC-RAS	17.714 Ha para un periodo de retorno de 100 años y de 25.417 Ha para un periodo de retorno de 500 años.
8	Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispulquico – tramo Ciudad de Cajamarca – ciudad Universitaria, con fines de prevención de inundaciones	Método probabilístico Gumbel	Iber 2D	Zona de inundación 1: 9.14 Ha; zona 2: 1.65 Ha

A partir de las investigaciones analizadas se puede decir que el principal problema que se ha tomado en cuenta para un estudio de inundaciones son la evolución de los ríos lo cual causa socavación en diferentes estructuras; también el desborde de los ríos por intensas precipitaciones y la contracción de los ríos debido a que han sido encausados con una menor área que su cauce natural.

También se puede evidenciar que los datos de topografía en su mayoría han sido sacados de imágenes satelitales y cartas nacionales, otros mediante levantamiento topográfico en campo con estación total e incluso con Dron. Asimismo, los datos hidrológicos han sido obtenidos de las distintas estaciones meteorológicas y en otros casos de estudios anteriores realizados en la zona.

En cuanto al análisis hidrológico se puede evidenciar que la mayor parte de tesis o artículos analizados han utilizado el software de modelamiento hidráulico HEC-HMS, en pocos casos el software HidroEsta y en otros se ha calculado los caudales máximos mediante los métodos de análisis probabilístico. Cabe señalar que generalmente se ha considerado períodos de retorno de 50 y 100 años.

Además de ello, el coeficiente de rugosidad utilizado para el modelamiento hidráulico ha sido obtenido en su mayoría de estudios anteriores de las zonas, mapas de uso de suelos y de tablas referenciales; mientras que algunos autores han utilizado la misma base de datos de los softwares y en minoría han realizado estudio de mecánica de suelos.

Por otro lado, es importante decir que los softwares más utilizados en el modelamiento hidráulico son Iber 2D y HEC-RAS, los cuales han hecho posible la simulación del comportamiento hidráulico de los ríos o quebradas en cada uno de los estudios.

La mayor parte de los estudios analizados han obtenido los mapas de las zonas expuestas a inundación. Con lo cual, han calculado a través del software ArcGIS las cantidades exactas de áreas expuesta a inundación para distintos caudales y períodos de retorno. Por lo cual, en gran parte de estudios analizados recomiendan como medidas de prevención muros de contención o defensas ribereñas tanto en las áreas urbanas como en las áreas agrícolas. Además, en los estudios donde existe un canal artificial de concreto se recomendaron aumentar la altura de los muros del canal.

Conclusiones

- En los estudios de inundaciones se recopilan una gran cantidad de datos que muchas veces no es posible manejarlos de forma manual; es por ello que el apoyo de los softwares de modelamiento hidrológico e hidráulico es necesario e indispensable para obtener los mapas de las zonas inundables.
- También se concluye que las principales fuentes para los datos topográficos han sido las imágenes satelitales, cartas nacionales y datos topográficos de campo. Además, los datos hidrometeorológicos han sido obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas a cada área de estudio.
- Los softwares de modelamiento hidrológico más utilizado ha sido HEC-HMS y en casos donde se ha tenido datos hidrométricos se empleó el programa HidroEsta; los cuales han sido capaces de dar resultados de los caudales máximos para los distintos períodos de retorno requeridos en cada estudio. Asimismo, los softwares de modelamiento hidráulico más utilizados han sido HEC-RAS e IBER 2D, con los cuales se ha podido verificar el comportamiento de los ríos o quebradas para caudales máximos en distintas zonas.
- La metodología común en los estudios de inundaciones analizados ha sido la siguiente: a partir de los datos de topografía se obtuvieron modelos de elevación digital de cada zona en estudio; luego con los datos hidrometeorológicos se obtuvieron los caudales máximos para periodos de retorno requeridos a través de softwares de análisis hidráulico. Posterior a ello se obtuvieron los coeficientes de rugosidad mediante estudios anteriores de cada zona y con ello se realizó el modelamiento hidráulico en los modelos HEC-RAS o Iber y finalmente se obtuvieron los mapas de peligro de inundación con las cantidades áreas expuestas con lo cual se recomendaron medidas de prevención ante futuras inundaciones.

Recomendaciones

- Para realizar un estudio de inundación se recomienda realizar un reconocimiento de la zona para tenerlo en cuenta en el cálculo de coeficiente de rugosidad, ya que este no solo depende de la aspereza del cauce sino también de la cantidad de vegetación presente en la zona.
- Al realizar la configuración de los softwares de análisis hidrológico e hidráulico se debe verificar que los datos que sean coherentes, que tengan relación y que se asemejen a la realidad de la zona en estudio, ya que muchas veces los datos brindados por las distintas fuentes son mal observados o transcritos. De manera que se puedan obtener resultados reales y más exactos.
- Cada modelo matemático de modelamiento hidráulico requiere de diferentes tipos de datos, por lo que se debe tener en cuenta esto antes de elegir el programa a utilizar.

Referencias

- [1] Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), «Estudio Básico de la Demanda de Control de Inundaciones en la República del Perú,» 2017.
- [2] INDECI, «Fortaleciendo la respuesta ante desastres en el Perú: Lecciones Aprendidas del Fenómeno El Niño Costero 2017 en el Perú,» 2018.
- [3] L. Metzger, «Evaluación de zonas de inundación utilizando un modelo hidrológico-hidráulico en Tumbes,» Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. Dirección de hidrología-DHI, Lima, 2019.
- [4] A. Delgado Parra, «Modelización 1D, 1D/2D y 2D de inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación HEC-RAS 5.0,» UPC BARCELONATECH, Barcelona, 2016.
- [5] P. Chang, J. Vargas, L. Rivera, A. Salazar y V. Robledo, «Análisis Corporativo de los modelos HER-RAS, IBER y FLOW 3D en la simulación hidráulica de un meandro en Colombia,» *Cubagua Habana 2019 Conocimiento y Tecnología*, 2019.
- [6] K. Villena, «Identificación de áreas inundables mediante modelamiento hidráulico del río Chonta tramo de La Alameda La Chonta distrito de Los Baños del Inca,» Universidad de Cajamarca, Cajamarca, 2018.
- [7] M. Guillen y A. Navarro, «Vulnerabilidad de zonas críticas de inundación considerando cauce natural y cauce modificado por estructuras de protección Puente Punta Moreno aguas abajo, Trujillo,» Universidad de Trujillo, Trujillo, 2019.
- [8] J. Núñez, «Identificación de zonas urbanas propensas a riesgos por inundación ante máximas avenidas del río Utcubamba en el Centro Poblado Naranjitos, Amazonas,» Universidad Nacional de Cajamarca, Amazonas, 2017.
- [9] J. Z. Chagua Cierto, «Estudio de inundación de la zona correspondiente al distrito de Calango, provincia de,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2018.
- [10] B. G. Trigoso Marín, «Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio- tramo Ciudad de Cajamarca, con fines de prevención de inundaciones,» Universidad de Cajamarca, Cajamarca, 2018.
- [11] MTC, «Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje,» Macro, Lima, 2011.
- [12] W. Chereque, Hidrología para estudiantes de ingeniería civil, Lima: Pontificia

Universidad Católica del Perú, 1989.

- [13] M. Villón, Hidráulica de canales, Segunda ed., Lima: Villón, 2007.
- [14] H. E. C. H.-R. US Army Corps of Engineers, «River Analysis System, HEC-RAS 4.1,» USA, 2010.
- [15] A. Rocha, Hidráulica de tuberías y canales, Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007.
- [16] F. Orduña, Aplicaciones del software SIG: ArcGIS 9.2. Lección 1: Introducción a ArcGIS Desktop, España: Universitat de Girona, 2007.
- [17] V. Olaya, Sistemas de Información Geográfica, 2014.
- [18] G. Monsalve, Hidrología en la Ingeniería, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- [19] S. L. Basso Báez, «Modelación de inundaciones generadas por crecidas del río Blanco en la localidad de Chaitén, post eventos del 2008. Región de Los Lagos, Chile,» Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2017.
- [20] F. Aparicio, Fundamentos de hidrilogía de superficie, México: Limusa, 1992.
- [21] Flumen, «Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario.,» España, 2010.
- [22] Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. Centro de Ingeniería Hidrológica, «HEC-HMS,» [En línea]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. [Último acceso: 1 Julio 2020].

Anexos

TÍTULO DE LA TESIS		
UNIVERSIDAD		
LUGAR /FECHA		
AUTOR (ES)		
TIPO DE INFORME		
PROBLEMA		
OBJETIVO		
METODOLOGÍA	TOPOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA	
	DATOS DE PRECIPITACIÓN	
	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	
	MODELAMIENTO HIDRÁULICO	
RESULTADOS	CAUDALES DE DISEÑO	
	PERÍODOS DE RETORNO	
	MAPA DE INUNDACIONES	
	ÁREAS VULNERABLES	
MEDIDAS DE PREVENCIÓN		
CONCLUSIONES		
URL		

Anexo 1: ficha de análisis de tesis

Fuente: elaboración propia

TÍTULO DEL ARTÍCULO		
REVISTA		
LUGAR /FECHA		
AUTOR (ES)		
PROBLEMA		
OBJETIVO		
METODOLOGÍA	TOPOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA	
	DATOS DE PRECIPITACIÓN	
	ANÁLISIS HIDROLÓGICO	
	MODELAMIENTO HIDRÁULICO	
RESULTADOS	CAUDALES DE DISEÑO	
	PERÍODOS DE RETORNO	
	MAPA DE INUNDACIONES	
	ÁREAS VULNERABLES	
MEDIDAS DE PREVENCIÓN		
CONCLUSIONES		
URL		

Anexo 2: ficha de análisis del artículo

Fuente: elaboración propia