

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE DIPLOMA

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE RÍOS EN ZONAS URBANAS
PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE
INUNDACIONES: CASO DE ESTUDIO RÍO JIGÜE**

ANABEL REYES RAMÍREZ



HOLGUÍN
2015

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE DIPLOMA

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE RÍOS EN ZONAS URBANAS
PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE RIESGO ANTE
INUNDACIONES: CASO DE ESTUDIO RÍO JIGÜE**

Autor: ANABEL REYES RAMÍREZ

Tutores: MsC. Raymundo Carlo Rodríguez Tejeda
Ing. Aniel Álvarez González



HOLGUÍN
2015

DEDICATORIA

A mi madre Idalmis Ramirez por todo su amor, dedicación y apoyo por todos estos años.

A mi padre Roberto Pérez por ser mi guía, maestro y modelo a seguir en toda mi vida estudiantil y en mi futuro como profesional.

A mi novio Yunior Lengarán por todo su amor y apoyo en todo este tiempo juntos.

A toda mi familia por todo el aliento que me han brindado y por sentirse siempre muy orgullosos de mí.

AGRADECIMEINTOS

A mis padres por toda la ayuda y dedicación brindada por todos estos años de carrera.

A mis profesores de la carrera por todos los conocimientos compartidos y la ayuda brindada para la realización de este trabajo de diploma.

A mis tutores, en especial a Aniel Álvarez por toda la dedicación, ayuda y conocimientos aportados.

Al profesor Miguel Cruz Cabeza gracias por todo el tiempo dedicado en la revisión y elaboración de este trabajo.

A la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín RAUDAL por toda información brindada no sólo para la realización de este trabajo, sino también durante toda mi formación como profesional, en especial a los ingenieros Omelia, Sergio y Arnaldo.

A todas las personas que me ayudaron durante mi estancia en la Universidad de Magdeburg-Stendal en Alemania, sobre todo en la traducción al idioma alemán, en especial a Yan Arnold, Daniela Hasslecker y Larissa Marschall.

A todos mis amigos y compañeros de la carrera por todos los momentos compartidos.

A todos los que de una forma u otra colaboraron para la realización exitosa de mi trabajo de diploma.

RESUMEN

La creación de mapas de riesgo ante inundaciones mediante modelos matemáticos de simulación hidráulica, es considerada una de las herramientas más eficaces para conocer las zonas vulnerables a esta amenaza y actuar a tiempo para reducir la magnitud de su impacto. En la presente investigación se propuso realizar la modelación del río Jigüe de la ciudad de Holguín, con el objetivo de simular las condiciones actuales que presenta el cauce y lograr una mayor similitud con las características físicas reales del mismo. Con la ayuda de las herramientas informáticas HEC-RAS, ArcGIS y HEC-GeoRAS, se obtuvieron los mapas de riesgo asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia. Como ejemplo de la aplicación de esta herramienta se cuantificaron de manera aproximada las viviendas y la población que se encuentran amenazadas y se clasificaron las zonas de mayor y menor riesgo dentro del área inundada. Los resultados de esta investigación pueden contribuir con la labor de entidades responsabilizadas en la protección de vidas y bienes materiales, y pueden servir de base para proponer medidas de solución ante este fenómeno.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO – I.....	8
ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DEL USO DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGOS ANTE INUNDACIONES. ESTUDIOS EN EL RÍO JIGÜE	8
1.1. Antecedentes históricos relativos al uso de las modelaciones matemáticas para la reducción de riesgos y vulnerabilidades ante inundaciones fluviales	8
1.2. Modelaciones matemáticas de fenómenos hidráulicos. Su conceptualización.....	11
1.2.1 Caracterización de los modelos matemáticos de simulación hidráulica	12
1.2.2 Software empleados para la modelación hidráulica	17
1.2.3 Secuencia de trabajo a utilizar	21
1.2.4 Bases teóricas del cálculo unidimensional.....	24
1.3. Estudios de reducción de riesgos y vulnerabilidades ante inundaciones fluviales	28
1.3.1 Aplicación de los modelos matemáticos.....	30
1.4. Diagnóstico del estado actual de las modelaciones hidráulicas realizadas en el río Jigüe para la obtención de mapas de riesgo ante inundaciones fluviales.....	33
1.5. Conclusiones	39
CAPÍTULO II.....	40
CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO FISICO GEOGRÁFICO. MANEJO DE LAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE RIESGO ENTE INUNDACIONES FLUVIALES EN EL RÍO JIGÜE	40
2.1 Características físico-geográficas de la cuenca del río Jigüe.....	40
2.1.1 Caracterización hidráulica e hidrológica del río Jigüe.....	41
2.1.2 Levantamiento de las obras de fábrica	46
2.2 Modelación hidráulica del río Jigüe.....	48
2.2.1 Procesamiento de la cartografía en AutoCAD y ArcGIS.....	49

2.2.2 Ajuste del modelo en HEC-GeoRAS	50
2.2.3 Procesamiento en HEC-RAS	54
2.3 Obtención de los mapas de riesgo de inundación en ArcGIS	64
2.3.1 Análisis de los resultados	70
2.3.2 Clasificación de las zonas de riesgo	73
2.5 Conclusiones	76
CONCLUSIONES GENERALES.....	77
RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS	83

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

Término	Denominación
SIG	Sistema de Información Geográfica
HEC-RAS®	<u>Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System</u>
HEC-GeoRAS®	<u>Hydrologic Engineering Center's - Geographical River Analysis System</u>
ESRI	<u>Environmental System Research Institute</u>
MDT	Modelo Digital del Terreno
TIN	<u>Triangulated Irregular Network</u>
CIH	Centro de Investigaciones Hidráulicas
CITMA	Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
CUJAE	Centro Universitario José Antonio Echeverría
INRH	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
UNESCO	<u>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</u>

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen fenómenos naturales sumamente destructivos, los cuales se incrementan como consecuencia del cambio climático, los cambios en la topografía terrestre, alteraciones en el uso de los suelos (urbanización y deforestación), la falta de mantenimiento en las redes de drenaje, entre otros factores. Los desastres originados por ellas constituyen cerca de la tercera parte de todos los desastres naturales [1] y son responsables de más de la mitad de las muertes asociadas a éstos.

Dado que no se puede escapar de la incidencia de estas amenazas naturales, deben encaminarse los esfuerzos al desarrollo de métodos, técnicas e instrumentos que ayuden a la preservación de las vidas y los recursos ante estos eventos. Una de las variables que influye de manera apreciable en la incidencia de estas amenazas es la explosión demográfica en los entornos urbanos de las ciudades.

El crecimiento poblacional trae como consecuencia que parte de la población se asiente en la zona de inundación de los ríos. Por esta razón es de suma importancia que los organismos responsables en el ordenamiento territorial, el control de las políticas de construcción, la preservación de los objetivos económicos y sociales y de la población, estén conscientes de la dimensión de esta amenaza y el grado de vulnerabilidad que presentan, para actuar a tiempo y reducir así la magnitud de su impacto. Bienes

Una de las herramientas inmediatas para conocer las zonas la vulnerabilidad es la creación de mapas de riesgos, mediante la modelación matemática de fenómenos hidráulicos de ríos y cuencas. Estos nos brindarán una representación cartográfica de las áreas que son susceptibles de ser inundadas para diferentes probabilidades, permitiendo así definir los lugares idóneos donde se construirán asentamientos poblacionales o algún objeto de obra de interés social. Igualmente permitirá comprobar la eficacia de las obras de infraestructura diseñadas tales como viales, puentes, alcantarillas y drenajes, por lo que constituye a su vez una garantía para la inversión a ejecutar.

La importancia de poder contar con este eficaz instrumento radica en dar a conocer a la comunidad el riesgo de la ocurrencia de una crecida extraordinaria, establecer las fronteras topográficas de las crecidas, crear una estrategia de evacuación y protección a la población y sus bienes materiales, así como conocer la situación que se manifiesta ante eventos de diferentes probabilidades desde el punto de vista de la planificación física.

Todos estos aspectos contribuirán a la salvación de vidas humanas y bienes materiales de la población y de la economía del país, lo que influye en la conservación del medio ambiente y su ente fundamental, el hombre. Representaría además un ahorro considerable de medios materiales como transporte, combustible, alimentos, personal, paralización de centros de trabajo y estudio, que en ocasiones se pierden por realizarse evacuaciones preventivas que luego resultan innecesarias.

Del importante papel que juegan las modelaciones de procesos hidráulicos y los mapas de zonificación de riesgos, se deriva la necesidad de que los mismos sean lo suficientemente exactos, pues de este factor dependerá la veracidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto permitirá manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones en situaciones de emergencia.

En Cuba el régimen de precipitaciones posibilita la formación de inundaciones, sobre todo durante el período lluvioso (mayo a octubre). El área inundable para todo el territorio cubano es de 26 132 Km², lo que representa el 25% de la superficie terrestre, esto es una cifra indudablemente preocupante para la Isla, si se tiene en cuenta que esto puede traer consigo, innumerables daños a la agricultura, el fondo habitacional y la economía [2].

La ciudad de Holguín no posee una alta vulnerabilidad a las inundaciones, sin embargo tiene zonas bajas muy sensibles, esencialmente provocadas por el desbordamiento de ríos y arroyos. En la ciudad el 4,4% de los habitantes pueden ser afectados por las inundaciones, lo que representa 13 859 habitantes [3].

Entre las zonas vulnerables con más tendencia a verse afectadas por las inundaciones, se encuentran las áreas cercanas al margen del Río Jigüe, ubicado al noroeste de la ciudad. Su cauce se encuentra modificado por la acción del hombre debido a la construcción no controlada de viviendas por parte de la población que genera secciones hidráulicas y obras de fábricas poco eficientes, afectando sensiblemente la conductividad hidráulica y creando fenómenos de erosión o deposición de sedimentos, los cuales combinado con un deficiente mantenimiento, crea incapacidad de las corrientes naturales para evacuar el volumen de agua de las crecidas, aún con lluvias moderadas.

Esto genera la necesidad de realizar estudios e investigaciones en varios sectores de este río, por diferentes entidades responsabilizadas (RAUDAL, CITMA, Planificación Física, Agenda 21, Universidad de Holguín) en aras de cuantificar y zonificar el riesgo al que se encuentran expuestas las viviendas e instituciones ubicadas en esta área.

Entre ellas se destacan dos investigaciones, las de Chacón [2] y Fernández [4] en torno a la elaboración de mapas de vulnerabilidad mediante la modelación hidráulica del río Jigüe, que permiten la zonificación del riesgo. Sin embargo al analizar dichos estudios se puede evidenciar la presencia de una serie de limitantes e insuficiencias, lo que sugiere que los resultados arrojados por las modelaciones y los mapas, no presentan un nivel de precisión y confiabilidad suficiente que permita una acertada toma de decisiones para la reducción de la vulnerabilidad en este sector de la ciudad de Holguín.

Esto evidencia que los organismos de la Defensa Civil están desprovistos de una herramienta de trabajo efectiva y válida, que se ajuste a las condiciones actuales que presenta el cauce del río, aspecto que impide o limita su desempeño a la hora de establecer protocolos de actuación en posibles situaciones de peligro. Además el desconocimiento de la ubicación y delimitación exacta de las zonas de riesgo de la ciudad, limita la labor de Planificación Física en la asignación de terrenos para la construcción de viviendas u otras obras sociales.

De este modo las valoraciones teóricas realizadas hasta este momento y los resultados de un diagnóstico fáctico, posibilitan precisar la manifestación de la contradicción existente entre: la necesidad de disponer de mapas como herramienta eficaz para la

zonificación del riesgo ante inundaciones y el deficiente estado actual que presentan los mapas modelados en el río Jigüe de la ciudad de Holguín, lo cual repercute negativamente a la hora de enfrentar exitosamente los embates de estos fenómenos naturales.

Por las razones antes mencionadas se identifica el siguiente **problema de investigación**: La necesidad de realizar un modelo matemático más preciso que refleje las condiciones actuales del cauce y permita obtener mapas de riesgo confiables para la reducción de vulnerabilidad ante inundaciones en la cuenca del río Jigüe.

Como **objeto de la investigación** se asume: Estudios para reducción de riesgo y vulnerabilidad ante inundaciones fluviales.

El **campo de acción de la investigación**: Modelaciones matemáticas de fenómenos hidráulicos para la obtención de mapas de riesgo ante inundaciones fluviales.

De esta forma se define como **objetivo general**: Realizar la modelación matemática de un tramo del río Jigüe de la ciudad de Holguín para la obtención de los mapas de riesgo ante inundaciones fluviales.

Como **objetivos específicos** se definieron:

1. Caracterizar la evolución histórica del uso de modelos matemáticos en la simulación de fenómenos hidráulicos.
2. Sistematizar los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la modelación hidráulica de ríos en zonas urbanas.
3. Diagnosticar las insuficiencias de las modelaciones hidráulicas para la obtención de mapas de riesgo en el río Jigüe de la ciudad de Holguín.
4. Modelar numéricamente los fenómenos hidráulicos del río Jigüe para obtener los mapas de riesgo con diferentes probabilidades de diseño.
5. Identificar en los mapas de riesgo los patrones de vulnerabilidad que permita definir los criterios necesarios para una acertada toma de decisiones ante las inundaciones.

Para orientar el proceso investigativo se plantea la siguiente **hipótesis de trabajo**: Si se modela matemáticamente las condiciones actuales del cauce del río Jigüe se podrán obtener mapas de riesgo más confiables y así reducir la vulnerabilidad a las inundaciones en este río de la ciudad de Holguín.

Como **preguntas científicas**:

1. ¿Qué aspectos caracterizan la evolución histórica del uso de modelos matemáticos en la simulación de fenómenos hidráulicos?
2. ¿Qué fundamentos teóricos y metodológicos sustentan la modelación hidráulica de ríos en zonas urbanas?
3. ¿Cómo diagnosticar las insuficiencias de las modelaciones hidráulicas para la obtención de mapas de riesgo en el río Jigüe de la ciudad de Holguín?
4. ¿Cómo modelar numéricamente los fenómenos hidráulicos del río Jigüe para obtener los mapas de riesgo con diferentes probabilidades de diseño?
5. ¿Cómo identificar en los mapas de riesgo los patrones de vulnerabilidad que permita definir los criterios necesarios para una acertada toma de decisiones ante las inundaciones?

Se definieron las siguientes **tareas** para el cumplimiento de los objetivos:

1. Caracterización de la evolución histórica del uso de modelos matemáticos en la simulación de fenómenos hidráulicos.
2. Sistematización de los fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la modelación hidráulica de ríos en zonas urbanas.
3. Diagnóstico de las insuficiencias de las modelaciones hidráulicas para la obtención de mapas de riesgo en el río Jigüe de la ciudad de Holguín.
4. Modelación numérica de los fenómenos hidráulicos del río Jigüe para la obtención de los mapas de riesgo con diferentes probabilidades de diseño.
5. Identificación en los mapas de riesgo de los patrones de vulnerabilidad que permita definir los criterios necesarios para una acertada toma de decisiones ante las inundaciones.

Métodos fundamentales utilizados en la investigación:

Métodos teóricos:

- **Histórico – lógico:** Este método fue considerado para la determinación de los antecedentes históricos relativos al uso de las modelaciones matemáticas para la reducción de riesgos y vulnerabilidades ante inundaciones fluviales, en el contexto internacional, nacional y local.
- **Análisis – síntesis:** Se utilizó a todo lo largo del proceso investigativo, permitiendo cumplimentar las tareas sugeridas por la lógica de la investigación.
- **Inducción – deducción:** Resultó de utilidad para, a partir del estudio de diferentes casos particulares, llegar a establecer aspectos que son generales, que constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas. Se aplicará para la evaluación de los diferentes criterios que pueden llegar a definir en nivel de exactitud o precisión q se requiere para lograr una correcta modelación hidráulica.
- **Modelación:** Resultó de utilidad para la modelación hidráulica del Río Jigüe para la obtención de los mapas de vulnerabilidad ante inundaciones.

Métodos empíricos:

- **Observación:** Se utilizó en la inspección visual realizada a todo el tramo del río, contribuyendo en la realización del diagnóstico de la situación actual que presenta el mismo.
- **Entrevistas:** Se entrevistaron vecinos de la comunidad que residen en las márgenes del río.
- **Análisis documental:** Resultó de ayuda en la recopilación de información de artículos, proyectos, estudios de riesgo y vulnerabilidad realizados hasta la actualidad.
- **Consulta a expertos:** Fue de utilidad para el trabajo con los Software y la modelación, así como para la comprensión de conceptos y aspectos teóricos de la hidráulica.

Como **aporte** de esta investigación se tendrá: la obtención mediante modelos matemáticos más precisos, de los mapas de vulnerabilidad ante inundaciones para el tramo del río Jigüe, así como recomendaciones para favorecer la toma de decisiones en la reducción de riesgos.

La **novedad científica** de la investigación: La modelación hidráulica con que se obtendrán los mapas de vulnerabilidad ante inundaciones para el tramo de estudio del río Jigüe, considera las características actuales del cauce, la existencia de obras de fábrica y los elementos típicos de una cuenca en zonas urbanas.

La **actualidad del tema de investigación** radica en que la modelación hidráulica del río Jigüe se presenta como resultado de investigaciones realizadas en el proyecto de intercambio entre el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” y la Facultad de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Técnica de Magdeburgo-Stendal, en Alemania.

Estructura del trabajo de diploma

La investigación está concebida en una introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

En el primer capítulo se encuentran los aspectos referentes al análisis histórico realizado acerca uso de los modelos matemáticos de simulación hidráulica en la elaboración de mapas de zonificación de riesgos y su papel en la reducción de la vulnerabilidad ante inundaciones fluviales, también se hará énfasis en los fundamentos teóricos que caracterizan estos estudios y el diagnóstico de los modelos realizados anteriormente en el Río Jigüe.

En el segundo capítulo se desarrolla todo el proceso de modelado del cauce del río para la obtención de los mapas de riesgo, además se hará un análisis de los resultados obtenidos y se propondrán soluciones.

CAPÍTULO – I

ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DEL USO DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGOS ANTE INUNDACIONES. ESTUDIOS EN EL RÍO JIGÜE

En este capítulo se abordan los contenidos referentes a los modelos matemáticos de simulación hidráulica y su empleo como herramienta para la gestión del riesgo ante inundaciones. Se analizan las bases teóricas y los fundamentos metodológicos que caracterizan los modelos hidráulicos, y como se han aplicado hasta la actualidad. Se presenta la secuencia de trabajo a emplear para realizar la modelación así como las ventajas de los software seleccionados. Por último se diagnostican las insuficiencias presentes en los modelos realizados en el río Jigüe que condicionan la veracidad y confiabilidad de esta herramienta.

1.1. Antecedentes históricos relativos al uso de las modelaciones matemáticas para la reducción de riesgos y vulnerabilidades ante inundaciones fluviales

Desde la antigüedad el hombre ha sido víctima de las inundaciones debido a intensas lluvias, por lo que se ha visto en la obligación de estudiar las causas que las provocan y así tomar medidas de precaución para prevenir o reducir al mínimo sus efectos adversos. En los primeros tiempos, como es lógico, estos estudios tenían bases puramente empíricas, eran desarrollados con métodos manuales, y aunque eran funcionales en la mayoría de los casos, no arrojaban resultados muy confiables.

Con el paso de los años se descubren las leyes y teorías físico-matemáticas fundamentales, sin embargo, los limitados recursos de computación, las tecnologías asociadas a estos y la falta de datos a escala espacial, impedían elaborar modelos de simulación con la suficiente precisión y exactitud para confiar en ellos. A partir del surgimiento y desarrollo de las nuevas tecnologías, se logran avances que permitieron no sólo optimizar los cálculos en función del tiempo, sino también en la precisión de los resultados obtenidos.

Abbott [5] describe la evolución de la modelación matemática dividiendo su historia sobre la base de generaciones de modelos. La primera generación, en los años 50, consistió simplemente en utilizar primitivos ordenadores o calculadoras programables para la resolución de ecuaciones matemáticas. La segunda generación, en los años 60, fueron modelos numéricos que se construían enteramente, del principio al fin, para un problema concreto.

La tercera generación supuso la creación de esquemas numéricos básicos, cada uno para un tipo de problema que podían luego adaptarse con relativa facilidad para un estudio concreto de un río o un área determinada, es decir, para desarrollar un modelo a partir de unas herramientas existentes. Con esta tercera generación, que se prolongó hasta mediados de los 80, la modelación matemática se convirtió en una herramienta práctica que podía ser adquirida o construida por las principales empresas consultoras. Un inconveniente de los modelos de esta generación era la complejidad de su uso, por lo que el productor y el usuario generalmente debían ser el mismo, siendo tan solo los resultados los que eran transferidos al cliente.

La cuarta generación aconteció en los años 90 gracias a la generalización de los ordenadores personales, cada vez más económicos y potentes, y popularizó el uso de modelos matemáticos en el campo de la hidráulica. Esta generación permitió la aparición de una serie de paquetes informáticos (como el HEC-RAS), o sistemas de modelación, económicos y de uso sencillo y amigable, de manera que un usuario distinto del desarrollador puede utilizarlos y crear sus propios modelos para problemas relativamente estándares. Los modelos de la cuarta generación, que son los que mayoritariamente se utilizan actualmente, requieren sin embargo personas con suficiente criterio y conocimientos en hidráulica para asegurar que los datos han estado utilizados de manera correcta y para una buena interpretación de los resultados.

La quinta generación, todavía en sus inicios, sería la inclusión de los modelos hidráulicos dentro de sistemas informáticos más amplios junto con otros modelos complementarios (meteorológicos, hidrológicos etc.), con actualizaciones y adquisición de datos automatizados (a través de sensores colocados en sitios estratégicos, imágenes vía satélite, sistemas de información geográfica y otras bases de datos). La cuarta

generación de modelos, y la incipiente quinta generación, han comprobado la existencia de unas herramientas relativamente sencillas de utilizar. Algunas se han popularizado en gran manera y se están convirtiendo en estándares a la hora de estudiar problemas hidráulicos concretos como las inundaciones fluviales, etc.

Sin embargo, esta evolución de los modelos no hubiera sido posible sin el desarrollo de manera simultánea de otras tecnologías de la información, cuyos resultados fueron capaces de complementar cada vez mejor los nuevos modelos, ejemplo de esto son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos tuvieron su primera aparición en 1962 en Canadá, y aunque inicialmente fue utilizado para almacenar datos sobre el uso de suelos, en la actualidad son sistemas de información capaces de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada [6]. Estas funciones al integrarlas con los modelos le brindaron la posibilidad al usuario de representar y visualizar los resultados obtenidos de una manera muy detallada.

Los sistemas de detección con el empleo de radares, las imágenes satelitales y los sensores remotos fueron otras de las técnicas modernas empleadas por los países desarrollados en la década del 90, donde se obtienen resultados muy importantes en la representación y zonificación de la amenaza usando imágenes secuenciales. Como ejemplo de inundaciones que han servido como base para estos estudios y métodos están: Bangladesh, 1988; Francia, 1994; Yemen, 1997; Este de África, 1997; Vietnam, 1998; Río Elbe en Alemania, 2001 y 2002; Praga, 2002; etc. [7].

Así, la continua evolución en el campo de la informática va revolucionando el enfoque y las técnicas de estudio de la hidrología y la hidráulica, al surgir y perfeccionarse múltiples métodos, software y herramientas informáticas para la modelación y representación de la información tanto temporal como espacial. De esta manera comienza a emplearse mundialmente la modelación matemática como parte integral de la gestión de inundaciones, al emplear modelos tanto para la planeación, el diseño y la predicción. La misma constituye hoy en día la base fundamental de las tecnologías integradas, que dan respuesta a los problemas de la gestión de los recursos hidráulicos y la prevención de inundaciones provocadas por intensas lluvias.

“La modelación matemática es una de las manifestaciones de la revolución científico-técnica contemporánea ampliamente generalizada en países desarrollados. El desarrollo científico-técnico actual permite el empleo de tecnologías y software de avanzada en el cual la modelación ocupa un lugar destacado como herramienta para el análisis y operación de los recursos hídricos, pasándose ya a la etapa de introducción y generalización de la misma en las empresas cubanas, por lo que se hace imprescindible ampliar la aplicación de estos modelos en nuestro país.” [8].

1.2. Modelaciones matemáticas de fenómenos hidráulicos. Su conceptualización

Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente, sólo se puede realizar parcialmente. Uno de los instrumentos más eficaces de que se dispone para tratar de comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con las estructuras es mediante los modelos matemáticos. Estos son una representación simplificada de un sistema, cuya elaboración implica la selección y cuantificación de las variables necesarias para representarlo con el nivel de detalle requerido.

Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones, en verdad deformaciones, de la realidad. La hidráulica tiene la gran ventaja de poder representar físicamente, a escala, la mayor parte de sus modelos, y sus fórmulas son modelos creados para una realidad muy simplificada y esquematizada [9] .

Cuando se planifica una investigación a través de un modelo hidráulico, se busca reproducir del mejor y más completo modo posible las condiciones que se encuentran en la naturaleza, pero esto no siempre es posible. Un río es demasiado complejo y nunca puede lograrse en un modelo una reproducción total y perfecta de un fenómeno que ocurra en él, por ello que se tiene que imaginar un río mucho más simplificado que el que existe realmente. En ningún modelo se puede reproducir las variaciones instantáneas del caudal líquido y del caudal sólido, de la sección transversal, de la pendiente y de todas

las características hidráulicas. En consecuencia, se modela un río ideal, que es el que se estudia en un modelo matemático [9]. Si bien es cierto que las simplificaciones son inevitables, debemos ser plenamente conscientes de ellas para poder interpretar correctamente los resultados obtenidos en cualquier modelo.

1.2.1 Caracterización de los modelos matemáticos de simulación hidráulica

Los modelos matemáticos computacionales proveen una estructura para integrar la teoría con los análisis y experimentos. En el caso de los modelos hidráulicos e hidrológicos estos sistemas son altamente complejos, sobre todo por la diversidad de subsistemas físicos que integran. Según Garrido [10] los modelos matemáticos de simulación hidráulica más usados para la modelación de inundaciones pueden clasificarse como modelos hidrodinámicos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D). Estos son empleados de acuerdo a la disponibilidad de datos de la zona en estudio, así como sus características geomorfológicas.

Modelos unidimensionales

Los modelos unidimensionales son un método válido para cálculos donde la evolución temporal no sea importante y el flujo sea unidimensional, o sea, cuando existe una dirección del flujo que prevalece sobre las demás. Se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero de gran utilidad, son capaces de simular cambios de régimen crítico a subcrítico, cauces con geometrías difíciles y llanuras de inundación. También son capaces de calcular el movimiento del agua a través de obras especiales como puentes, tuberías, presas, etc. [11].

Las soluciones de este tipo de modelos están basadas en las ecuaciones de Saint-Venant (epígrafe 1.2.4) deducidas por Barré de Saint Venant en 1871, que describen tanto el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable [12]. Los modelos matemáticos unidimensionales son los modelos más fáciles con los que es posible simular el movimiento del agua en un cauce natural, ya que en el sistema de ecuaciones las incógnitas a resolver y los datos que necesita para modelar el movimiento

unidimensional son menores que los que se requiere para modelar los caudales en bidimensionales.

Esto se debe a que las ecuaciones diferenciales utilizadas para resolver el caso sólo consideran los datos topográficos e hidráulicos medidos en cada una de las secciones transversales a la dirección principal del flujo. Pese a esto, los modelos matemáticos unidimensionales brindan una esquematización más detallada de la topografía y de la hidráulica que los modelos de flujos bidimensionales.

Los modelos unidimensionales de régimen permanente gradualmente variado trajeron como mejora la facilidad de usar todas las secciones del río, es decir considerar los cauces como no prismáticos, con movimiento no uniforme. De estos modelos, el llamado HEC-2 y posteriormente HEC-RAS, se ha convertido virtualmente en “universal” en esta clase de aplicaciones [8].

Modelos bidimensionales

Cuando estamos en presencia de varias direcciones de flujo predominante resulta conveniente la utilización de este tipo de modelos, como por ejemplo en confluencias de ríos, flujos alrededor de estructuras, cauces compuestos, curvas, desbordamiento de cauces etc., donde sea necesario un modelo más complejo y completo. Pero este tipo de modelos sin embargo tienen la desventaja de requerir un mayor tiempo de implementación, una alta demanda de datos y tiempo computacional.

En los modelos hidrodinámicos 2D las ecuaciones de conservación de la masa y movimiento son expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución. Plantea además hipótesis como: las ondas del caudal que se originan en la superficie varían gradualmente, las pérdidas de carga por rozamiento del flujo transitorio no varían sustancialmente de las pérdidas en flujo estacionario, y la pendiente media del fondo del cauce al ser pequeña se puede promediar. En lenguaje matemático, son ecuaciones en derivadas parciales y pueden resolverse usando el método de los elementos finitos [12].

Una solución intermedia entre la modelación 1D y 2D son los modelos cuasi bidimensionales. En este método, las llanuras de inundación son modeladas como ramales de río separados y conectadas al cauce principal por medio de vertederos o estructuras de desbordamiento. Esto permite al flujo de agua desbordar sobre la planicie de inundación cuando el nivel del agua excede los bancos o diques del río [13]. Aunque muchos estudios usando modelos 1D/2D se han aplicado exitosamente para modelar crecidas, hay poca información sobre confiabilidad y precisión de los resultados del modelo.

Ventajas de los modelos

Según Álvarez [8], al analizar las ventajas de los modelos vemos que:

- Permite a los investigadores la organización del conocimiento y las observaciones sobre el sistema, así como las posibles deducciones lógicas que se puedan tener de esta organización.
- Proporcionan un marco para contrastar el sistema y sus posibles modificaciones.
- Proporciona una perspectiva sobre detalles y aspectos relevantes.
- Es posible una mayor y mejor manipulación que con el propio sistema.
- Con un modelo matemático se describe un problema de forma más concisa que, por ejemplo, con una descripción verbal.
- Permite controlar mejor las fuentes de variación que lo que permitiría el estudio directo del sistema.
- Generalmente son menos costosos que experimentar con el sistema.
- Los mismos brindan una mejor comprensión de los procesos simultáneos interrelacionados y sus influencias.
- Dirigen diferentes disciplinas hacia un mismo objetivo.
- Facilitan el análisis y comparación de muchas variantes que surgen en el desarrollo de la investigación.
- Logran una formulación concisa del problema.

Obviamente no todos son ventajas y hay algunas reservas respecto al proceso de modelización. Las desventajas que presentan las modelaciones matemáticas es que se asumen en algunos casos valores aproximados por lo que los resultados no son 100%

exactos. También si se quiere aumentar la complejidad del modelo, este requiere de un mayor costo de tiempo, y a veces se precisa de computadoras que sean muy potentes para realizar las modelaciones deseadas. Así, no hay garantía de que a pesar del esfuerzo y tiempo dedicado a la modelización se produzcan resultados útiles y satisfactorios; por razones económicas de escasez de recursos o por falta de ingenio, podrían no alcanzarse las metas deseadas.

Simulación computacional de los modelos matemáticos

Si bien la función de estos modelos está en describir el comportamiento de un sistema hidráulico o una red de distribución hídrica, es cierto que el proceso no culmina ahí. En este punto es donde se hace necesaria la utilización de una herramienta o software informático que sea capaz de simular, calcular y a la vez analizar los parámetros que caracterizan los elementos del modelo en cuestión.

Con los términos modelización y simulación se designa al conjunto de actividades asociadas con la construcción de modelos de sistemas del mundo real y su simulación en una computadora. La modelización relaciona los sistemas reales y los modelos, y estudia la validez de éstos, es decir, la forma en que un modelo representa un sistema real. La simulación relaciona modelos y computadoras, y se refiere al proceso de imitación de aspectos importantes del comportamiento del sistema en tiempo real, comprimido o expandido, mediante la construcción y experimentación con el modelo del sistema [8]. En la Figura 1.1 se representa la relación existente entre el proceso de modelización y simulación.

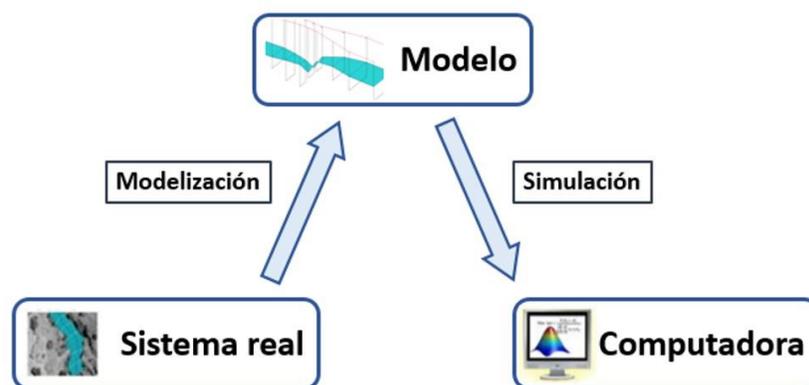


Figura 1.1. Esquemización del proceso de modelización-simulación.

En la Tabla 1.1 se resumen un conjunto de software informáticos de simulación hidráulica, y sus funciones según el tipo de modelo matemático a emplear. Según Garrido [12] estos son algunos de los más empleados, pero no son los únicos, en el Anexo 1 se muestra una selección aun mayor de modelos de simulación hidráulica que pueden emplearse en este tipo de investigaciones.

Tabla 1.1. Modelos de simulación hidráulica. [12]

Tipo de modelo	Software	Acceso	Desarrollado por	Funciones
1D	Mike 11	Comercial	Instituto Hidráulico de Delft (DHI)	Modelación unidimensional de flujos en lámina libre y régimen variable. El modelo resuelve las ecuaciones de Saint Venant mediante diferencias finitas y el esquema implícito.
1D	HEC-RAS	Libre	Cuerpo de Ingenieros de la Armada de E.U (HEC)	Realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.
1D	Sobek-CF	Comercial	WL/Delft Hydraulics	Modelo hidráulico fluvial mono y bidimensional (malla con celdas cuadradas) que incluye módulos para hidrología y calidad del agua
1D/2D	InfoworksRS	Comercial	Innovyze	Modelo hidráulico fluvial mono y bidimensional que incluye módulos para hidrología, transporte de sedimentos (inclusive la evolución morfológica del cauce) y calidad del agua
2D	Mike 21	Comercial	Instituto Hidráulico de Delft(DHI)	Modelo hidráulico bidimensional para la modelación del transporte de sedimentos y de la evolución morfológica de los cauces fluviales, mediante mallas curvilíneas
2D	SMS	Comercial	Boss International	Entorno gráfico que permite la modelación bidimensional del flujo y calidad de sistemas hidrodinámicos, en transporte de sedimentos y la deposición en puentes.
1D/2D	FLO-2D	Comercial	FLO-2D Software	Modelo mono y bidimensional para la simulación de la propagación de flujos detríticos

En esta investigación se va a optar por un modelo unidimensional, por las características del cauce del río a estudiar y la disponibilidad de información y datos, además esta

elección supone un ahorro de tiempo considerable en la simulación. En cuanto a la selección del modelo a utilizar, la potencia en su algoritmo matemático es un tema de gran importancia, existen factores como la disponibilidad (comercial o libre), factibilidad para ser implementado en zonas determinadas, posible vinculación con otros programas para el pre y pos-procesamiento de la información, además de otras potencialidades generales que condicionan la preferencia del especialista a la hora de decidir el empleo de un modelo determinado. Por estos motivos el software seleccionado para la realización de la simulación es el HEC-RAS.

1.2.2 Software empleados para la modelación hidráulica

Como se puede evidenciar, en el proceso de modelación intervienen tres herramientas informáticas fundamentales, ellas son: el SIG, ArcGIS en este caso, el modelo matemático HEC-RAS y la extensión HEC-GeoRAS como enlace entre ambos. En este epígrafe se hará una explicación más detallada sobre el funcionamiento de estos tres software.

HEC-RAS

Este software ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU [14]. Es una evolución del programa predecesor HEC-2, pues mejora el modo de interactuar con el usuario al permitirle un mayor dominio del programa. El HEC-RAS (Figura 1.2) está específicamente desarrollado para el cálculo de modelos hidráulicos en cauces naturales, con las diferencias que existen con respecto al cálculo en secciones prismáticas o bien definidas [11]. Es uno de los programas más utilizados que goza con gran prestigio internacional para la modelación de estos tipos de problemas, por su potente algoritmo de cálculo y su calidad gráfica para la representación de los resultados.

El modelo numérico del HEC-RAS simula el flujo unidimensional permanente en canales abiertos. Puede además calcular el perfil de agua para régimen permanente gradualmente variado y simular flujo subcrítico y supercrítico empleando las ecuaciones de Saint Venant aplicadas a una dimensión. Para esto resuelve la ecuación de la energía para una dimensión, y puntualmente, también soluciona la ecuación de cantidad de

movimiento cuando el perfil de agua es rápidamente variado (resaltos hidráulicos, confluencias y obras de fábrica) [11]. El programa realiza el cálculo hidráulico de estructuras tales como puentes, alcantarillas, vertederos, y demás obstrucciones presentes en el llano de la inundación.

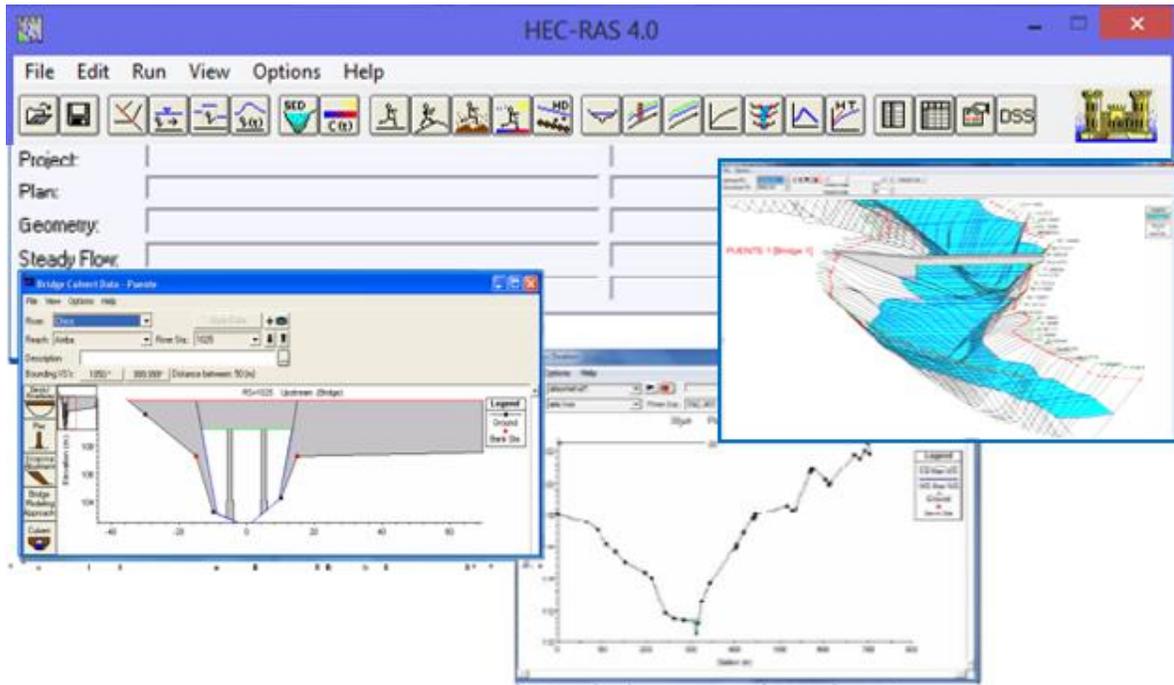


Figura 1.2. Interfaz gráfica de la herramienta HEC-RAS

El software es muy completo ya que permite no solo obtener el perfil de la lámina de agua en un tramo de cauce, sino además interpretar los resultados de las simulaciones del modelo, calcular las situaciones más frecuentes que se presentan en la realidad, e incluso puede ser integrando con otras tecnologías como los sistemas CAD y SIG para el procesamiento de los datos y representación gráfica de los resultados [15]. Actualmente existe una amplia tendencia a interactuar los resultados de HEC-RAS con los SIG (principalmente ArcGIS o ArcView) mediante la extensión HEC-Geo RAS.

En resumen estas son algunas de las ventajas de esta herramienta:

- Es un software que está avalado en el ámbito internacional y su uso se ha hecho extensivo al mundo entero.
- Es un modelo hidráulico potente, capaz de procesar perfiles subcríticos, supercríticos, y mixtos; y realiza cálculos del flujo permanente y no permanente.

- Es capaz de procesar una voluminosa información geométrica.
- Puede interactuar con otros modelos digitales de terreno (DEM o TIN) mediante un entorno GIS.
- Realiza un cálculo hidráulico de estructuras (puentes, alcantarillas).
- Permite la modelación para el caso de “agua clara” o con transporte de sólidos.
- Permite detallar con precisión los coeficientes de rugosidad en cada sección.
- Es relativamente sencillo y fácil de utilizar a pesar de que esta en idioma inglés.
- Es un programa en entorno Windows, por lo que se hace más fácil editar, modificar y visualizar la pantalla.
- Permite especificar las áreas inefectivas en las estructuras (puentes, alcantarillas, etc.)
- Si se trabaja con régimen rápidamente variable dará resultados más confiables que si se utilizara un modelo bidimensional.
- Presenta opciones para el cálculo de los flujos laterales.
- Crea archivos para ver los resultados en forma gráfica.
- Es un programa de libre adquisición.

ArcGIS

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Posibilita cargar con facilidad datos espaciales y tabulares para ser mostrados en forma de mapas, tablas y gráficos, también provee las herramientas necesarias para consultar y analizar los datos y presentar los resultados como mapas con calidad de presentación. Algunos ejemplos de lo que se puede obtener es cartografía temática, creación y edición de datos, análisis espacial, geocodificación de direcciones [16].

ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. ArcMap (Figura 1.3), es el componente primario del software y es utilizado

para todas las tareas que involucren cartografía digital en forma directa, su análisis y edición. Se utiliza para desplegar mapas y efectuar consultas sobre ellos, crear mapas imprimibles de alta calidad, desarrollar aplicaciones personalizadas, y desarrollar una gran variedad de operaciones basadas en álgebra de mapas [17].

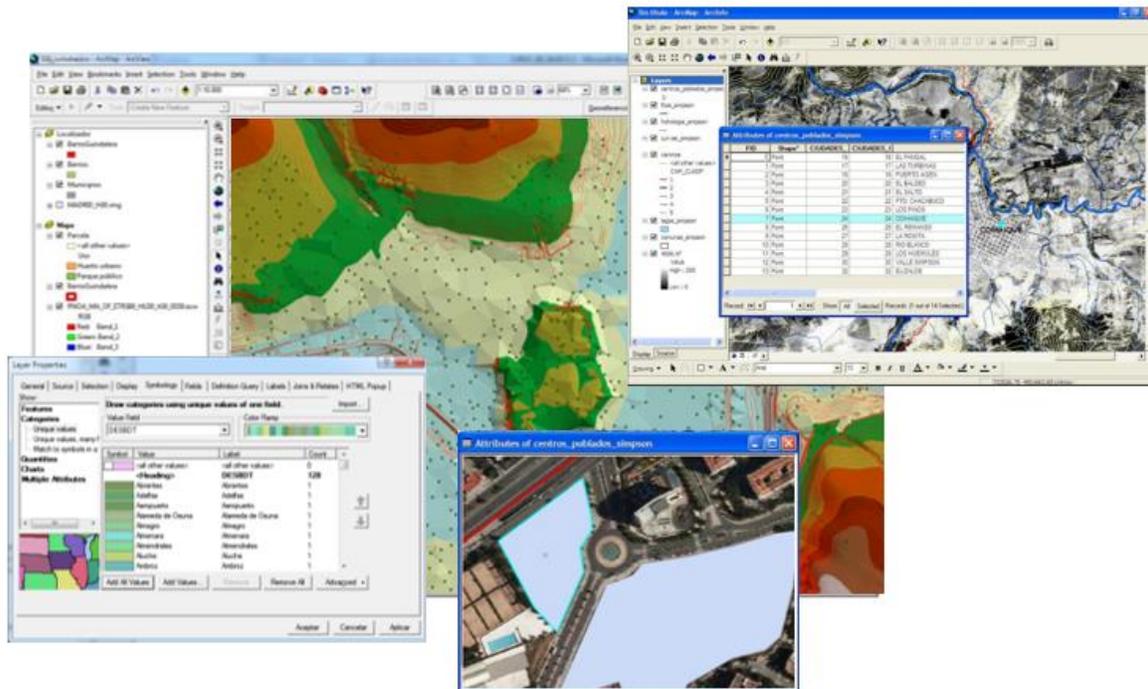


Figura 1.3 Interfaz gráfica de la herramienta ArcMap. ArcGIS

HEC-GeoRAS

El HEC-GeoRAS (Figura 1.4) es una extensión para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de ingenieros de la Armada de los Estados Unidos y el ESRI [18]. Consiste básicamente en un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para procesar datos georeferenciados, las cuales proporcionan información de entrada a los modelos y permiten visualizar el resultado de las corridas a través del sistema de información geográfica.

La extensión permite la preparación desde el ArcGIS de datos geométricos del terreno incluyendo el cauce del río, secciones transversales y posteriormente crea un archivo para su importación en HEC-RAS, a esta parte se le conoce como preproceso. En la fase de post-proceso, los resultados de la simulación hidráulica son exportados desde HEC-

RAS e importados al SIG mediante HEC-GeoRAS. De esta manera pueden ser procesados para crear y visualizar las zonas de inundación y de obtener así mapas de riesgo.[19]

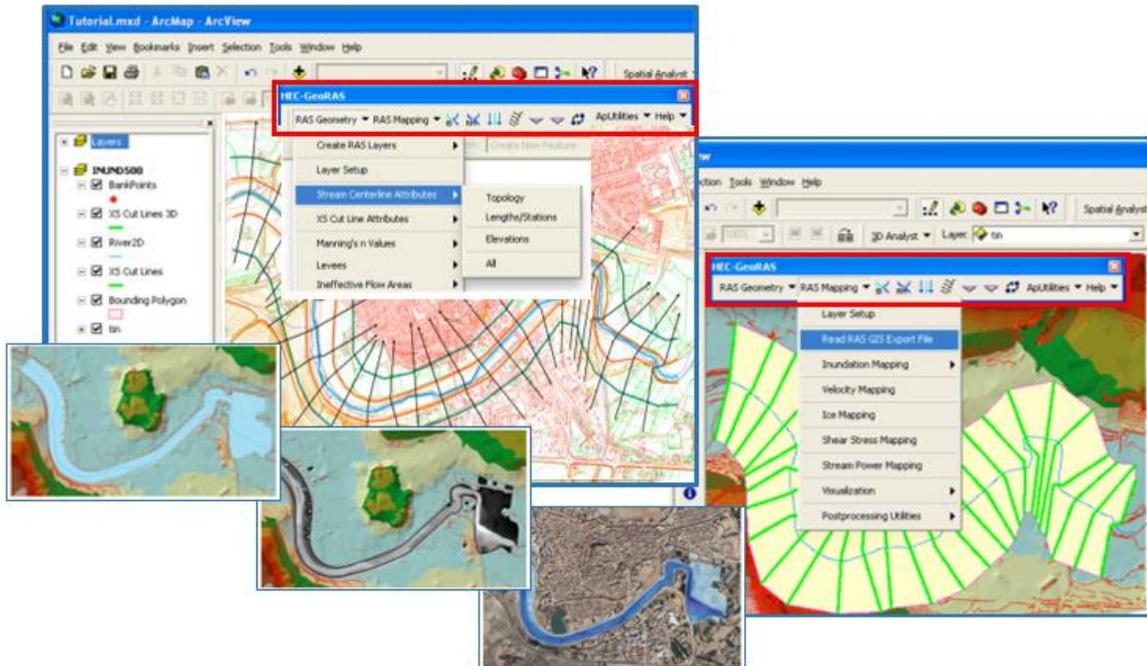


Figura 1.4. Interfaz gráfica de la extensión HEC-GeoRAS.

1.2.3 Secuencia de trabajo a utilizar

Una vez conocida la función de cada software dentro del proceso de modelización, resulta mucho más fácil comprender la secuencia de trabajo que se plantea en esta investigación como metodología fundamental a seguir para la modelación hidráulica. Es válido destacar que existe una amplia información sobre la implementación, a nivel internacional y nacional, de esta misma secuencia en investigaciones similares, donde se han obtenido resultados satisfactorios con la combinación de estas tres herramientas. En la Figura 1.5 se muestra un diagrama donde se explica la metodología a seguir.

Preproceso A: La etapa denominada como preproceso A comienza con el Software AutoCAD, que aunque no se señala en el epígrafe anterior como una de las herramientas informáticas claves en este tipo de procesos, será utilizada con la función de preparar la cartografía de entrada para la elaboración del MDT. Su posible uso está condicionado

por las características que presenten los ficheros cartográficos con que se cuente para comenzar a trabajar.

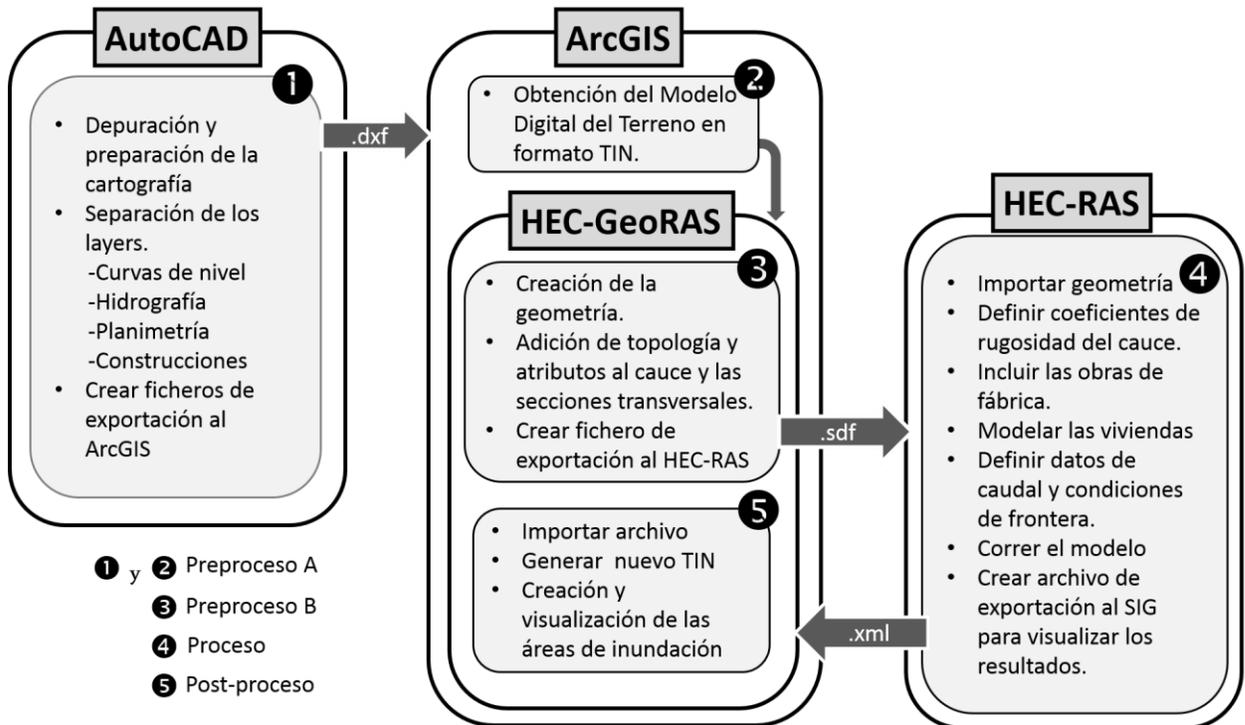


Figura 1.5. Secuencia de trabajo para la modelación hidráulica.

Primeramente debe revisarse que no existan curvas de nivel sin cota de elevación o que la misma tenga como valor cero, esto puede introducir errores cuando se genere el MDT. Luego debe separarse en ficheros cada uno de los layers o capas de información con que se cuente en el mapa (altimetría, hidrografía, construcciones, planimetría, etc.) y posteriormente guardar esos archivos en formato “.dxf” para exportarlos al ArcGIS. Precisamente en este software continúa esta primera etapa del preproceso A, donde una vez importada la capa que contiene la información de las curvas de nivel, se genera el MDT en formato TIN. De este TIN se extraerán posteriormente los datos geométricos de las secciones transversales.

Se prefiere además que la cartografía se encuentre georeferenciada (coordenadas reales), lo que garantizaría en el proceso de visualización de datos, una mejor complementación de los diferentes mapas, además de su posibilidad de exportarlos a otras bases. Este primer preproceso resulta medular en la veracidad del trabajo al

constituir la base geométrica del cálculo hidráulico. La calidad de los resultados depende en gran medida de esta información base.

Preproceso B: en esta etapa se continúa en el software ArcGIS, pero se desarrolla utilizando las herramientas de la extensión HEC-GeoRAS una vez que la misma se haya activado en el SIG, es aquí donde se comienza a crear sobre el MDT la geometría de los elementos característicos del río. A manera de digitalizaciones, se comienza a editar primeramente el río, luego los límites del cauce, los límites de circulación del agua y las secciones transversales. Esta fase es muy importante pues la información geométrica que se utilizará en el cálculo hidráulico se derivará completamente de este proceso. Una vez digitalizados se les añaden los atributos, o sea, la componente de elevación mediante la integración con el MDT creado anteriormente, y se convierte así la información en capas en 3D. Luego se crea el fichero que se exportará al HEC-RAS en formato “.sdf”.

Proceso: ya en esta etapa se comienza el trabajo con el modelo para el cálculo hidráulico, o sea con el software HEC-RAS. Se comienza importando la geometría que fue creada en el preproceso, en algunos casos se requiere hacer una revisión para corregir posibles alteraciones sobre todo en las secciones transversales, producidas sobre todo por la combinación de tanta información que aunque se encuentra previamente georeferenciada , no siempre se ajusta lo más posible a la realidad.

Una vez que se tenga la geometría deseada se le introducen los valores de coeficiente de rugosidad al cauce, y se procede a modelar geoméricamente las obras de fábrica que se encuentren en el río, así como construcciones y demás elementos que obstruyen el flujo en el cauce. Posteriormente se le introducen los datos de caudales obtenidos de los estudios hidrológicos realizados con anterioridad, seguidos por las condiciones de frontera o contorno. Una vez completada la edición de los factores geoméricos e hidrológicos se procede a ejecutar el programa obteniendo los niveles de crecida. Esta información se guarda en un fichero de exportación en formato “.sdf” para la representación de las áreas inundadas en el ArcGIS.

Posproceso: para iniciar esta fase desde el ArcGIS se hace necesario nuevamente utilizar las herramientas del HEC-GeoRAS, primeramente para convertir el fichero

guardado en el HEC-RAS en formato “.sdf” a un nuevo formato “.xml” que le permitirá ser importado para la etapa de posproceso. Luego se genera un nuevo MDT con los datos geométricos de crecida que fueron exportados y posteriormente se visualizan las zonas de inundación para cada perfil, es decir, para cada caudal que se haya establecido en HEC-RAS. Además, se genera un grid de profundidad en cada punto de la llanura de inundación que podemos simbolizar con los intervalos que deseemos.

Si visualizamos las capas de planimetría y construcciones que fueron exportados desde el plano original, se podrá apreciar y delimitar con un nivel de exactitud bastante elevado las áreas específicas que se verán afectadas, incluso las viviendas y obras sociales que se encontrarán dentro de la mancha de inundación creada por el modelo. De esta manera se pueden clasificar las zonas de acuerdo al grado de vulnerabilidad que presenten según la magnitud del evento.

En el Capítulo 2 se desarrolla esta metodología aplicada a un ejemplo práctico en el Río Jigüe y se explica con un mayor nivel de detalle.

1.2.4 Bases teóricas del cálculo unidimensional

Los modelos hidráulicos o hidrodinámicos, hacen uso de las ecuaciones diferenciales parciales de flujo no permanente en canales, conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant, en sus formas completas o simplificadas. El flujo se calcula como una función del tiempo y del espacio a través del sistema. Estos modelos, sobre todo los que consideran la solución completa de las ecuaciones de Saint-Venant, tienen la capacidad de simular un amplio espectro de condiciones de flujo y diversas características del río [20]. La ecuación de la continuidad y la de cantidad de movimiento fueron desarrolladas por primera vez por el matemático e ingeniero francés Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant en 1871, partiendo de las siguientes hipótesis:

- Flujo unidimensional e incompresible, donde la velocidad y la profundidad solo varían a lo largo del eje de la conducción.
- Flujo gradualmente variado.
- El eje del canal es aproximadamente recto.
- La ecuación de Manning describe los fenómenos de resistencia.

- Distribución hidrostática de presiones.
- Aceleración vertical despreciable.
- Pendiente media del fondo suave y lecho de fondo fijo.

Ecuación de la continuidad

$$Q = V_{m1} \cdot A_1 = V_{m2} \cdot A_2$$

Donde:

V_{m1} : velocidad del agua en el tramo 1

V_{m2} : velocidad del agua en el tramo 2

A_1 : área total del tramo 1

A_2 : área total del tramo 2

Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\delta V}{\delta t} + V \frac{\delta V}{\delta x} + g \frac{\delta y}{\delta x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Otras ecuaciones utilizadas por el HEC-RAS

Ecuación de Bernoulli: Esta herramienta posibilita además el cálculo del perfil del agua para régimen subcrítico, supercrítico y mixto, el cálculo del perfil básico de la superficie del agua se determinan a partir de la ecuación de conservación de la energía o ecuación de Bernoulli (Figura 1.6).

$$y_2 + z_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

y_1, y_2 = Tirante en las secciones (m).

z_1, z_2 = Elevación con respecto a un nivel de referencia (m).

v_1, v_2 = Velocidad media en las secciones (m/s).

a_1, a_2 = Coeficiente de distribución de la velocidad o coeficiente de Coriolis.

h_e = Pérdidas de energía entre las dos secciones.

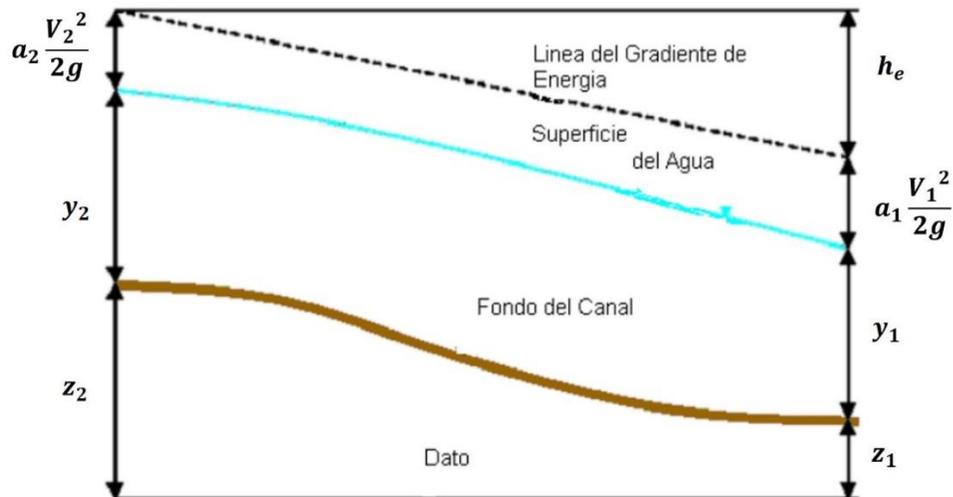


Figura 1.6. Representación de los términos de la ecuación de energía o Bernoulli

Ecuación para las pérdidas de energía: De acuerdo con la filosofía del modelo, el HEC-RAS para evaluar las pérdidas de energía, o sea, el último término de la ecuación anterior utiliza la ecuación siguiente:

$$h_e = LS_f + C \cdot \left(a_2 \frac{V_2^2}{2g} - a_1 \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

Donde:

L = longitud de la sección (m).

S_f = superficie de fricción entre dos secciones.

C = coeficiente de expansión o contracción.

V = velocidad (m/s).

α = coeficiente de corrección de la velocidad.

Donde se incluye las pérdidas por longitud, determinadas por el producto de la longitud ponderada entre dos secciones y la pendiente de energía. Mientras que el segundo

término de dicha función, son las pérdidas producidas por las contracciones o expansiones que se producen en el tramo y es el producto de un coeficiente por la diferencia de velocidad entre ambas secciones. La longitud utilizada habitualmente es la media ponderada entre las longitudes a la derecha, cauce principal, e izquierda de la sección. Esta longitud está dada por la función:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Donde:

L_{lob} : longitud en el valle de inundación izquierdo (m).

Q_{lob} : caudal en el valle de inundación izquierdo (m^3/s).

L_{ch} : longitud en el canal principal (m).

Q_{ch} : caudal en el cauce principal (m^3/s).

L_{rob} : longitud en el valle de inundación derecho (m).

Q_{rob} : caudal en el valle de inundación derecho (m^3/s).

Los gastos corresponden a los gastos de las diferentes partes en que son divididas las secciones

Ecuación de Manning: el modelo HEC-RAS divide la sección transversal del canal, en tres secciones: canal izquierdo, cauce principal y canal derecho. La determinación de los factores de conducción (K) de la sección transversal, requiere que el flujo se subdivide en unidades para el cual la velocidad esté distribuida uniformemente. En el modelo HEC-RAS se subdivide el flujo, en subsecciones, utilizando en la entrada de la sección transversal del canal, N valores de puntos de cambio según se aprecia en la Figura 1.7.

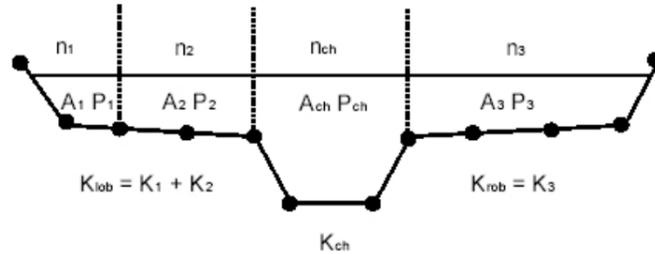


Figura 1.7. Método de la subdivisión K predeterminado por el modelo HEC-RAS.

El factor de conducción (K) de la sección de un canal se define como una medida de la capacidad de transporte al depender directamente del gasto. El factor de conducción es calculado dentro de cada subsección, aplicando la ecuación de Manning de la forma siguiente:

$$Q = K \cdot S_f^{1/2}$$

$$K = \frac{A \cdot R^{2/3}}{n}$$

Donde:

K = factor de conducción de la subsección.

n = coeficiente de rugosidad de Manning por subsección.

A = área del flujo por subsección (m²).

R = radio hidráulico por subsección (A/P).

El modelo HEC-RAS resume todas las K incrementadas en los canales laterales, al obtener un valor para el canal derecha y otro para el canal izquierdo. En el cauce principal normalmente se obtiene un solo elemento de K. El valor total en la sección transversal se obtiene por la suma de los tres valores de K (canal izquierdo, cauce principal y canal derecho), según se aprecia en la Figura 1.7.

1.3. Estudios de reducción de riesgos y vulnerabilidades ante inundaciones fluviales

Los estudios de los fenómenos relativos a las inundaciones son, en la actualidad, una herramienta eficaz para delimitar la capacidad de transporte hídrico que puede tener un

determinado río. Éstos se realizan para asegurarse de que las aguas quedarán a una determinada cota durante una lluvia estadística con un determinado periodo de retorno [21]. La prevención temprana de estos fenómenos atmosféricos y la predicción en tiempo de las áreas que se afectarán es un reto permanente que tiene el hombre.

A principios del año 2000, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Cultura y la Ciencia (UNESCO, por sus siglas en inglés) estableció un convenio de soporte financiero cuyo principal objetivo es el de fortalecer la capacidad en los países centroamericanos, en los campos del uso de la información técnica y científicas y el desarrollo de metodologías participativas, para la producción de información relacionada con la zonificación de amenazas y riesgos, la cual debe servir en la toma de decisiones para la reducción de los desastres [22].

En Cuba los sistemas de alerta temprana, la red de radares del Instituto de Meteorología y la organización de todo el pueblo bajo el mando de los Consejos de Defensa y de la Defensa Civil hacen que las pérdidas sean mucho menores que en otros países del área que no cuentan con esta organización. Para lograrlo, año tras año hay que invertir muchos recursos en la preservación de bienes y vidas.

“En el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la CUJAE se desarrolla una propuesta de integración de herramientas informáticas para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones rurales provocadas por intensas lluvias.” [10].

Gracias a este interés creciente de la comunidad nacional e internacional por desarrollar proyectos e investigaciones encaminadas a la reducción de los riesgos y las zonas vulnerables, así como la concientización en la importancia de la integración de las nuevas tecnologías de la información, la comunicación y las herramientas informáticas que están a nuestro alcance, hoy una amplia cantidad de investigadores desarrollan y amplían sus perspectivas en esta área, donde cada día se obtienen aún más resultados con un amplio impacto social, ambiental y económico en diferentes partes del mundo, incluyendo a Cuba.

1.3.1 Aplicación de los modelos matemáticos

Etxeberria y colaboradores [23] plantean una metodología para la creación de mapas de inundaciones mediante la integración de los SIG con modelos hidráulicos e hidrológicos, donde describen además un ejemplo práctico aplicado en el valle de Oiartzun de Gipuzkoa al Norte de España. El aspecto más notorio de esta metodología es la manera en que se integran estos modelos con los sistemas CAD, y el uso de fotogrametría aérea, para lograr aumentar el nivel de precisión a la hora de delinear las secciones transversales y en la representación final de las áreas de inundación.

Barillas y colaboradores [24] estudiaron las amenazas naturales en la cuenca del Río Salamá en Guatemala, con el objetivo de representar el grado de vulnerabilidad a la que se encuentra sometido el poblado de San Sebastián. Utilizan el HEC-RAS para el cálculo hidráulico, realizando dos modelos para dos escenarios probables: el cauce actual sin diques y otro escenario hipotético para conocer el comportamiento de la inundación si se construyeran diques de protección. Este es un método eficaz para comprobar desde el proceso de diseño la factibilidad de construir obras de protección para combatir las inundaciones.

Oleagordia y colaboradores [25] realizaron el estudio hidrológico-hidráulico del río Arlanzón a su paso por el Término Municipal de Burgos, España. El objetivo de este estudio era conocer el riesgo de inundación por las aguas de los ríos Arlanzón, Vena, Cardeñadizo y Ubiera. Para ello realizaron un estudio hidrológico de la cuenca del Arlanzón partiendo de los datos de precipitaciones, cartografía, secciones transversales levantadas en el campo, puentes, con esta información recopilada y contando con el apoyo de los sistemas informáticos (AutoCAD, ArcView, Hec-HMS y Hec-Ras) elaboraron la cartografía de ocupación de las avenidas para diferentes probabilidades de retorno. Esto les permitió clasificar y agrupar el territorio en zonas de bajo, medio y alto riesgo. Se señala además que la modelación de los puentes y alcantarillas presentes en el río influye considerablemente en los niveles de crecida obtenidos.

García y colaboradores [26] desarrollaron una investigación que se centra en el empleo combinado de datos de precipitación, modelos hidrológicos e hidráulicos, y técnicas SIG

para la estimación de caudales de avenidas y la delimitación de áreas inundables en el Sur de la Región de Murcia, con el fin de obtener datos espacialmente distribuidos en las áreas potenciales de inundación. En este caso usan la extensión ArcView para representar las zonas de riesgo usando el fichero exportado desde el modelo hidráulico en HEC-RAS, aunque los propios autores reflejan que uso de otro software como el SOBEK hubiera ofrecido un modelo aún mejor, al permitir la entrada de datos meteorológicos.

Peroso [27] realizó una investigación cuyo objetivo consistió en diseñar e implementar metodologías para cuantificar en términos monetarios el riesgo de inundación en planicies ribereñas, el caso de estudio es la llanura del río Coro ubicada en Venezuela. Emplea modelos de simulación hidrológica e hidráulica integrados a SIG, apoyados por herramientas de visualización de datos geográficos y modelos geoestadísticos. La representación espacial de la amenaza y riesgo de inundación apoyada en plataformas SIG, representa un aporte muy valioso, ya que ello muestra la variación de dicha amenaza en cada elemento, y por lo tanto, no todos requieren el mismo nivel de protección a la hora de plantear la medidas atenuantes; esto permite optimizar la gestión del riesgo de inundación en la zona y representa una de las tendencias bien definidas de la comunidad científica actual en el tema en cuestión.

En el contexto nacional también se han realizado estudios similares como es el caso de Expósito [28] donde se lleva a cabo la modelación hidráulica de un tramo de río en la cuenca Guantánamo-Guaso con la ayuda de SIG y HEC-RAS. En la investigación se logró determinar la respuesta hidráulica (cotas y profundidades del agua y áreas de inundación) de la cuenca para diferentes avenidas, sin embargo señala como limitante que el uso de planos a escala tan pequeña como la utilizada (1:50000) no son apropiados para la precisión que requiere los estudios hidráulicos de inundación ya que introducen errores de grandes magnitudes en ocasiones dependiendo de cuan pequeña sea la escala.

Rojas y León [29] modelan las inundaciones por intensas lluvias en la zona urbana de Camagüey. En este caso se hace referencia a un aspecto muy importante, pues se toma en cuenta la influencia de considerar las edificaciones existentes en las zonas de

inundación, y su repercusión. No obstante se evidencia un conocimiento insuficiente en cuanto a cómo modelar en el software escogido (HEC-RAS) esta y otras características típicas de un río en zonas urbanas.

Couto [30] realizó un estudio en un tramo del río Hatibonico también en Camagüey, donde se emplean los programas HEC RAS, SWMM y el IBER, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos como los perfiles de niveles de agua a lo largo del tramo de río seleccionado y las áreas de inundación. Los modelos comparados en este estudio, usan esquemas de cálculo distintos para la solución de las ecuaciones completas de Saint Venant, no obstante los resultados obtenidos en los limnigramas en la sección de salida no son muy diferentes. Se señala que aunque el modelo IBER aportó una mayor diversidad de resultados, característico de un software bidimensional, las ventajas que aporta el HEC-RAS como su integración con los SIG, tiempo de simulación pequeño, posibilidad de representar los saltos hidráulicos, y poca exigencia de datos, lo destacan como el más acorde de manera general para la simulación de este río.

Luis [31] realiza una estimación del riesgo de inundación en viviendas a partir de eventos máximos en la cuenca San Pedro, ciudad de Camagüey, donde se realiza una revisión bibliográfica sobre las metodologías existentes para determinar la amenaza de inundación. Un aspecto interesante es la posible aplicación del software HEC-FDA (Flood Damage Analysis). Este requiere de datos hidráulicos, tipo y valor de la infraestructura, además posee cinco categorías de daños que permiten estimar el daño anual esperado producido por inundaciones. Las opciones de medidas estructurales para reducir el impacto de las inundaciones está bien desarrollada, sin embargo, las versiones de este modelo ofrecidas de forma gratuita hasta la actualidad no posibilitan integrarlo con un SIG, por lo que su uso se vería limitado.

A manera de conclusión una vez analizada la amplia bibliografía existente sobre estudios similares se puede evidenciar una serie de semejanzas que pudieran ser definidas como tendencias a seguir en este tipo de investigaciones:

- Se plantea en la mayoría de las investigaciones analizadas un trabajo combinado entre los modelos Hidráulicos e Hidrológicos, mediante el uso de las herramientas HEC-RAS y HEC-HMS respectivamente.
- Se destaca como metodología predominante para la modelación hidráulica, el uso de ArcGIS, HEC-GeoRAS y HEC-RAS, aunque se considera también de manera amplia el empleo del ArcView en lugar de ArcGIS.
- Se evidencia un interés cada vez más creciente por ampliar los conocimientos necesarios en cuanto a las posibilidades que brindan los modelos para representar las construcciones presentes en la llanura de inundación, pues aunque todos plantean la importancia de considerarlas dentro del cálculo hidráulico, aún existe un alto nivel de incertidumbre en cuanto a las maneras y herramientas correctas para hacerlo.
- Una amplia mayoría refleja como verdadero aporte el análisis cualitativo o cuantitativo de la amenaza o riesgo que reflejan los mapas obtenidos y la necesidad de diseñar metodologías para una vez conocida la dimensión de la vulnerabilidad, poder desarrollar acciones para disminuirla o erradicarla.

1.4. Diagnóstico del estado actual de las modelaciones hidráulicas realizadas en el río Jigüe para la obtención de mapas de riesgo ante inundaciones fluviales.

En el año 2008 un equipo de trabajo compuesto por profesionales de Agenda 21, CITMA, Dirección Municipal de Planificación Física y Entidades Extranjeras, evaluaron la ciudad de Holguín de forma integrada a las relaciones entre el medio natural, el construido y la sociedad como componente del sistema urbano, y ha quedado plasmado en el informe Geo Holguín [3]. En el mismo se realiza una evaluación de los riesgos y la vulnerabilidad ante inundaciones, donde reflejan en un mapa temático las principales zonas afectadas por tales circunstancias (Figura 1.8).

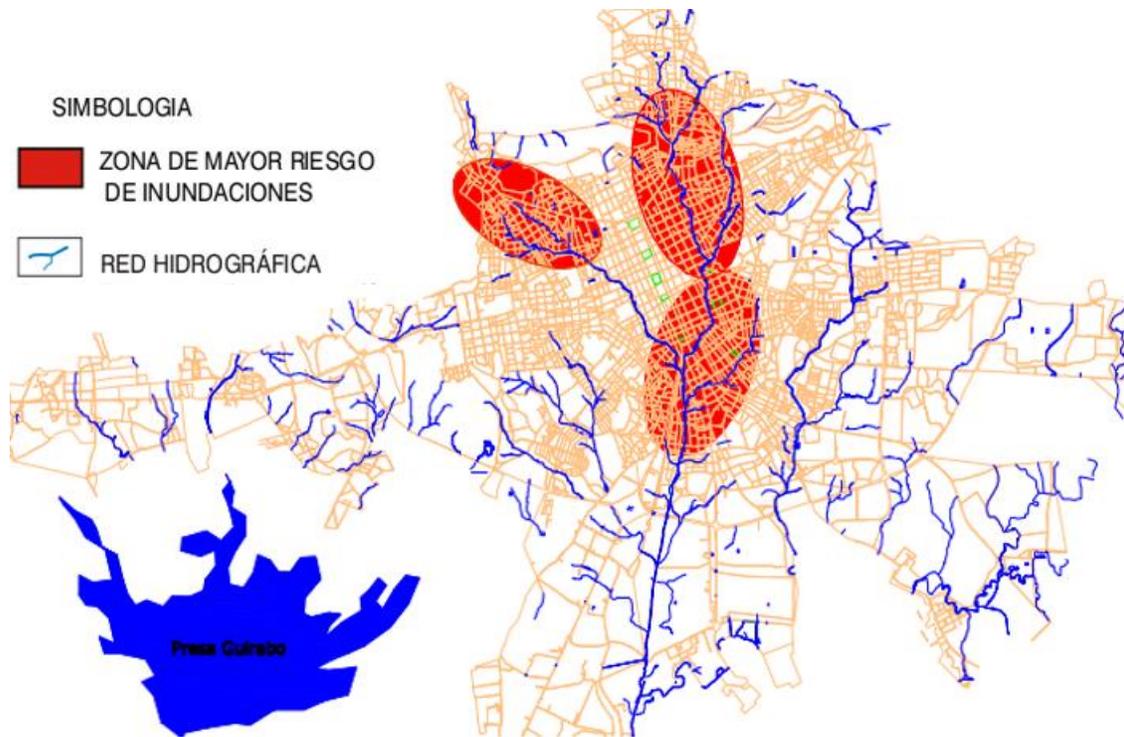


Figura 1.8. Mapa de riesgo por inundaciones de la ciudad de Holguín [3].

En ese mismo año la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín RAUDAL realiza un estudio [32] acerca del comportamiento de las inundaciones en la ciudad y elabora un nuevo mapa de riesgo, en esta ocasión reflejan no solo las zonas críticas, sino también la cantidad de viviendas y habitantes que son vulnerables ante la presencia de este fenómeno (Figura 1.9).



Figura 1.9. Vulnerabilidad ante inundaciones en la ciudad de Holguín [32].

Sin embargo estos mapas fueron confeccionados mediante la obtención de los niveles de crecidas a través del análisis de encuestas a la población y vecinos de las viviendas afectadas, pero no se tuvieron en cuenta los diferentes factores que inciden sobre este fenómeno, como la modelación longitudinal del flujo, el diseño hidrológico y la geomorfología. La ausencia de estos factores en los estudios realizados compromete de manera evidente la veracidad de los mismos.

Otro aspecto que restringe la utilidad de estos mapas es que ellos representan solo las zonas vulnerables, sin tener en cuenta que las inundaciones son fenómenos que varían su intensidad y duración, y de estas variables también dependen los niveles máximos de crecida que se puedan presentar en cada caso. Por esta razón se considera relevante en este tipo de instrumentos, la posibilidad de reflejar la amenaza en función de su probabilidad de ocurrencia o su período de retorno, y de esta manera poder clasificar las zonas de riesgo según la magnitud de la inundación.

De esta manera surge la necesidad de aplicar en este entorno los modelos de simulación hidráulica, el cual permitirá analizar el comportamiento de los diferentes elementos del ciclo hidrológico y el sistema hidráulico en diferentes escenarios posibles, además “ya que un modelo es una representación de un sistema, permite evaluar decisiones o acciones sin que se lleven a cabo experimentos reales” [8].

Específicamente en la zona del río Jigüe se han desarrollado dos investigaciones por parte de la Universidad de Holguín, con el objetivo de elaborar mapas de riesgo ante inundaciones mediante la modelación hidráulica que en este sector de la ciudad, por su gran nivel de vulnerabilidad. La primera investigación fue desarrollada por Chacón [2], la cual tuvo como objetivo general: contribuir a la actualización tanto documental como operativa, de los procedimientos y herramientas informáticas para realizar los estudios de peligro ante inundaciones. Además obtuvo los mapas de riesgo ante inundaciones para varias probabilidades de diseño en el tramo comprendido entre las calles Mariana de la Torre y Mendieta del río Jigüe (Figura 1.10), y utiliza los programas AutoCAD Land, ArcGIS y HecRAS.

La continuidad de la anterior investigación se llevó a cabo por Fernández [4] la cual tuvo como objetivo general: determinar las cotas de inundaciones fluviales del río Jigüe para diferentes probabilidades de diseño, a través de la vinculación de sistemas de información geográficos con la modelación hidráulica unidimensional. En su trabajo de diploma se amplió el tramo de estudio hasta la calle Maceo, punto donde el río Jigüe converge con el Marañón, y se realizó un diseño hidrológico más detallado para obtener los caudales de diseño en diferentes puntos y finalmente se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad para 5 probabilidades de diseño (Figura 1.11), al utilizar los mismos software usados por la investigación precedente.

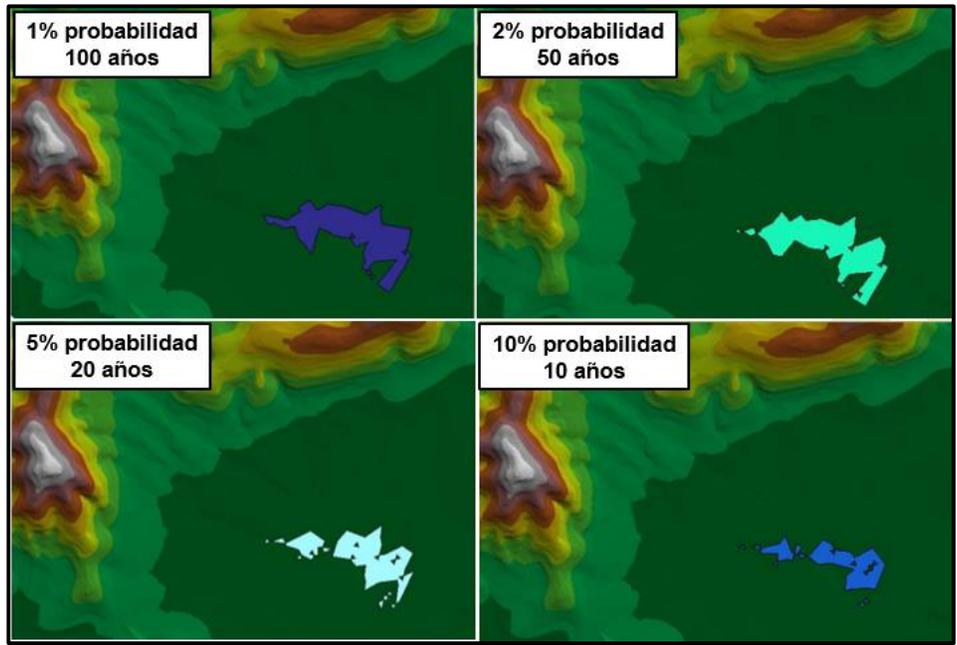


Figura 1.10. Mapas de riesgo ante inundaciones en un tramo del Río Jigüe [2].

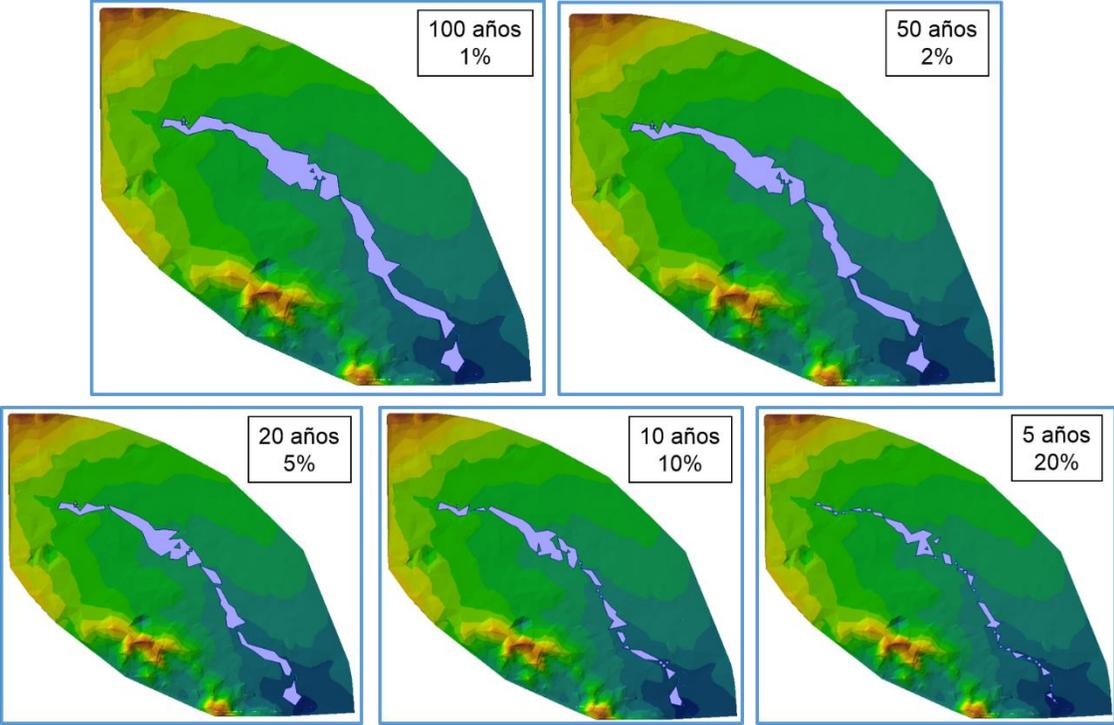


Figura 1.11. Mapas de riesgo ante inundaciones en un tramo del Río Jigüe [4].

Sin embargo aspectos de importancia para esta investigación resulta ser, que en ambos estudios referidos se apreciaron una serie de limitantes que pueden condicionar la precisión y/o eficiencia de los mismos:

- No se realiza una debida explicación de las ventajas del software escogido para realizar la modelación o el procesamiento de la cartografía, ni las razones que justifican su selección.
- No disponen de información cartográfica con alto nivel de detalle para la construcción de los modelos digitales del terreno, lo que afecta de manera determinante la simulación y representación de las zonas de inundación.
- Ausencia de un modelo hidrológico en el área de estudio, por lo que una de las variables de entrada a la modelación (caudales de diseño) se ve comprometida, obligando a los autores a tomar como referencia estudios hidrológicos realizados mediante datos climatológicos con bajo nivel de precisión.
- A la hora de modelar las características físicas de la cuenca del río, no se tienen en cuenta la presencia de los puentes y demás obras de fábrica, así como el efecto que tienen las viviendas situadas en las márgenes del río, cuyas paredes obstruyen el cauce en la mayoría de los casos. Estas y otras características de un río en zonas urbanas son de vital importancia para lograr una mayor similitud con la realidad y obtener así los resultados esperados.
- Los estudios referidos no manifiestan haber realizado una interpretación de los resultados obtenidos de la modelación o los mapas de riesgo, por lo que no reflejan propuestas de soluciones o recomendaciones para la reducción de la vulnerabilidad, que constituye realmente el objetivo final de dichas investigaciones.

1.5. Conclusiones

- Gracias a la evolución de la modelación matemática, esta constituye en la actualidad una de las herramientas más eficaces para la gestión de inundaciones, por su capacidad de simular de manera casi perfecta, los fenómenos propios de un río o cuenca hidrográfica.
- Con la simulación hidráulica unidimensional mediante la integración de las herramientas informáticas HEC-RAS- ArcGIS- HEC-Geo-RAS, se logra no solo obtener resultados satisfactorios del cálculo hidráulico sino también la representación y visualización de dicha información.
- Las modelaciones matemáticas y los mapas de riesgo con que se cuenta en la zona del río Jigüe de la ciudad de Holguín, no responden a las características actuales del cauce, por lo que no presentan el nivel de confiabilidad requerido para su correcta utilización.

CAPÍTULO II.

CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO FISICO GEOGRÁFICO. MANEJO DE LAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS DE RIESGO ENTE INUNDACIONES FLUVIALES EN EL RÍO JIGÜE

En el presente capítulo se realiza primeramente una caracterización de la zona de estudio, con el objetivo de determinar los elementos característicos del río y las condiciones actuales del cauce que son necesarias a incluir en el modelo. En un segundo momento se desarrolla todo el proceso de modelación con los software según la metodología planteada, hasta la obtención de los mapas de riesgo ante inundaciones fluviales. Luego se realiza un análisis de los resultados donde se cuantifican los posibles daños y se clasifican las posibles zonas de riesgo.

2.1 Características físico-geográficas de la cuenca del río Jigüe

El río Jigüe tiene su nacimiento en las elevaciones del extremo noroeste de la ciudad de Holguín, se forma de tres zanjas naturales que nacen en las faldas de la Loma del Fraile, y termina en su confluencia con el río Marañón, cercano a la estación de ferrocarril y prolongación de la calle Maceo hacia la carretera central. Cruza los repartos: Nuevo Llano, Lenin, Hechavarría, Libertad y Centro Ciudad norte y sur.

Para esta investigación fue seleccionado el tramo de este río comprendido entre las calles Mariana de la Torre hasta Maceo (Figura 2.1). Las razones para la selección fueron la disponibilidad de datos de flujo, pues solo hay registro de estudios hidrológicos en ese tramo y por ser el más vulnerable según los estudios analizados.

El tramo seleccionado tiene una longitud aproximada de 2.2 km, con un área tributaria de 422 ha y de ella 345 ha están urbanizadas, con una población asentada de 90 000 habitantes aproximadamente en toda la cuenca [33].



Figura 2.1. Ubicación geográfica del Río Jigüe en la ciudad de Holguín y tramo seleccionado para el estudio.

2.1.1 Caracterización hidráulica e hidrológica del río Jigüe

Las inundaciones en el río Jigüe, aunque no existen testimonios escritos hasta el año 1965, se deben haber producido mucho antes de la fundación del Hato de San Isidoro de Holguín, pues al ser un río corto, poco profundo y de cauce pequeño, siempre ha presentado gran tendencia al desbordamiento durante el periodo húmedo.

Desde el triunfo de la Revolución, las áreas de esta cuenca hidrográfica han sido transformadas físicamente, debido al empleo de la casi totalidad de sus espacios por el desarrollo urbanístico. Por tal motivo, las características del escurrimiento superficial se vieron fuertemente afectadas al ser ocupados los suelos por construcciones de viviendas de diferentes tipologías e infraestructura urbana, trayendo como consecuencia que las áreas libres disminuyeran considerablemente, cambiando la capacidad de infiltración de los suelos y convirtiendo la mayor parte del agua que se infiltraba en escurrimiento superficial.

La explosión demográfica de los últimos 60 años trajo como consecuencia que una parte de la población se fuera asentando dentro de las márgenes y zona de inundación del cauce de este río, reduciendo sus secciones hidráulicas y provocando que las aguas originadas por las lluvias no puedan ser conducidas por el mismo, incrementando así la frecuencia de las inundaciones en algunos puntos, principalmente en el tercio medio y final de la cuenca; y al presentarse aguaceros de gran intensidad, este río se saliera de su cauce, escurriendo parte del mismo por las calles aledañas afectando a las viviendas y otras instalaciones dentro de la zona de inundación.

En el cauce de este río existen 66 viviendas (se incluyen las biplantas) que restringen la circulación del agua en las crecidas, al estar construidas sobre el cauce y junto a las entradas y salidas de los puentes, siendo ellas mismas las principales amenazadas con derrumbes parciales o totales en ocurrencias de lluvias mayores de 80 mm/día [33]. Esta situación se manifiesta en mayor medida en el tramo en que el río cruza los repartos Centro Ciudad norte y sur, que presentan mayor nivel de urbanización, destacándose a partir de las calles Agramonte, Arias, Martí y hacia el final donde el río conduce los mayores caudales y se producen consecutivamente las reducciones del cauce y remansos de las aguas. En la Figura 2.2 se muestran algunos ejemplos de viviendas que fueron construidas en las márgenes del río Jigüe, prácticamente sobre el cauce, lo que representa una obstrucción del flujo a la hora de evacuar las grandes avenidas, sometiéndose a la misma vez a un alto grado de vulnerabilidad.

Según reportes del INRH [34] la zona que más incidencia ha tenido en los últimos años es la del Reparto Hechevarria aledaña al Hospital Lenin, afectada por el desbordamiento del Jigüe. Esta situación no es nueva, pues se conoce que desde los primeros años de la Revolución en esta área se producían daños por esta causa en determinadas épocas del año. Las elevaciones que circundan a la cuenca por el norte presentan pendientes muy inclinadas y terrenos rocosos con poca vegetación; por esta razón cuando se presentan lluvias intensas, el agua se escurre rápidamente hacia abajo e inunda la zona del Hospital Lenin y las áreas aledañas a esta.



Figura 2.2. Viviendas construidas en las márgenes del río Jigüe.

En el tramo comprendido entre las calles Arias y Carbó desemboca el drenaje del Hospital Lenin. Toda esta área presenta un mal funcionamiento del drenaje pluvial, sus alcantarillas están obstruidas en su mayoría, provocando que el escurrimiento superficial no se incorpore a los colectores de drenaje, red que actualmente es muy deficiente, por la falta de tragantes en algunos casos, o la mala disposición de otros.

A todos estos problemas se adiciona un nuevo elemento, la deposición de los residuales líquidos y sólidos, produciendo un estrechamiento de los cauces desde la cabecera del río y a lo largo de su curso, incrementándose los sólidos en suspensión y los arrastres de materiales como escombros y basuras que de forma indiscriminada son arrojados al cauce por la propia población como muestra de indisciplina social y falta de cultura ambiental, obstruyéndolo parcialmente y creándole incapacidad para evacuar las aguas de las crecidas. Esta situación se ve en aproximadamente el 47.2% de la longitud del cauce.

Este fenómeno reduce además la capacidad de algunos puentes importantes, que a pesar de que se construyeron en la década de los años 50, permitieron el paso de las

avenidas provocadas por el ciclón Flora, el evento meteorológico más extraordinario del que se tenga conocimiento en el país. Lamentablemente la capacidad de evacuación del río ha cambiado drásticamente, es por eso la necesidad de recuperar estas secciones, que en la actualidad se encuentran obstruidas parcial o totalmente, pues constructivamente en su mayoría presentan buenas condiciones, y solo presentan pequeñas deficiencias que no son de consideración desde el punto de vista estructural.

Las mayores dificultades que presentan las obras de fábrica en el tramo de estudio se encuentran en el nivel de obstrucción de los puentes y alcantarillas que no permiten conducir los gastos de diseño para la cual fueron construidos, principalmente las obras que se construyeron después del triunfo de la Revolución. En la actualidad algunos funcionan a una capacidad por debajo del 50%, presentando grandes obstáculos a las entradas, debajo de los puentes y salida de estos, así como secciones obstruidas en su totalidad. Todo esto impide una buena circulación del flujo, lo que provoca un remanso de la corriente hacia aguas arriba, incrementando el tirante de circulación en el río entre un 20 – 30%, en función del grado de obstrucción que tengan estas obras. (Figura 2.3)



Figura 2.3. Secciones de los puentes reducidas y obstruidas.

Otra problemática que se presenta es el mantenimiento de las secciones de los puentes y alcantarillas, así como en los tramos de los cauces aguas arriba y abajo, al no eliminarse la presencia de hierbas y arbustos que sumados a los sedimentos arrastrados por las corrientes fluviales hace que estas obras de cruce se vean afectadas periódicamente, provocando que el agua se derrame por sus márgenes.

La inundación de significación más reciente sufrida en la ciudad ocurrió el día 3 de julio del año 2006, cuando se reportó una lámina de lluvia acumulada de 102.3 mm en 2 horas y de 105.0 mm en 24 horas, la que dejó un saldo de 5 mil casas inundadas, 7 dañadas parcialmente, 2 derrumbes totales, 5 puentes dañados de forma parcial y 7 destruidos totalmente, contaminación del medio e insatisfacción de la población. En ese mes de julio se reportó un acumulado de 207.7mm. En el Anexo 1 se muestra una foto tomada a una vivienda ubicada en las márgenes del río Jigüe, la cual fue afectada por la inundación. En la pared de la fachada se puede apreciar el nivel de agua alcanzado.

De las investigaciones territoriales, hidrológicas e hidráulicas que se analizaron, se puede concluir que la cuenca del río Jigüe, sobre todo en el tramo analizado, ha sido sometida a procesos antropogénicos y naturales que han cambiado sustancialmente el natural curso de las aguas, y aunque se han realizado estudios y proyectos en este río, estos datan de más de 20 años, siendo ejecutados parcialmente y los realizados no han tenido las necesarias labores de mantenimiento, reparación y manejo, agravando la hidrología de la zona.

De los estudios hidrológicos realizados anteriormente en el río se tomaron los caudales aportados a lo largo de todo el tramo, para posteriormente introducirlos en el cálculo hidráulico. Se encontraron registros de caudales en 8 cierres a lo largo del tramo, los mismos están ubicados en las calles: Mariana de la Torre, Carbó, Garayalde, Mendieta, Frexes, Luz Caballero, Coliseo y Maceo. Estos datos de flujo fueron calculados para 5 probabilidades de ocurrencia: 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, equivalente a 100, 50, 20, 10, 5 años como período de retorno respectivamente. En la Tabla 2.1 se muestran estos caudales en cada uno de los cierres de cálculo.

Tabla 2.1. Caudales del tramo de estudio del río Jigüe [4]

Cierre de cálculo	1%	2%	5%	10%	20%
Mariana de la Torre	42.1	34.8	23.5	18.3	9
Carbó	42	36	28	19	10
Garayalde	44	38	29	20	11
Mendieta	45	39	30	21	11
Frexes	59	51	39	27	15
Luz Caballero	71	61	47	33	17
Coliseo	82	71	55	38	20
Maceo	97	84	64	44	23

2.1.2 Levantamiento de las obras de fábrica

En el tramo de estudio se encuentran un total de 23 obras de fábrica, puentes en su totalidad, con diversas tipologías constructivas, que incluyen puentes con o sin pilas, y en puentes abovedados. En la Figura 2.5 se muestra la localización de los puentes en el tramo del río y su tipología.

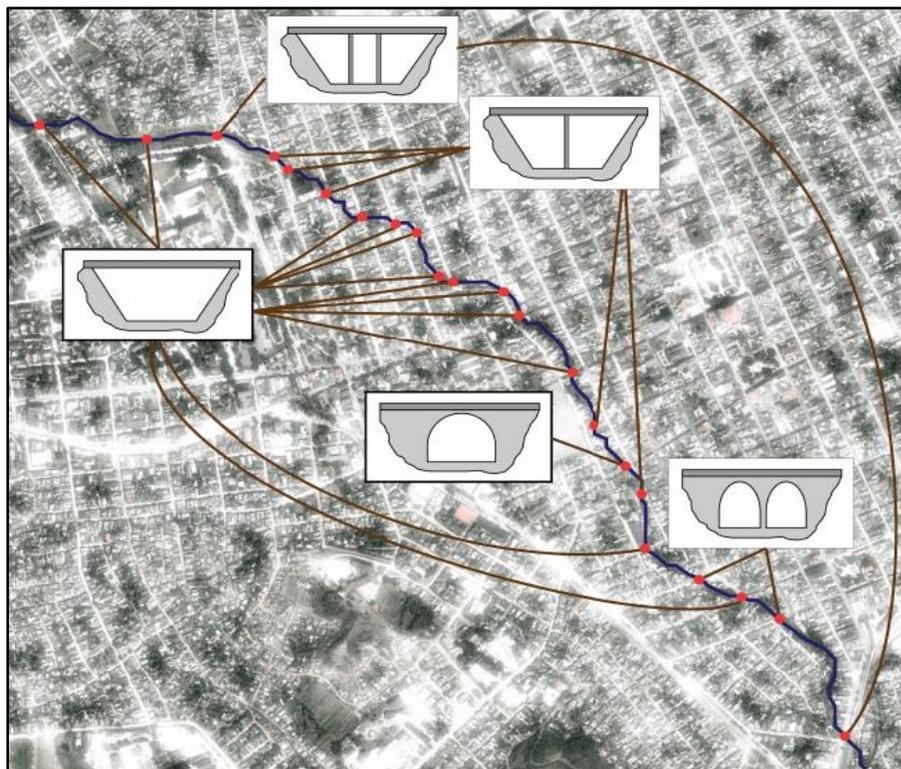


Figura 2.5. Localización de los puentes en el tramo de estudio y su tipología constructiva.

En el sub-epígrafe anterior se describió la situación que presentan la mayoría de los puentes en este río y, al constituir claramente una obstrucción al flujo, se hace necesario incluirlos en el modelo a realizar. Como se mencionó anteriormente, el modelo HEC-RAS es capaz de realizar el cálculo hidráulico para este tipo de estructuras, para ello se hace necesario realizar un levantamiento geométrico con el objetivo de obtener las dimensiones de los elementos del puente para la modelación. En la Tabla 2.2 se muestra el registro del levantamiento geométrico.

Tabla 2.2. Dimensiones de los elementos de los puentes.

Puente	Tablero			Pilas				Pretil		Cauce
	luz	ancho	espesor	cant	ancho	altura	posición	altura	ancho	
Mariana de T.	6	8	0.6	-	-	-	-	0.8	0.2	8
Organopónico	8.3	4.5	0.5	-	-	-	-	0.36	0.22	7.6
Cochera	10.6	6	0.3	2	0.2	1.9	2.75 @	0.9	0.13	8.6
Carbó	10	10	0.25	1	0.35	1.4	4.2 (4)	0.86	0.18	10
Cuba	13	8.4	0.4	1	0.6	0.8	6.7 (1)	0.8	0.16	12.5
Garayalde	7.6	8.2	0.3	1	0.3	0.9	2.9 (1)	1	0.2	9.5
Mendieta	6.3	8.8	0.25	-	-	-	-	0.7	0.2	5.3
Victoria	8.3	7	0.3	-	-	-	-	0.75	0.22	5.1
Agramonte	5.5	7.1	0.3	-	-	-	-	0.7	0.22	5.5
Arias	10.7	8	0.4	-	-	-	-	0.85	0.22	6
Unión	8.1	7.8	0.5	-	-	-	-	0.85	0.22	8
Aguilera	10.4	7.7	0.5	-	-	-	-	0.73	0.19	10
Rastro	8.4	6.2	0.25	-	-	-	-	0.58	0.35	8.5
Frexes	8.8	8.5	0.5	-	-	-	-	0.95	0.25	8.8
Martí	10.4	8.4	0.6	1	1/0.8	2.8	4.1 (1)	0.95	0.25	10.5
Aricochea	10.6	7.6	0.6	1	1/0.7	2.3	6.2(1)	0.83	0.23	8
Cables	8.7	7.9	0.2	-	-	-	-	0.71	0.28	8.7
Peralejo	7.3	6.7	0.4	-	-	-	-	0.7	0.22	8
Gral. Salazar	10	7.4	0.75	1	0.9	2.35	4.45(1)	0.77	0.27	12
Maceo	16.6	8	0.7	2	0.5	4.3	0.5 (3)	0.86	0.24	15

Sin embargo, tres de los puentes por su tipología constructiva tipo abovedada resulta más conveniente modelarlos como alcantarillas. En la Tabla 2.3 se muestran sus dimensiones.

Tabla 2.3. Dimensiones de los puentes en forma de arco a modelar como alcantarillas.

Puente	Tablero		Alcantarillas				Pretil		Cauce
	luz	ancho	#alcant	Diám.	altura	posición	altura	ancho	
Luz Caballero	9/5.6	9	1	4.4	2.2	4.2(1)	1	0.13	9/5.6
Ángel Guerra	16.3	10.3	2	4	1.8	2.8 @	0.8	0.2	15
Coliseo	12.7	7.5	2	4.5	2.7	3.05 @	0.7	0.22	12

Otra situación que la mayoría de los puentes presentan, es un determinado ángulo de esviaje (ángulo formado por la perpendicular al eje de la vía y el cauce del río). Esto genera inconvenientes en dichas secciones hidráulicas para conducir los gastos, por lo que también fue necesario incluirlo en el modelo.

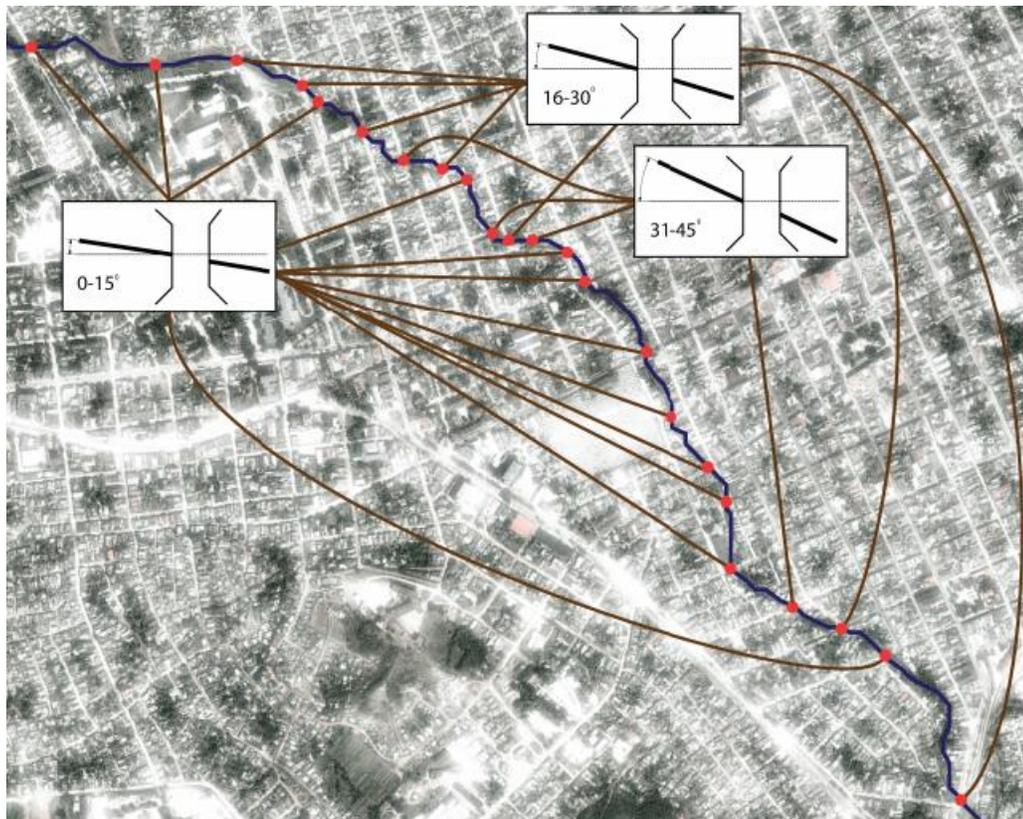


Figura 2.5. Localización de los puentes y los distintos ángulos de esviaje.

2.2 Modelación hidráulica del río Jigüe

La modelación se llevará a cabo mediante la secuencia de trabajo explicada en el epígrafe 1.2.3. (Ver figura 1.5)

2.2.1 Procesamiento de la cartografía en AutoCAD y ArcGIS

La cartografía utilizada para la realización del modelo fue obtenida de un plano topográfico en formato “.dwg” de la ciudad de Holguín. El mismo contiene, en forma de capas la información perteneciente a las curvas de nivel (a equidistancia 1m), la planimetría de la ciudad, sus construcciones, la red hidrográfica etc. Por las características que presentaba dicha cartografía, fue necesario realizar un proceso de depuración en el software AutoCAD, en el cual se eliminaron aquellas curvas de nivel que no contenían cota de elevación. Se separaron en distintos ficheros cada una de las capas y fueron guardadas en formato “.dxf” para su posterior visualización en el software ArcGIS, incluido el fichero de las curvas de nivel para la obtención del MDT. En la Figura 2.7 se muestran las tareas de esta primera etapa del preproceso y los ficheros que fueron exportados del AutoCAD al ArcGIS.

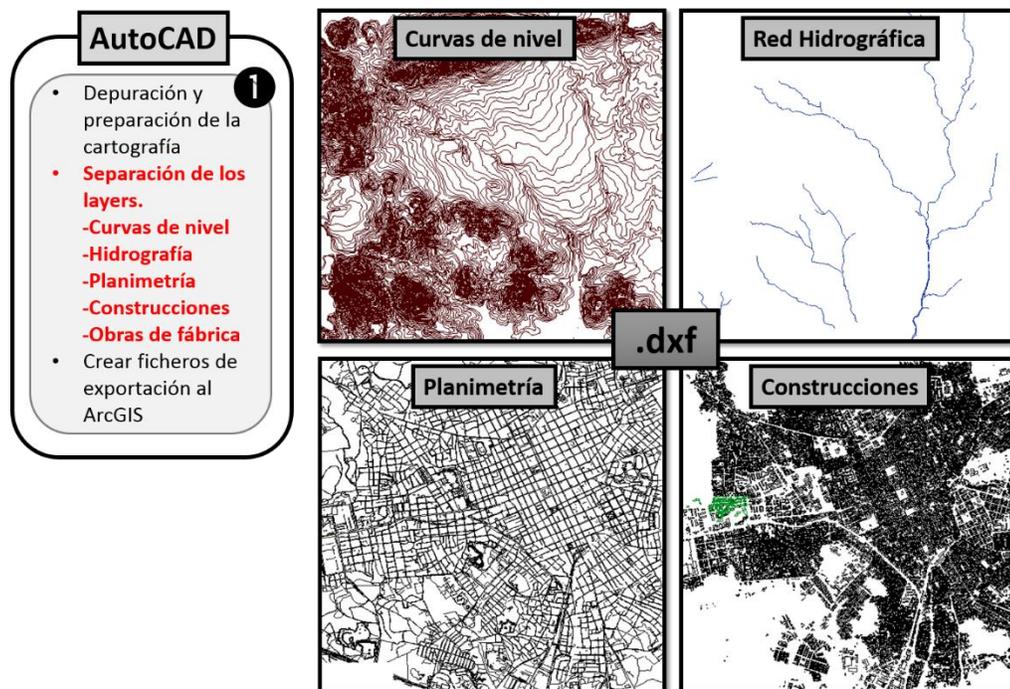


Figura 2.7. Preprocesamiento de la cartografía. Ficheros en formato “.dxf” para exportar al ArcGIS.

El siguiente paso fue la obtención del Modelo Digital del Terreno en el Software ArcGIS, para ello se cargó el fichero con las curvas de nivel y mediante la herramienta 3DAnalyst se creó el MDT en formato TIN. En la Figura 2.8 se muestra el modelo obtenido.

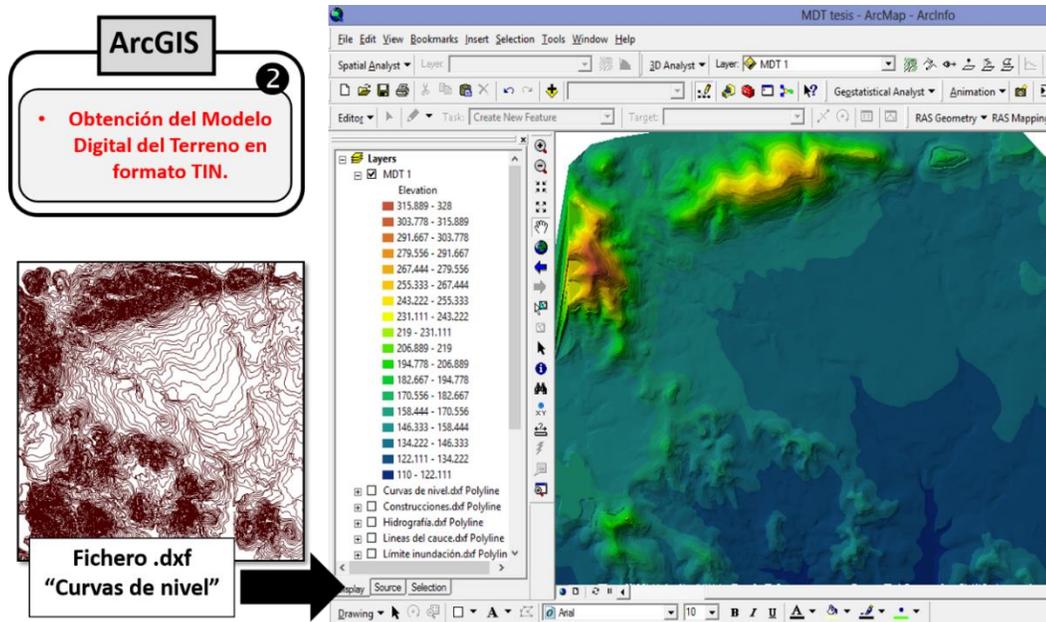


Figura 2.8. Obtención del Modelo Digital del Terreno en ArcGIS.

2.2.2 Ajuste del modelo en HEC-GeoRAS

Una vez obtenido el MDT fue necesario crear sobre el mismo la geometría y propiedades del río. Para esto se activó la herramienta HEC-GeoRAS, extensión que nos permitió además generar el archivo de exportación al HEC-RAS. En la Figura 2.9 se muestra la extensión HEC-GeoRAS activa y la selección del menú “Create RAS Layers” para la creación de los cuatro elementos fundamentales de la geometría del río Jigüe.

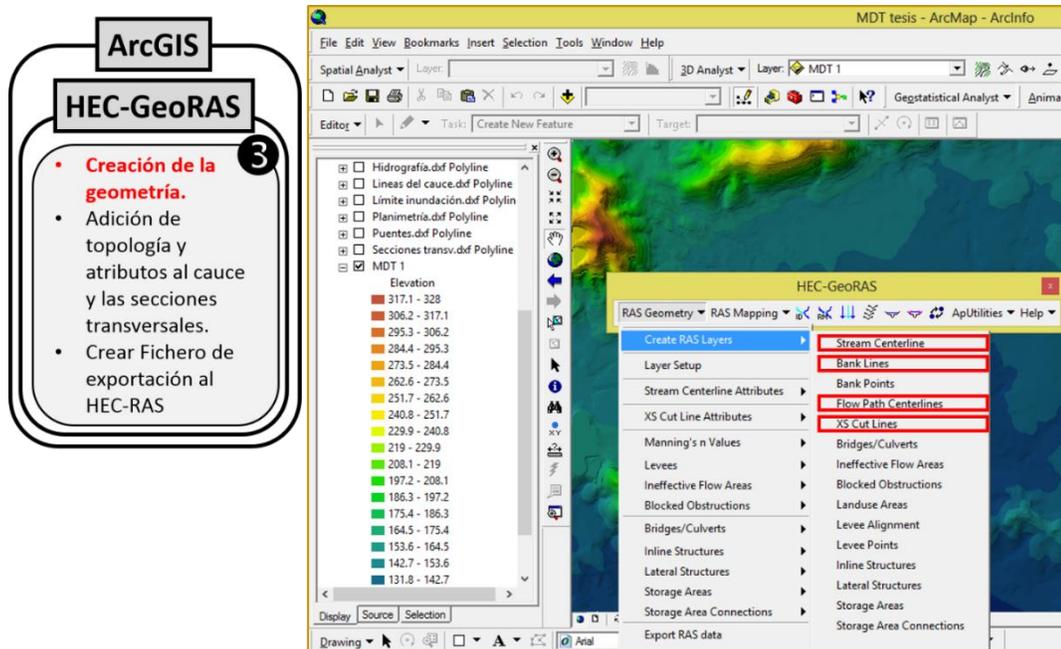


Figura 2.9. Menú principal del HEC-GeoRAS para la creación de la geometría del río.

Utilizando el comando Editor se dibujó primeramente el eje del río (Stream Centerline) y se comenzó a digitalizar el cauce desde aguas arriba hacia aguas abajo, teniendo como guía el fichero “Hidrografía.dxf” que fue cargado anteriormente. A continuación se le asignó el nombre al río, en este caso “Jigüe” y al tramo que se está analizando y luego se dibujó las líneas límites del cauce (Bank Lines). El siguiente elemento del río a digitalizar fueron los (Flowpaths) o zonas por donde se prevé que circulará el flujo de agua, de esta manera se delimitaron los valles de inundación. Estas líneas son utilizadas por el HEC-GeoRAS para determinar las distancias entre secciones tanto en el cauce principal como en las llanuras de inundaciones. Se digitalizó de aguas arriba a aguas abajo una línea por cada lado del río, incluyendo el eje del cauce principal. Fue necesario definir, para cada segmento, su situación: izquierdo (Left), derecho (Right) o cauce (Channel).

El último elemento a digitalizar fueron las secciones transversales (XS Cut Lines). Se intentó que las secciones cortaran perpendicularmente o lo más cercano a esto al flujo; digitalizando siempre desde la margen izquierda a la derecha e impidiendo que se cortaran entre sí. Con las secciones definidas se extrajeron los datos de la geometría de las secciones transversales a partir del TIN, y de esta manera se completó el proceso de digitalización. En la Figura 2.10 se muestra el resultado de la creación de la geometría del río Jigüe.

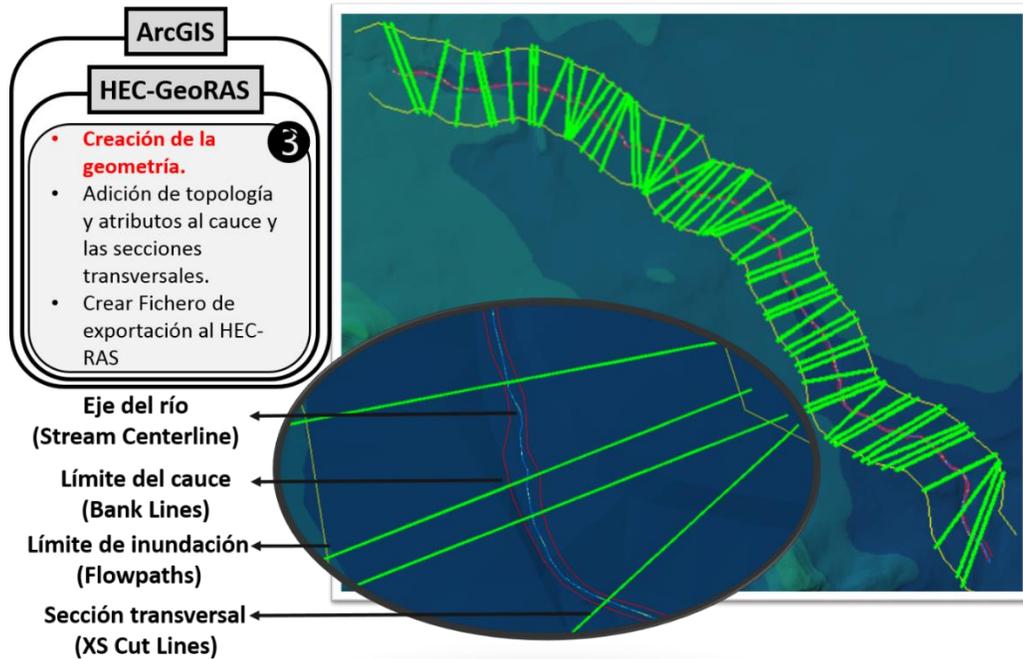


Figura 2.10. Geometría del río Jigüe creada mediante la extensión HEC-GeoRAS.

Antes de exportar la información creada al HEC-RAS fue necesario tener dicha información en 3D. El HEC-GeoRAS es capaz de generar tanto para el cauce como para las secciones transversales un fichero en tercera dimensión de las capas Stream Centerline y XS Cut Lines respectivamente usando el MDT para extraer los datos de elevación de cada borde de los triángulos del TIN. Mediante los submenús Stream Center Lines Attributes y XS Cut Lines Attributes el programa asignó las cotas de elevación extraídas del MDT a dichos elementos. (Figura 2.11)

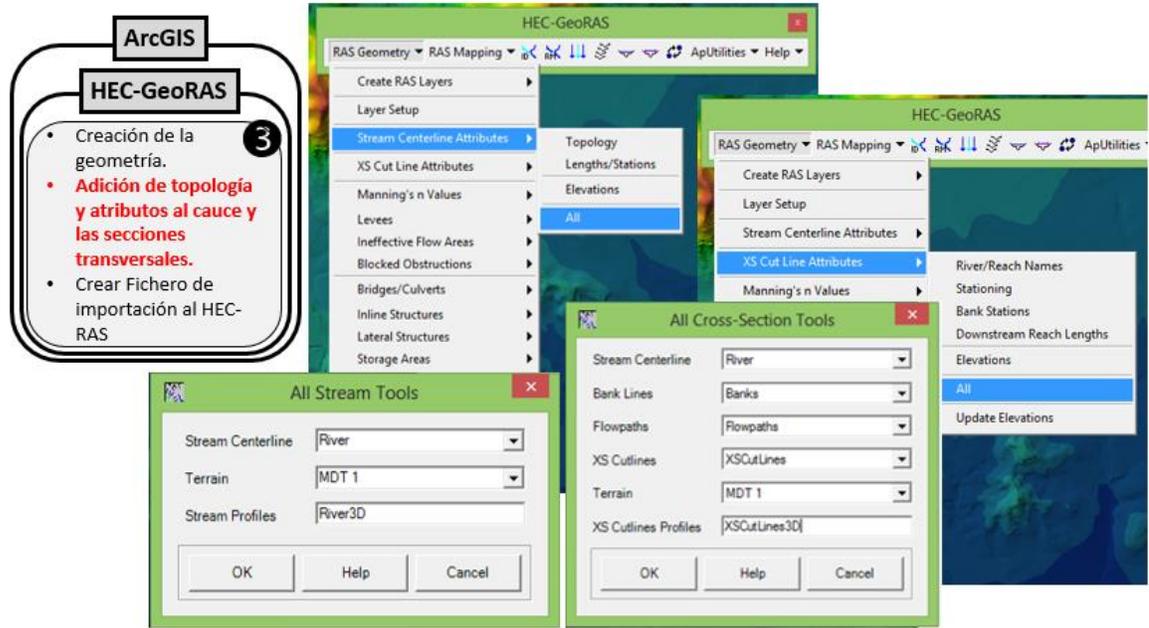


Figura 2.11. Menú para la adición de los atributos al cauce y secciones transversales

Antes de concluir la etapa de preproceso, fue necesario crear el fichero de exportación al HEC-RAS, mediante el menú Export RAS Data el HEC-GeoRAS donde se crea automáticamente el fichero en formato “.sdf” y queda guardado en la carpeta de donde se ejecuta el proyecto. (Figura 2.12)

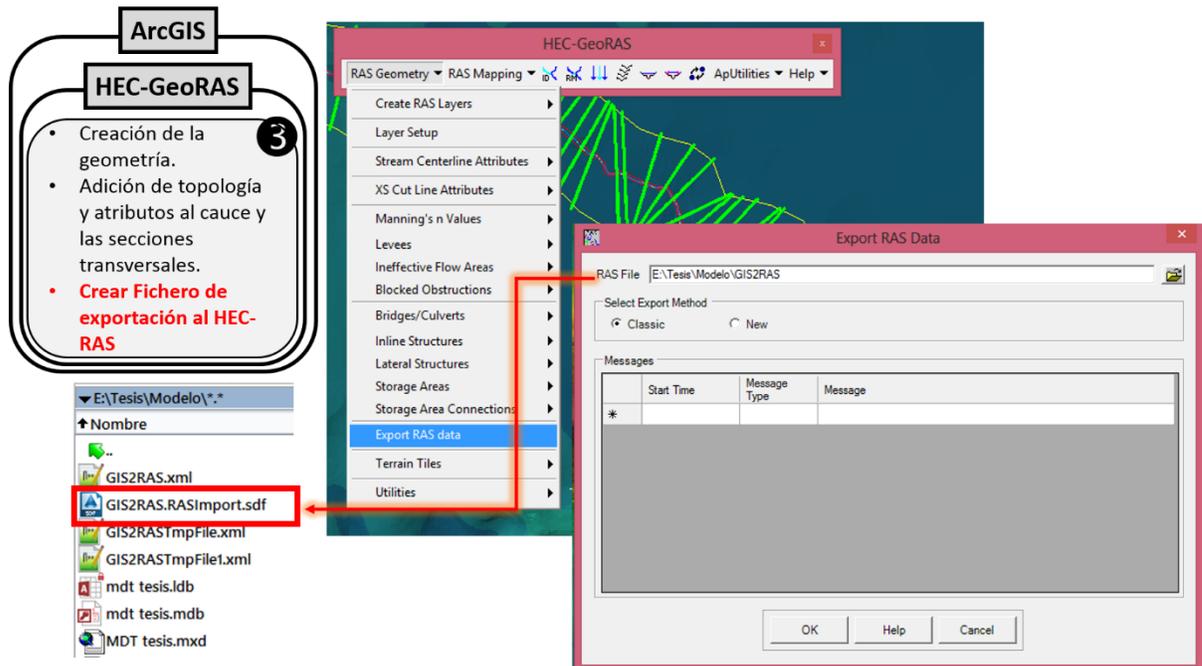


Figura 2.12. Creación del fichero de exportación al HEC-RAS.

2.2.3 Procesamiento en HEC-RAS

Una vez concluida la etapa de pre procesamiento, se comenzó a trabajar con el modelo matemático HEC-RAS para el cálculo y la simulación hidráulica del río. Para comenzar el trabajo con esta herramienta se creó un proyecto nuevo y se importa desde la ubicación actual, el fichero generado anteriormente para así obtener la geometría del río. En la figura 2.13 se observa el procedimiento para la importación del archivo y la geometría de río Jigüe una vez visualizada en la ventana Geometric Data.

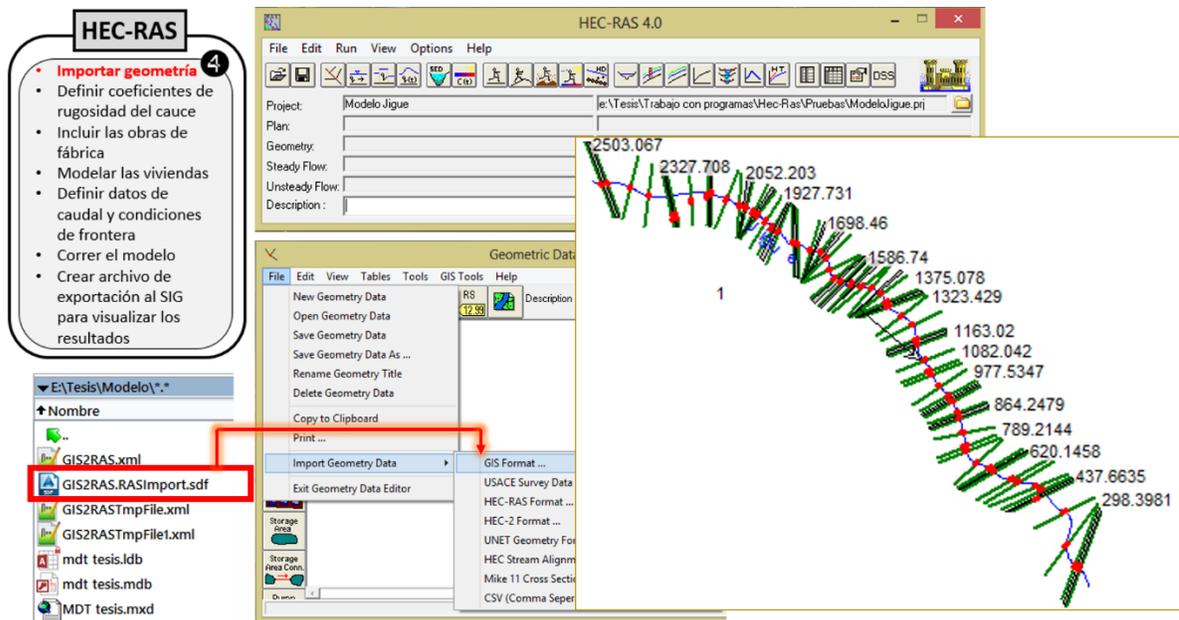


Figura 2.13. Archivo con la información geométrica importada por el HEC-RAS

El siguiente paso fue asignar el coeficiente de rugosidad o coeficiente de Manning a las secciones transversales de acuerdo con los materiales que conforman el lecho del río y las zonas proclives a inundación. Para este estudio se consideró que el material que compone el río es tierra ordinaria con superficie uniforme con valor de $n=0.02$ y las zonas de inundación hierba pequeña con valor de $n=0.03$. Estos valores fueron asignados mediante la ventana Cross Sección o mediante la tabla “Manning’s n or k values” como se muestra en la Figura 2.14.

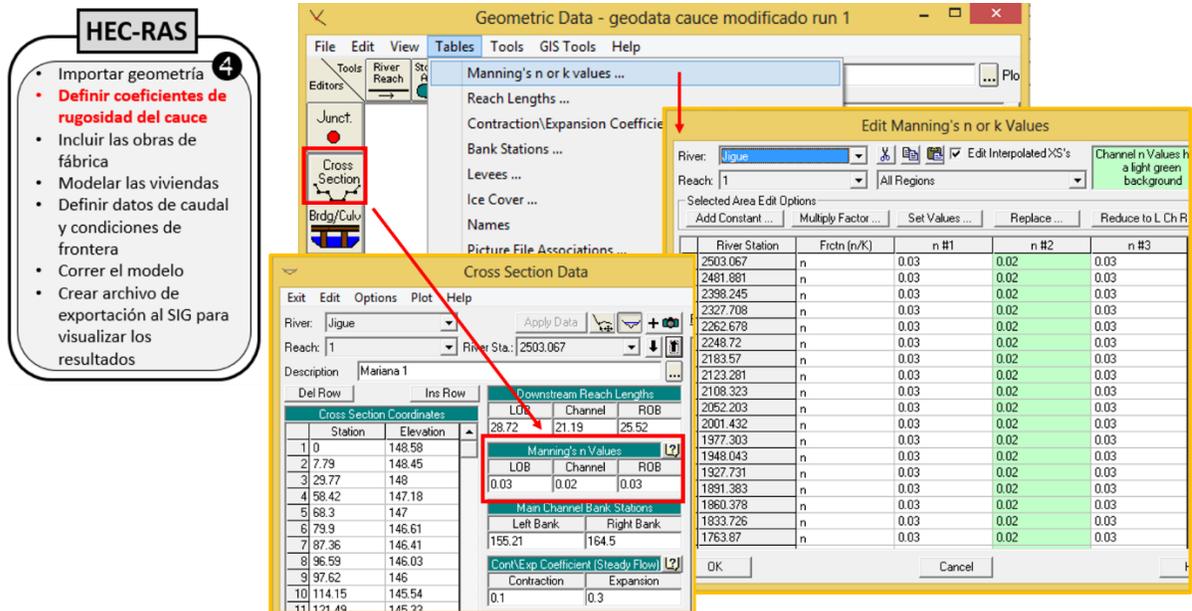


Figura 2.14. Asignación de los coeficientes de rugosidad de Manning a las secciones transversales.

Como mencionamos en el epígrafe anterior las obras de fábrica presentes en el tramo forman parte del entorno del río y constituyen un elemento que obstruye el flujo cuando se producen grandes avenidas, por esto es necesario tener en cuenta los puentes en la modelación. Para introducir un puente (Figura 2.15), en la ventana Geometric Data, se selecciona el icono Bridge/Culvert Data, luego en el menú Options/Add a Bridge or Culvert se introdujo el número que indica la posición de la sección donde se encuentra el puente, esta no puede estar incluida dentro de las secciones que se dieron como dato, por lo que fue necesario en todos los casos tener dos secciones transversales semejantes a la sección donde se ubicará el puente, a una distancia mínima aguas arriba y aguas abajo.

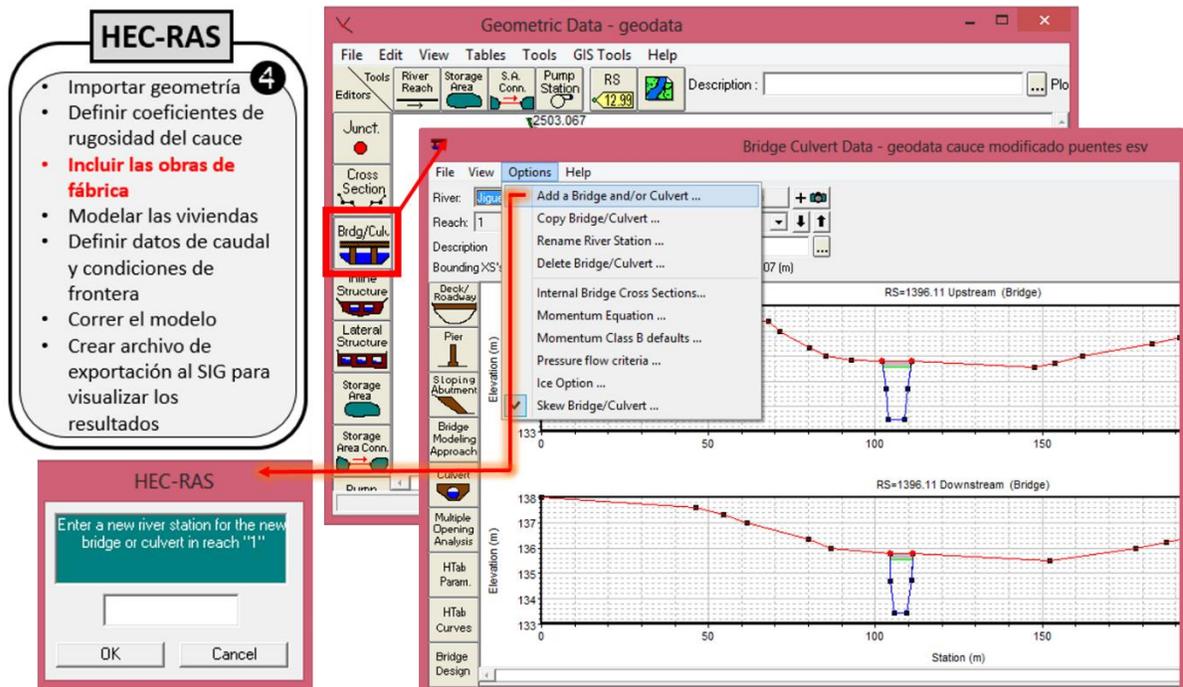


Figura 2.15. Secuencia para introducir un puente o una alcantarilla en el HEC-RAS

Los 23 puentes fueron modelados según sus características geométricas recogidas en el reporte del levantamiento realizado (Tabla 2.2). Los elementos que conforman el puente a modelar son el tablero (Deck / Roadway), las pilas (Pier) y los estribos (Sloping Abutment). Las dimensiones y posicionamiento de estos elementos son introducidos al modelo por los íconos de igual nombre que se encuentran en la ventana Bridge/Culvert Data, como se muestra en la Figura 2.16. Se introdujo además el ángulo de esviaje para aquellos puentes que lo presenten, tanto al tablero como a las pilas. Para esto se seleccionó la opción Skew Bridge/Culvert del menú Options de la ventana Bridge/Culvert Data.

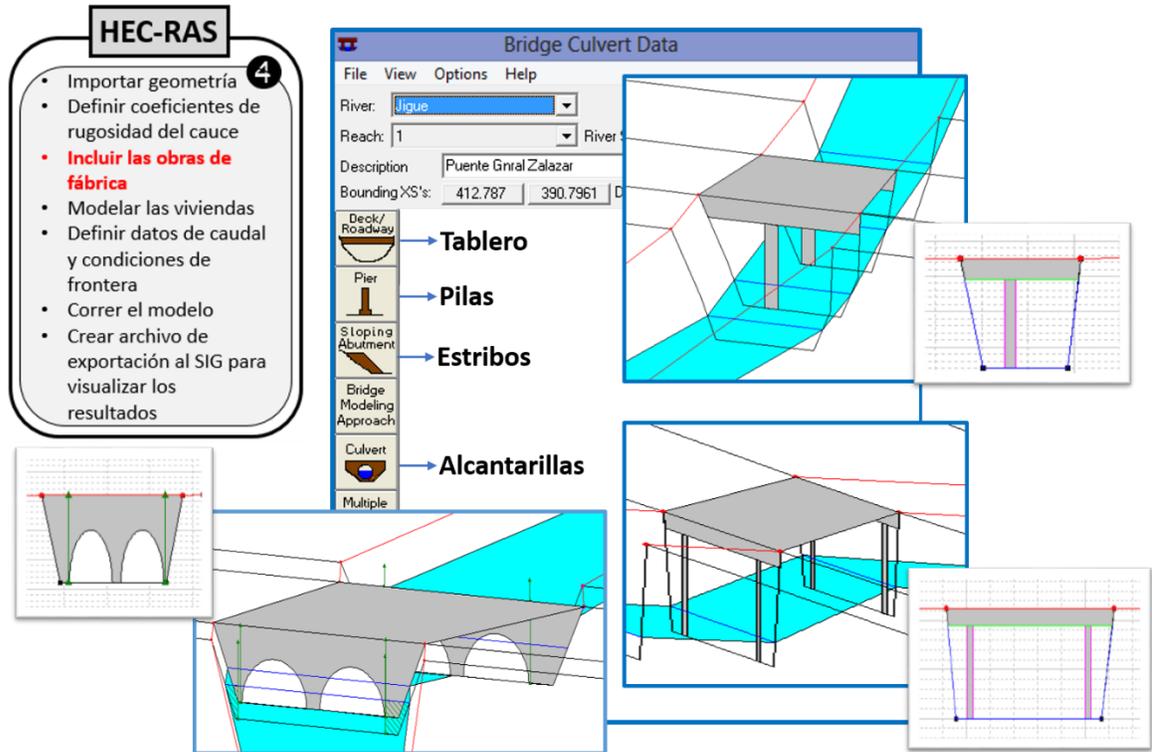


Figura 2.16. Ventana para modelar las dimensiones de los elementos de las obras de fábrica

Otro de los elementos que están presentes en el cauce y que obstruyen de manera significativa el flujo son las viviendas, que como se explicó al comienzo de este capítulo, están asentadas en los márgenes del río y provocan un remanso considerable de las aguas cuando se producen lluvias intensas. Realmente el software no brinda la posibilidad de modelar las viviendas como construcciones específicamente, pero sin embargo permite modelar otras estructuras que al combinarlas funcionan como tal. Estas son nombradas como elementos de restricción del flujo en las secciones, como los Diques o Motas (Levees), las áreas Inefectivas (Ineffective Areas), las áreas de Obstrucción (Obstruction Areas) y las estructuras laterales (Lateral Structures).

En este caso se necesitó usar las dos últimas, puesto que se necesita representar elementos en ambas direcciones, tanto paralelo como transversal al cauce del río. La función de las áreas de obstrucción es la de definir regiones de la sección en las cuales no existe flujo, por la presencia de obstáculos. Dichas regiones se excluyen del cálculo de área mojada, pero, eso sí, aportan perímetro mojado al cálculo. La utilidad de esta

herramienta está en la simulación de elementos de obstrucción al flujo que se pueden encontrar de modo natural (árboles, grandes rocas) o artificial (muros verticales, casas, edificios, naves industriales) en el entorno fluvial y afecten al flujo. Las estructuras laterales funcionan de igual modo, solo que son estructuras que se encuentran paralelas al flujo principal del cauce, es decir perpendiculares a las secciones transversales. Estas son agregadas al modelo mediante los menús de la ventana Geometric Data como se muestra en la figura 2.17.

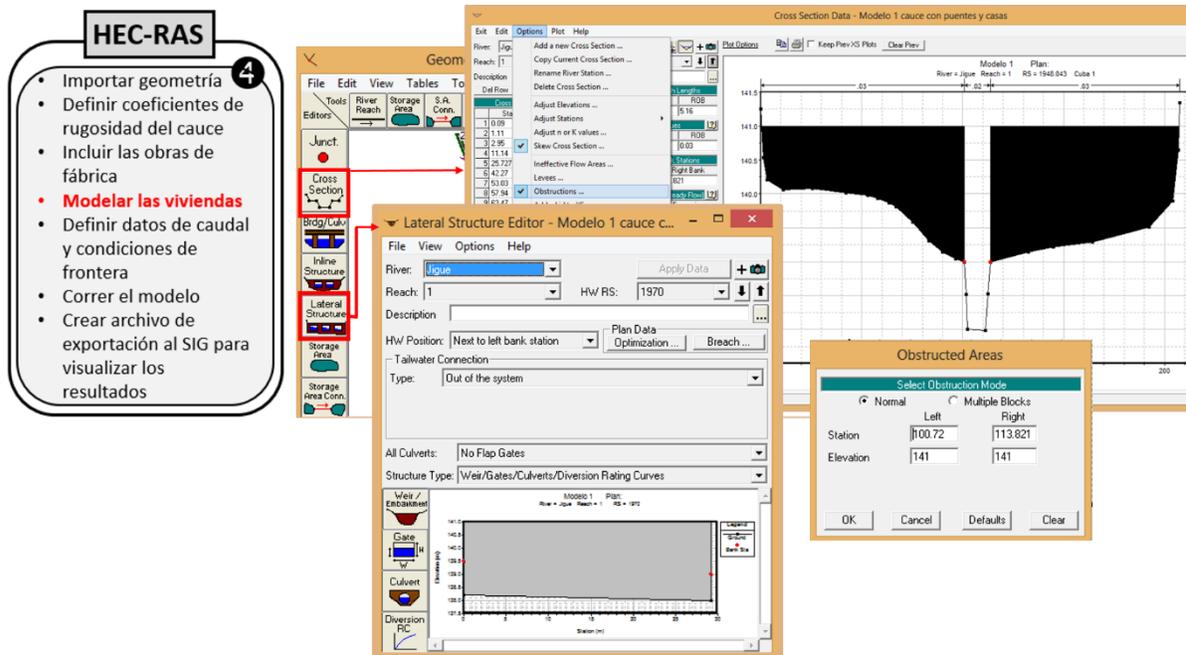


Figura 2.17. Incluir estructuras laterales y obstrucciones para simular el efecto de las viviendas al borde del cauce.

Al combinar estas estructuras se puede simular el efecto deseado tal como se muestra en la Figura 2.18

- HEC-RAS** 4
- Importar geometría
 - Definir coeficientes de rugosidad del cauce
 - Incluir las obras de fábrica
 - **Modelar las viviendas**
 - Definir datos de caudal y condiciones de frontera
 - Correr el modelo
 - Crear archivo de exportación al SIG para visualizar los resultados

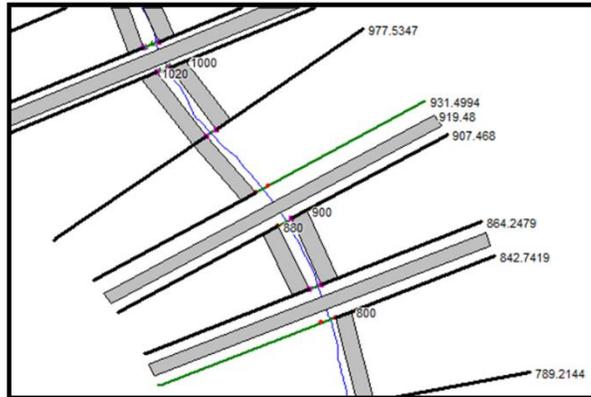


Figura 2.18. Posición de las estructuras laterales y las obstrucciones dentro de las secciones transversales.

Estas no fueron las únicas estructuras que se introdujeron al modelo, también se utilizaron otros elementos de restricción del flujo, como los Diques o Motas (Levees) y las Áreas Inefectivas (Ineffective Areas). Los Levees son una especie de diques longitudinales artificiales que se colocan para indicarle al programa que existe una vía preferente de desagüe, de esta manera comenzará a llenar primero el cauce principal hasta que llegue a la cota del levee y luego comenzará a llenar la parte situada del otro lado. Se definieron además las áreas inefectivas cuya función es, como su propio nombre indica, la de definir regiones dentro de la sección donde las velocidades sean prácticamente nulas (flujos no activos o zonas de aguas muertas), en este ejemplo estas coinciden con los límites a ambos lados de la primera y última tubería de las alcantarillas. En la figura 2.19 se observa la representación de estos elementos en las secciones transversales.

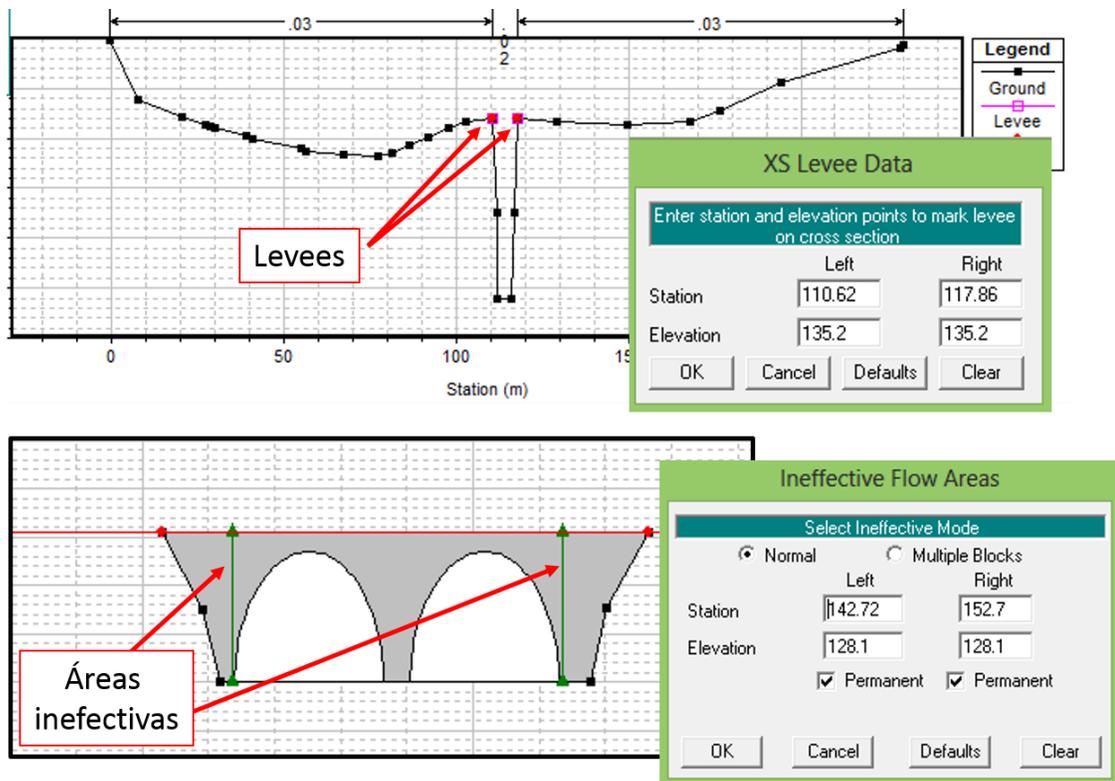


Figura 2.19. Representación de los Levees y las Áreas inefectivas en las secciones transversales.

Una vez incluidos en el modelo todos los elementos presentes en el cauce, se definieron los datos de los caudales para modelar el flujo en régimen permanente, extraídos de estudios hidrológicos realizados en el río con anterioridad (tabla 2.1). Este paso se realiza mediante el ícono Edit/Enter steady flow data de la ventana principal del HEC-RAS. (Figura 2.17) En esta misma ventana se introducen además las condiciones de frontera, Para este caso se especificó que tanto para aguas arriba como para aguas abajo se consideraría la profundidad normal de circulación de los caudales obtenidos. Este calado es definido a partir de la pendiente del gradiente de energía, la cual se considerará aproximadamente igual, a la pendiente del lecho del río en dichas vecindades (0.008).

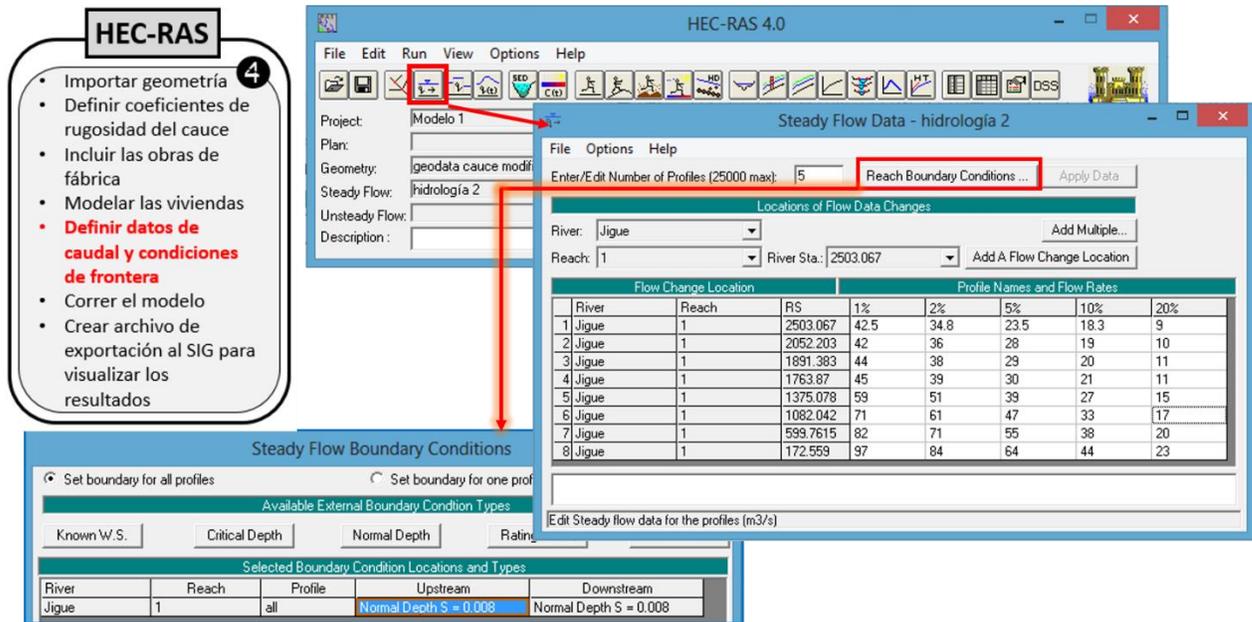


Figura 2.17. Ventana para la introducción de los datos de caudales y condiciones de frontera.

Al introducir los datos de flujo ya se está en condiciones de correr el modelo. Para realizar la simulación hidráulica del cauce es necesario crear primeramente un plan que incorpore un fichero de geometría y otro de datos hidrológicos, esto se realiza mediante el ícono Steady Flow Analysis de la ventana principal. En este caso se realizaron 3 corridas del modelo, en cada una de estas simulaciones se mantuvo el fichero correspondiente a los datos de caudales, solo se fue modificando en cada corrida el fichero correspondiente a la geometría. En un primer momento se modeló el cauce en su estado natural sin modificaciones ni estructuras externas, luego un modelo incluyéndole las obras de fábrica y el último fichero de geometría incluía tanto los puentes como las construcciones. Tal como se muestra en la Figura 2.18 se seleccionó en cada corrida uno de los archivos correspondiente a la información geométrica y el que contenía la información con los datos hidrológicos; además se seleccionó el régimen de flujo mixto y de esta manera el software realiza la simulación hidráulica.

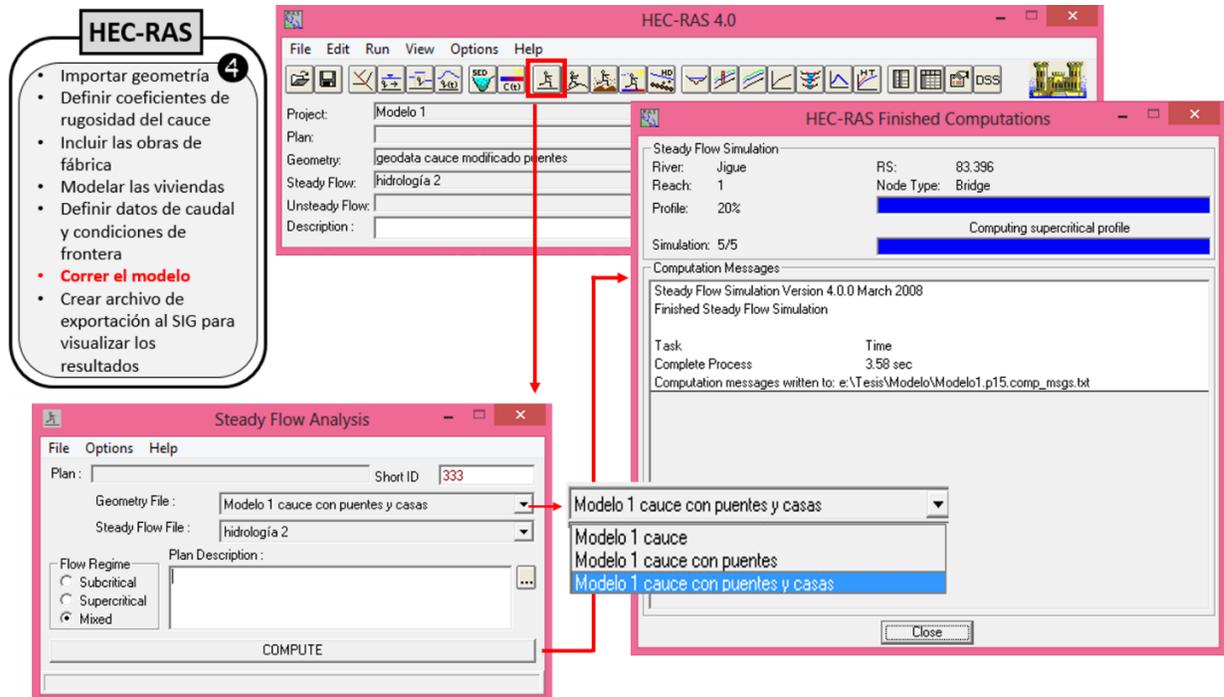


Figura 2.18. Ventana para la selección de los ficheros y la corrida de los resultados.

Una vez ejecutada la simulación correctamente, se pueden ver los resultados de varias maneras. Dentro del menú “View” se tienen grupos de opciones, que son accesibles, también por íconos como se muestran en la Figura 2.19.



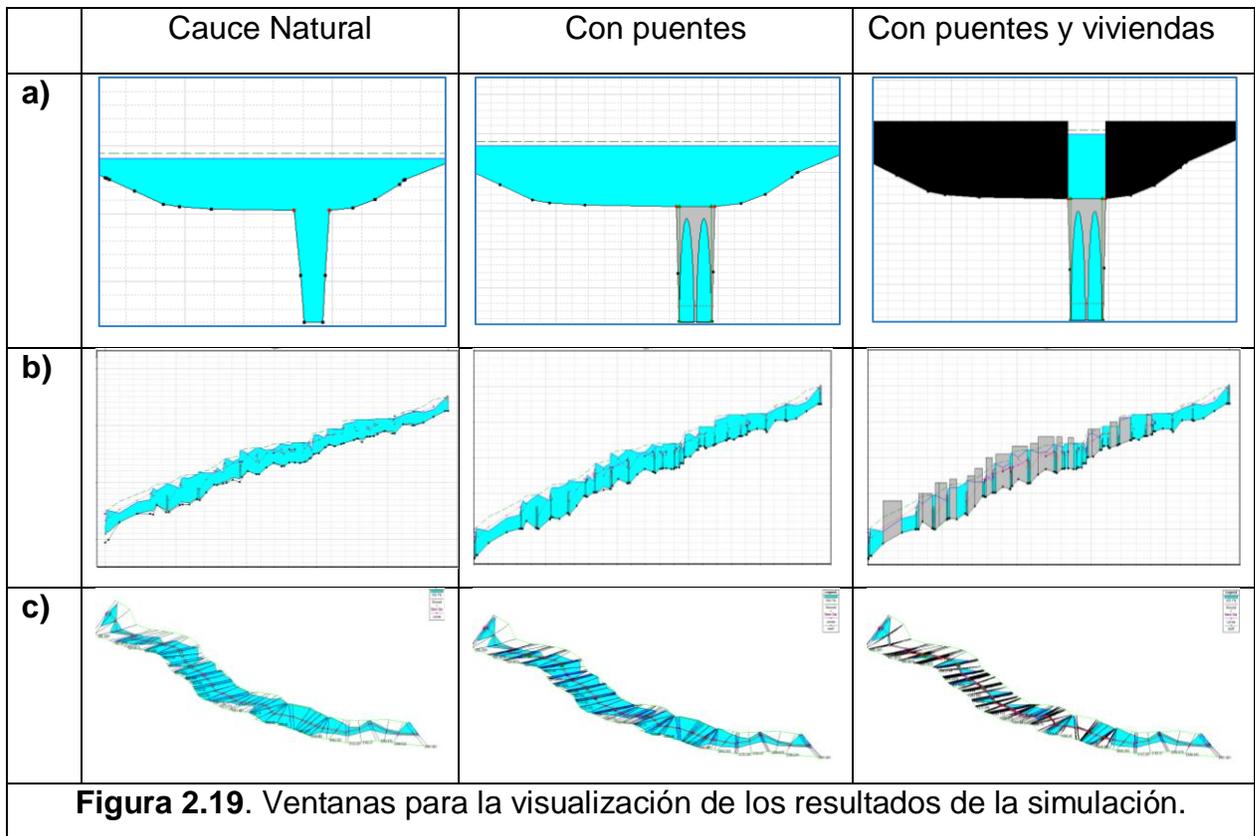
a) Ver las secciones transversales en Cross-Sections.



b) Ver los perfiles de las láminas de agua en Water Surface Profiles



c) Ver dibujos en perspectiva en X-Y-Z Perspectiva Plots



Para finalizar la etapa de procesamiento se creó un fichero de exportación que contiene toda la información que se necesita para la obtención de la lámina y las cotas de agua. Como se observa en la figura 2.20 al crear dicho fichero mediante la opción Export GIS Data se selecciona tanto la ubicación del fichero de salida, como los perfiles que se desea exportar entre otras propiedades.

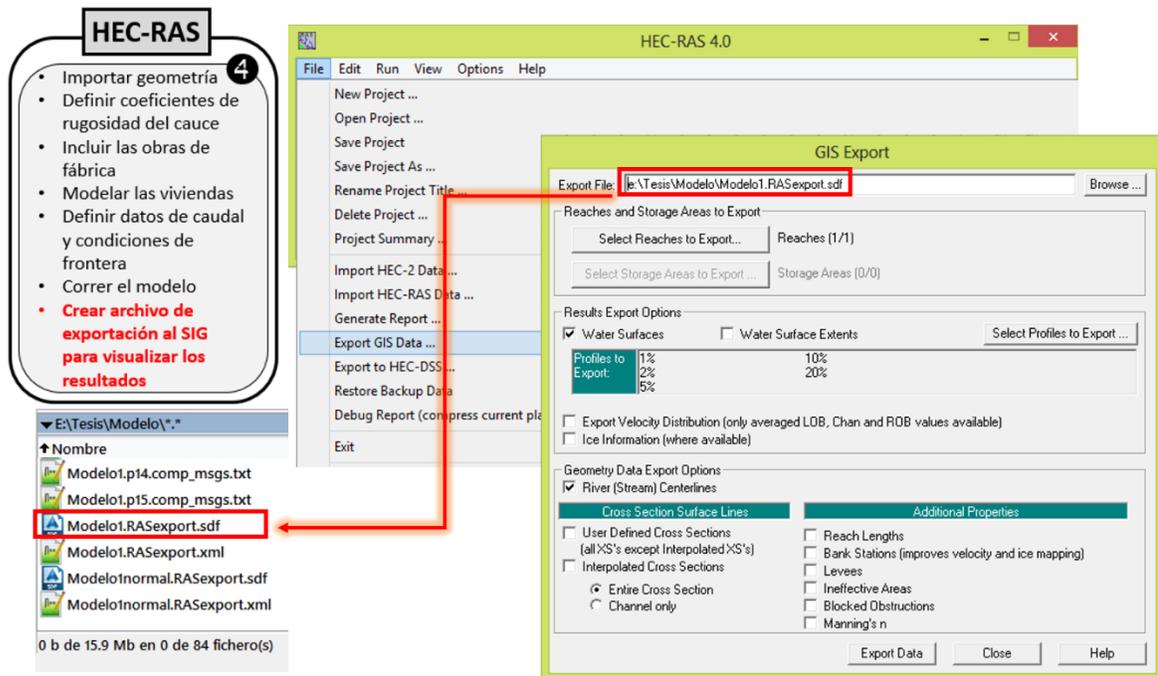


Figura 2.20. Generar el fichero de exportación al ArcGIS.

2.3 Obtención de los mapas de riesgo de inundación en ArcGIS

Luego de haber ejecutado la simulación en el HEC-RAS, se regresa a ArcGIS para realizar el postprocesamiento, nuevamente con la ayuda del HEC-GeoRAS, de esta manera se logra la visualización de los resultados de la simulación hidráulica y las zonas de desborde en el ArcGIS. Antes de importar este fichero fue necesario convertirlo del formato “.sdf” a “.xml” mediante el ícono “Import RAS SDF File” como se muestra en la Figura 2.21. Todas las tareas que involucra el postprocesamiento se realizan mediante el menú Ras Mapping, mediante las opciones “Layer Setup” e “Import RAS Data” se selecciona la ubicación del fichero y se importa al ArcGIS respectivamente.

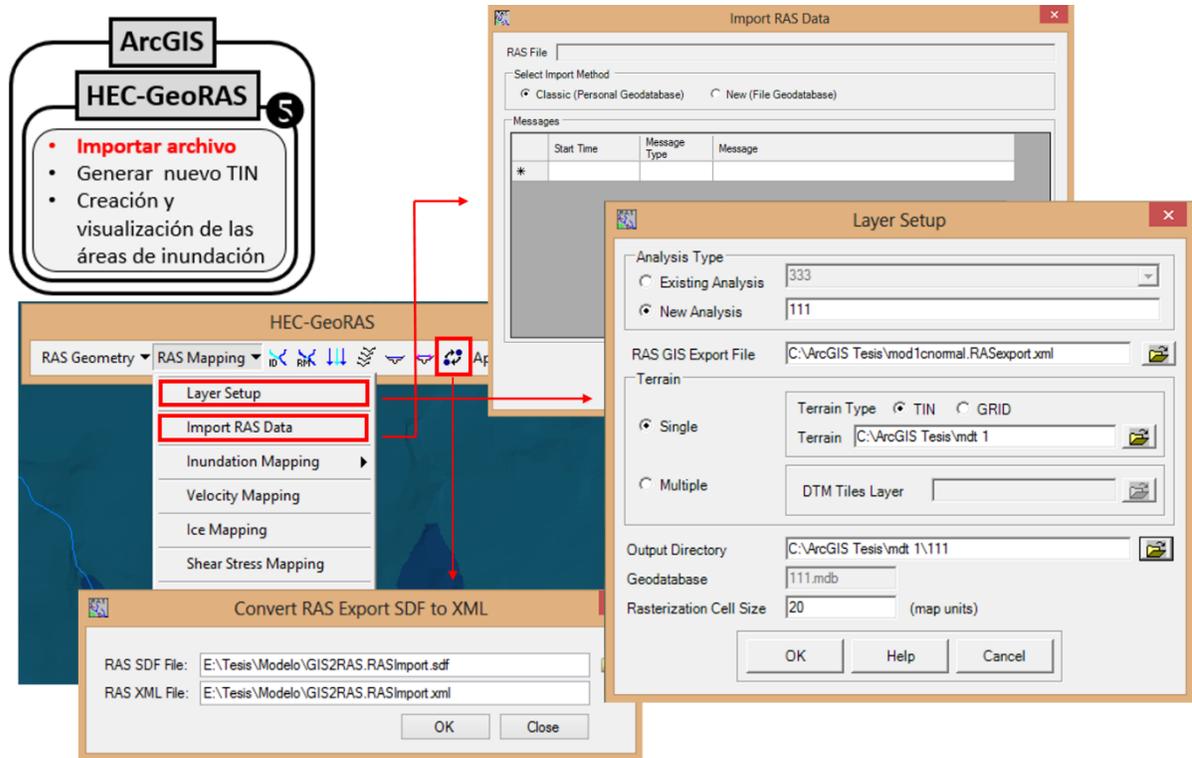


Figura 2.21. Ventana para la importación del archivo al ArcGIS mediante el HEC-GeoRAS

Cuando se importa el archivo se obtiene, sobre el modelo digital del terreno generado al principio, un polígono de ocupación de las secciones transversales y otros datos seleccionados en el trabajo con HEC-RAS (Figura 2.22).

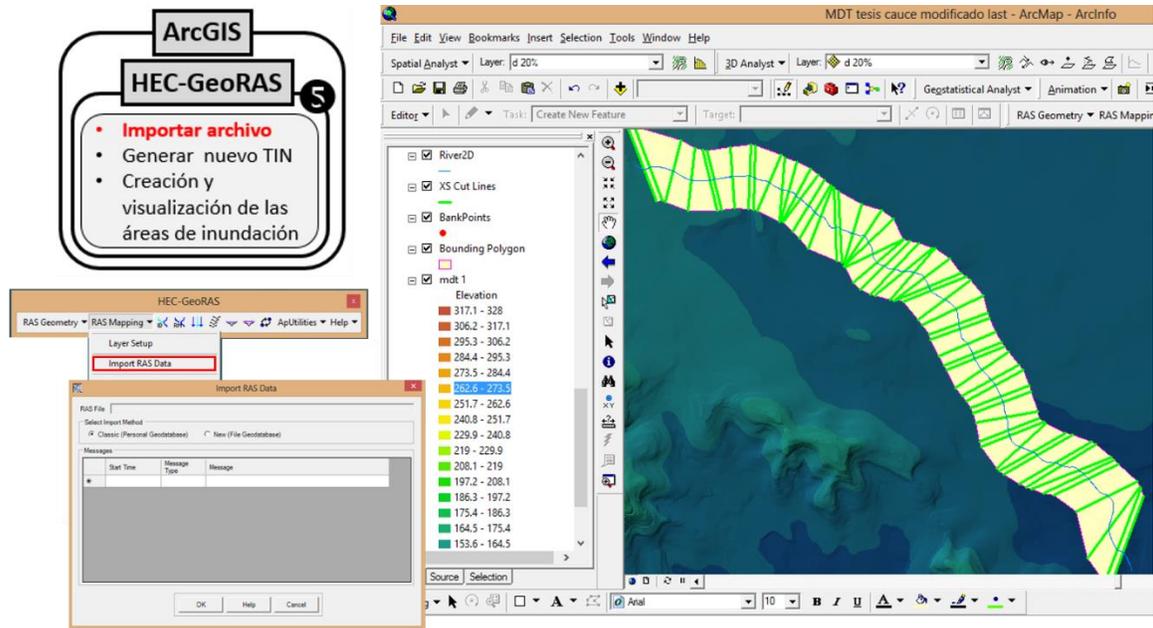


Figura 2.22. Polígono de ocupación y secciones transversales del fichero importado.

El siguiente paso para la visualización de las zonas de inundación es generar un nuevo TIN de cualquiera de los perfiles importados, lo que genera un MDT con las elevaciones en esta zona específica de la llanura de inundación. En el menú Inundation Mapping se selecciona la opción Water Surface Generation para seleccionar el perfil con la probabilidad de diseño que se desea representar. En la Figura 2.23 se muestra el TIN obtenido para la llanura de inundación para un 1% de probabilidad.

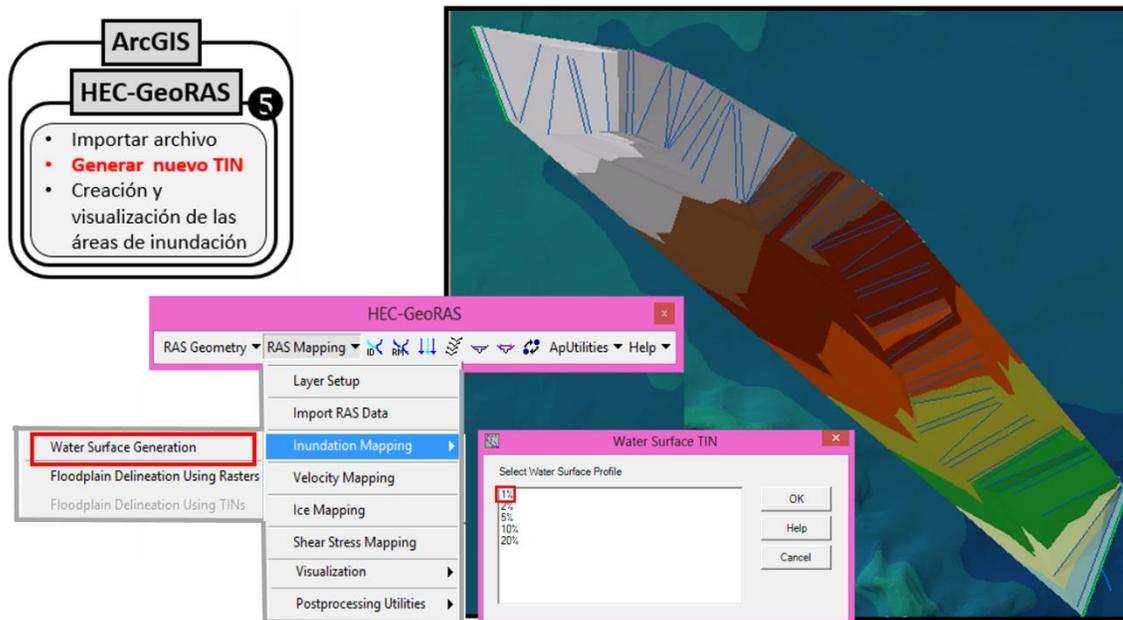


Figura 2.23. Nuevo TIN generado con la información importada de la simulación para 1% de probabilidad.

El último paso para la generación del mapa se realiza mediante la opción “Floodplain Delineation Using Rasters”, donde luego de seleccionar el perfil (al que anteriormente se le creó el TIN), se pueden visualizar las manchas de inundación además de un mapa en formato GRID con la información de la profundidad de esa zona. En la Figura 2.24 se observan los mapas obtenidos para 1% de probabilidad.

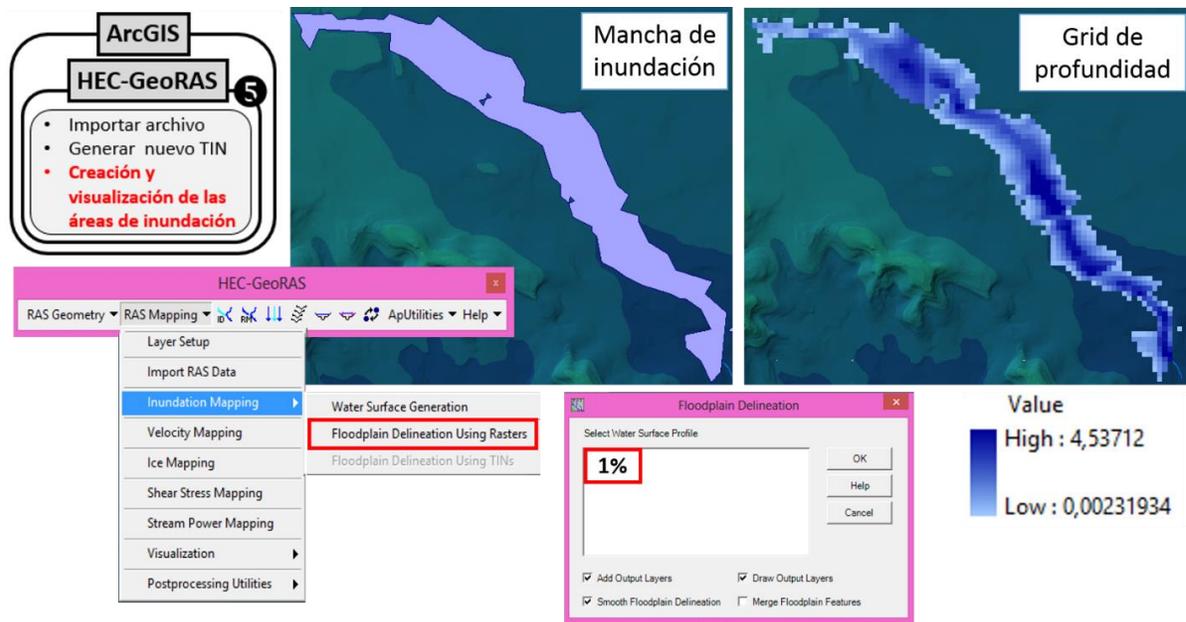


Figura 2.24. Mancha de inundación del río obtenidos para 1% de probabilidad

Aunque ya se tiene representado hasta el momento las manchas de la inundación sobre el MDT, aparentemente no es posible definir o ubicar los límites físicos de la misma en cuanto a zonas específicas dentro de la ciudad. Para ello en el propio software ArcGIS se cargó una imagen satelital georeferenciada de la ciudad de Holguín y de esta manera se visualizan los límites de la inundación para el Río Jigüe. En la Figura 2.25 quedó representado el mapa de inundación para una probabilidad de 1%, o sea un período de retorno de 100 años, el resto de los mapas correspondientes a los demás períodos de retorno, para los cuales se realizó la simulación se pueden observar en los Anexos.

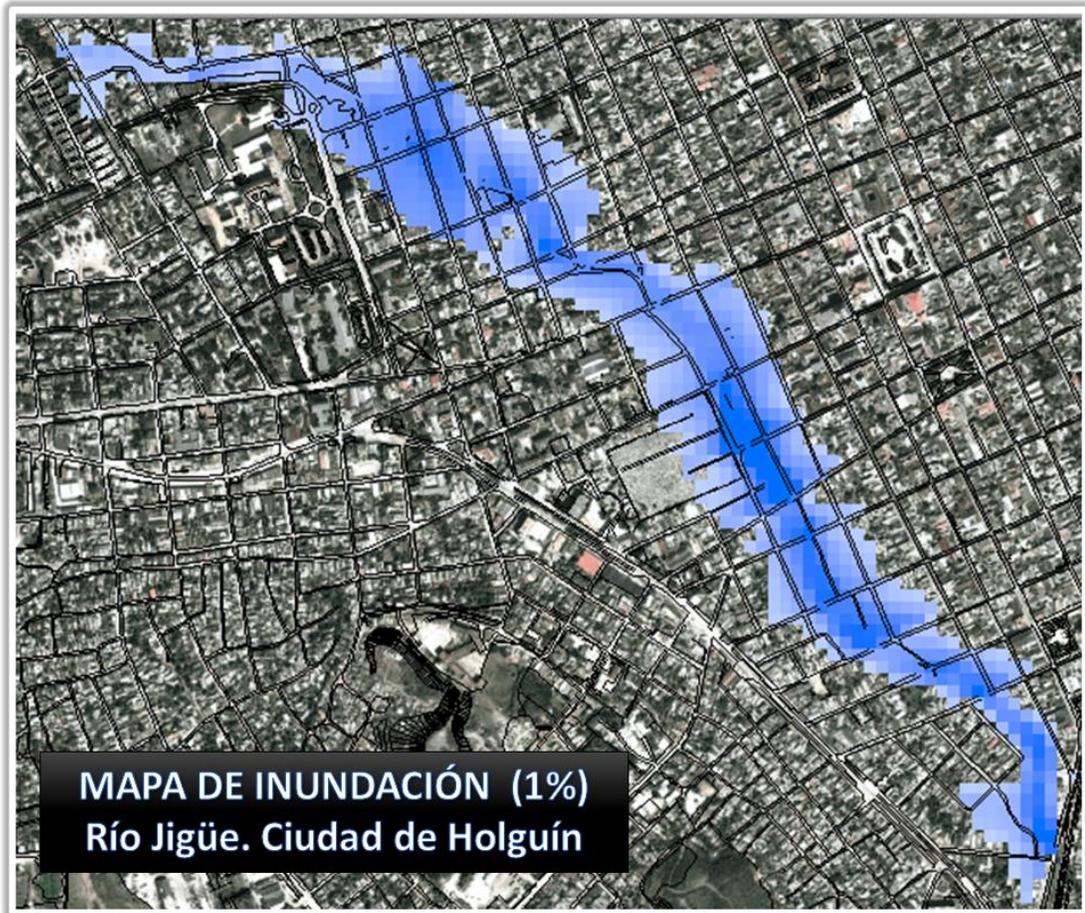


Figura 2.25. Mapa de inundación del río Jigüe para 1% de probabilidad.

Si se desea representar en un mismo mapa, como aumenta la magnitud de inundación a medida que disminuye el período de retorno, se pueden visualizar las manchas de inundación de todos los períodos simultáneamente, esto permitirá comparar los límites alcanzados por el agua a medida que aumenta la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno, como se muestra en la Figura 2.26.

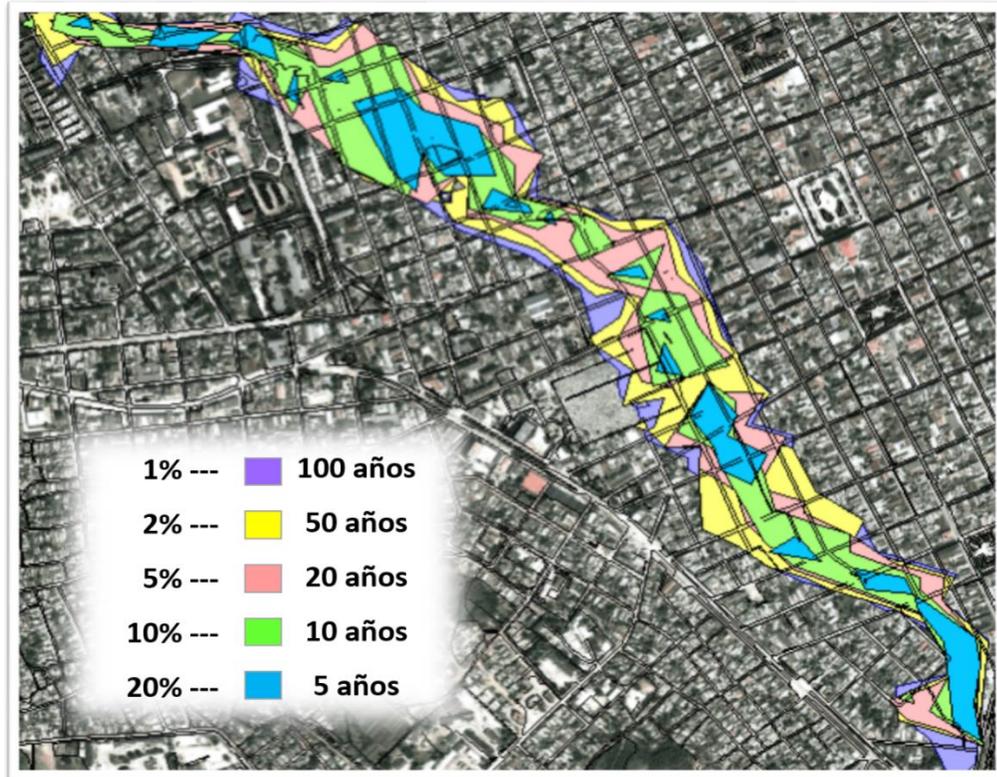


Figura 2.26. Mapa de inundación según el período de retorno.

2.3.1 Análisis de los resultados

Si bien la modelación hidráulica permitió obtener las manchas de inundación de las zonas afectadas por este fenómeno, la verdadera importancia de este resultado radica en que, esta representación de la amenaza, es una de las variables fundamentales para cuantificar el daño económico y social que pueden llegar a causar eventos de esta naturaleza.

Para cuantificar el daño producido por una inundación se realiza un procedimiento que consiste en valorar la severidad de este fenómeno sobre la infraestructura afectada, esto constituye el elemento primordial para determinar el riesgo al que están sometidas las viviendas, obras sociales y demás inmuebles asentados en las zonas cercanas al margen del río.

Cuantificación de los daños

Las viviendas (o infraestructura en general) que resultarán afectadas por las inundaciones del río Jigüe pueden ser visualizadas en el mapa creado anteriormente. Esto es posible mediante la superposición de la mancha de inundación con el fichero “.dxf” importado desde el AutoCAD con la capa de las construcciones, según se muestra en la figura 2.27, sin embargo solamente visualizar las viviendas afectadas resulta insuficiente para determinar los daños económicos esperados por la inundación. De ahí que conocer la cantidad de viviendas afectadas por la inundación es esencial para realizar estimaciones de daños económicos en viviendas ni muy exageradas, pero tampoco insuficientes.

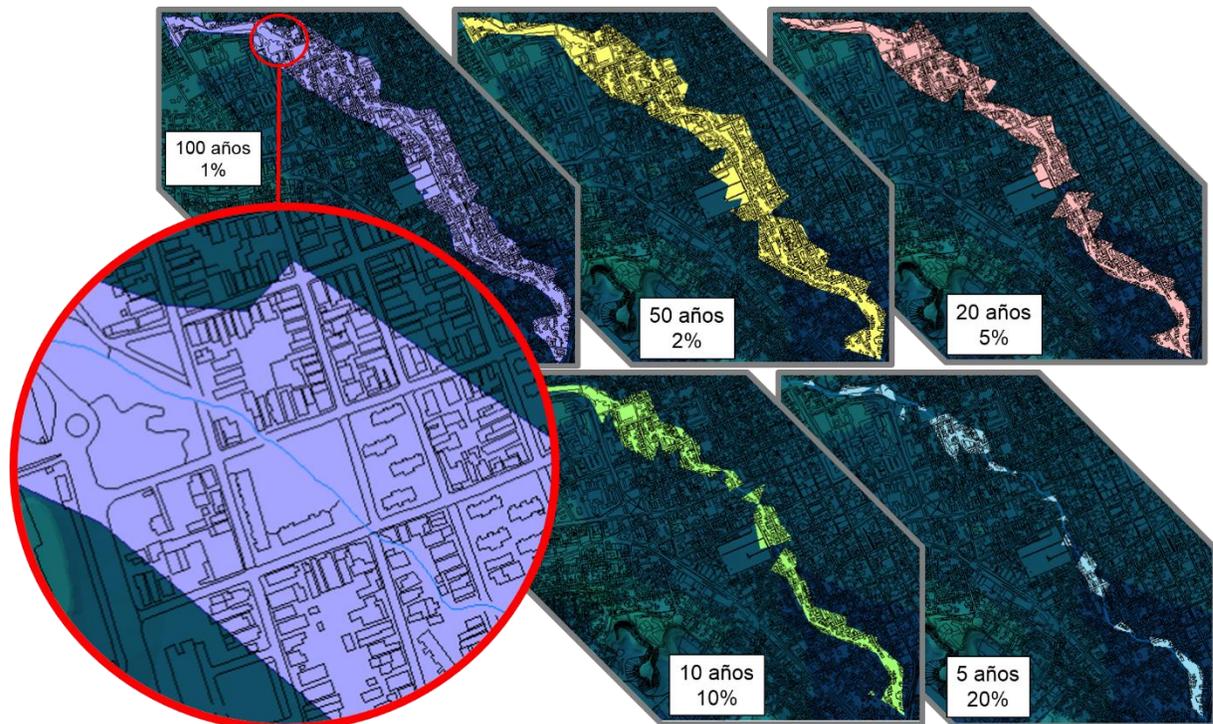


Figura 2.27. Superposición de la mancha de inundación con el fichero de las construcciones.

En la figura 2.27 se pueden observar, delimitadas en colores diferentes, las zonas y manzanas que se encuentran dentro de los límites que alcanzará la inundación, dependiendo del período de retorno. Una vez identificadas, se procede a realizar el proceso más engorroso del trabajo, que consiste en determinar la cantidad de viviendas

contenidas dentro de cada área inundada. Este proceso se considera difícil, pues además de realizarse de manera manual, exige que la cartografía esté debidamente actualizada con todas las construcciones presentes en la zona.

Si se quisiera determinar con mayor exactitud, el daño económico que causaría este evento en las viviendas cuantificadas, resultaría conveniente estimar el valor monetario del inmueble. La evaluación de inmuebles en esencia, indica el valor de un artículo a partir de sus características físicas, ubicación y uso. Además, como bien señala (Perozo, 2012), este costo puede ser considerado como el valor de reposición, que hay que pagar en el mercado por la adquisición de un inmueble de características iguales o equivalentes al que se está evaluando. Esto indica que cada edificación tendrá un valor diferente, por lo que para la presente investigación, al no poder contar con datos reales de costos, no se tendrá en cuenta el valor monetario.

Entre los daños indirectos que también son producidos por las inundaciones se encuentran las afectaciones de carácter social, sobre todo las que atentan contra la calidad de vida de los habitantes. Es por ello que resulta conveniente conocer, aunque sea de manera estimada la cantidad de personas que son susceptibles o vulnerables a esta amenaza. Según datos del Centro Provincial de Estadística, se estima en el momento un promedio de 4 habitantes por vivienda en la ciudad de Holguín.

En la Tabla 2.4 se muestran los resultados de la cuantificación de los daños para cada una de las probabilidades para las que realizó la modelación, teniendo en cuenta como parámetros: el área que ocupa en cada caso la mancha de inundación, la cantidad de viviendas contabilizadas dentro de la zona ocupada por la misma, y la cantidad promedio de habitantes que se encuentran asentados en estas zonas de riesgo.

Tabla 2.4. Cuantificación de los daños producidos por las inundaciones.

Probabilidad	Área Inundable		Viviendas	Habitantes
	m ²	km ²	en riesgo	vulnerables
1%	357433.35	0.36	1446	5784

2%	298623.11	0.29	1274	5096
5%	232314.68	0.23	935	3740
10%	165588.74	0.165	660	2640
20%	64439.08	0.06	249	996

Es válido señalar la existencia, en las zonas a ocupar por la inundación, no solo de viviendas o edificios multifamiliares, sino también de varias obras sociales, empresas, entidades económicas y de los servicios, cuya afectación representarían un incremento de las pérdidas económicas no solo para la población sino también para el sector estatal.

Algunos de estos sitios son:

- Organopónico “Hospital Lenin”
- Tienda “La Rotonda”
- Kiosco “Hospital Lenin”
- Empresa de Investigaciones de la Construcción
- Parqueo Cine Frexes
- Comité Provincial ANAP
- Cine Frexes
- Cremería Las Torres
- Iglesia “Calle Rastro”
- Escuela Primaria “Mario Pozo López” ”
- Empresa de Ingeniería y Diseño Vértice
- Cementerio “Rastro”
- Taller “Mártires de Holguín”
- Banco “” Jose A. Cardet”
- Taller “” Angel Guerra”
- Tienda de Víveres Gnral Zalazar y Maceo
- Hogar de niños sin amparo filial Maceo.

2.3.2 Clasificación de las zonas de riesgo

Hasta el momento, los mapas de inundación obtenidos de la modelación matemática han permitido cuantificar, de manera estimada, las infraestructuras que son susceptibles a sufrir daños. Sin embargo, es una realidad que no todas las viviendas o inmuebles que se encuentran dentro de la mancha de inundación, presentan el mismo grado de vulnerabilidad. Por esta razón resulta muy útil poder especificar cuáles de estas edificaciones requieren un mayor nivel de cuidado, una atención priorizada a la hora de

realizar evacuaciones o incluso concebir desde su diseño la construcción de medidas de protección que garanticen que el impacto de las aguas sobre ellas no sea tan severo.

Según Perozo [27] existe un factor fundamental que permite valorar el nivel de impacto de una inundación sobre las infraestructuras en general, y es la profundidad del agua. En la presente investigación se consideró el efecto de la profundidad de inundación como parámetro fundamental para clasificar las zonas de riesgo y valorar el impacto que provoca una mancha de inundación sobre una zona determinada, pues en la medida que la profundidad es mayor, se esperará que los daños sean mayores.

Lo ideal en cuanto a determinar el riesgo de inundación en una zona determinada, resultaría de conocer la magnitud de la amenaza, o sea determinar la profundidad del agua en cada una. Esta actividad en la práctica resulta poco viable y como medida alternativa comúnmente se determina una profundidad de agua promedio de la inundación para cada zona afectada para así, determinar la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo de inundación en viviendas. [35]

Para esto se utilizan los mapas en formato GRID obtenidos a partir de la mancha de inundación, divididos en franjas de diferentes intervalos de profundidades y que pueden visualizarse fácilmente en una escala de colores. Estos mapas, brindan a su vez información sobre la extensión de la mancha de inundación que se alcanza para las condiciones de profundidad del agua. De esta manera se puede observar cuales viviendas se encuentran dentro de las zonas donde el agua alcanzará un mayor nivel.

De esta manera se elaboró una escala de peligrosidad definida en 5 niveles según recomienda Perozo [27] y se obtuvo así una clasificación de las zonas con mayor y menor nivel de riesgo ante las inundaciones del río Jigüe. Estos mapas de vulnerabilidad son la representación gráfica de la amenaza según el factor de la profundidad de la inundación, ya que ésta sintetiza, de la manera más amplia, la peligrosidad. En la Figura xxx se muestra el mapa obtenido para un período de retorno 100 años, el resto se pueden observar en los Anexos.

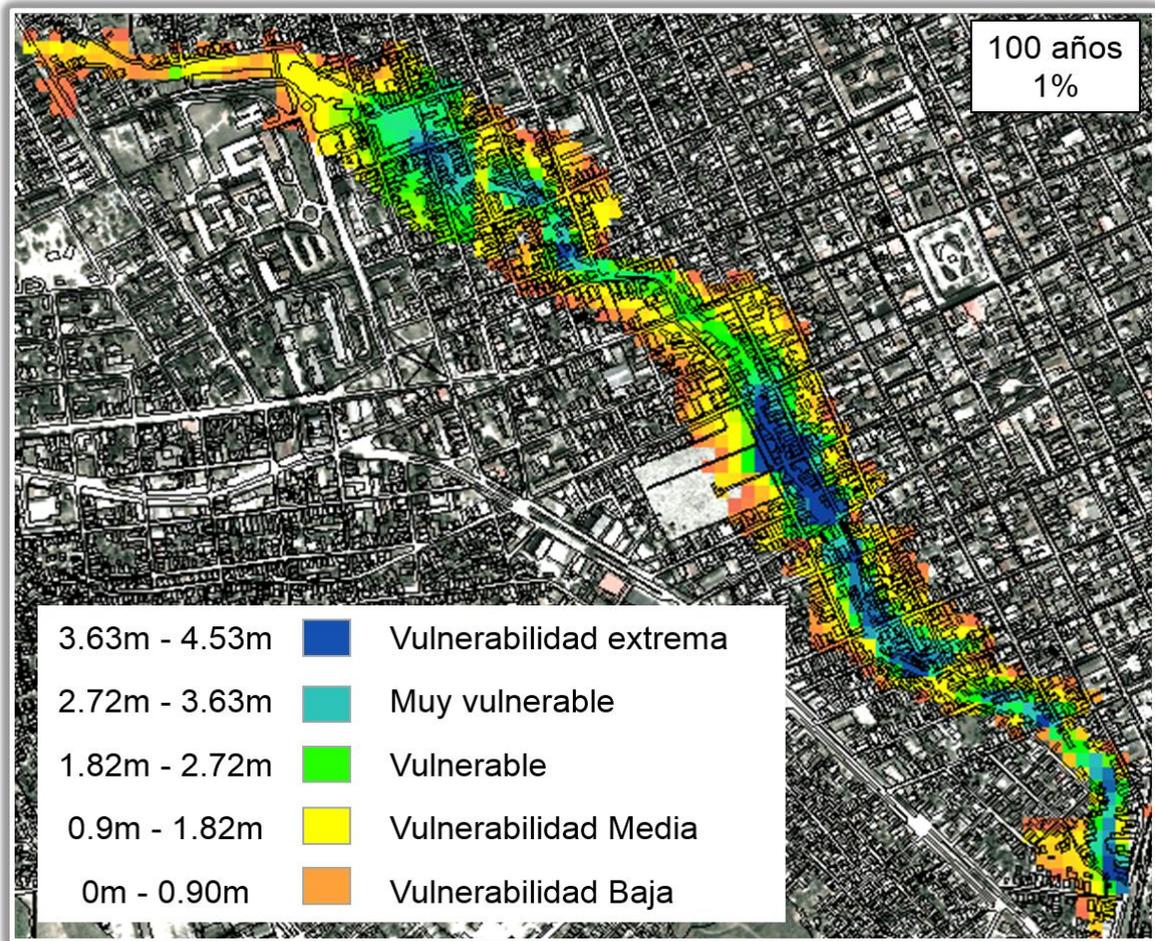


Figura 2.28. Clasificación de las zonas de riesgo según la profundidad de la inundación. Mapa de riesgo para período de retorno de 100 años.

Los resultados mostrados en la Figura 2.28 parecen totalmente lógicos, las viviendas que se encuentran en las márgenes del río, sufren el impacto de la inundación más severamente, sin embargo, a medida que se van alejando va disminuyendo la afectación. De igual manera se observan zonas con un mayor nivel de profundidad, concentradas fundamentalmente a partir de la segunda mitad, donde, como se explicó a inicios del capítulo, se observa un estrechamiento del cauce producido por la presencia de las viviendas en el cauce, por lo que esta herramienta permite comprobar el efecto negativo que trae consigo esta situación.

Esta cartografía de riesgo podrá ser utilizada no sólo como base para la ordenación y planificación del territorio, sino que sus resultados también permitirán proponer medidas

para reducir, en la medida de lo posible, los factores que influyen en la alta vulnerabilidad de las zonas identificadas en los mapas de riesgo.

2.5 Conclusiones

- De las tres variantes de datos geométricos usados en la simulación, la variante que incluye las construcciones y puentes, presenta mayores niveles de agua en la inundación. Esta constituye la variante que describe de manera más real el estado actual del cauce y por tanto sus resultados son más confiables.
- Con la obtención de los mapas de inundación se pudo cuantificar la magnitud de la inundación, las viviendas afectadas así como la población vulnerable a esta amenaza.
- Utilizando la profundidad de la inundación como factor determinante, se logró clasificar las zonas de inundación según su grado de vulnerabilidad en 5 niveles.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se logró representar en el modelo las obras de fábrica y simular el efecto de las construcciones que se encuentran en las márgenes del río. Estas características propias de un río en zonas urbanas, garantizan la similitud de los resultados con los fenómenos ocurridos en la vida real.
- El uso del software HEC-RAS con su potente algoritmo de cálculo y abalado internacionalmente en el uso de este tipo de condiciones, asegura la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos en el cálculo hidráulico.
- Se mostró como se pudieron obtener a partir de los mapas, resultados concretos de las viviendas que presentan un mayor grado de vulnerabilidad y por lo tanto requieren una mayor atención por parte de los organismos responsables.
- Las zonas con mayor riesgo, según los mapas, se encuentran en las áreas bajas del Hospital Lenin y a partir de la calle Luz Caballero y hasta el final del río, coincidiendo con estudios de vulnerabilidad realizados en años anteriores.
- Los mapas obtenidos presentan un buen nivel de confiabilidad y pueden ser utilizados como herramientas para la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento territorial y las políticas de protección ante desastres.

RECOMENDACIONES

1. Para complementar este estudio y lograr resultados más completos se recomienda dar continuidad a la presente investigación a partir de los siguientes aspectos:
 - Utilizar datos de flujo más actualizados, incluso vincularlos con los resultados obtenidos a partir de un modelo hidrológico de la cuenca del río.
 - Trabajar con planos topográficos más actualizados, obtenidos preferiblemente a partir de levantamientos topográficos, capaces de describir detalladamente las características fisiográficas de la cuenca del río.
 - Profundizar en las aplicaciones y facilidades que brinda el modelo, como el estudio del transporte de sedimentos.
 - Modelar el comportamiento hidrodinámico del cauce en un modelo 2D y comparar los resultados con el enfoque 1D empleado en el presente trabajo.
 - Tener en cuenta la presencia de las viviendas en el cauce desde la obtención del modelo digital del terreno.
 - Obtener el catastro actualizado de la zona para realizar un inventario físico de las construcciones afectadas más reales, así como obtener por parte de planificación física el número exacto de la población afectada.
 - Realizar un estudio económico detallado para determinar el costo monetario de los daños producidos por la inundación, según la magnitud de la misma.
 - Trabajar en la obtención de registros y datos de límites de avenidas que permitan hacer estudios comparativos para validar en un futuro este modelo.
2. Aplicar esta misma secuencia de trabajo, en futuras simulaciones hidráulicas con el objetivo de obtener los mapas de riesgo ante inundaciones en el resto de las cuencas hidrográficas Marañón, Guillenes, Milagrito, que se encuentran en el sector urbano de la ciudad de Holguín. De esta manera conocer no solo la capacidad de transporte hídrico de toda la red hidrográfica, sino el nivel de vulnerabilidad que presentan todos los sectores de la ciudad.
3. Divulgar los resultados de la presente investigación en a las instituciones responsabilizadas, tanto en el ordenamiento territorial y la preservación de vidas y

bienes materiales, como en el control de los recursos hídricos: Planificación Física, Consejo de Defensa Civil, RAUDAL, CITMA etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Bhattacharya. (2007, 25.08.2014). *Modelación para la Gestión de Inundaciones*. Available: <http://www.unesco-ihe.org/education/ilearning.htm>
- [2] H. Chacón, "Mapa de peligro ante inundaciones en un sector de la ciudad de Holguín.," Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", 2013.
- [3] L. M. Zúñiga, O. Gallardo, J. L. Rodríguez, M. M. Rojas, and D. A., "Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Holguín," 2008.
- [4] Y. M. Fernández, "Obtención de mapas de inundaciones para el tramo de la calle Mariana de la Torre hasta la calle Maceo correspondiente al río Jigüe de la ciudad de Holguín. ," Departamento de Ingeniería Civil., Universidad de Holguín, 2014.
- [5] M. B. Abbott, "Hydroinformatics: Information Technology and the aquatic environment. Avebury technical, Aldershot, Ukraine.," 1991.
- [6] "Sistema de Información Geográfica," in *Wikipedia*, ed, 2014.
- [7] J. D. Ruiz, "Evaluación de la amenaza por inundación.," Universidad de Málaga. España, 2006.
- [8] A. Álvarez, "Simulación Hidráulica del Traspase Este-Oeste en la Zona Norte Oriental de Cuba.," Universidad de Ciego de Ávila 2007.
- [9] A. Rocha, "Los modelos como herramienta valiosa para el diseño hidráulico.," presented at the Investigación en modelos físicos y matemáticos de obras hidráulicas., 2003.
- [10] M. Garrido, M. R. Gómez, and A. J. León, "Sistema automatizado de alerta temprana ante el peligro de inundaciones," *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, vol. XXXIV, pp. 30-43, 2013.
- [11] A. J. García, "Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos," Doctoral, DEPARTAMENTO DE EXPRESIÓN GRÁFICA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, ESPAÑA., 2013.
- [12] M. Garrido, "Integración de herramientas informáticas para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones. ," Master, FACULTAD DE INGENIERÍA INFORMÁTICA CENTRO DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE SISTEMAS (CEIS) Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" 2012.
- [13] M. Garrido, M. R. Gómez, and A. J. Leon, "Integración de herramientas informáticas para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones.," in *CONGRESO INTERNACIONAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE.*, La Habana, Cuba, 2012.
- [14] J. C. Warner, G. W. Brunner, and B. C. Wolfe. (2002, 22.01.2015). *United States Army Corps of Engineers*. Available: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.html>
- [15] R. Almenares and A. Álvarez, "Modelación de la rotura de la presa melones con el modelo HEC-RAS," Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Holguín. Dirección del Traspase., XVI FORUM DE CIENCIA Y TÉCNICA. 2006.

- [16] J. M. García, "Metodología para la caracterización geométrica de obras de fábrica en cauces fluviales mediante técnicas fotogramétricas. Aplicación a modelos hidráulicos.," Maestría en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura. , Universidad de Salamanca – Universidad deValladolid, 2012.
- [17] E. E. Osorio, "Manual de ArcGIS 9.3 - Básico.Descripcion de la suite ArcGIS , representacion y consulta de datos.," 2010.
- [18] T. Cameron and P. E. Ackerman. (2011, 22.01.2015). *United States Army Corps of Engineers*. Available: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas_downloads.html
- [19] E. Molero, "Manual Básico de HEC-GeoRAS " Universidad de Granada. Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio2013.
- [20] S. Fattorelli and P. Fernandez, "Diseño hidrológico.," Water Assessment and Advisory., Biblioteca Virtual2011.
- [21] L. Montoya and R. Vargas, "Aplicación de SIG para la evaluación de amenazas y riesgos: Tegucigalpa, Honduras.," International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, ITC. The Netherlands.2011.
- [22] A. J. Leon, M. R. Gómez, J. B. Martínez, Y. Rodríguez, and M. Garrido, "Plataforma Modular Integrada para el pronóstico de inundaciones," *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, vol. XXX, 2009.
- [23] P. Etxeberria, J. M. Edeso, and A. Brazaola, "Cartografía de peligro de inundación mediante sistemas de información geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos.," in *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, España, 2002.
- [24] M. Barillas-Cruz, C. van Westen, E. Orozco, I. Thonon, E. Lira, G. Peters Guarín, *et al.*, "Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Salamá y análisis de vulnerabilidad.," *GEOS*, vol. 23, pp. 17-24, 2003.
- [25] I. Oleagordia and R. Rodríguez, "Estudio Hidrológico del río Arlanzón a su paso por el Término Municipal de Burgos " U.D. de Hidráulica e Hidrología. E.T.S. Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, España.2003.
- [26] R. García and C. Conesa, "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*, vol. 107-123, pp. 107-123, 2011.
- [27] M. A. Peroso, "Sistema de medidas para reducir el riesgo de inundación en llanuras ribereñas. Caso de estudio: Llanura del río Coro," Facultad de Ingeniería Civil. , Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, 2012.
- [28] R. Expósito, "Modelación hidráulica de un tramo de río en la cuenca Guantánamo-Guaso con auxilio de SIG y HEC-RAS.," Facultad de Ingeniería Civil. Especialidad: Ingeniería Hidráulica., Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, 2009.

- [29] A. Rojas and A. J. Leon, "Un análisis de inundaciones por intensas lluvias en la zona urbana de Camagüey.," in *CONGRESO INTERNACIONAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE*, La Habana, Cuba, 2012.
- [30] M. A. Couto, "Comparación de resultados de la modelación hidráulica con los software HEC-RAS, SWMM y el IBER," Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones de Hidráulica, 2013.
- [31] A. L. Luis, "Estimación del riesgo de inundación en viviendas a partir de eventos máximos: Caso de estudio en la cuenca San Pedro.," Facultad De Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", 2013.
- [32] L. Aguirre, "Estudio de las inundaciones en la ciudad de Holguín.," Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos.2008.
- [33] J. Mastrapa, "Estudio de situación actual del drenaje en la Ciudad de Holguín.," Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín RAUDAL.2011.
- [34] L. Aguirre and A. Álvarez, "Diagnostico sobre la situacion que presenta el cauce del arroyo jigüe.," Delegación Provincial INRH. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos2008.
- [35] M. A. Peroso and N. V. Marrero, "Metodología para estimar el riesgo de inundación en Llanuras ribereñas. Caso de estudio: llanura del río coro," in *CONGRESO INTERNACIONAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE*, La Habana, Cuba, 2012.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla A1.1. Otros modelos de simulación hidráulica.

Anexo 2. Figura A2.1. Vivienda en el margen del río Jigüe, afectada por la inundación del 3 de julio del 2006.

Anexo 3. Tabla A3.1. Ángulo de esviaje que presentan los puentes del tramo de estudio.

Anexo 4. Visualizaciones de los resultados de la simulación hidráulica

Figura A4.1. Sección transversal luego de la simulación.

Figura A4.2. Perfil de la lámina de agua del río luego de la simulación.

Figura A4.3. Perspectiva del río en X-Y-Z.

Anexo 5. Mapas de inundación para los distintos períodos de retorno.

Figura A5.1. Mapas de inundación para período de retorno de 50 años.

Figura A5.2. Mapas de inundación para período de retorno de 20 años.

Figura A5.3. Mapas de inundación para período de retorno de 10 años.

Figura A5.4. Mapas de inundación para período de retorno de 5 años.

Anexo 6. Mapas de vulnerabilidad. Clasificación de las zonas de riesgo para los distintos períodos de retorno.

Figura A6.1. Clasificación de las zonas de riesgo para período de retorno de 50 años.

Figura A6.2. Clasificación de las zonas de riesgo para período de retorno de 20 años.

Figura A6.3. Clasificación de las zonas de riesgo para período de retorno de 10 años.

Figura A6.4. Clasificación de las zonas de riesgo para período de retorno de 5 años.

Anexo 1. Modelos de simulación hidráulica.

Método	Modelo	Licencia
1D	HEC-RAS(HEC- GeoRAS)	Libre
	MIKE 11	Comercial
	WSPRO	Comercial
	DAMBRK	Comercial
	SOBEK-CF	Comercial
	ISIS Steady	Comercial
	ISIS Flow	Comercial
2D	CARPA	Libre
	IBER	Libre
	LISFLOOD-FP	Comercial
	TUFLOW	Comercial
	MIKE 21	Comercial
	MIKE FLODD (INTEGRACIÓN DE MIKE 11 Y MIKE 21)	Comercial
	TELEMAC	Comercial
	SOBEK-OF	Comercial
	Delft-FLS	Comercial
	RMA-2 (SMS)	Comercial
	HIVEL2D (SMS)	Comercial
	FESWMS	Comercial
	HYDRO AS-2D	Comercial
	FLO-2D	Comercial
	3D	TELEMAC 3D
Delft-3D		Comercial
MIKE 3		Comercial
RMA 10 (SMS)		Comercial
FLOW 3D		Comercial
CFX		Comercial
FLUENT		Comercial
PHEONIX		Comercial

Tabla A1.1. Modelos de simulación hidráulica. [31]

Anexo 2. Daños en vivienda situada en el cauce del río Jigüe.



Figura A2.1 Vivienda en el margen del río Jigüe, afectada por la inundación del 3 de julio del 2006

Anexo 3. Ángulo de esviaje de las obras de fábrica

Puente	Ángulo de esviaje	Puente	Ángulo de esviaje
Mariana de la Torre	4	Rastro	11
Organopónico	0	Frexes	0
Cochera	19	Martí	14
Carbó	19	Luz Caballero	8
Cuba	12	Aricochea	0
Garayalde	8	Cables	0
Mendieta	39	Ángel Guerra	10
Victoria	29	Peralejo	37
Agramonte	0	Coliseo	27
Arias	31	General Salazar	12
Unión	26	Maceo	29
Aguilera	38	Ángulo Promedio	16.22

Tabla A3.1 Ángulo de esviaje que presentan los puentes del tramo de estudio.

Anexo 5. Mapas de inundación para los distintos períodos de retorno.

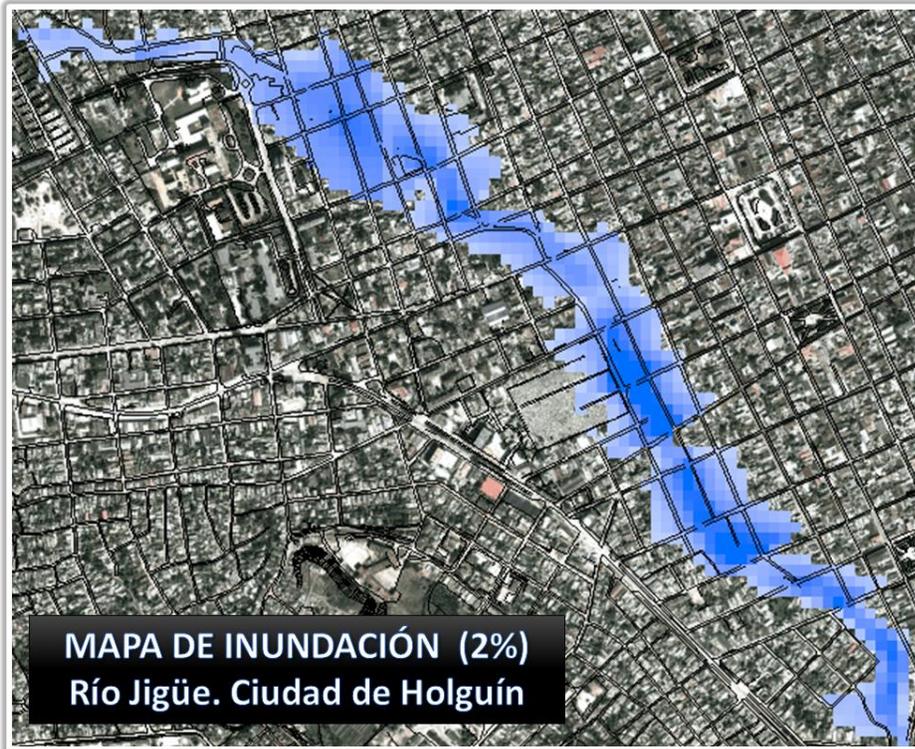


Figura A5.1. Mapas de inundación para período de retorno de 50 años (2%).

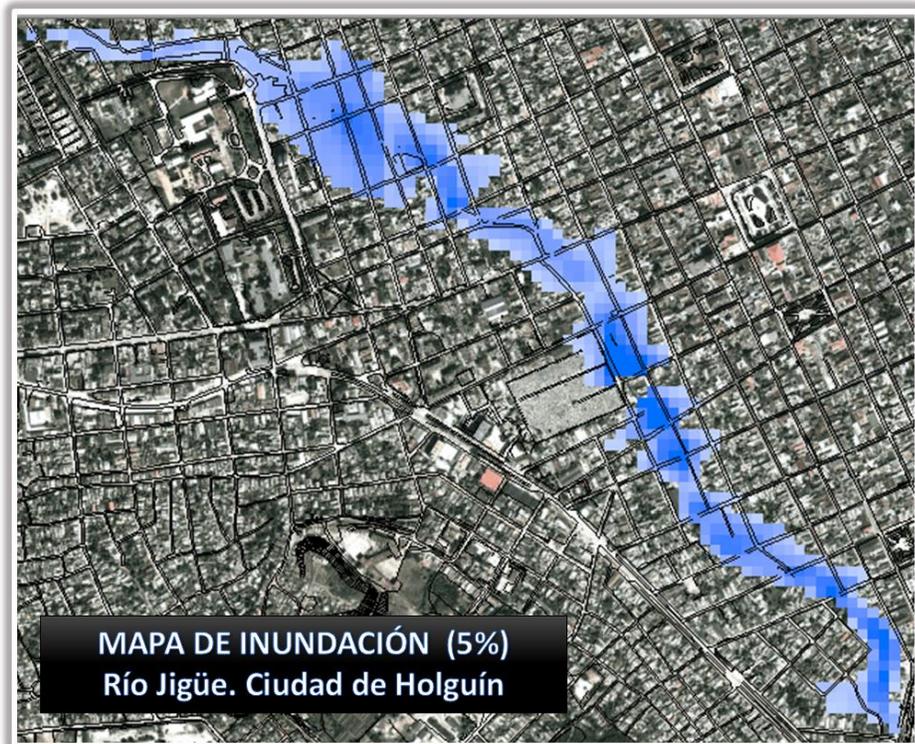


Figura A5.2. Mapas de inundación para período de retorno de 20 años (5%).



Figura A5.3. Mapas de inundación para período de retorno de 10 años (10%).

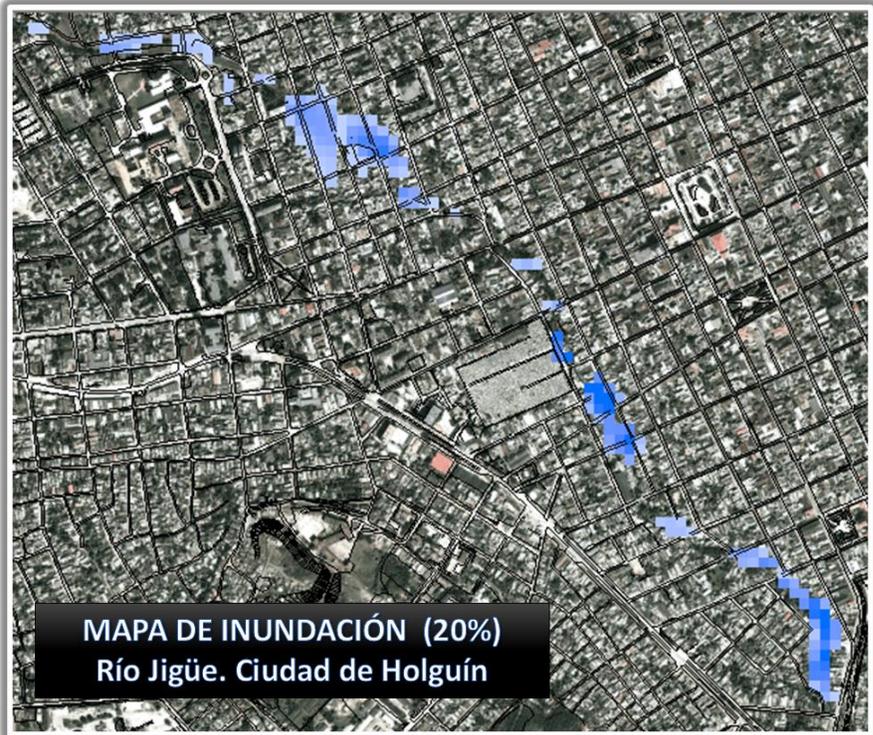


Figura A5.4. Mapas de inundación para período de retorno de 5 años (20%).

Anexo 6. Mapas de vulnerabilidad. Clasificación de las zonas de riesgo para los distintos períodos de retorno.

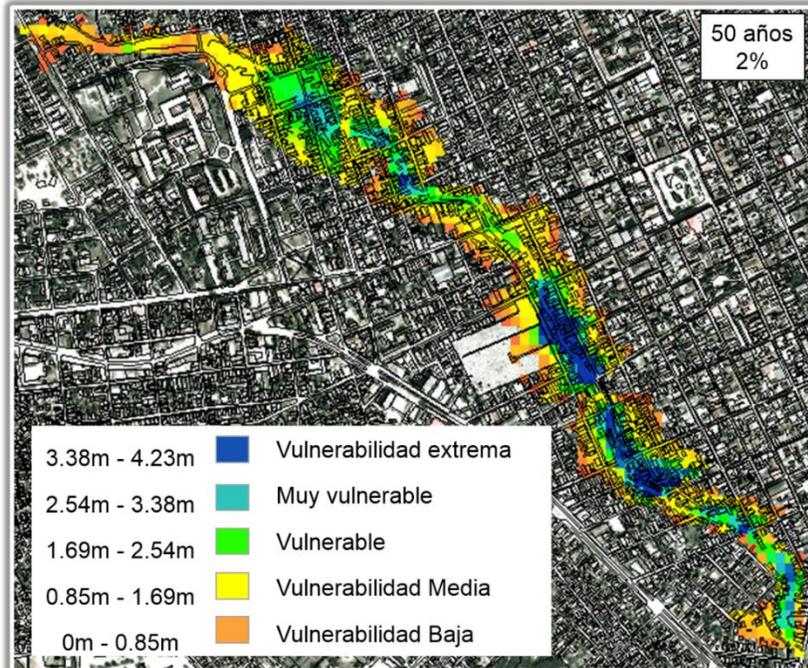


Figura A6.1. Clasificación de las zonas de riesgo según la profundidad de la inundación. Mapa de riesgo para período de retorno de 50 años.

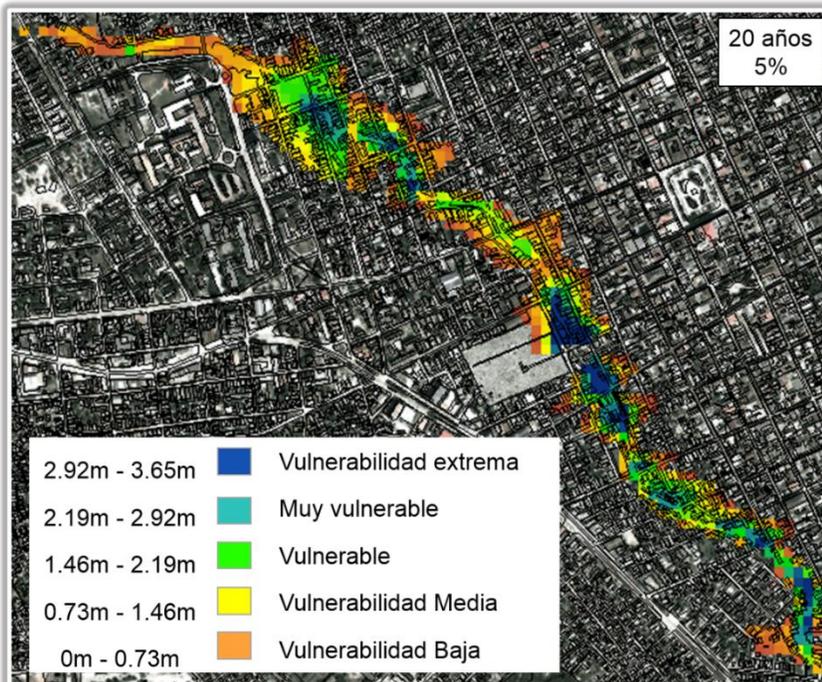


Figura A6.2. Clasificación de las zonas de riesgo según la profundidad de la inundación. Mapa de riesgo para período de retorno de 20 años.

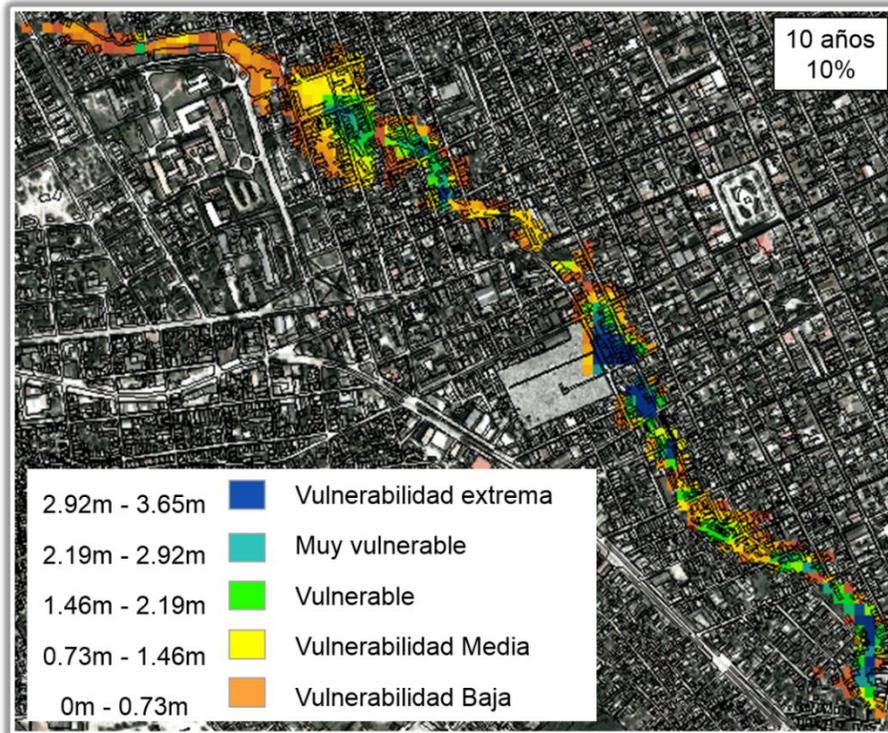


Figura A6.3 Clasificación de las zonas de riesgo según la profundidad de la inundación. Mapa de riesgo para período de retorno de 10 años.

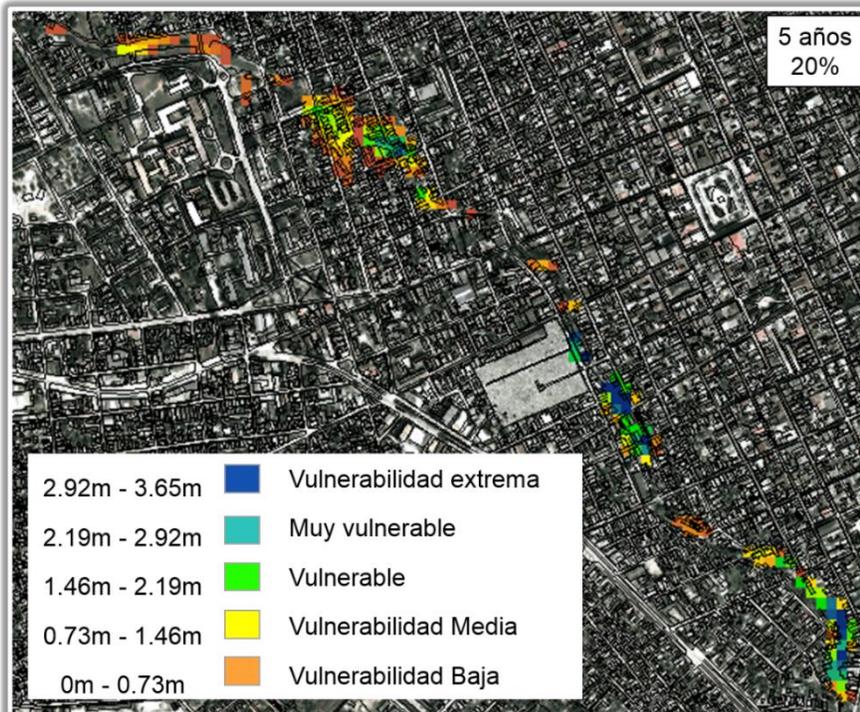


Figura A6.4. Clasificación de las zonas de riesgo según la profundidad de la inundación. Mapa de riesgo para período de retorno de 5 años.

