

**Modelación de Inundaciones en Ambientes Urbanos Bajo la Implementación del
Software IBER**

Autor

Anderson Alveiro Maldonado Pérez

Director

MSc. Diego Sánchez Tapiero

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

**Modelación de Inundaciones en Ambientes Urbanos Bajo la Implementación del
Software IBER**

Anderson Alveiro Maldonado Pérez

Monografía para optar por el Título de: Ingeniero Civil

Director

MSc. Diego Sánchez Tapiero

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa Ingeniería Civil

Pamplona

2024

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría manifestar mi profunda gratitud por el apoyo constante que he recibido a lo largo de este camino hacia la obtención de este importante logro en mi vida. Este momento no solo representa un logro personal, sino también es un testimonio de la dedicación y el apoyo continuo que he recibido de todos ustedes.

A mi familia, les debo un profundo reconocimiento por su incansable aliento y su constante presencia durante este trayecto. Su apoyo ha sido mi roca en momentos de desafío y su guía ha sido la luz que me ha orientado en el camino hacia el éxito. A mis padres, les agradezco por su amor incondicional, por su sacrificio y por ser los pilares de mi vida. Su fe en mí ha sido mi mayor motivación y su ejemplo, mi inspiración constante.

A mis amigos y seres queridos, les agradezco por estar a mi lado en cada paso del camino. Su amistad, ánimo y palabras de aliento han hecho que este viaje sea más significativo y gratificante. A cada uno de ustedes, les dedico este logro. Su presencia ha sido mi mayor regalo y su influencia ha moldeado mi camino hacia el éxito. Este hito no solo me pertenece a mí, sino que es un reflejo del amor, el apoyo y la dedicación de todos ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	8
Capítulo 1. Fundamentos De La Modelación.....	10
La modelación: Concepto y Aplicaciones.	10
Factores que Influyen en la Modelación.....	11
Datos de Entrada	12
Capítulo 2. Tipos de Modelación	16
Modelización Hidrodinámica	16
Modelos Hidráulicos.....	17
La Hidrodinámica En Inundaciones	18
Modelación Hidrológica en Ambientes Urbanos	20
Definición de Modelación Hidrológica Urbana.....	20
Importancia de la Modelación Hidrológica en Ambientes Urbanos.....	21
Beneficios y Aplicaciones de la Modelación Hidrológica Urbana	22

Factores Específicos en la Modelación Hidrológica Urbana	22
Modelos Unidimensionales	23
Modelos bidimensionales	24
Caudales Máximos	26
Capítulo 3. Modelación de Inundaciones Urbanas: Herramientas y Métodos	29
HEC-RAS	30
SWMM	31
MIKE URBAN	33
PCSWMM	34
IBER	35
Capítulo 4. Modelación con la Implementación de IBER	39
Ventajas del Modelo IBER.....	40
Limitaciones Del Modelo IBER	41
El Módulo De Procesos Hidrológicos	42

Ventajas de la Modelación con IBER en Ambientes Urbanos	43
Limitaciones en la Modelación de Aguas Subterráneas	45
Consideraciones para la Aplicación de IBER en Entornos Urbanos	46
La distribución Modelo Hidrodinámico Bidimensional IBER.	46
Módulo de Turbulencia en IBER:.....	47
Modulo Transporte de sedimentos.....	48
Modelo de Terreno.....	48
Capítulo 5. Análisis y Resultados de la Modelación de Inundaciones Urbanas	50
Conclusiones	54
Referencias Bibliografías	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Modelo Hidráulicos</i>	11
Figura 2 <i>Modelado Digital de Superficies de Terreno</i>	13
Figura 3 <i>Tipos de vegetación y uso de suelos</i>	15
Figura 4 <i>Modelación Hidráulica 2D Con IBER</i>	18
Figura 5 <i>Desbordamiento de ríos provoca inundaciones en Veracruz</i>	19
Figura 6 <i>Modelación Higrológica</i>	23
Figura 7 <i>Laboratorio de modelos Hidráulicos</i>	24
Figura 8 <i>Simulaciones Hidráulicas 2D</i>	26
Figura 9 <i>Cálculo Del Caudal Máximo De Creciente</i>	28
Figura 10 <i>Esquema software</i>	30

Introducción

La modelación hidráulica e hidrológica es fundamental para comprender y manejar las dinámicas de los sistemas acuáticos, especialmente en áreas urbanas. Gracias a estos modelos, es posible simular y predecir el comportamiento del flujo de agua, lo cual es esencial para planificar y mitigar los riesgos relacionados a las inundaciones.

Las aplicaciones de la modelación son amplias, abarcando desde la evaluación de infraestructuras hidráulicas hasta la predicción de eventos extremos, como inundaciones. Los factores que influyen en la modelación incluyen características físicas del área de estudio, como la topografía y la geología, así como datos climáticos y patrones de uso del suelo. La precisión y calidad de los datos de entrada son cruciales para obtener resultados confiables y útiles. En el ámbito urbano, donde la interacción entre el agua y la infraestructura es compleja, la modelación se vuelve aún más desafiante y necesaria.

Dentro de los tipos de modelación, la modelización hidrodinámica se centra en la simulación de flujos de agua en diferentes entornos, mientras que la modelación hidrológica urbana aborda específicamente la gestión del agua en áreas urbanizadas. Esta última es vital debido a la creciente urbanización y los desafíos asociados, como el aumento de la escorrentía y la mayor frecuencia de inundaciones.

Para la modelación de inundaciones urbanas, existen diversas herramientas y métodos disponibles, como HEC-RAS, SWMM, MIKE URBAN, PCSWMM e IBER. Cada una de estas herramientas ofrece distintas capacidades y ventajas, dependiendo del tipo de análisis requerido y las características del área de estudio.

Particularmente, el modelo IBER destaca por su capacidad para simular procesos hidrológicos e hidráulicos en entornos urbanos. Este modelo ofrece importantes beneficios, como

su habilidad para gestionar enormes cantidades de datos y su exactitud en la representación de fenómenos complejos. Sin embargo, también presenta limitaciones que deben ser consideradas, como su aplicabilidad a diferentes tipos de terreno y condiciones hidrológicas.

Como resultado, la modelación hidráulica e hidrológica se vuelve indispensable para abordar los desafíos de la gestión del agua en áreas urbanas. A medida que las ciudades continúan creciendo y los eventos climáticos extremos se vuelven más frecuentes, la capacidad para predecir y mitigar los riesgos de inundaciones se vuelve cada vez más crucial. Herramientas como IBER juegan un papel fundamental en este contexto, permitiendo simular y analizar diversos escenarios de inundación con precisión. Estos temas en profundidad, proporcionando un análisis detallado de las herramientas, métodos y aplicaciones de la modelación en la gestión de inundaciones urbanas.

Capítulo 1. Fundamentos De La Modelación

En este capítulo se exploran los fundamentos esenciales de la modelación hidráulica e hidrológica, relacionada con la mitigación de riesgos asociados con las inundaciones urbanas. Esto implica la representación matemática detallada de los sistemas hidráulicos y los ciclos hidrológicos, permitiendo simular y predecir el comportamiento del agua en una variedad de escenarios. Estos modelos no solo facilitan la comprensión de los procesos de flujo y transporte de agua, sino que también son cruciales para gestionar eventos extremos como inundaciones

Este capítulo explora en profundidad los distintos tipos de modelos hidráulicos aplicados en la práctica, resaltando sus usos particulares y el papel que juegan en mejorar la gestión de los recursos hídricos y en optimizar la planificación urbana. También se exploran en profundidad los factores cruciales que afectan la precisión y confiabilidad de la modelación, tales como la calidad de los datos de entrada, abarcando información topográfica, climática y sobre el uso del suelo. La disponibilidad y precisión de estos datos son esenciales para asegurar la exactitud de los resultados generados a través de la modelación hidráulica e hidrológica. Además, se discuten los desafíos prácticos y consideraciones específicas al aplicar estos modelos en entornos urbanos complejos, donde la interacción entre la infraestructura urbana y los sistemas naturales añade complejidad a la administración de los recursos hídricos y el control de inundaciones.

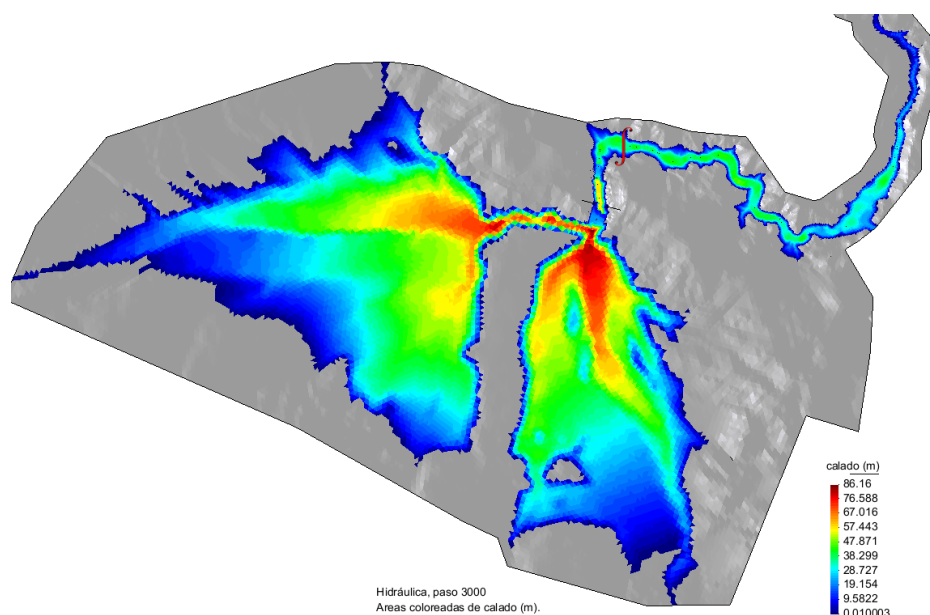
La modelación: Concepto y Aplicaciones.

Según (Estrada Sifontes y Pacheco Moya 2012)), la modelación es un proceso esencial en diversas disciplinas científicas y de ingeniería, utilizado para comprender, predecir y gestionar fenómenos complejos. En términos generales, la modelación implica la creación de una representación simplificada de la realidad para estudiar ciertos aspectos específicos del sistema o

fenómeno de interés Figura 1. Dueñas (1997) menciona que modelar es el acto de construir modelos matemáticos, físicos, o computacionales que replican el comportamiento de sistemas reales bajo diferentes condiciones. Estos modelos facilitan el análisis, la simulación y la previsión del comportamiento de estos sistemas, ofreciendo una herramienta crucial para la planificación estratégica.

Figura 1

Modelo Hidráulicos



Nota: Adaptado de TYC GIS Formación, 2019, Cursos Gis.

Factores que Influyen en la Modelación

Alejandro Herrera. (2002), describió que la exactitud y el éxito de la modelación dependen de múltiples factores, cada uno de los cuales puede impactar considerablemente los datos obtenidos de este modelo. Entre estos factores se encuentran los datos de entrada, los parámetros del modelo y las condiciones iniciales y de contorno. A continuación, se detallan

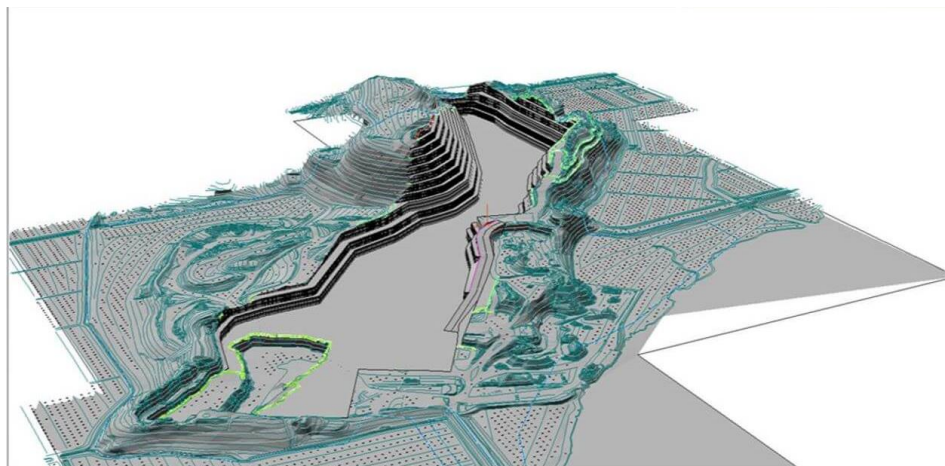
estos aspectos y su influencia en el proceso de modelación.

Datos de Entrada

Los datos de entrada son cruciales para el funcionamiento de cualquier modelo, ya que proporcionan la base informativa sobre las condiciones del sistema que se está evaluando. La exactitud y calidad de estos datos son esenciales para asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Los principales tipos de datos de entrada incluyen:

Topografía: La topografía describe la forma y características físicas del terreno, incluyendo elevaciones, pendientes y estructuras geográficas como se detalla en la Figura 2. Los datos topográficos son esenciales para simular el flujo de agua, ya que definen cómo se desplazará el agua a lo largo de la superficie terrestre. Estos datos pueden obtenerse mediante:

- Levantamientos Topográficos: Métodos tradicionales de medición en campo.
- Tecnología que emplea láseres para medir distancias y generar mapas detallados del terreno
- Imágenes Satelitales y Fotogrametría: Técnicas de teledetección que proporcionan datos de elevación y características del terreno.

Figura 2*Modelado Digital de Superficies de Terreno*

Nota: Adaptado de *Terrain Tools*, 2020, por Softree

(<https://www.softree.com/ES/productos/mapeo-3d>).

Condiciones Climáticas. Gutiérrez García et al. (2022), concluyeron que Las condiciones climáticas, como las precipitaciones, la temperatura y la evaporación, son variables críticas que influyen en los patrones de flujo y distribución del agua en una cuenca. Estos datos influyen en la disponibilidad de agua y en su distribución espacial y temporal. Las fuentes de datos climáticos incluyen:

- Estaciones Meteorológicas: Proporcionan mediciones locales de variables climáticas.
- Modelos Climáticos Globales (GCM): Ofrecen proyecciones de variables climáticas a gran escala.
- Redes de Observación Remota: Satélites que monitorean el clima y proporcionan datos a nivel global.

Características del Suelo. Las características del suelo, tales como su capacidad de infiltración y conductividad hidráulica, determinan el movimiento del agua a través del suelo y tienen un impacto en el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos. Los datos sobre las características del suelo pueden incluir:

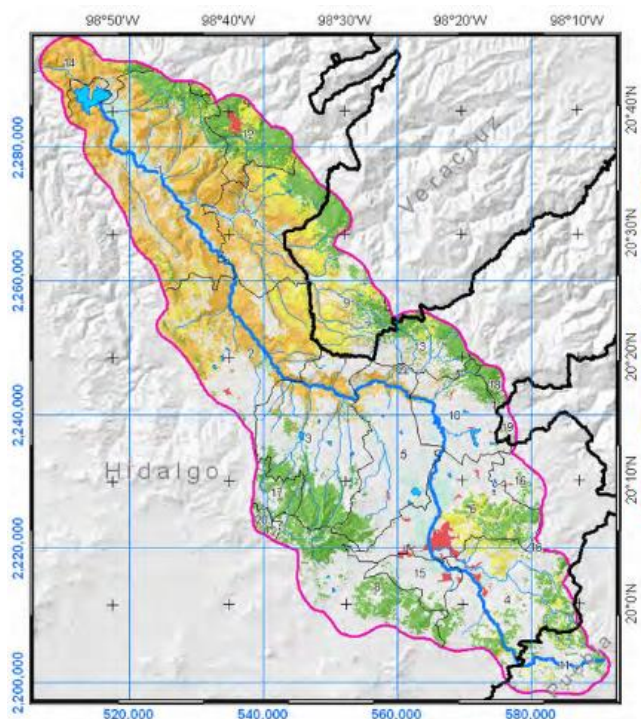
- Mapas de Suelos: Información sobre los tipos de suelo.
- Perfiles de Suelo: Descripciones detalladas de las capas de suelo y sus propiedades.
- Ensayos de Infiltración: Pruebas en campo para medir la capacidad de infiltración del suelo.

Uso del Suelo y Cobertura Vegetal. Influyen en la cantidad de escurrimiento, la capacidad de retención de agua del suelo. Las diferentes coberturas vegetales, como bosques, pastizales y áreas urbanizadas, tienen distintos efectos sobre la hidrología de una cuenca. Los datos sobre uso del suelo y cobertura vegetal se obtienen mediante:

- Mapas de Uso del Suelo: Información sobre cómo se utiliza la tierra (agricultura, urbanización, etc.).
- Imágenes Satelitales: Proporcionan información actualizada sobre la cobertura vegetal.
- Inventarios Forestales: Datos sobre la cantidad y tipo de vegetación en un área.

Figura 3

Tipos de vegetación y uso de suelos.



Nota. Adaptado *Tipos de vegetación y uso de suelos*, (2007), Researchgate. (2007).

En este capítulo se han explorado los fundamentos esenciales de la modelación hidráulica e hidrológica, destacando su papel crucial en la administración del agua y la reducción de riesgos de inundaciones en áreas urbanas. La exactitud de los datos de entrada y la elección correcta de los modelos son aspectos cruciales que deben considerarse para asegurar la efectividad de la modelación en entornos urbanos. Este capítulo proporciona una base sólida para comprender cómo estos principios fundamentales pueden aplicarse en la práctica para mejorar la adaptación de las ciudades frente a las amenazas de inundaciones.

Capítulo 2. Tipos de Modelación

En este capítulo se abordan diversos enfoques y técnicas fundamentales de la modelación hidrodinámica e hidrológica, cruciales para entender y manejar los fenómenos relacionados con el agua en contextos urbanos. Desde la modelización hidrodinámica, que examina cómo se desplaza el agua en sistemas de ríos y drenaje, hasta los modelos hidráulicos que simulan el comportamiento de estructuras y redes de conducción, este capítulo explora cómo estas herramientas son empleadas para predecir y mitigar inundaciones urbanas. Se analiza la importancia específica de la modelación hidrológica urbana, su definición y sus aplicaciones prácticas, resaltando los beneficios derivados de su implementación y los factores clave que influyen en su efectividad, incluyendo modelos unidimensionales y bidimensionales, así como la evaluación de caudales máximos en condiciones urbanas.

Modelización Hidrodinámica

La modelización hidrodinámica es una herramienta clave para analizar en detalle el flujo del agua en cuerpos hídricos, como ríos y áreas propensas a inundaciones. Este enfoque utiliza métodos numéricos para resolver ecuaciones, permitiendo una representación precisa y detallada del comportamiento dinámico del agua. Entre las variables críticas que se consideran en este análisis se encuentran el calado, los cambios en el caudal, el nivel de agua, la presión y la concentración de contaminantes, en flujos estables y variables (Torres-Bejarano et al. 2016).

Entender la hidrodinámica de los cuerpos hídricos facilita la previsión y comprensión necesaria para tomar decisiones bien fundamentadas en ingeniería y gestión de recursos hídricos. Esta capacidad se vuelve especialmente crucial al enfrentar fenómenos naturales, como inundaciones repentinas y cambios climáticos, así como la intervención humana mediante la construcción de infraestructuras.

Segun Bohorquez Bohorquez y Urrego Jiménez. (2021), los modelos más destacados se encuentra el Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), reconocido por su facilidad en el procesamiento de datos, alto rendimiento computacional y robustez numérica. Su implementación exitosa en numerosos estudios de caso a nivel mundial lo establece como uno de los modelos hidrodinámicos más fiables y frecuentemente utilizados en la práctica contemporánea

Modelos Hidráulicos.

La modelación hidráulica se utiliza para simular situaciones reales que ocurren en prototipos, permitiendo comprender su comportamiento. Este modelo se utiliza para abordar cuestiones vinculadas a estructuras hidráulicas, infiltración, secciones de ríos y transporte de sedimentos. Estos modelos específicos de estructuras son fundamentales para solucionar problemas hidráulicos en distintas construcciones, como el cálculo hidráulico, minimizar las pérdidas, diseñar métodos de disipación de energía y planificar estructuras como presas., vertederos, puertos y esclusas (Asto Soto y Diaz Malpartida. 2016).

La modelación hidráulica proporciona una representación más precisa y detallada del flujo de agua que los cálculos teóricos representando los puntos críticos tal y como se muestra en la Figura 4, lo que aumenta la confiabilidad de los diseños de estructuras hidráulicas. Esto reduce el riesgo de colapsos y pérdidas económicas, así como la necesidad de inversiones innecesarias.

Figura 4*Modelación Hidráulica 2D Con IBER*

Nota: Tomado de CESAR, 2019, (<https://cersa.org.pe/capacitaciones/?q=armatupack/iber>).

El conocimiento de la hidrodinámica facilita la previsión y el entendimiento de los procesos físicos y químicos en el agua, aspectos cruciales para la ingeniería y la gestión de recursos hídricos. La selección del modelo hidrodinámico adecuado está determinada por los objetivos del análisis, la complejidad del problema en cuestión y la calidad de los datos disponibles. Según S. I. B. (2015), el Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) es uno de los modelos más empleados y confiables, conocido por su eficiente procesamiento de datos y su sólida capacidad numérica.

La Hidrodinámica En Inundaciones

En la investigación de Ochoa et al. (2016), se establece que la hidrodinámica juega un papel fundamental en el análisis de inundaciones, sucesos naturales que provocan impactos importantes a nivel socioeconómico a nivel global.. Estas inundaciones, parte natural de la dinámica fluvial, ocurren cuando las lluvias persistentes causan un incremento gradual en el

nivel del agua de un cauce, sobrepasando las orillas y afectando las áreas circundantes como se muestra en la Figura 5.

Para analizar y anticipar los impactos de las lluvias intensas en las zonas cercanas a los canales, se emplean modelos hidrodinámicos de uno o dos dimensiones. Los modelos unidimensionales consideran el canal como una línea, mientras que los modelos bidimensionales lo representan mediante una red de celdas poligonales que incluyen tanto el canal como las áreas de inundación. (Villegas Masías, 2023).

Aunque los modelos unidimensionales ofrecen resultados precisos para el flujo en el cauce principal, tienen limitaciones en la representación de variables en áreas inundadas. Por otro lado, los modelos bidimensionales ofrecen una representación más precisa de las características del cauce y las zonas propensas a inundaciones, aunque requieren una mayor capacidad computacional, lo que ha restringido su adopción generalizada.

Figura 5

Desbordamiento de ríos provoca inundaciones en Veracruz.



Nota: Tomado de Milenio, 2022, (<https://www.milenio.com/estados/en-veracruz-registran-inundaciones-por-desbordamiento-de-tres-rios>)

Los modelos bidimensionales son cruciales para evaluar riesgos y planificar estrategias preventivas, tanto estructurales como no estructurales, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales. Su integración con sistemas de información geográfica y el uso de modelos digitales de elevación posibilitan la representación más detallada topográficamente y la extensión de las inundaciones (Quispe Ajata 2021).

Existen varios programas bidimensionales disponibles de forma gratuita que permiten este tipo de análisis, entre los que destaca el modelo IBER, ampliamente utilizado en ingeniería debido a su accesibilidad y capacidad para modelar flujos de ríos en dos dimensiones.

Modelación Hidrológica en Ambientes Urbanos

La modelación hidrológica en ambientes urbanos se centra en comprender y gestionar el ciclo hidrológico dentro de áreas altamente desarrolladas. A diferencia de los entornos rurales, los ambientes urbanos presentan desafíos únicos debido a la alta densidad de infraestructura, la impermeabilización del suelo y la complejidad de las redes de drenaje. La modelación en estos contextos es crucial para prevenir inundaciones, gestionar el agua de lluvia y asegurar un desarrollo sostenible (Pérez et al. 2018).

Definición de Modelación Hidrológica Urbana

Sañudo, Cea, y Puertas (2020) define que la modelación hidrológica urbana es el proceso de utilizar modelos matemáticos y computacionales para simular y predecir el comportamiento del agua en áreas urbanizadas. Esto incluye la precipitación, el escurrimiento superficial, la infiltración, el almacenamiento y el transporte de agua a través de sistemas de drenaje y alcantarillado.

Componentes Clave de la Modelación Hidrológica Urbana.

- Precipitación Urbana: Entrada de agua a través de lluvia, que puede ser muy intensa debido a efectos de isla de calor urbano.
- Esguerrimiento Superficial: Movimiento del agua sobre superficies impermeables como pavimento, tejados y calles, que no permite la infiltración.
- Infiltración Reducida: Limitada debido a la alta proporción de superficies impermeables.
- Almacenamiento y Drenaje: Sistemas diseñados para recoger, transportar y, en algunos casos, tratar el agua de lluvia, incluyendo alcantarillado, cunetas y depósitos de retención.

Importancia de la Modelación Hidrológica en Ambientes Urbanos

La modelación hidrológica en ambientes urbanos es esencial para:

- Prevención de Inundaciones: Permite anticipar y mitigar inundaciones urbanas, que pueden causar daños significativos a la propiedad y poner en riesgo la vida de los habitantes.
- Gestión del Agua de Lluvia: Ayuda a diseñar sistemas de drenaje eficientes y sostenibles, reduciendo el riesgo de desbordamientos y mejorando la calidad del agua.
- Planificación Urbana: Informa decisiones sobre el desarrollo y la ordenación del territorio, asegurando que las infraestructuras estén preparadas para eventos extremos.
- Adaptación al Cambio Climático: Permite evaluar los impactos futuros del

cambio climático en los sistemas de gestión del agua urbanos, facilitando la adopción de estrategias para mejorar la resiliencia.

Beneficios y Aplicaciones de la Modelación Hidrológica Urbana

Diseño de Infraestructura de Drenaje: La modelación proporciona datos críticos para diseñar sistemas de drenaje capaces de manejar grandes volúmenes de agua de lluvia, minimizando el riesgo de inundaciones.

- Desarrollo de Soluciones Basadas en la Naturaleza: Permite evaluar la efectividad de soluciones como techos verdes, pavimentos permeables y parques urbanos, que ayudan a gestionar el agua de manera más sostenible.
- Planificación de Emergencias: Proporciona escenarios de riesgo que ayudan a desarrollar planes de emergencia y protocolos de actuación ante eventos de lluvias intensas.
- Optimización del Uso del Suelo: Informa políticas de uso del suelo que equilibran el desarrollo urbano con la gestión sostenible del agua, promoviendo la creación de espacios verdes y áreas permeables.

Factores Específicos en la Modelación Hidrológica Urbana

- Densidad de Infraestructura: Alta densidad de edificios, carreteras y otras estructuras que modifican el flujo natural del agua.
- Impermeabilización del Suelo: Superficies impermeables aumentan el volumen y velocidad del escurrimiento superficial.
- Redes de Drenaje Complejas: Sistemas de alcantarillado y drenaje pluvial que

deben ser modelados con precisión para predecir su capacidad y comportamiento bajo diferentes escenarios de lluvia.

- Efectos de Isla de Calor Urbano: Aumento de la temperatura en áreas urbanas que puede intensificar las lluvias y alterar los patrones de escurrimiento.

Figura 6

Modelación Higrológica



Nota: La imagen presenta un modelado de inundaciones urbanas que muestra diversas áreas de una ciudad afectadas por posibles niveles de inundación, HidrojING. (2017)

Modelos Unidimensionales

Los modelos unidimensionales son herramientas fundamentales en la hidrodinámica que estudian el comportamiento de los ríos y canales en una sola dimensión, para esto se utilizan laboratorios de simulación que permiten este análisis, ver Figura 7. Su operación se fundamenta en la incorporación de datos topográficos e hidráulicos a través de secciones transversales perpendiculares a lo largo del recorrido del agua. Estas secciones actúan como puntos de cálculo

en el modelo, definiendo la forma del cauce y sus márgenes.

Figura 7

Laboratorio de modelos Hidráulicos



Nota: El Instituto de Ingeniería cuenta desde 1965 con un laboratorio de modelos hidráulicos. IIUNAM, dir. (2022).

Sin embargo, a pesar de su utilidad, los modelos unidimensionales presentan algunas limitaciones inherentes a su dimensionalidad. Por ejemplo, están diseñados para analizar flujos constantes que descienden siempre en una dirección perpendicular a las secciones transversales seleccionadas. Esto significa que no pueden capturar adecuadamente la variabilidad de la velocidad del flujo en dirección transversal al canal, lo que limita su capacidad para representar con precisión situaciones hidrodinámicas más complejas (Ceballos López 2011).

A pesar de estas limitaciones, los modelos unidimensionales encuentran su aplicación en contextos específicos, como el estudio de flujos en tuberías rectas y largas (Nelson 2013).

Modelos bidimensionales

Los modelos bidimensionales son una herramienta fundamental en la hidrodinámica para

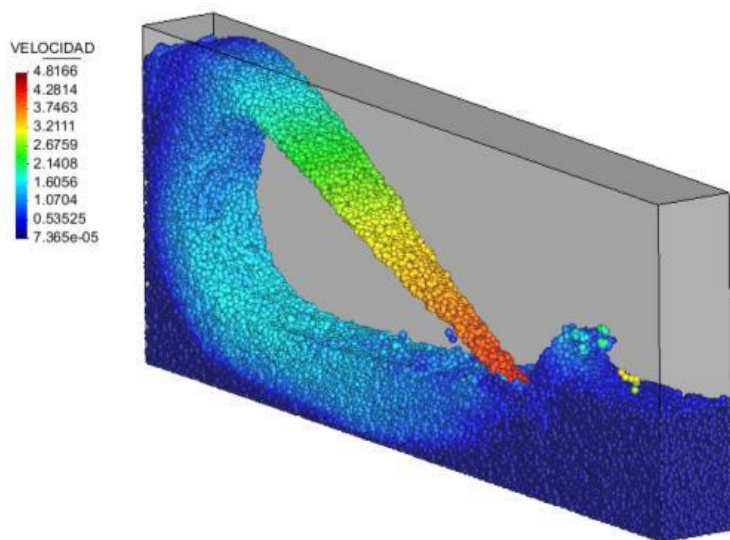
analizar y predecir el comportamiento del flujo de agua en dos dimensiones ver Figura 8. Estos modelos se fundamentan a través de las ecuaciones de balance de masa y momento, formuladas en dos dimensiones. A diferencia de los modelos unidimensionales, que se limitan a analizar el flujo en una dirección, los modelos bidimensionales ofrecen una representación más completa y detallada del comportamiento del agua. Sin embargo, su implementación requiere un mayor tiempo y recursos computacionales debido a la complejidad de los cálculos necesarios (Jorge Ayala. 2016).

La exactitud y fiabilidad de los resultados en la modelación bidimensional dependen de la calidad de la malla creada del. Además, el número de celdas empleadas en esta malla también afecta la calidad de los resultados (Bladé et al. 2014).

Barrera Ochoa (2020), expresa que en términos de ventajas sobre la modelación unidimensional, los modelos bidimensionales permiten una mejor representación del componente topográfico, ya que consideran la complejidad del modelo topográfico. Además, permiten la asignación de condiciones de contorno de salida en zonas donde el flujo se acumula, algo que no se puede realizar en la modelación unidimensional. En cuanto al componente del uso del suelo, en la modelación bidimensional los coeficientes de rugosidad se asignan directamente sobre el modelo, lo que facilita el análisis de percepción de datos. Además, el flujo en dos dimensiones está determinado por dos variables espaciales, lo que simplifica algunos aspectos del análisis.

Figura 8

Simulaciones Hidráulicas 2D



Nota: En la imagen se muestran una simulación de movimiento de un fluido en 2D. Fuente: Nelson (2017).

Caudales Máximos

Los caudales máximos, también conocidos como crecidas o avenidas, son fenómenos naturales caracterizados por la presencia de flujos de agua significativamente mayores que el caudal base o el caudal existente en condiciones de estiaje. Esta situación provoca un incremento en los niveles normales del agua, a menudo resultando en el desbordamiento de los cauces naturales de la corriente (Guaya Caraguay y Montalván Alcívar 2018). El cálculo de un caudal máximo implica proyectar un flujo de agua desde el inicio del aumento de la escorrentía superficial hasta que esta situación llega a su fin.

Estas inundaciones son causadas principalmente por dos factores: la acumulación excesiva de lluvia y el desbordamiento de cuerpos de agua retenidos río arriba. El exceso de

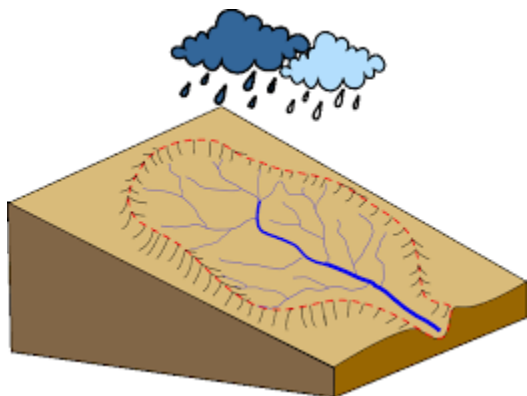
lluvia puede saturar rápidamente los cauces naturales, mientras que el desbordamiento de embalses, lagos o ríos almacenados aguas arriba puede liberar grandes volúmenes de agua de manera repentina, contribuyendo a la crecida del caudal. Los caudales máximos son eventos hidrológicos que pueden tener consecuencias significativas, incluyendo inundaciones y daños a la infraestructura y propiedades cercanas a los cuerpos de agua. Su estudio y pronóstico son fundamentales para la administración del riesgo de inundaciones y la planificación adecuada de infraestructuras hidráulicas (German Monsalve Flor s. f.).

Las inundaciones por crecidas ocurren cuando el volumen de agua generado por la cuenca hidrográfica excede la capacidad del canal natural para contenerlo, como se muestra en la Figura 9. Estas inundaciones pueden deberse a dos causas principales: primero, a una lluvia tan intensa que el cauce del río no puede manejar el volumen de agua que pasa por él en un período determinado; segundo, a obstrucciones aguas abajo que impiden el flujo adecuado del caudal, como ocurre con obras mal dimensionadas.

El pronóstico de los caudales de crecida se basa en la extrapolación de datos históricos, y los resultados se vinculan principalmente a un período de retorno en años (Guaya Caraguay y Montalván Alcívar 2018).

Figura 9

Cálculo Del Caudal Máximo De Creciente



Nota: Tomado de Goconqr, 2016,

(https://cdn.goconqr.com/uploads/flash_card/image_question/6979431/desktop_69ba771f-7384-4787-bf05-8e557045ec1f.png).

Este capítulo ha proporcionado una visión integral de los diferentes tipos de modelación hidrodinámica e hidrológica, destacando su relevancia en la gestión de inundaciones urbanas. La exploración de modelos hidráulicos y su aplicación en la predicción y mitigación de fenómenos extremos subraya la importancia de estas herramientas en la planificación urbana sostenible.

Además, se ha puesto importancia al trabajar en entornos urbanos, asegurando que las modelaciones sean precisas y eficaces. En conjunto, este capítulo sienta las bases para entender cómo las distintas técnicas de modelación pueden integrarse y aplicarse para mejorar la resiliencia de las ciudades frente a las inundaciones

Capítulo 3. Modelación de Inundaciones Urbanas: Herramientas y Métodos

La rápida urbanización y el cambio climático han elevado la frecuencia y la intensidad de las inundaciones en áreas urbanas, creando importantes desafíos para la gestión del agua y la planificación de las ciudades. Estas inundaciones pueden causar graves daños a la infraestructura, pérdidas económicas y riesgos para la salud pública. Por esta razón, la modelación de inundaciones urbanas se han vuelto una herramienta esencial para ingenieros y planificadores urbanos, facilitando la prevención y mitigación de estos eventos. (Espejo Mariño y Zabaleta Castro 2021).

Existen diversas herramientas de software diseñadas para simular y analizar inundaciones en entornos urbanos. Estas herramientas permiten a los profesionales evaluar el impacto potencial de eventos de lluvia extrema, planificar medidas de mitigación y mejorar la adaptación de las infraestructuras urbanas. Según un estudio de caso que compara el uso de SWMM y MIKE URBAN, estas herramientas son eficaces para desarrollar estrategias de mitigación de inundaciones y sistemas de drenaje urbanos .

Otro estudio revisa diversas aplicaciones de modelos de inundaciones urbanas, incluyendo HEC-RAS, SWMM y otros, en estrategias de mitigación de inundaciones, mostrando cómo estos modelos pueden integrarse en la planificación urbana para reducir los riesgos de inundaciones (Qi et al. 2021). Además, la integración del modelo SWMM con un modelo bidimensional innovador ha demostrado ser efectiva para la modelación de inundaciones pluviales urbanas, proporcionando una comprensión más detallada del flujo de agua en superficies urbanas durante eventos de lluvia extrema .

"Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study":

Este estudio un caso sobre la aplicación de SWMM y MIKE URBAN para modelar

inundaciones urbanas y sistemas de drenaje. Examina cómo estas herramientas pueden ser utilizadas para evaluar la eficacia de los sistemas de drenaje urbano y para desarrollar estrategias efectivas de mitigación de inundaciones (Bisht et al. 2016a).

Figura 10

Esquema software



Nota: Software libre, un instrumento en la ingeniería de los recursos hídricos. Fuente: (Pérez 2018)

HEC-RAS

El Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS) es un software creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Su función principal es modelar el flujo de agua en ríos y canales.

Características Principales:

- Simulación 1D y 2D: Permite la simulación unidimensional (1D) y bidimensional (2D) del flujo de agua.
- Modelación de Inundaciones: Capaz de modelar eventos de inundación,

incluyendo flujos superficiales y subterráneos.

- Interfaz Gráfica: Ofrece una interfaz gráfica para la entrada de datos, modelado y visualización de resultados.
- Análisis de Terrenos y Estructuras: Integra datos de terreno y permite la inclusión de estructuras urbanas como puentes y alcantarillas.
- Capacidad de Exportación e Integración: Se puede integrar con otros sistemas GIS y herramientas de modelado.

Ventajas:

- Muy utilizado y reconocido en el ámbito de la ingeniería hidráulica.
- Gratuito y accesible para profesionales y académicos.

HEC-RAS fue lanzado por primera vez en 1995. Este software es una evolución del HEC-2, utilizado desde los años 1960. HEC-RAS permite realizar análisis de flujos unidimensionales en sistemas fluviales, canales y estructuras hidráulicas, proporcionando herramientas avanzadas para el modelado y la simulación de flujos, incluyendo cálculos de perfil de inundación, calidad del agua y transporte de sedimentos. Su capacidad para integrar datos y modelos detallados lo hace indispensable en la planificación y gestión de recursos hídricos.

SWMM

Descripción: SWMM (Storm Water Management Model) es un software desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos. Se utiliza para modelar el flujo de agua de escorrentía urbana, fue lanzado por primera vez en 1971. Este modelo ha llegado a ser una herramienta indispensable para diseñar y evaluación de sistemas de drenaje y

alcantarillado urbano. SWMM (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) facilita la simulación de la escorrentía superficial y su calidad en respuesta a eventos de precipitación, lo cual es crucial para planificar infraestructuras adecuadas para el manejo de aguas pluviales. A lo largo de los años, SWMM ha sido mejorado continuamente para integrar las últimas metodologías y avances tecnológicos, convirtiéndose en un estándar para la modelación de la hidrología en entornos urbanos.

"Linking a Storm Water Management Model to a Novel Two-Dimensional Model for Urban Pluvial Flood Modeling". Este estudio vincula el modelo SWMM con un nuevo modelo bidimensional para la modelación de inundaciones pluviales urbanas, proporcionando una comprensión más detallada del flujo de agua en superficies urbanas durante eventos de lluvia extrema (Yang et al. 2020).

Características Principales:

- Simulación de Escorrentía: Modela el flujo de escorrentía en áreas urbanas, incluyendo sistemas de alcantarillado y drenaje.
- Análisis de Calidad del Agua: Además de la cantidad de agua, puede analizar la calidad del agua en los flujos modelados.
- Interfaz de Usuario: Incluye una interfaz de usuario amigable para la configuración y análisis de modelos.
- Herramientas de Preprocesamiento y Postprocesamiento: Ofrece herramientas integradas para la preparación de datos y la visualización de resultados.
- Capacidad de Integración: Puede integrarse con sistemas GIS para mejorar la

precisión y presentación de datos.

Ventajas:

- Amplia aplicación en la gestión de aguas pluviales y sistemas de drenaje urbano.
- Gratuito y con un fuerte respaldo institucional.

MIKE URBAN

Descripción: MIKE URBAN es un software desarrollado por DHI para la modelación de sistemas de aguas pluviales y residuales en áreas urbanas, lanzado a principios de la década de 2000. Basado en tecnologías avanzadas de modelado hidráulico como MIKE 11 y MIKE SHE, MIKE URBAN está especialmente creado para la gestión integrada de los sistemas de distribución de agua, drenaje y alcantarillado en entornos urbanos. El software permite realizar análisis detallados de las redes de tuberías, simular distintos escenarios de flujo de agua y evaluar el rendimiento de las infraestructuras. Esto facilita la planificación y optimización de la gestión de recursos hídricos urbanos de manera sostenible.

Características Principales:

- Modelación Integrada: Permite la modelación integrada de redes de alcantarillado y drenaje urbano.
- Interfaz Gráfica Avanzada: Ofrece una interfaz gráfica avanzada para la creación y análisis de modelos.
- Integración con GIS: Se puede integrar con datos GIS para mejorar la precisión de los modelos.

- **Análisis de Eventos Extremos:** Puede simular eventos de lluvia intensa y su impacto en infraestructuras urbanas.
- **Soporte y Actualizaciones:** Cuenta con soporte técnico y actualizaciones continuas por parte de DHI.

Ventajas:

- Herramienta muy completa y profesional para la gestión de aguas urbanas.
- Utilizado en proyectos de gran escala y complejidad.

PCSWMM

Descripción: PCSWMM es una versión mejorada del SWMM, desarrollada por Computational Hydraulics International (CHI), que incluye herramientas adicionales para análisis y visualización de datos, fue lanzado en 1984 como una interfaz gráfica mejorada para SWMM. Este software proporciona un entorno de trabajo más accesible y eficiente, facilitando el uso de SWMM para usuarios de todos los niveles. PCSWMM proporciona herramientas de vanguardia para analizar y visualizar datos, permitiendo simulaciones precisas de sistemas de drenaje y alcantarillado en áreas urbanas. Su habilidad para gestionar extensos conjuntos de datos y ejecutar cálculos avanzados lo ha hecho altamente valorado en el ámbito de la ingeniería hidráulica y en la administración de aguas pluviales.

Características Principales:

- **Modelación de Escorrentía y Calidad del Agua:** Permite la modelación detallada de escorrentía urbana y análisis de calidad del agua.
- **Integración con GIS:** Ofrece una integración robusta con sistemas GIS para la

importación y exportación de datos geoespaciales.

- Interfaz de Usuario Mejorada: Incluye una interfaz gráfica mejorada para facilitar la creación y análisis de modelos.
- Herramientas de Visualización: Proporciona herramientas avanzadas para la visualización de resultados en formatos de mapas y gráficos.
- Soporte y Capacitación: Ofrece soporte técnico y recursos de capacitación para usuarios.

Ventajas:

- Proporciona una versión más accesible y mejorada del SWMM.
- Ideal para proyectos que requieren un análisis detallado y herramientas de visualización avanzadas.

IBER

El estudio "Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models IBER and SWMM" presenta un enfoque integrado de drenaje urbano que combina dos modelos de libre acceso: IBER, que simula el flujo superficial en dos dimensiones, y SWMM, que modela las redes de alcantarillado en una dimensión. La metodología de vinculación consiste en un proceso de llamada paso a paso de IBER” (Sañudo et al. 2020a).

IBER es un software de simulación hidrodinámica bidimensional (2D) desarrollado por el Grupo de Ingeniería de Ríos y Costas de la Universidad de A Coruña, el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Está diseñado específicamente para analizar los flujos de agua en ríos y

zonas urbanas. Lanzado en 2010, permitiendo realizar estudios detallados de inundaciones y comportamientos hidráulicos complejos. Su capacidad para representar con precisión la interacción entre el agua y las estructuras del terreno lo convierte en una herramienta esencial para planificar y gestionar las inundaciones, tal cual que el diseño de infraestructuras hidráulicas en áreas urbanas y naturales.

Características Principales:

- Simulación 2D: IBER permite la simulación bidimensional del flujo de agua, lo que proporciona una alta precisión en la representación de la propagación de las inundaciones en áreas urbanas.
- Modelación de Inundaciones Urbanas: Es adecuado para modelar eventos de inundación en áreas urbanas, incluyendo la interacción del flujo con estructuras como edificios, calles y sistemas de drenaje.
- Interfaz Gráfica: Dispone de interfaz gráfica intuitiva, que se facilita para la creación de modelos, la asignación de condiciones de contorno y la visualización de los resultados.
- Integración con GIS: IBER se puede integrar con sistemas de información geográfica (GIS) para la importación y exportación de datos geoespaciales, lo que mejora el análisis y la presentación de resultados.
- Herramientas de Preprocesamiento y Postprocesamiento: Incluye herramientas para el preprocesamiento de datos, como la creación de mallas y la asignación de propiedades de terreno, y para el postprocesamiento, como la visualización de

resultados en formato de mapas y gráficos.

- Aplicaciones Diversas: Además de la modelación de inundaciones urbanas, IBER se utiliza en proyectos de gestión de ríos, diseño de obras hidráulicas, estudios de impacto ambiental y evaluación de riesgos de inundación.

Ventajas:

- Es un software gratuito y de código abierto, lo que lo hace accesible para instituciones académicas y profesionales.
- Su capacidad para modelar flujos bidimensionales permite una mejor representación de la dinámica de las inundaciones en áreas complejas.

IBER es una herramienta poderosa y versátil para la modelación de inundaciones en entornos urbanos, especialmente adecuada para aquellos que buscan una solución accesible y precisa.

Para finalizar este capítulo sobre herramientas y métodos de modelación de inundaciones urbanas, es importante destacar el papel crucial que desempeñan los diversos softwares analizados. Aunque cada uno de ellos, como HEC-RAS, SWMM, MIKE URBAN y PCSWMM, ofrece funcionalidades y beneficios específicos que los hacen valiosos en contextos particulares, el software IBER merece una atención especial cuando se trata de inundaciones urbanas.

IBER, desarrollado conjuntamente por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el Departamento Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cataluña, se ha posicionado como una herramienta destacada por su capacidad para simular flujos bidimensionales en entornos urbanos. Esta característica es especialmente relevante para modelar escenarios de inundaciones en áreas densamente construidas, donde las complejas interacciones

entre el agua y la infraestructura urbana requieren un nivel de detalle y precisión que IBER puede proporcionar.

La precisión de IBER en la simulación de cómo el agua interactúa con el terreno y las infraestructuras urbanas lo establece como una herramienta fundamental para una planificación y gestión eficaces de las inundaciones. Su enfoque bidimensional permite captar mejor los patrones de flujo y los posibles puntos de inundación, facilitando la implementación de medidas de mitigación más efectivas y precisas. Además, IBER ha demostrado ser robusto en términos de flexibilidad y adaptabilidad, esto lo lleva a ser adecuado para un amplia grado de escenarios y condiciones urbanas.

Capítulo 4. Modelación con la Implementación de IBER

Este Capítulo se centra en la implementación del modelo IBER, una herramienta avanzada y específica para la modelación de inundaciones urbanas y otros escenarios hidrodinámicos complejos. Este capítulo examina en detalle las numerosas ventajas y limitaciones del modelo IBER, destacando su aplicabilidad y precisión en la simulación de procesos hidrológicos en entornos urbanos. Se abordarán las características técnicas del módulo de procesos hidrológicos, las ventajas específicas que ofrece en la gestión de aguas urbanas, y las consideraciones necesarias para su aplicación efectiva en contextos urbanos. También se explorarán las limitaciones del modelo en el contexto de aguas subterráneas y su distribución hidrodinámica bidimensional. Además, se analizarán los módulos adicionales de IBER, incluyendo la turbulencia, el transporte de sedimentos y el modelo de terreno, proporcionando una visión integral de cómo esta herramienta puede optimizar la misión y planificación de recursos hídricos en entornos complejos.

Palavecino Ramos, (2015), manifiesta que la elección del software IBER para la simulación del movimiento del agua requiere tener en cuenta varios factores que superan la elección de un programa bidimensional de alta precisión. Al evaluar diferentes opciones, es crucial sopesar no solo la precisión de los resultados, sino también el costo económico y computacional asociado, así como la capacidad de los equipos informáticos disponibles. Es cierto que los modelos en dos dimensiones tienden a ofrecer una mayor precisión en los resultados al representar con mayor fidelidad la complejidad de los fenómenos hidrodinámicos. Sin embargo, esta precisión conlleva un aumento en el tiempo de cálculo y, en muchos casos, un mayor costo computacional. Esto puede ser una preocupación significativa para entidades y organismos que necesitan llevar a cabo estas simulaciones hidráulicas de manera regular y

eficiente.

Por otro lado Saenz Solis (2021), menciona que los modelos en una dimensión suelen ser más económicos en términos de costo computacional y pueden ser una opción viable para ciertos escenarios donde la precisión extrema no es fundamental. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos modelos pueden perder calidad en ciertas situaciones y distorsionar los resultados, lo que puede ser problemático en aplicaciones donde se requiere una representación precisa del flujo del agua.

Ventajas del Modelo IBER

(Gómez y Cillán 2018), el modelo IBER ofrece una serie de ventajas significativas en comparación con los modelos unidimensionales.

Aquí hay algunas de las ventajas más destacadas:

- Mayor estabilidad y convergencia: IBER demuestra una mayor estabilidad y convergencia en comparación con los modelos unidimensionales, tanto para regímenes permanentes como variables. Esto significa que proporciona resultados más confiables y precisos en una variedad de condiciones hidráulicas.
- Alta resolución del área de trabajo: El modelo IBER ofrece una alta resolución espacial en el área de trabajo, lo que permite capturar con precisión los detalles topográficos y geomorfológicos del terreno.
- Mayor precisión en cambios de régimen: En situaciones donde se producen cambios en el régimen del flujo, como en condiciones de inundación, IBER ofrece una mayor precisión en la simulación de estos eventos.
- Adaptación a mallas irregulares: Las mallas irregulares se adaptan de manera más

efectiva a la topografía del terreno en el modelo IBER, lo que permite una representación más precisa de la realidad.

- Visualización de inundaciones de alta precisión: IBER proporciona una visualización detallada y precisa de las áreas inundadas, lo que facilita que identifiquen las zonas de riesgo y su vez la toma de decisiones en la gestión de inundaciones.
- Resultados en plano horizontal: Los resultados generados por IBER se presentan en un plano horizontal, lo que facilita su interpretación y análisis por parte de los usuarios.
- Interfaz amigable y simple: El programa IBER cuenta con una interfaz amigable, simple y agradable, lo que facilita su uso para una amplia gama de usuarios, desde ingenieros hidráulicos hasta gestores de recursos hídricos.

En este contexto, el software IBER se destaca como una opción equilibrada que ofrece un compromiso entre precisión, costo y eficiencia computacional. Aunque puede requerir un tiempo de cálculo mayor en comparación con algunos programas de una dimensión, su capacidad para simular el movimiento del agua en dos dimensiones la convierte en una de las herramientas más valiosas para un amplio grado de aplicaciones hidráulicas. Además, su costo económico relativamente bajo y su disponibilidad gratuita hacen que sea una opción atractiva para muchas empresas y organizaciones que buscan realizar simulaciones hidráulicas de manera eficiente y rentable.(Bermúdez et al. 2010).

Limitaciones Del Modelo IBER

El modelo IBER, a pesar de sus numerosas ventajas, también presenta algunas

limitaciones que es importante tener en cuenta:

- **Tiempo de cálculo elevado:** El tiempo necesario para realizar los cálculos en IBER puede aumentar considerablemente cuando se utiliza una malla más detallada o se simulan escenarios complejos. Esto puede ser una limitación en proyectos que requieren resultados rápidos o en sistemas computacionales con recursos limitados.
- **Dependencia de la calidad de la información base:** Los resultados del modelo IBER están estrechamente vinculados a la calidad de los datos base que se suministran al programa. Esto incluye datos topográficos, hidrológicos y de condiciones de contorno. Si la información base es inexacta o incompleta, los resultados del modelo pueden ser poco confiables.
- Estas limitaciones resaltan la importancia de contar con recursos adecuados y de realizar una cuidadosa preparación de datos antes de utilizar el modelo IBER en proyectos de simulación hidráulica. Además, es fundamental considerar el tiempo de cálculo necesario y planificar en consecuencia para obtener resultados precisos y confiables.

El Módulo De Procesos Hidrológicos

Bladé et al. (2014), declara que el módulo de procesos hidrológicos del software IBER se ha diseñado para ofrecer una solución avanzada en la modelación hidrológica, especialmente en entornos urbanos. IBER se distingue por su capacidad para resolver ecuaciones en dos dimensiones de aguas someras, lo que permite calcular de manera precisa la transformación de la escorrentía superficial a lo largo del terreno urbano. Este enfoque proporciona una

representación detallada de cómo se distribuye y se mueve el agua en el paisaje urbano, fundamental para comprender y gestionar los procesos hidrológicos en ciudades y áreas altamente desarrolladas.

Ventajas de la Modelación con IBER en Ambientes Urbanos

- **Detallada Representación de la Escorrentía Superficial:** IBER puede simular con precisión cómo la lluvia se convierte en escorrentía superficial en un entorno urbano. La capacidad de modelar en dos dimensiones permite capturar la compleja interacción del agua con diversas infraestructuras urbanas, como carreteras, edificios y sistemas de drenaje.
- **Análisis de Inundaciones Urbanas:** El modelo es capaz de prever y analizar escenarios de inundación, lo cual es fundamental para la planificación y gestión del riesgo en zonas urbanas. Esto permite a los planificadores urbanos y a los ingenieros diseñar sistemas de drenaje más eficientes y tomar medidas preventivas para minimizar el impacto de las inundaciones.
- **Planificación de Infraestructuras:** Al proporcionar una visión detallada del comportamiento hidrológico, IBER facilita el diseño y la optimización de infraestructuras urbanas, tales como alcantarillados, sistemas de retención de aguas pluviales y áreas de infiltración.

Incorporación de estructuras. Según (Castro Malca y García Alvarado 2021), el modelo IBER brinda la capacidad de incluir una amplia gama de estructuras hidráulicas para simular y anticipar cómo se comportan los cauces en presencia de estas infraestructuras (WPS 2021).

Entre los tipos de estructuras que admite el modelo se encuentran:

- **Compuertas:** Las compuertas son dispositivos utilizados para regular o gestionar el flujo de agua en un canal o río. Su inclusión en el modelo permite estudiar cómo afectan al flujo y la dinámica del agua en diferentes condiciones.
- **Vertederos:** Los vertederos son estructuras construidas para permitir que el agua se desborde sobre ellas cuando el nivel del agua supera una altura específica. La capacidad del modelo para simular vertederos es crucial para evaluar el comportamiento del flujo en situaciones de crecida y caudales elevados.
- **Cubiertas:** Las cubiertas son estructuras que cubren un cauce o canal y pueden utilizarse para diversos propósitos, como la protección contra la erosión o la regulación del flujo. Su inclusión en el modelo permite analizar cómo afectan las velocidades y direcciones del agua en el cauce.
- **Diques:** Los diques son barreras construidas a lo largo de un cauce para contener o desviar el flujo de agua. La capacidad de simular diques en el modelo es fundamental para evaluar su efectividad en la protección contra inundaciones y otros eventos hidrológicos extremos.
- **Puentes:** Los puentes son estructuras que atraviesan un cauce o río y permiten el paso de vehículos, personas o animales por encima del agua. La inclusión de

puentes en el modelo permite evaluar su impacto en el flujo del agua y su capacidad para resistir las fuerzas hidráulicas.

- **Alcantarillas:** Las alcantarillas son estructuras utilizadas para permitir que el agua fluya bajo una carretera, ferrocarril u otra infraestructura. Su simulación en el modelo es esencial para evaluar cómo afectan al flujo y la capacidad de drenaje del sistema hidráulico.

La capacidad de incorporar estas estructuras hidráulicas en el modelo IBER proporciona a los ingenieros y gestores de recursos hídricos una herramienta poderosa para analizar y diseñar soluciones efectivas para la administración del agua y la reducción de riesgos.

Limitaciones en la Modelación de Aguas Subterráneas

Es importante destacar que la versión actualizada de IBER no incorpora un módulo de flujo de aguas subterráneas. Esto significa que el modelo no considera el flujo base, que es el movimiento lento del agua a través del subsuelo y que contribuye significativamente a los caudales de los ríos, especialmente durante eventos de lluvia prolongados o en áreas con alta infiltración del suelo (CCS s. f.). Esta limitación tiene implicaciones específicas en el contexto urbano:

Eventos de lluvia cortos e intensos en entornos urbanos, son comunes y la respuesta rápida de la escorrentía superficial suele ser predominante. En estos casos, la falta de un módulo de flujo subterráneo en IBER puede ser menos crítica, ya que la escorrentía superficial generada directamente por la lluvia tiene un impacto mayor.

Eventos de Lluvia Prolongados: Para eventos de lluvia prolongados, donde la contribución del flujo base puede ser significativa, la capacidad del modelo para simular con

precisión puede verse afectada. En tales situaciones, la ausencia de la consideración del flujo subterráneo puede limitar la efectividad de las simulaciones y las predicciones de inundaciones.

Consideraciones para la Aplicación de IBER en Entornos Urbanos

Calibración y Validación: Es fundamental calibrar y validar el modelo con datos observacionales específicos del entorno urbano para asegurar que las simulaciones reflejen adecuadamente las condiciones locales (Cuba 2017).

- Integración con Otros Modelos: Para superar la limitación de la falta de modelación del flujo subterráneo, puede ser beneficioso integrar IBER con otros modelos que sí consideren este componente, proporcionando así una visión más completa del ciclo hidrológico urbano.
- Escenarios de Cambio Climático: Evaluar cómo distintos escenarios de cambio climático afectan el comportamiento hidrológico urbano con IBER puede facilitar el desarrollo de estrategias de adaptación y resiliencia más eficaces.

La distribución Modelo Hidrodinámico Bidimensional IBER.

En la investigación iAgua (2014), se dice que el modelo IBER es un modelo matemático bidimensional utilizado para la simulación del flujo en ríos y estuarios.

El modelo IBER está compuesto por varios módulos interconectados. Hasta el momento, el modelo incluye cinco módulos operativos: uno para simular el flujo en lámina libre en ríos y canales naturales, otro para identificar áreas propensas a inundaciones, uno más para realizar cálculos hidráulicos en sistemas de encauzamiento, otro para evaluar la estabilidad de los sedimentos en el lecho del río, y un módulo para analizar las corrientes de marea en zonas estuarinas (Cuba 2017).

El modelo IBER utiliza métodos numéricos avanzados que son altamente estables y confiables, lo que lo hace ideal para simular flujos discontinuos, como los de ríos con caudales intensos o regímenes hidráulicos irregulares. También permite modelar el transporte de sedimentos y de fondo, y tiene la capacidad de considerar el efecto del viento en el flujo de agua a través de infraestructuras como puentes, compuertas y vertederos. Además, IBER es útil para simular eventos como la ruptura de balsas y presas. (Bermúdez et al. s. f.).

Módulo de Turbulencia en IBER:

IBER incluye diversos modelos de turbulencia fundamentados en la hipótesis de Boussinesq. Entre estos modelos se encuentran el modelo de viscosidad turbulenta constante, el modelo K de Rodi y Rastogi, el modelo de longitud mixta y el modelo parabólico (Pérez y Romero 2021).

El modelo de viscosidad turbulenta constante asume una viscosidad turbulenta constante en todo el dominio de la simulación, proporcionando resultados aceptables en situaciones de turbulencia uniforme y bien mezclada. El modelo K de Rodi y Rastogi, basado en la teoría de la energía cinética turbulenta, utiliza ecuaciones adicionales para calcular la producción y disipación de energía turbulenta, ofreciendo una representación más precisa de la distribución espacial de la turbulencia (Luliquis Salinas y Vines Fox 2022). El modelo de longitud mixta combina elementos de los modelos de viscosidad turbulenta constante y el modelo K, utilizando una longitud de mezcla variable para calcular la viscosidad turbulenta, lo que lo hace flexible y adaptable a una variedad de condiciones de flujo. El modelo parabólico, basado en la teoría de perfiles de velocidad con forma parabólica, ofrece una representación detallada de cómo se distribuye la velocidad en flujos turbulentos. Este modelo es especialmente eficaz para capturar

la estructura de velocidad con alta precisión en el flujo (Pérez y Romero 2021).

Modulo Transporte de sedimentos

El modelo IBER aborda las complejas interacciones entre el agua y los sedimentos en los ríos, resolviendo las ecuaciones de transporte de sólidos mediante dos mecanismos principales: carga en suspensión y carga de fondo.

El arrastre de sedimentos en el lecho del río se refiere al desplazamiento de partículas que se mueven a lo largo del fondo del río, impulsado por la gravedad y las condiciones hidráulicas en esa área. Por su parte el transporte de sedimentos suspendidos implica la permanencia de partículas finas flotando en la columna de agua, influenciado por la turbulencia y la velocidad del flujo (Asto Soto y Diaz Malpartida 2016).

Este módulo calcula la dinámica de la elevación del lecho del río utilizando la ecuación de Exner en dos dimensiones, integrando los procesos de acumulación y remoción de sedimentos. Esta ecuación modela cómo cambia la elevación del lecho del río con el tiempo debido a la deposición y erosión de sedimentos, es importante destacar que, en la versión presente del software IBER, nada más se pueden considerar granulometrías uniformes, lo que limita la capacidad del modelo para representar la variabilidad en el tamaño y la composición de los sedimentos en el lecho del río. No obstante, a pesar de esta restricción, este módulo ofrece una herramienta esencial para entender y anticipar la dinámica de los sedimentos en los sistemas fluviales, lo que resulta crucial para una gestión eficiente de los recursos hídricos y para la planificación del uso del suelo en las zonas ribereñas (iAgua 2014).

Modelo de Terreno

IBER, al trabajar en un entorno bidimensional, precisa la integración de un modelo digital del terreno (MDT) como componente clave desde el inicio del análisis. La última versión

de IBER simplifica la importación de múltiples formatos de geometrías y mallas tridimensionales (Zanata, Oliveira, y Telles 2024).

Según Yang et al. (2020) la modelación precisa de cauces reales, se aconseja emplear archivos MDT debido a su detalle superior. IBER facilita la generación de una malla de cuadrados a partir de archivos Raster GDAL o de triángulos usando la herramienta RTIN. Además, IBER se destaca por su capacidad para integrar ortofotos georreferenciadas en el modelo, lo que optimiza tanto la entrada de datos como la interpretación de resultados en los proyectos. Al integrar ortofotos georreferenciadas, se facilita la visualización y comprensión de la topografía del área de estudio, lo que contribuye a una modelación más precisa y detallada.

En conclusión, el modelo IBER emerge como una herramienta fundamental y especializada para la modelación hidrodinámica en entornos urbanos, ofreciendo ventajas significativas en la simulación precisa de inundaciones y otros procesos hidrológicos complejos. Sus capacidades avanzadas, como el modelado bidimensional detallado y la integración de módulos especializados para procesos hidrológicos, transporte de sedimentos y turbulencia, permiten una representación fiel de las interacciones entre el agua, el terreno y las infraestructuras urbanas. Considerando estas fortalezas y desafíos, la implementación de IBER no solo mejora la gestión de inundaciones, sino que también proporciona herramientas efectivas para la planificación y respuesta ante eventos extremos, potenciando la resiliencia urbana frente a riesgos hidrológicos..

Capítulo 5. Análisis y Resultados de la Modelación de Inundaciones Urbanas

En el ámbito de la modelación de inundaciones urbanas, diversos estudios y aplicaciones prácticas han demostrado la eficacia de diferentes softwares en la predicción y gestión de eventos de inundación. Según la comparación realizada en el estudio "Definition of Flood-Prone Areas: A Comparison between HEC-RAS and Iber Software Results", el software IBER ofrece una representación bidimensional del flujo de agua, proporcionando mayor precisión en áreas urbanas complejas en comparación con el modelo unidimensional de HEC-RAS (Martins et al., 2020) . Este análisis destaca la capacidad de IBER para manejar flujos superficiales detallados, lo cual es crucial para el diseño urbano y la prevención de riesgos..

Por otro lado, HEC-RAS ha sido bastante utilizado en la simulación en ríos y sistemas de drenaje debido a su robustez y facilidad de uso. Sin embargo, su enfoque unidimensional puede limitar la precisión en áreas con topografías complejas y densas infraestructuras urbanas. En contraste, el software SWMM, desarrollado por la EPA, es altamente valorado por su capacidad para modelar sistemas de alcantarillado y gestionar aguas pluviales, siendo una herramienta esencial en el diseño de redes de drenaje urbano. .

Adicionalmente, MIKE URBAN, desarrollado por DHI, integra modelos hidráulicos avanzados para simular el comportamiento del agua en entornos urbanos, ofreciendo soluciones completas para la gestión del agua en ciudades. Este software permite la integración de datos geoespaciales y la visualización detallada de los resultados, permitiendo tomar decisiones bien fundamentada.

Los resultados obtenidos de la modelación, se observa que la precisión y la capacidad de predicción de cada software dependen en gran medida de la complejidad del sistema hidrológico y las condiciones específicas del área de estudio. Por ejemplo, en un estudio de caso

comparativo, el modelo IBER demostró ser más efectivo en la predicción de áreas inundables en zonas urbanas densamente pobladas debido a su enfoque bidimensional, mientras que HEC-RAS fue más adecuado para la simulación de flujos en ríos y canales abiertos (Martins et al., 2020).

La implementación de modelos hidrodinámicos como el modelo Iber es fundamental para la gestión de recursos hídricos, principalmente en la predicción y mitigación de inundaciones. Este modelo es robusto en la identificación de zonas potencialmente inundables con características bidimensionales (Instituto Nacional de Hidráulica Chile, 2016), y es capaz de incorporar estructuras de ingeniería para analizar fenómenos específicos (García-Feal et al., 2017). Su módulo de post-proceso genera una amplia gama de resultados detallados, incluyendo mapas de variables clave como calado, cota y velocidad (Solomatine & Shrestha, 2009), facilitando la visualización de escenarios adversos.

La presentación gráfica y animada de los resultados del modelo Iber ayuda a que incluso personal no especializado en ingeniería pueda entender las situaciones modeladas, apoyando así la toma de decisiones por parte de entidades responsables de la gestión de riesgos de inundación. Los resultados de estas simulaciones proporcionan información crucial para la planificación de infraestructuras y la reducción del riesgo en áreas vulnerables (Federal Emergency Management Agency, 2013).

Según Pérez (2018) describe los elementos esenciales que afectan la exactitud de los modelos, enfatizando la importancia de los datos de entrada precisos, que incluyen información topográfica, climática y de uso del suelo. Estos datos son fundamentales para validar las simulaciones y optimizar la planificación y gestión de los recursos hídricos. Además, se examinan los modelos unidimensionales y bidimensionales, cada uno con aplicaciones específicas que permiten estudiar tanto el flujo superficial como los fenómenos de inundación en

entornos urbanos complejos.

Al seleccionar el software adecuado para la modelación de inundaciones urbanas, es fundamental considerar los requerimientos específicos del proyecto, lo complejo del sistema hidrológico, y los objetivos concretos de la simulación. La integración de diferentes herramientas y la validación mediante estudios de caso permiten obtener resultados más precisos y confiables, ayudando a manejar eficazmente los riesgos de inundación en áreas urbanas (Londoño Giraldo 2021).

En América Latina, países como Brasil y México han destacado en la implementación y desarrollo de la modelación hidrológica, especialmente en la gestión de inundaciones y otros fenómenos hidrológicos. Estos países han priorizado la modelación hidrológica debido a sus recurrentes problemas de inundaciones y la necesidad de gestión eficiente de recursos hídricos.

Brasil ha hecho avances significativos en la modelación hidrológica. La Agencia Nacional de Aguas (ANA) y otros organismos han actuado en la inversión de tecnología y formación para mejorar la predicción y gestión de inundaciones. Utilizan modelos avanzados para entender y mitigar los impactos de las lluvias intensas y las inundaciones en áreas urbanas y rurales.

México, por su parte, ha integrado la modelación hidrológica en sus políticas de gestión de riesgos. El Instituto Nacional de Ecología, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Cambio Climático (INECC) han implementado programas de seguimiento y modelación para prevenir desastres naturales, como inundaciones y sequías, que afectan diversas regiones del país.

Países como Chile y Argentina también están progresando en la implementación de tecnologías de modelación hidrológica, aunque su adopción es menos extensa en comparación

con la de Brasil y México. En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) ...ha utilizado modelos para la administración de cuencas fluviales, mientras que en Argentina, el Instituto Nacional del Agua (INA) ha trabajado en mejorar la capacidad de predicción de eventos hidrológicos extremos.

Colombia, aunque ha realizado esfuerzos en la implementación de modelación hidrológica, aún enfrenta desafíos difíciles. La escases de infraestructura adecuada y la necesidad de mayor inversión en tecnología y capacitación son algunos de los obstáculos que limitan el avance en este campo. Sin embargo, el país está trabajando en mejorar sus capacidades a través de la colaboración con instituciones internacionales y la adopción de nuevas tecnologías.

En contraste, países como Perú han comenzado a integrar la modelación hidrológica en sus estrategias de gestión de riesgos más recientemente. La Autoridad Nacional del Agua (ANA) en Perú ha iniciado programas para implementar modelos hidrológicos y mejorar la predicción de desastres naturales, aunque todavía tienen mucho por avanzar para igualar el nivel de implementación de Brasil y México.

En conclusión, mientras que Brasil y México lideran en la priorización y desarrollo de la modelación hidrológica en América Latina, otros países como Chile, Argentina, Colombia y Perú están en diferentes etapas de adopción y desarrollo de estas tecnologías. Estos esfuerzos son cruciales para mejorar la gestión de riesgos y mitigar los impactos de los desastres naturales en la región.

Conclusiones

Hemos explorado los fundamentos esenciales de la modelación hidráulica e hidrológica. Comenzando con el concepto y las diversas aplicaciones de la modelación, hemos destacado cómo los modelos hidráulicos son fundamentales para simular el comportamiento del agua en sistemas naturales y urbanos. Analizamos los factores clave que afectan la precisión de la modelación, tales como la calidad de los datos de entrada, que abarcan detalles topográficos, climática y de uso del suelo. Este capítulo proporciona los principios esenciales para reconocer cómo estas herramientas son vitales para una gestión eficiente del agua y una adecuada planificación urbana.

Exploramos los diferentes tipos de modelación hidrodinámica y hidrológica, centrándonos en su aplicación en inundaciones urbanas. Examinamos cómo la modelización hidrodinámica permite simular el flujo del agua en ríos y sistemas de drenaje urbano, mientras que los modelos hidrológicos abordan el ciclo completo del agua, desde la precipitación hasta la escorrentía. Destacamos la importancia de estos modelos en la definición de la modelación hidrológica urbana y sus beneficios en la mitigación de inundaciones, haciendo énfasis en modelos unidimensionales y bidimensionales para captar la complejidad de los fenómenos urbanos.

Exploramos diversas herramientas y métodos utilizados para la modelación de inundaciones urbanas. Presentamos herramientas como HEC-RAS, SWMM, MIKE URBAN, PCSWMM e IBER, cada una con capacidades únicas para simular y gestionar riesgos de inundación en entornos urbanos. Cada herramienta ofrece ventajas específicas y se adapta a diferentes contextos y necesidades, proporcionando a los planificadores urbanos y gestores de riesgos una gama diversa de opciones Para anticipar y reducir los efectos de las inundaciones.

Analizamos las ventajas significativas que ofrece IBER, como la capacidad de modelar detalles bidimensionales y simular la interacción compleja entre el agua y las estructuras urbanas. Discutimos las limitaciones y consideraciones prácticas al utilizar IBER, incluyendo su aplicación en entornos con aguas subterráneas y la flexibilidad para incorporar diversos módulos como procesos hidrológicos, transporte de sedimentos y características del terreno. IBER emerge como una herramienta robusta para la gestión integral de inundaciones urbanas.

Referencias Bibliográficas

- Alejandro Herera. (2002). «INVESTIGACIÓN EN MODELO HIDRÁULICO DE LA REPRESA DE LA HIDROELÉCTRICA CHIMAY - PDF Free Download». (<https://docplayer.es/25979464-Investigacion-en-modelo-hidraulico-de-la-represa-de-la-hidroelectrica-chimay.html>).
- Asto Soto, Luiggi Johanis, y Isai Nelson David Diaz Malpartida. 2016. «Modelo de simulación de la operación del embalse Gallito Ciego utilizando el software IBER». *Universidad Privada Antenor Orrego*.
- Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (2013). Mapeo de riesgos y estudio de seguros contra inundaciones: documentación técnica. Washington,
- Barrera Ochoa, Mauricio Santiago. 2020. «Modelación hidráulica en 2D del tramo puente av. Felipe II-Tres Puentes del río Yanuncay utilizando IBER». bachelorThesis, Universidad del Azuay.
- Bermúdez, María, Ernest Bladé, Luis Cea, y Ángel Mateos Alonso. s. f. «IBER applications basic guide: Two-dimensional modelling of free surface shallow water flows».
- Bladé, E., L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, y A. Coll. 2014. «IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos». *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1):1-10. doi: 10.1016/j.rimni.2012.07.004.

Bohorquez Bohorquez, Carlos Andres, y Manuel Sebastián Urrego Jiménez. 2021. «Modelación hidrodinámica del río Gualí en el municipio de Honda Tolima mediante la herramienta IBER».

Castro Malca, Paulo César, y Carla del Pilar García Alvarado. 2021. «Propuesta de modelamiento bidimensional para la estimación del tamaño de malla y el tiempo computacional en canales anchos de 100 metros usando IBER 2.5.2 y hecras 5.0.7». *Universidad Privada Antenor Orrego*.

CCS. s. f. «El modelo IBER y su aplicación al estudio de inundaciones».

<https://www.conorsegurosdigital.com/>.

(<https://www.conorsegurosdigital.com/es/numero-09/sumario/colaboraciones/el-modelo-IBER-y-su-aplicacion-al-estudio-de-inundaciones>).

CESAR. 2019. «MODELACIÓN HIDRÁULICA 2D CON IBER V 2.4.2». *Cersa*.

(<https://cersa.org.pe/capacitaciones/?q=armatupack/iber>).

HidrojING. 2017 «Modelación hidrológica - HidrojING».

(<https://www.hidrojing.com/servicios/modelizacion-hidrologica/>).

Instituto Nacional de Hidráulica (Chile). (2016). Manual del usuario del modelo Iber 2D:

Modelo hidrodinámico de flujos superficiales. Santiago, Chile: Autor.

García-Feal, O., Puertas, J., Vázquez-Cendón, ME, Leitão, JP y León, C. (2017). Aplicación del modelo hidrodinámico 2D Iber en simulaciones de rotura de presas. Revista de

Ingeniería Hidráulica, 143 (9[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-)

Ceballos López, Julián David. 2011. «MODELACIÓN HIDRÁULICA Y MORFODINÁMICA DE CAUCES SINUOSOS APLICACIÓN A LA QUEBRADA LA MARINILLA (ANT)». *Boletín de Ciencias de la Tierra* (30):107-18.

Cuba, Mayumi Naisha Sequeiros. 2017. «EVALUACIÓN HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO CON EL MODELO IBER PARA DETERMINAR EL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA POBLACIÓN RIBEREÑA AL RIO QOCHOQ, PROVINCIA CALCA - REGIÓN CUSCO 2017».

Espejo Mariño, Oriele Katherine, y Yamileth Zabaleta Castro. 2021. «Modelamiento numérico para mejorar la eficiencia de funcionamiento de las pozas disipadoras en ríos de alta pendiente: Caso de estudio Bocatoma San Pedro - Ayacucho». *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.

Gómez, David López, y Juan J. Rebollo Cillán. 2018. «El modelo IBER y su aplicación al estudio de inundaciones».

Guaya Caraguay, Cristian Iván, y Edison Andrés Montalván Alcívar. 2018. «Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la provincia de Manabí aplicando el programa IBER». *bachelorThesis*, Quito, 2018.

Gutiérrez García, Jesús Valentín, Juan Enrique Rubiños Panta, Demetrio Salvador Fernández Reynoso, Carlos Ramírez Ayala, Rodrigo Roblero Hidalgo, Francisco Gerardo Gutiérrez

García, Martín Enrique Romero Sánchez, Jesús Valentín Gutiérrez García, Juan Enrique Rubiños Panta, Demetrio Salvador Fernández Reynoso, Carlos Ramírez Ayala, Rodrigo Roblero Hidalgo, Francisco Gerardo Gutiérrez García, y Martín Enrique Romero Sánchez. 2022. «Modelación hidráulica en IBER para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán». *Revista mexicana de ciencias forestales* 13(71):159-81. doi: 10.29298/rmcf.v13i71.1238.

IIUNAM, dir. 2022. Laboratorio de modelos hidráulicos.

iAgua, redaccion. 2014. «¿Cómo se produce el proceso de transporte de sedimentos en los ríos?» *iAgua*. (<https://www.iagua.es/noticias/mexico/imta/14/12/22/como-se-produce-proceso-transporte-sedimentos-lo-rios>).

Jorge Ayala. 2016. «(PDF) Modelamiento Hidráulico Bidimensional para la determinación de planos de inundación de Quillacollo (Cochabamba - Bolivia) | Jorge Ayala - Academia.edu». (https://www.academia.edu/10212008/Modelamiento_Hidr%C3%A1ulico_Bidimensional_para_la_determinaci%C3%B3n_de_planos_de_inundaci%C3%B3n_de_Quillacollo_Cochabamba_Bolivia_).

Luliquis Salinas, Shamir Fabian John, y Samuel Walter Vines Fox. 2022. «Evaluación conceptual y numérica de la socavación local de pilares con collares para el puente Andrés Avelino Cáceres utilizando HEC-RAS e IBER - Piura - Perú». *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.

Londoño Giraldo, Johan Styweart. 2021. «Evaluación del riesgo urbano por inundaciones del río

Supía». Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia.

Nelson, Soporte IT. 2013. «Ingeniería Fluvial: La geometría en HEC-RAS». *Eadic*. Recuperado 16 de abril de 2024 (https://eadic.com/blog/entrada/ingenieria-fluvial-geometria-hec_ras/).

Ochoa, Santiago, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, María Labaque, y José Manuel Díaz. 2016. «Modelación Hidrodinámica del tramo Medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba». *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 3(2):95-101.

Ortiz Peña, Guillermo Javier, y Boris Salinas Oyola. 2022. «Modelamiento hidráulico con el software IBER para el diseño de defensa rIBEReña de la Quebrada Bocapan - Tumbes – 2022». *Repositorio Institucional - UCV*.

Palavecino Ramos, Angelo Enrique. 2015. «Modelación bidimensional del flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER». masterThesis, Quito, 2015.

Pérez, Daniela Romero, y Daniel Camilo Gómez Romero. 2021. «IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE IBER PARA REALIZAR UN MODELO DE CALIDAD DEL AGUA Y EVALUAR ESCENARIOS EN EL RÍO RANCHERÍA, GUAJIRA».

Pérez, Jhonny I., Jairo R. Escobar, Jose M. Fragozo, Jhonny I. Pérez, Jairo R. Escobar, y Jose M. Fragozo. 2018. «Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia». *Información*

tecnológica 29(4):143-56. doi: 10.4067/S0718-07642018000400143.

Quispe Ajata, Karina Marisol. 2021. «Cartografía de riesgo de inundaciones con el software IBER : caso: Río Grande Municipios San Julián, Cuatro Cañadas y Okinawa Uno Santa Cruz – Bolivia». Thesis.

RMCF 2021. «Modelación hidráulica en IBER para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán | Revista Mexicana de Ciencias Forestales».

Researchgate. 2007 «FIGURA 3. Mapa de Vegetación y Uso Del Suelo (2007). FIGURE 3....» ResearchGate. (https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-3-Mapa-de-vegetacion-y-uso-del-suelo-2007-FIGURE-3-Vegetation-map-and-soil_fig3_260773518).

Redacción. s. f. «La modelización hidráulica y los sistemas de información geográfica». *Guía Fundación Nueva Cultura del Agua*. (<https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/areas/agua-y-territorio/80-la-modelizacion-hidrologica-hidraulica-y-los-sistemas-de-informacion-geografica>).

S. I. B. 2015 - IBER, APLICACIÓN DE MODELOS HIDRODINAMICOS PARA LA EVALUACION DE ZONAS INUNDABLES EN BOLIVIA». (<https://www.sib.org.bo/actividad/articulos/item/805-IBER-aplicacion-de-modelos-hidrodinamicos-para-la-evaluacion-de-zonas-inundables-en-bolivia.html>).

Softree. 2020 «Mapeo 3D y Diseño de Sitios para Ingenieros-Terrain Tools». (<https://www.softree.com/ES/productos/mapeo-3d>).

Solomatine, DP y Shrestha, DL (2009). Complejidad del modelo en el modelado hidrológico: calibración e incertidumbre predictiva. *Procesos hidrológicos*, 23

Saenz Solis, Franco Oliver. 2021. «Estudio de inundación en el tramo del centro poblado Manchuria al centro poblado Sandial en el distrito de Pítipo, provincia de Ferreñafe, departamento de Lambayeque, mediante el uso de los software HEC-HMS E IBER».

Torres-Bejarano, F., J. Padilla Coba, C. Rodríguez Cuevas, H. Ramírez León, y R. Cantero Rodelo. 2016. «La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia». *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 32(3):163-72. doi: 10.1016/j.rimni.2015.04.001.

Villegas Masías, Meyling Nayham. 2023. «Análisis de riesgo frente a inundaciones en la Quebrada Estanquillo con el modelo matemático IBER, en el distrito de Cerro Colorado, provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa».

Zanata, Igor Martins, Vicente de Paulo Santos de Oliveira, y Wagner Rambaldi Telles. 2024. «The Use of Computational Modeling for Simulation and Comparison of Digital Elevation Models in Northwest Fluminense. Case Study: Pomba River and Paraíba Do Sul River». *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18(4):e04610-e04610. doi: 10.24857/rgsa.v18n4-001.

Saenz Solis, Franco Oliver. 2021. «Estudio de inundación en el tramo del centro poblado Manchuria al centro poblado Sandial en el distrito de Pítipo, provincia de Ferreñafe, departamento de Lambayeque, mediante el uso de los software HEC-HMS E IBER».

- Sañudo, Esteban, Luis Cea, y Jerónimo Puertas. 2020b. «Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM». *Water* 12(9):2647. doi: 10.3390/w12092647.
- Yang, Yuhang, Leifeng Sun, Ruonan Li, Jie Yin, y Dapeng Yu. 2020. «Linking a Storm Water Management Model to a Novel Two-Dimensional Model for Urban Pluvial Flood Modeling». *International Journal of Disaster Risk Science* 11(4):508-18. doi: 10.1007/s13753-020-00278-7.
- Zanata, Igor Martins, Vicente de Paulo Santos de Oliveira, y Wagner Rambaldi Telles. 2024. «The Use of Computational Modeling for Simulation and Comparison of Digital Elevation Models in Northwest Fluminense. Case Study: Pomba River and Paraíba Do Sul River». *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18(4):e04610-e04610. doi: 10.24857/rgsa.v18n4-001.