



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



**MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN CUENCAS URBANAS UTILIZANDO
EL SOFTWARE IBER 2D**

(AUTOR)

STEEVEN GAMARRA PEINADO

1085181677



**INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
NORTE DE SANTANDER**

2022



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



**MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN CUENCAS URBANAS UTILIZANDO
EL SOFTWARE IBER 2D**

(AUTOR)

STEEVEN GAMARRA PEINADO

1085181677

**MONOGRAFÍA COMO TRABAJO DE GRADO PARA OPTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

TUTOR

ING. DIEGO IVAN SANCHEZ TAPIERO

INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

NORTE DE SANTANDER

2022



TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I	9
GENERALIDADES	9
INUNDACIONES.....	9
Inundaciones lentas	9
Crecientes súbitas	9
TIPOS DE INUNDACIONES	10
Inundaciones pluviales	10
Inundaciones fluviales.....	10
Inundaciones costeras.....	10
Inundaciones por ruptura de diques y presas.....	11
Inundaciones por incorrecta operación.....	11
INUNACIONES URBANAS	11
MODELO.....	12
TIPOS DE MODELACIONES.....	13
Modelación hidrológica.....	13
Aplicación en la ingeniería.	13
Modelación hidráulica.....	14
Aplicaciones en la ingeniería.....	14
MODELOS UNIDIMENSIONALES	15
Modelo empírico.	15
Modelo linealizado.....	16



Modelo hidrológico.....	16
Modelo hidráulico.....	16
Modelos Completos.....	18
Modelos explícitos.....	18
Modelos implícitos.....	19
MODELOS BIDIMENSIONALES (2D).....	19
Métodos de diferencias finitas.....	21
¿Cuáles son las ventajas de un modelo bidimensional sobre un modelo unidimensional? 24	
CAPÍTULO 2.....	25
SOFTWARES QUE PERMITEN HACER MODELACIONES DE INUNDACIONES EN 2D	25
SOFTWARES MODELADORES EN 2D.....	25
TUFLOW 2D.....	25
TELEMAC 2D.....	26
MIKE 21.....	27
FLO-2D.....	27
RIVER-2D.....	28
HEC-RAS 2D.....	29
LISFLOOD-FP.....	29
IBER 2D.....	30
¿Para qué sirve Iber?.....	31
Antecedentes de IBER 2D.....	31
Módulos.....	33
Módulo hidrodinámico.....	33



Módulo de Turbulencia.....	34
Módulo de transporte de sedimentos	34
Carga de fondo.....	34
Carga suspendida	35
Módulo Calidad del agua.....	35
Módulo de Procesos hidrológicos.....	35
Módulo de Hábitat	36
MODELO NUMÉRICO DE IBER	36
Ecuaciones.....	36
CAPITULO III.....	40
MODELACIÓN DE INUNDACIONES CON IBER.....	40
DATOS REQUERIDOS PARA UN MODELO BIDIMENSIONAL.....	40
Condiciones de frontera.....	40
Condiciones iniciales.....	40
Terreno	40
Rugosidad y viscosidad	41
Rugosidad del terreno	41
Viscosidad del fluido	41
MODELACIÓN EN REGIONES CON ESCASEZ DE DATOS	41
Paso 1: entrada de datos.	42
Paso 2: Diseño del Cauce y llanura de inundación.....	42
Paso 3: Generación de un Modelo Digital del Terreno Preliminar.	42
Paso 4: Parametrización en el software Iber 2D.....	43



Paso 5: Obtención del Modelo Digital del Terreno definitivo.	43
CAPITULO IV	48
MODELACIÓN 2D DE INUNDACIONES PARA CUENCAS URBANAS CON IBER	48
INUNDACIONES URBANAS	48
Causas de las inundaciones urbanas	48
MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CUENCAS URBANAS CON IBER	49
Modelación 1D-2D	50
Casos de estudios.....	51
RESULTADOS DE LAS MODELACIONES CON IBER.....	53
Imágenes de algunos resultados de modelaciones.....	54
REFERENCIAS.....	56



TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Acercamiento al problema de elementos finitos.....	22
Ilustración 2: Aproximación a la solución de elementos finitos.....	22
Ilustración 3: Tipos de mallas	23
Ilustración 4:Diseño del cauce del río.....	42
Ilustración 5: Salida de topografía con la información solventada con escasez de datos. 43	
Ilustración 6: Salidas de simulación tipo raster del calado en función del tiempo.	44
Ilustración 7: Curvatura y localización del tramo de estudio.	45
Ilustración 8:Modelo Digital del Terreno y ubicación del punto de calibración	45
Ilustración 9: Velocidades del tramo en estudio en diferentes escenarios.....	46
Ilustración 10:Resultados de altura de la lámina de agua en el escenario máximo caudal de avenida torrencial 2015 = 249 m ³ /s	46
Ilustración 11: Mapa de máximos para velocidades del agua.....	54
Ilustración 12: Mapa de máximos para valores de cota del agua.	54
Ilustración 13: Resultado tipo raster	55



Tabla de ecuaciones

Ecuación 1: Conservación de masa.

Ecuación 2: Conservación de momento

Ecuación 3: Conservación de masa.

Ecuación 4: Relación entre el flujo y el almacenamiento.

Ecuación 5: Simplificación modelo de onda .

Ecuación 6: conservación de masa modelo onda cinemática.

Ecuación 7: estabilidad numérica modelo onda difusiva.

Ecuación 8: conservación masa modelos explícitos.

Ecuación 9: conservación de momento modelos explícitos.

Ecuación 10: Ecuación vectorial de flujo.

Ecuación 11: Vectores de la ecuación de flujo bidimensional.

.Ecuación 12: Términos faltantes de la ecuación de flujo en dos dimensiones.

Ecuación 13: Ecuación de Manning.

Ecuación 14: Rozamiento de fondo.

Ecuación 15: Ecuación de Van Dorn.

Ecuación 16: Velocidad del viento a 10 metros de altura.

Ecuación 17: Viscosidad turbulenta para un modelo parabólico.

Ecuación 18: Viscosidad Turbulenta a través de la ecuación de Manning.

Ecuación 19: Viscosidad Turbulenta en el módulo de longitud de Mezclas.

Ecuación 20: Transporte para la energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía turbulenta.



CAPITULO I

GENERALIDADES

INUNDACIONES

Según IDEAM (2015), Las inundaciones son un fenómeno hidrológico periódico que cuentan con gran potencial destructor que forma parte de la dinámica del desarrollo de las corrientes. Se producen por precipitaciones generalizadas intensas, que elevan los niveles de agua en los cauces, sobresaliendo de las orillas ya sean naturales o artificiales, provocando desbordamientos y esparcimiento de aguas sobre las áreas de inundación y las zonas cercanas a los ríos. las secuencias generalmente no están fusionadas (p. 1).

Se pueden identificar de la manera más sencilla de la siguiente manera:

Inundaciones lentas

Este tipo, es una inundación que ocurre en áreas de ríos planos y tiene muchos valles aluviales grandes, con incrementos diarios de solo unos pocos centímetros, afectando una gran área, pero generalmente sin pérdida de vidas, el tiempo de afectación en las áreas de inundación puede ascender fácilmente a meses, el ejemplo más obvio en Colombia es la región de la Mojana.

Crecientes súbitas

En comparación con las crecientes lentas, en estas las áreas afectadas son más pequeñas, pero las inundaciones son más destructivas y cobran más vidas cuando ocurren, estas inundaciones responden rápidamente a la llegada de intensas lluvias en las partes altas de la cuenca, por lo que el cauce del río aumenta rápidamente sus niveles de agua en cuestión de horas, y el tiempo en las áreas afectadas se convierte en horas o incluso días.(IDEAM, 2015)



TIPOS DE INUNDACIONES

Inundaciones pluviales

Según Fenoglio (2019), son aquellas inundaciones causadas por precipitaciones intensas o fuertes que excedan la capacidad de los sistemas de drenaje pluvial urbano. En las zonas bajas de las ciudades, la formación de depósitos de agua no solo se debe a las fuertes lluvias, sino también a los atascos de drenaje ocasionados por basuras y el bloqueo de alcantarillas, a menudo debido a la falta de operación. (p. 28).

Inundaciones fluviales

Según EPN (2013), La inundación del río se crea cuando el agua que se desborda de un río permanece en la superficie terrestre cercana(p. 1).

Inundaciones costeras

Esta inundación se presenta en ciudades ubicadas a orillas de ríos, mares y sistemas mixtos como estuarios, este tipo de inundación se presenta por desbordamiento de ríos y quebradas o como consecuencia del desbordamiento, por aumento del caudal del río y la descarga de agua sobre sus llanuras aluviales, afectando a las ciudades que se desarrollaron allí, a pesar de los terraplenes o defensas artificiales. En los estuarios, las inundaciones a menudo ocurren cuando los efectos de las mareas producidos por los centros de baja presión y los vientos fuertes y persistentes se superponen durante las mareas altas. La característica forma de embudo de los estuarios hace que el agua se eleve por encima, estrechando los ríos asociados. Este tipo de inundación ocurre principalmente en las llanuras, es más frecuente y menos severa en profundidad que la inundación causada por la marea alta. (Fenoglio, 2019)



Inundaciones por ruptura de diques y presas

Según EPN (2013), este tipo de inundación ocurre cuando un embalse revienta, provocando un flujo repentino de grandes cantidades de agua, lo que puede tener consecuencias catastróficas e inundar grandes extensiones de tierra.(p. 1).

Inundaciones por incorrecta operación

Este tipo de inundación generalmente ocurre cuando se intenta una liberación controlada de agua a través de la compuerta de la presa y, debido a una falla, se abre más de lo necesario, creando más flujo de salida del que puede transportar el canal aguas abajo. , provocando que el río se desborde y provoque inundaciones.(EPN, 2013)

INUNACIONES URBANAS

Según Pérez et al., (2018) Las inundaciones urbanas son una preocupación y un problema social creciente en todo el mundo. El aumento de las zonas urbanas y el incremento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones aumentan el peligro ante una eventual inundación. Las inundaciones urbanas son más comunes en ciudades ubicadas en áreas llanas, especialmente aquellas sin drenaje o con drenaje insuficiente, mal construidos o atascados con desechos municipales. Sin embargo, el rápido crecimiento de las ciudades suele ir acompañado de una mala planificación, lo que aumenta la vulnerabilidad de los residentes ante posibles inundaciones. Se puede decir que los daños por inundaciones afectan directamente a los segmentos más pobres de la sociedad que son las principales víctimas de las inundaciones. Factores como la forma de la superficie ribereña, el patrón de desarrollo urbano y las estructuras económicas de la sociedad influyen en cómo un evento ribereño peligroso resultará en pérdidas



humanas, deterioros en las propiedades, así como también problemas para solventar la escases económica que estos eventos generarían a la sociedad.(Pérez et al., 2018)

Las inundaciones urbanas son el resultado de cambios en los ciclos del agua en las ciudades. Las superficies pavimentadas y los edificios generan un incremento de la escorrentía superficial que, a su vez, se vuelve más rápida debido a la reducción de la infiltración, por lo que las aguas pueden concentrarse en las calles y avenidas.

En la inundación urbana distinguimos:

- Inundación pluvial.
- Inundaciones ribereñas o costeras.
- Inundación mixta. (Fenoglio, 2019)

MODELO

Consiste en separar un elemento real donde se crean relaciones para comprender la conducta de un fenómeno. Para representar la realidad a través de los modelos se necesitan algunas deducciones y utilizar información a distintas escalas y así comprender la conducta del caso de interés. El grado de solución de la información y la numerosa cantidad de datos requeridos, así como lo complejo que pueda llegar a ser el modelo utilizado, dependen fundamentalmente de los objetivos del estudio. La elección de evaluar una cuenca o un área determinada depende de las necesidades específicas de cada estudio.

Un modelo también representa un proceso de manera simplificada, en una forma inusual al sistema mismo. Los comportamientos hidrológico, hidráulicos, hidrogeológicos, sedimentarios y de calidad pueden ser bastantes complejos, y un modelo proporciona una perspectiva resumida que ayuda a disminuir esta complejidad y darle solución al problema.(IDEAM, 2018)



Seleccionar un modelo objetivo es un paso importante en el modelado para predecir con precisión los flujos y también lograr comprender las respuestas de la cuenca. Para un estudio de un caso en particular, la finalidad del caso, el modelo y el alcance de datos son los factores decisivos para la selección. (Veléz & Ocampo, 2014)

TIPOS DE MODELACIONES

Modelación hidrológica

Según IDEAM (2018), La modelización hidrológica se refiere a la representación de los componentes del ciclo hidrológico o de algunos de ellos (p. 32).

Existen diferentes contextos donde es fundamental conocer los detalles de la conducta de un cuerpo de agua en distintas situaciones. Las propiedades para las que se utiliza el modelo deben depender en gran medida del fenómeno en estudio. En cada escenario donde se pueda utilizar la modelación hidrológica se debe tener muy claro para qué se requiere, ya sea para construir infraestructura, crear alertas tempranas, zonas de riesgo, etc. porque hay diferencias significativas en los requisitos de entrada y parámetro.

Aplicación en la ingeniería.

La modelación hidrológica se utiliza en muchos campos de las ingenierías:

- Abastecimiento de agua.
- Riegos.
- Gestión de agua subterránea.
- Generación de energía.
- Gestión de crecida.



- Calidad del agua.
- Disminuir la cantidad de contaminantes.
- Conservación de hábitat.(IDEAM, 2018)

Modelación hidráulica

El modelado hidráulico abarca un proceso técnico que tiene como objetivo reproducir un fenómeno de la realidad, el cual se encamina en establecer los movimientos o la dinámica del agua, implementando modelos físicos y/o matemáticas simplificadas.(IDEAM, 2018)

Aplicaciones en la ingeniería.

La modelación hidráulica puede ser utilizada en muchos campos de las ingenierías:

- Determinar las demandas y distribuciones de las aguas.
- Diseño de obras hidráulicas.
- Inundaciones.
- Gestión, planificación y mantenimiento de cuencas.
- reservorios).
- Calidad del agua
- Estudio de la forma terrestre y las dinámicas fluviales.(IDEAM, 2018).



MODELOS UNIDIMENSIONALES

Este tipo de modelo se ocupa de las ecuaciones de conservación de momento y la masa propuestas en 1871 por Barre de Saint Venant, que describe un flujo unidireccional inestable en canales abiertos.

Ecuación 1: Conservación de masa.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0$$

Ecuación 2: Conservación de momento

$$\frac{1\partial Q}{A\partial t} + \frac{1\partial}{A\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Debido a la complejidad numérica de la ecuación no se puede obtener una solución analítica, por esta razón se han implementado varios métodos sencillos para resolver este problema por aproximación numérica, estas soluciones son las siguientes:

Modelo empírico.

Estos se basan en observaciones intuitivas de ondas, hay 2 tipos de modelos empíricos: (1) modelo de retardo, basado en el retardo entre la entrada y salida de un cuerpo de agua, (2) las relaciones de medición, basadas en experimentos entre los flujos aguas abajo y aguas arriba.



Modelo linealizado.

Estos buscan realizar una linealización de la ecuación de Saint Venant para que puedan ser resueltas analíticamente, por lo que es necesario reducir los términos, (1) omitiendo el 2do término de la ecuación de conservación del momento, (2) asumiendo una constante sección transversal, (3) suponiendo una inclinación constante, (4) linealizando el gradiente de rozamiento con respecto a la velocidad y la profundidad de la velocidad, (5) sin flujo lateral, y (6) el comportamiento de las olas se describe mediante una expresión simple y se resuelve analíticamente.

Modelo hidrológico.

Es un modelo basado en la ecuación 1 y la relación entre el flujo y el almacenamiento.

Ecuación 3: Conservación de masa.

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Ecuación 4: Relación entre el flujo y el almacenamiento.

$$S = K [XI + (1 - X) O]$$

Donde:

K= cte. con unidad de tiempo.

X=0 a 1.

Modelo hidráulico.

Los modelos hidráulicos se basan en la ecuación 1 y algunas modificaciones de la ecuación 2, éstos son: simplificado o complejo.



- **Modelo simplificado**

Su clasificación se da teniendo en cuenta la cantidad de términos a los que le den solución de la ecuación 2, estos se clasifican en onda cinemática, difusiva y cuasi-permanente.

- **Modelos de ondas cinemáticas**

Estos utilizan la ecuación de conservación de momento de forma simplificada omitiendo algunos términos de la ecuación.

Ecuación 5: Simplificación modelo de onda cinemática.

$$S_0 = S f$$

Se asume $\partial A / \partial Q = 1/c$.

Ecuación 6: conservación de masa modelo onda cinemática.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

- **Modelo de onda difusiva**

Ecuación 7: estabilidad numérica modelo onda difusiva.

$$\Delta t \leq B S_0^{1/2} \Delta x^2 / (K c + S_0 \Delta x \Delta K c / \Delta h)$$



- **Modelo cuasi-permanente**

Este tiene en cuenta cada uno de los términos de la ecuación 1 y toda la ecuación 2 excluyendo el término $\partial v / \partial t$. Este modelo también reduce el tiempo computacional pero no es muy utilizado porque tiene más porcentaje de error en comparación con el de onda difusiva y por ello no se recomienda su utilización.

Modelos Completos

Los avances en las computadoras han permitido la creación de las primeras metodologías para resolver cada uno de los términos de la ecuación de Saint Venant, este tipo de modelos se denominan modelos dinámicos y su clasificación se da por el método de resolución, son explícitos o implícitos.

Modelos explícitos

Son los que resuelven sin ambigüedades la ecuación de Saint Venant. El modelado explícito se basa en separar el problema en puntos o nodos, para proponer 2 ecuaciones algebraicas lineales y resolverlas en cada punto y cada vez que sea necesario.

Ecuación 8: conservación masa modelos explícitos.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + BT \frac{\partial y}{\partial t} - q = 0$$

Ecuación 9: conservación de momento modelos explícitos.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) + (V - vx)qA = 0$$



Modelos implícitos

Estos pueden resolver simultáneamente la ecuación de Saint Venant de un punto a otro en todos los puntos. Establece un sistema de 2 ecuaciones para todas las secciones y las resuelve de manera simultánea. El sistema de ecuaciones se puede establecer como lineal o no lineal según la aproximación de los términos. (Romero Coca, 2015)

MODELOS BIDIMENSIONALES (2D)

Los modelos en dos dimensiones provienen de implementar la ecuación de Saint Venant en la dirección del flujo y perpendiculares a ellos. Estas se denominan ecuaciones de Navier Stokes o de Saint Venant para flujos en aguas poco profundas. Estos modelos se utilizan en el análisis de planicies aluviales o inundaciones poco profundas. (Romero Coca, 2015)

La ecuación gobernante de los modelos en dos dimensiones:

Ecuación 10: Ecuación vectorial de flujo en dos dimensiones.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = H$$

Donde:

x,y: Dimensión espacial.

U,F,G y H: Son vectores.



Ecuación 11: Vectores de la ecuación de flujo bidimensional.

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} hu \\ g\frac{h^2}{2} + hu^2 \\ huv \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ g\frac{h^2}{2} + hv^2 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Donde:

h: nivel u.

v: velocidad en dirección del flujo y perpendicular.

Soy, Sox: representan las pendientes del fondo en X y Y.

Sfy, Sfx: representan la resistencia al flujo en X y Y.

Ecuación 12: Términos faltantes de la ecuación de flujo en dos dimensiones.

$$Fd = \begin{pmatrix} 0 \\ -\epsilon h \frac{\partial u}{\partial x} \\ -\epsilon h \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} \text{ y } Gd = \begin{pmatrix} 0 \\ -\epsilon h \frac{\partial u}{\partial x} \\ -\epsilon h \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix}$$

Donde:

e: coeficiente de viscosidad.

Para solucionar la ecuación de flujo bidimensional se aproximan las ecuaciones diferenciales a ecuaciones algebraicas.



Los modelos en dos dimensiones se discretizan por medio de los siguientes métodos:

- (1) Diferencias finitas.
- (2) Elementos finitos.
- (3) Volúmenes finitos.

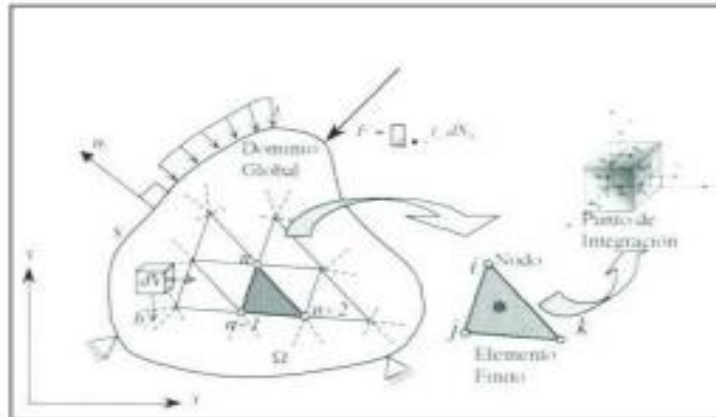
Métodos de diferencias finitas

Este es un método numérico que se basa en aproximar valores diferenciales mediante la expansión de la serie de Taylor para un punto, utilizando aproximaciones, las aproximaciones se unen a una malla para solucionar el sistema de ecuaciones, la desventaja de este método es que introduce problemas de geometría complejos.

Métodos de elementos finitos

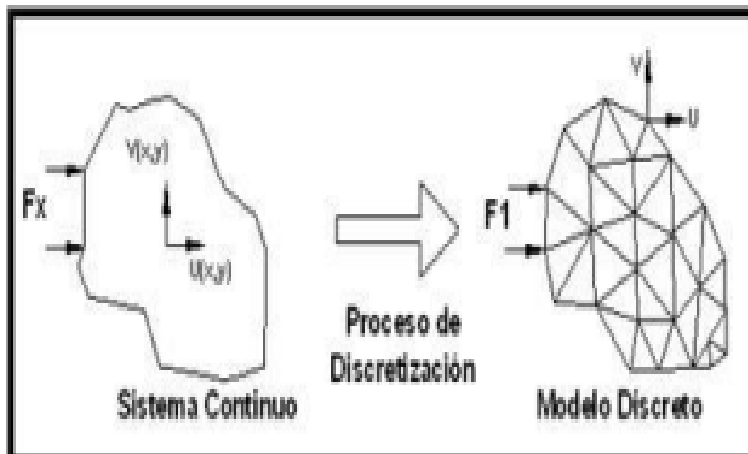
Este es un método más general y más eficiente para aplicar en la vida real que el de diferencia finita, abarca la geometría, la física y las condiciones de contorno, en este caso, se define un dominio que consiste en subdominios que son abordados por cualquiera de los métodos tradicionales. Aquí se hallan valores en puntos cualquiera partiendo de la fórmula integral ponderada del problema, que es esencialmente una ecuación que permite hallar valores desconocidos a través de condiciones de contorno. (Romero Coca, 2015)

Ilustración 1: Acercamiento al problema de elementos finitos



Fuente: (Romero Coca, 2015)

Ilustración 2: Aproximación a la solución de elementos finitos



Fuente: (Romero Coca, 2015)

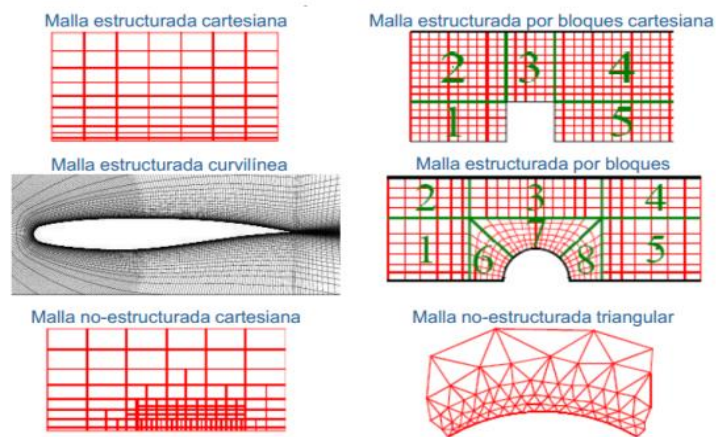
Métodos de volúmenes finitos

Este método ha ganado popularidad en áreas de modelado de aguas poco profundas, debido a las diversas ventajas que tiene en términos de conservación, flexibilidad geométrica y simplicidad conceptual. (Romero Coca, 2015)

Los métodos numéricos descritos anteriormente se implementan mediante la representación de un espacio discreto llamado malla, que se representa mediante una serie de puntos como la velocidad, la profundidad o el nivel.

Las posibles variaciones se calculan resolviendo una matriz, como resultado de usar o aplicar uno de los métodos mencionados anteriormente.

Ilustración 3: Tipos de mallas



Fuente: (Romero Coca, 2015)



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



¿Cuáles son las ventajas de un modelo bidimensional sobre un modelo unidimensional?

El modelo en dos dimensiones ofrece una gran ventaja sobre los cálculos con el modelo unidimensional, ya sea en régimen variable o en régimen permanente, proporcionando más estabilidad y convergencia que los modelos en una dimensión. Además, los modelos en dos dimensiones pueden simular con mejor adaptación al mundo real todas las escenarios en las que el flujo no es solo unidireccional, ampliando así en gran medida su campo de uso.(Jordán, 2013)



CAPÍTULO 2

SOFTWARES QUE PERMITEN HACER MODELACIONES DE INUNDACIONES EN

2D

SOFTWARES MODELADORES EN 2D

Hay muchos programas que se utilizan para solucionar el flujo de agua en lámina libre bidimensionalmente. Algunos softwares, como Mike21, Sobek o TufLOW2D, utilizan métodos de diferencia finita para sus cálculos, lo que conduce a restricciones en la flexibilidad de la malla y las soluciones de cálculo no continuo. Otros, como Telemac2D, y FLO2D, emplean elemento finito, lo que otorga una mayor flexibilidad en el cálculo de mallas porque trabaja con mallas no estructuradas. La inclinación actual se decanta hacia los softwares que utilizan métodos de volúmenes finitos. Algunos softwares que disponibles que emplean volúmenes finitos son Infoworks, Guad2D, Mike-21 e Iber.(E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)

TUFLOW 2D

TUFLOW (Two-dimensional Unsteady FLOW) es un software de simulación de inundaciones y mareas bidimensional (2D) y unidimensional (1D). Simula la hidrodinámica de cuerpos de agua utilizando ecuaciones de flujo de superficie libre 2D y 1D. TUFLOW está específicamente orientado a establecer patrones de flujo en aguas costeras, estuarios, ríos y llanuras aluviales donde los patrones de flujo son esencialmente de naturaleza 2D y no pueden o serían incómodos de representar usando un modelo de red 1D.

Una característica poderosa de TUFLOW es su incorporación del software de red hidrodinámica 1D, ESTRY (es decir. Los dominios 2D y 1D están vinculados para formar un modelo integrado). TUFLOW continúa desarrollándose y evolucionando para enfrentar los



desafíos del modelado hidrodinámico. Sus puntos fuertes incluyen humectación y secado rápidos, potentes opciones de enlace 1D y 2D, múltiples dominios 2D, representación 1D y 2D de estructuras hidráulicas, cambio automático del régimen de flujo sobre diques y terraplenes, flujo supercrítico 1D y 2D, manejo efectivo de datos y resultados de control de calidad. Es adecuado para modelar inundaciones en ríos importantes hasta flujos urbanos terrestres y entubados complejos, e hidráulica estuarina y costera. TUFLOW usa GIS para administrar, manipular y presentar datos, y software de terceros, como SMS y WaterRIDE, para ver y animar los resultados.

TUFLOW se basa en el esquema de solución de Stelling. Es un esquema implícito de dirección alterna (ADI) de diferencia finita que resuelve las ecuaciones de flujo de agua poco profundas de superficie libre en 2D completas. (TUFLOW, s. f.)

TELEMAC 2D

TELEMAC-2D soluciona las ecuaciones de Saint-Venant utilizando el método de elementos finito o volumen finito y una malla de cálculo de elementos triangulares. Puede realizar simulaciones en condiciones transitorias y permanentes.

Se utiliza para simular flujos de superficie libre en dos dimensiones del espacio horizontal. En cada punto de la malla, el programa calcula el calado del agua y los 2c omponentes de velocidad.

TELEMAC-2D tiene en cuenta los siguientes fenómenos:

- Propagación de ondas largas con efecto no lineal.
- Fricción de la cama.
- Influencia de la fuerza de Coriolis.
- Influencia de los factores meteorológicos.



- Turbulencia.
- Corrientes de torrentes y ríos.
- Influencia de los gradientes horizontales de temperatura o salinidad en la densidad.
- Áreas secas en el dominio computacional.
- Arrastre y difusión de corriente de un trazador, con términos de fuente y sumidero
- Seguimiento de flotadores y derivas lagrangianas.
- Tratamiento de puntos singulares: soleras, diques, tuberías.(TELEMAC, s. f.)

MIKE 21

Es un completo sistema de modelado para la simulación de la hidráulica y los fenómenos relacionados con la hidráulica en estuarios, aguas costeras y mares. Se puede aplicar a cualquier flujo bidimensional de superficie libre en el que se pueda despreciar la estratificación. Los distintos módulos del sistema simulan hidrodinámica, advección-dispersión, ondas cortas, transporte de sedimentos, calidad del agua, eutrofización y metales pesados. El sistema tiene una amplia gama de aplicaciones ambientales y de ingeniería en hidráulica costera, oceanografía, dinámica de olas, puertos, ríos, hidráulica ambiental y procesos de sedimentación. Un extenso módulo de procesamiento previo y posterior permite el análisis y la presentación gráfica de los datos y los resultados del modelo, que se almacenan en una base de datos simple. Un sistema de menú flexible e interactivo facilita el manejo de datos, la entrada de modelos y la ejecución de programas.(Warren & Bach, 1992)

FLO-2D

FLO-2D es un modelo de enrutamiento de inundaciones 2D que combina hidrología e hidráulica. El componente hidrológico es un modelo de lluvia-escorrentía, con un modelo de



flujo superficial que simula el movimiento del volumen de inundación alrededor de la red. El flujo transportado al canal se enruta utilizando la ecuación de onda 1D Saint Venant. FLO-2D se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, estudios de mitigación de inundaciones, modelado de desagües pluviales, análisis de ruptura de presas, interacciones de aguas superficiales y subterráneas, flujos de lodo y transporte de sedimentos.

Las características clave del modelo FLO-2D incluyen una interfaz gráfica de usuario (GUI), un sistema de desarrollo de cuadrículas (GDS) y un mapeador. Las funciones permiten al usuario procesar y editar los datos de la cuadrícula, editar gráficamente las estructuras hidráulicas y crear mapas de peligro y riesgo de inundaciones. FLO-2D es capaz de procesar diferentes tipos de datos topográficos y puede combinarse con el software de terceros SWMM.(FLO-2D, 2017)

FLO-2D es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de momentos de forma completa, utilizando un patrón de cuadrícula geométrica con paso constante, destinado a estimar las variables hidráulicas (tirante, velocidad y caudal) celda por celda y distinguir ocho para cada potencial direcciones de flujo.(Software FLO-2D, 2015)

RIVER-2D

Este es un modelo en dos dimensiones de cálculo de profundidad promedio de elementos finitos modificado para el análisis de hábitat de peces de río.

El programa utiliza la ecuación de cambio de una variable por expansión en serie de Taylor, por dos métodos, puede ser implícito o explícito, además el programa también brinda la capacidad de resolver el sistema de ecuaciones por 2 métodos, un método directo basado en



eliminación gaussiana y otro que se basa en un método general de residuos mínimos.(Romero Coca, 2015)

HEC-RAS 2D

Este solución la ecuación de Saint Venant y Onda Difusiva bidimensionalmente, modeliza por medio de volúmenes finitos implícitos, incorpora un algoritmo para solucionar la concatenación de modelos unidimensionales y bidimensionales, también permite modelar modelos estructurados y mallas no estructuradas, mejora el cómputo aprovechando los múltiples procesadores en las computadoras, tiene un modelo más preciso de cauces y avenidas que fluyen a través de la región de inundación, combina el flujo 1D del canal con la llanura aluvial 2D y, a través de la mejora en RAS Mapper, puede obtener inundaciones detalladas. mapas y vistas dinámicas de las inundaciones.(*HEC-RAS 5.0.1 Flujo 2D*, s. f.)

LISFLOOD-FP

Este es un modelo que estudia la dinámica de los fluidos en dos dimensiones planteado para modelar inundaciones en terrenos complejos, es un modelo esquemático claro que se basa en simplificar el método de cambio de una variable extendiendo la serie de Taylor, el programa puede simular el calado y la velocidad en una malla con 1.000.000 de celdas teniendo en cuenta el movimiento del volumen en las direcciones x e y que estaría dado por la diferencia de nivel entre celdas, este software no es de uso gratuito.(Romero Coca, 2015)



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Las herramientas utilizadas para hacer modelación de inundaciones en 2D vienen creciendo con una tendencia muy fuerte en estos últimos años gracias a la implementación de nuevos y mejorados módulos de cálculos a la hora de hacer las modelaciones, aunque no todos los softwares de modelación hacen sus cálculos basados en los mismos esquemas numéricos, existen algunos como lo es el caso de TELEMAC 2D que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant utilizando el método de elementos finitos o volumen finito y una malla de cálculo de elementos triangulares (TELEMAC, s. f.) y en el caso de HEC RAS Iber incluye un módulo hidrodinámico para simular el flujo de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así Resolver las ecuaciones de Saint Venant y Onda Difusa en 2 dimensiones, integra un algoritmo para resolver el concatenación de modelos 1D y 2D, permite el modelado de mallas estructuradas y no estructuradas (*HEC-RAS 5.0.1 Flujo 2D*, s. f.); todos estos pequeños detalles son necesarios de conocerlos antes de escoger con cual software se desea trabajar para hacer las modelaciones, también se debe tener en cuenta que tipos de datos de entrada se necesita y que tanta capacidad computacional requiere para modelar.

IBER 2D

Iber es un modelo matemático en dos dimensiones realizado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). (Jordán, 2013)

Iber incluye un módulo de hidrodinámica para simular el caudal de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así el cálculo de avenidas y crecidas y delimita las áreas de inundación.



Esta herramienta nace de la declaración del Centro de Investigaciones Hidrológicas sobre el acceso a un modelo que facilita favorablemente la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de gestión del agua. El Modelo Iber es una herramienta gratuita que se incluye en la lista de utilidades freeware. (IMASGAL, 09 Feb)

¿Para qué sirve Iber?

Con Iber se puede crear un gran número de modelos numéricos aplicados a la hidráulica y morfología fluvial. El cálculo de caudales de ríos, la identificación de áreas de inundación, la evaluación de zonas de riesgo y la delimitación de canales de drenaje intenso, hipotéticamente donde el caudal se da en dos dimensiones, son algunas de sus aplicaciones básicas. El transporte de sedimentos y el transporte de lechos de ríos, así como los flujos de mareas en los estuarios, se encuentran entre sus capacidades. La simulación del flujo de agua debajo de puentes, alcantarillas y vertederos también se pueden realizar al incluir la acción del viento, y se puede realizar el modelado de fallas de balsas y represas; un problema bidireccional que a menudo causa grandes dificultades de estabilidad.

El software IBER tiene una interfaz de procesamiento previo y posterior muy simple e intuitiva. (Perez et al., 2018)

Antecedentes de IBER 2D

Iber se desarrolla a partir de dos motores de modelado numérico bidimensional existentes, Turbillón y CARPA, ambos con métodos de volumen finito, integrados en un único código de extensión con nuevas capacidades. (E. Bladé, L. Cea, et al., 2014).

versión 1.0 (2010) incluye tres módulos computacionales principales: un módulo de hidrodinámica, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, esta primera versión se desarrolló en el marco de un convenio firmado entre CEDEX y la Dirección del



Agua (y en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua de la Universidad de A Coruña, y el Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña), Posteriormente (2016), la versión 2.0 del modelo, en la que se introdujeron mejoras en la interfaz de esta versión, que incorpora importantes avances en el módulo de hidrodinámica, y en el que se han creado nuevos módulos de hábitat hidráulico y calidad del agua.

La alianza entre la Dirección del Agua, el CEDEX y los grupos universitarios anteriores ha continuado durante este período y se ha fortalecido con la introducción de nuevas mejoras en el modelo Iber actualizado a la versión 3.0. Entre las mejoras de esta versión podemos destacar la combinación y mejoras de los siguientes módulos:

- Sistema de drenaje dual. Integra la simulación de flujo en red de drenaje subterráneo con flujo superficial.
- El avance del módulo de simulación hidrológica tiene en cuenta tanto la escorrentía superficial como la erosión del suelo.
- Módulo de transporte de sedimentos de arrastre de fondo mejorado, incluida la capacidad de trabajar con tamaños de partículas heterogéneos (mezclas de sedimentos).

Además, las técnicas informáticas intensivas en GPU integradas permiten abordar áreas de investigación más amplias, lo que reduce el tiempo de cálculo, lo anterior quiere decir que esta versión a simplificado el entorno de trabajo por medio de una nueva interfaz. (*Iber 3.0*, 2021)



Módulos

Módulo hidrodinámico

Este módulo resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas someras, que asumen suposiciones sobre la presión hidrostática y la distribución de la velocidad sobre la profundidad del agua. La presión hidrostática se satisface tanto en los ríos como en los flujos de marea en los estuarios no estratificados, generalmente se satisface una distribución uniforme de velocidades en los ríos y estuarios, siempre que no exista un proceso de niveles como consecuencia de las diferencias de la salinidad, las temperaturas o el viento.

En este módulo se realizan los siguientes procesos:

- Cálculo de flujo no estacionario subcrítico y supercrítico.
- Generación de saltos hidráulicos no estacionarios.
- Fricción del lecho calculada con la fórmula de Manning.
- Frentes de inundación inestables.
- Esfuerzos turbulentos calculados con diferentes modelos de turbulencia.
- Evolución del lecho por transporte de sedimento.
- Condición de contorno tipo pared: deslizamiento libre, ley logarítmica de fricción de la pared.
- Condiciones internas: puente, vertedero, compuerta, alcantarilla...
- Formación de brechas en presas.
- Procesos hidrológicos (lluvia, infiltración...).
- Fricción del viento en la superficie libre calculada con la fórmula de van Dorn.
- Herramientas para el cálculo de las zonas de riesgo de inundación de acuerdo con el Reglamento de Abastecimiento Público de Agua.



Módulo de Turbulencia

Iber incorpora modelos de turbulencia tipo Boussinesq que se promedian en profundidad y hallar los esfuerzos cortantes turbulentos.

Módulo de transporte de sedimentos

El módulo de transporte de sedimentos resuelve la ecuación 2D de Exner para calcular la evolución de la elevación del lecho debido a los procesos de sedimentación y erosión, teniendo en cuenta tanto la carga del lecho como la carga suspendida.

Carga de fondo

Las principales características del módulo por carga de fondo son:

- Tensión de escudos críticos para el movimiento inicial de sedimentos.
- Formulaciones de carga de fondo.
 - Wong y Parker (corrección de la fórmula de Meyer-Peter y Müller).
 - van Rijn.
 - Engelund – Fredsoe.
 - Relación definida por el usuario.
 - Engelund – Hansen.
- Corrección de la pendiente de la cama para el transporte de carga de la cama (magnitud y dirección).
- Posición de la capa de roca para condiciones no erosionables.



Carga suspendida

Las principales características de este módulo son las siguientes:

- Difusión turbulenta.
- Plazo de depósito / resuspensión.
- Concentración suspendida de equilibrio calculada a partir de las formulaciones. (Iberaula, 2018)

Módulo Calidad del agua

En este se calcula la evolución espacial y temporal de diversas especies, entre las que destacan:

- Escherichia-coli.
- Oxígenos disueltos.
- DBO de carbono.
- Nitrito/Nitrato.
- Temperaturas.
- Salinidad. (Iberaula, 2018)

Módulo de Procesos hidrológicos

Iber incluye una serie de funciones que permiten el cálculo de la transformación de la precipitación en escorrentía y, por lo tanto, permiten su uso como un modelo hidrológico distribuido basado en ecuaciones 2D de aguas o poco profundas.



Módulo de Hábitat

Iber se ha potenciado como modelo de hábitat añadiendo herramientas específicas en el pre y post proceso, convirtiéndose en una herramienta adecuada para la eco-hidráulica. (Iberaulla, 2018)

MODELO NUMÉRICO DE IBER

Ecuaciones

Iber resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidireccional, que combina los efectos de la turbulencia y la fricción de la superficie del viento:

Ecuación 13: Ecuación de Manning.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) \\ &= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{t_{s,x}}{\rho} - \frac{t_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) \\ &= -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{t_{s,y}}{\rho} - \frac{t_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \end{aligned}$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)



La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

Ecuación 14: Rozamiento de fondo.

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

Fuente: (E. Bladé, L. Cea, et al., 2014)

La fuerza de fricción del viento sobre la superficie libre se halla teniendo en cuenta la rapidez del viento a diez metros de altura.

Ecuación 15: Ecuación de Van Dorn.

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

Fuente: (E. Bladé, L. Cea, et al., 2014)



Ecuación 16: Velocidad del viento a 10 metros de altura.

$$|V_{10}| < \frac{5.6m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 * 10^{-6}$$
$$|V_{10}| \geq \frac{5.6m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 * 10^{-6} + 2.25 * 10^{-6} \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)

En el modelo parabólico, la viscosidad turbulenta se halla de la siguiente manera:

Ecuación 17: Viscosidad turbulenta para un modelo parabólico.

$$v_t = 0.068u_f h \quad u_f = \sqrt{\tau_b/\rho}$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)

Ecuaciones para la viscosidad Turbulenta en los distintos modulos:

Ecuación 18: Viscosidad Turbulenta a través de la ecuación de Manning.

$$v_t = 0.068\sqrt{gn}|U|h^{5/6}$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)

Ecuación 19: Viscosidad Turbulenta en el módulo de longitud de Mezclas.

$$v_t = [\min(0.267kh, kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{kh}\right)^2} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)

Donde

$$k = 0,41$$

Ecuación 20: Transporte para la energía cinética turbulenta y tasa de disipación de energía turbulenta.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_f} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_f} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_f} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_f} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\epsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_\epsilon 2 \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$v_t = C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad C_k = C_f^{-1/2} \quad C_\epsilon = 3.6 C_k^{3/2} C_{\epsilon 2} C_u^{1/2} \quad C_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2}$$

$$C_u = 0.09 \quad C_{\epsilon 1} = 1.44 \quad C_{\epsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.31$$

Fuente: (E.Bladé,L.Cea, et al., 2014)



CAPITULO III

MODELACIÓN DE INUNDACIONES CON IBER

DATOS REQUERIDOS PARA UN MODELO BIDIMENSIONAL

Datos que se utilizan para hacer una modelación bidimensional a través del software Iber 2D:

Condiciones de frontera

Son los datos de las entradas.

Condiciones iniciales

Los ingresos de estos datos pertenecen a las velocidades y los niveles en los nodos al inicio de las simulaciones, hay 2 formas:

- (1) ejecutar el modelo en estado estacionario.
- (2) se asume un valor de 0 para los nodos y un tiempo para calentar el modelo.

Terreno

Este tipo de datos son básicamente la forma en como está constituido el área de estudio, en el que puedes encontrar ríos, llanuras aluviales y estructuras como diques, diques, etc. En la mayoría de los programas, esta información está en un modelo digital de elevación, que se puede visualizar de 2 formas:

- (1) A partir de un Sistema de Información Geográfica, por medio de curvas de nivel o TIN.
- (2) A través de tomas satelitales.



Rugosidad y viscosidad

Rugosidad del terreno

Esta varía dependiendo el área analizada.

Viscosidad del fluido

El ingreso de datos de la viscosidad del fluido se ve influenciado debido a la variación de este factor en la realidad y por lo tanto en la mayoría de modelos se toma como un valor constante. (Romero Coca, 2015)

MODELACIÓN EN REGIONES CON ESCASEZ DE DATOS

En partes de América Latina, el modelado hidráulico 2D se ha visto limitado por la escasez de datos hidroclimáticos y topográficos completos. Países como Colombia, dotados de grandes reservas de agua, cuentan con registros hidrológicos, especialmente en las partes altas y medias en las principales cuencas hidrográficas del país. Sin embargo, la cantidad de estaciones meteorológicas, la repetición en los registros, datos que no se encuentran y la calidad de la información son algunas de las limitaciones que surgen para el modelado de inundaciones, ya que para variar estas solo necesitan horas o minutos. En las áreas urbanizadas la escasez de datos es aún mayor, la cantidad de precipitaciones que caen y se convierten en escorrentía, así como el desbordamiento de los ríos conocido como crecida de ríos, por lo que el riesgo de inundación es aún mayor aumentando el riesgo por inundación en dichas zonas. (Perez et al., 2018)

Como caso de estudio se tiene el Delta del río Ranchería (brazo el Riito), en el departamento de la Guajira en el cual se busca solventar la escasez de datos topográficos e hidrométricos para la modelación bidimensional, en este se implementa una estrategia metodológica la cual tiene algunos pasos a cumplir:

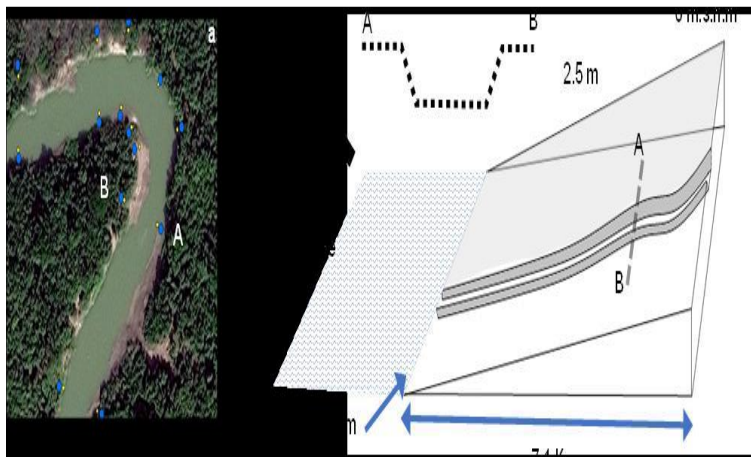
Paso 1: entrada de datos.

La fuente utilizada para la recolección de datos de elevación fue Google Eart y ASTER.
(Perez et al., 2018)

Paso 2: Diseño del Cauce y llanura de inundación.

En el diseño del cauce se realiza una aproximación geométrica para un cauce trapezoidal de perfil plano y poca pendiente como es característico del delta, debido a la falta de datos de altímetro y profundidad en la zona de estudio. En el área delimitada para la planicie de inundación, se señalaron puntos en el suelo de manera supervisada determinando posición y elevación con Google EarthTM. Finalmente, se generó un archivo de forma de punto para modelar aproximadamente la morfología de la llanura aluvial en el delta. (Perez et al., 2018)

Ilustración 4: Diseño del cauce del río.



Fuente: (Perez et al., 2018)

Paso 3: Generación de un Modelo Digital del Terreno Preliminar.

Los 2 archivos tipo shapfile para la llanura y el cauce fueron integrados en un SIG para generar MDT a partir de un TIN en la herramienta de Arc Map.(Perez et al., 2018)

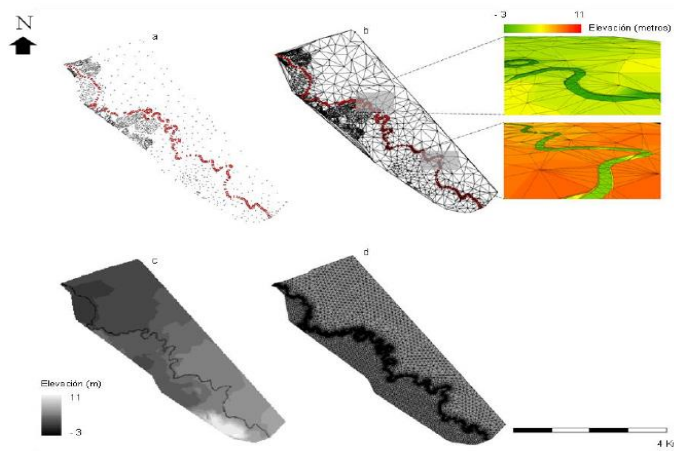
Paso 4: Parametrización en el software Iber 2D.

En esta etapa se verifico de manera visual las fallas del MDT preliminar en donde las salidas también fueron evaluadas de manera visual hasta obtener resultados aceptables para de esa manera continuar con la preparación y recopilación de datos necesarios para la parametrización del modelo final.(Perez et al., 2018)

Paso 5: Obtención del Modelo Digital del Terreno definitivo.

Finalmente, para obtener el modelo digital del terreno final se ejecutó un último ajuste iterativo que consistió en hacer mejores en la nube de puntos primarias con la finalidad de evaluar de manera visual las simulaciones preliminares en Iber, de esta manera se logró obtener un mejor diseño del MDT el cual representó un flujo coherente. Este modelo digital del terreno fue el designado para realizar las parametrizaciones finales y la simulación definitiva de la zona en estudio.(Perez et al., 2018)

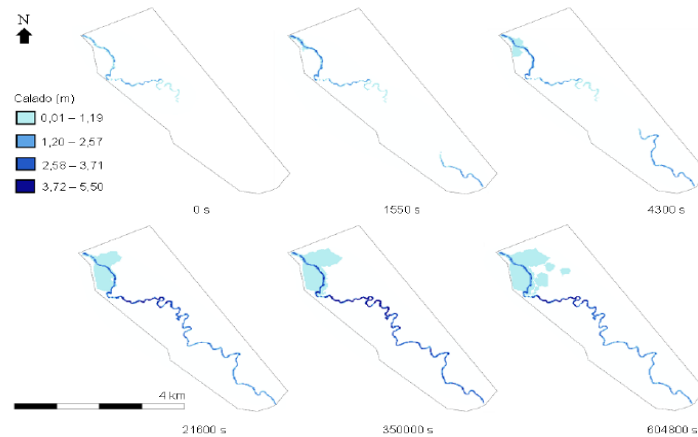
Ilustración 5: Salida de topografía con la información solventada con escasez de datos.



Fuente: (Perez et al., 2018)

A partir de la información anterior se simuló un evento de inundación y una medida estructural protectora con el programa IBER. Para este proceso se tomaron datos hidrológicos de la estación más cercana a la cuenca del río Ranchería; se determinó un caudal permanente y a partir de allí se construyó un hidrograma de ocho (8) días, partiendo de las fechas en las que ocurrió el evento histórico de máxima precipitación dado en la ciudad (año 2011, fenómeno de la niña). Los resultados mostraron que la metodología planteada es útil para el cálculo de zonas inundables en áreas deltaicas y sirve de apoyo a la toma de decisiones en regiones con escasez de datos, de esta manera se solventó la escasez de datos en el delta del río Ranchería y se logró llevar a cabo la modelación en Iber 2D generando resultados satisfactorios del caso de estudio. (Perez et al., 2018)

Ilustración 6: Salidas de simulación tipo raster del calado en función del tiempo.



Fuente: (Perez et al., 2018)

Otro caso de estudio, fue el desarrollado sobre el cauce denominado río Tercero o Ctalamochita, el cual se ubica en un área conocida como sierras grandes (Córdoba, Argentina). Con la finalidad de conocer las áreas de inundabilidad en la zona que puedan representar riesgo para la ciudad.

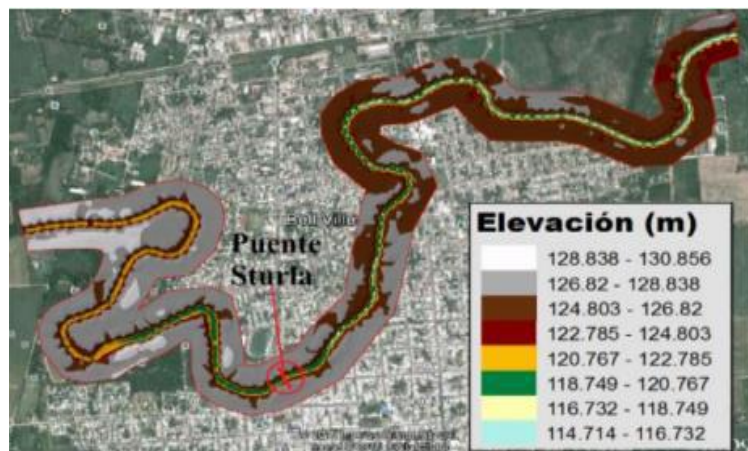
Ilustración 7: Curvatura y localización del tramo de estudio.



Fuente: (Orduz Berdugo, 2022)

En este caso de estudio se utilizó para la determinación de la batimetría del tramo de estudio, información secundaria de informes realizados previamente, la cual, fue contrastada con información obtenida en campo mediante una campaña topográfica realizada en el desarrollo del estudio. Esta información permitió mejorar la resolución de las secciones del cauce y generar un modelo digital de terreno para introducirlo en los dos modelos seleccionados.

Ilustración 8: Modelo Digital del Terreno y ubicación del punto de calibración



Descripción: se presenta el modelo digital de terreno utilizado para esquematizar y generar la batimetría del río, también se presenta el punto utilizado para tomar los datos de calibración denominado Puente Sturla.

Ilustración 9: Velocidades del tramo en estudio en diferentes escenarios



Fuente: (Orduz Berdugo, 2022)

Ilustración 10: Resultados de altura de la lámina de agua en el escenario máximo caudal de avenida torrencial 2015 = 249 m³/s



Fuente:(Orduz Berdugo, 2022)



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Como resultado, este estudio permitió el cálculo de las áreas inundadas en el tiempo de máximo caudal, en el que el área inundada correspondió a 43 hectáreas y alcanzo una altura promedio de 1 m y la velocidad promedio en el cauce fue de 1.26 m/s.(Orduz Berdugo, 2022)



CAPITULO IV

MODELACIÓN 2D DE INUNDACIONES PARA CUENCAS URBANAS CON IBER

INUNDACIONES URBANAS

El rápido incremento de las áreas urbanas y la debido a la cantidad de personas en estas, la planificación del uso del suelo se vuelve muy importante para la gestión sostenible de los recursos hídricos.(Stella et al., 2018)

Se le llama inundación urbana a las extensiones de aguas sobre un área de una ciudad o áreas en donde la población es bastante densa y además de eso sus calles en la mayoría de veces se encuentran pavimentadas

Causas de las inundaciones urbanas

Una inundación puede ser definida también como la ocupación de terreno por grandes cantidades de agua que no logran ser absorbidas o evaporadas, esto supone un riesgo, ya que no es canalizada por los ríos ni es detenida por los embalses, diques, etc.

La causa de las inundaciones son las precipitaciones torrenciales y las tormentas eléctricas que provocan las escorrentías superficiales a medida que el suelo se satura. Estos eventos se ven favorecidos por las actividades humanas, ya que, cada vez se urbanizan más áreas en las que encontramos betún que tiene el efecto de impermeabilizar el suelo e impedir la absorción de agua y la tala de árboles, dejando el terreno sin cobertura, lo que también facilita el flujo de sólidos en suspensión, lo que exagera los efectos de las inundaciones.



Otra causa bien conocida es el desborde de los ríos por el incremento de sus aguas, tanto de las referidas tormentas, como del deshielo y de fenómenos meteorológicos como las "gotas frías" (el resultado es el vapor de agua que suelta el mar, en el proceso de ascenso debido a una atmósfera inestable hasta llegar a regiones frías, donde se condensa rápidamente, formando grandes nubes de tormenta), o asociado a huracanes. Los deslizamientos y avalanchas obstruyen los lechos de los ríos, provocando la ruptura de los diques, así como canalizando el agua a través de los desagües. y trincheras en los ríos. Además de la propia escorrentía, hay que tener en cuenta otros factores, como la urbanización cerca de fuentes de agua o el alisado de antiguos cauces.(Isabel victores, 2014)

MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CUENCAS URBANAS CON IBER

Debido a que los diferentes fenómenos hidráulicos que ocurren en los cuerpos de agua son complejos, ha sido un reto resolverlos con métodos matemáticos exactos. Lo anterior, ha hecho necesario buscar mediante métodos experimentales y sustentados numéricamente, técnicas que permitan analizar y determinar las principales variables que caracterizan el flujo en cuerpos hídricos.

Por lo anterior, una de las técnicas desarrolladas es la modelación hidrodinámica, que consiste básicamente en determinar los valores de las variables más importantes que permiten representar el comportamiento del flujo del agua en cauces, a partir de la solución por métodos numéricos de ecuaciones que describen el comportamiento del mismo.

Las variables relevantes y de interés en el estudio del flujo en cauces y sus zonas de inundación son:

- El calado (láminas de agua).
- Los cambios de los caudales.



- Las elevaciones de las cotas.
- Las presiones o la contaminación. (Orduz Berdugo, 2022)

El estudio de la hidrodinámica de un cuerpo hídrico proporciona la ventaja de valorar las causas y efectos positivos o negativos que se podrían ocasionar, ya sea por fenómenos naturales como lo son las avenidas torrenciales, el cambio climático, etc. o la interacción directa del hombre con el recurso por ejemplo la instalación de obra e infraestructura. (Orduz Berdugo, 2022).

Los flujos de agua en áreas urbanas son significativamente más complejos que aquellos en áreas no urbanas. Por un lado, el agua puede circular por la superficie (drenaje principal) y/o por una red de colectores (drenaje menor), pero, por otro lado, el flujo puede tener lugar en lámina libre o a presión..(Bladé i Castellet, 2021)

Modelación 1D-2D

Este tipo de modelación es utilizada para calcular los procesos hidráulicos que suceden en el sistema de drenaje en zonas urbanas de una manera coherente. Por un lado, el sistema de drenaje en zonas urbanas consta de distintos elementos, y, por el otro, el modelo numérico integrado consta de diferentes modelos numéricos cuyos resultados y para efectos prácticos y de modelación numérica son modelos de tejados, calles, elementos colectores, conductos y unión de conductos, al modelo numérico integrado se le puede dar uso en conjunto o cada modelo por separado. El modelo de tejado utiliza ecuaciones de la onda cinemática unidimensional y ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas para modelar la variación del flujo de lluvia y la propagación de la escorrentía en los tejados. Por su parte, el modelo de calle utiliza solo ecuaciones bidimensionales para calcular la variabilidad del flujo de lluvia y su propagación en la calle. Es importante señalar que, para que el modelo sea más real, la escorrentía de los



tejados puede fluir puntual o uniformemente tanto en la calle como en los colectores. (Aragón Hernández, 2013)

Casos de estudios

Por ejemplo Caicedo Paez (2017) planteo la ejecución de un modelo hidrodinámico para determinar las alertas tempranas en la ecorregión de la Mojana, Nechí – Antioquia (Colombia) con el programa Iber, en el cual se tuvo en cuenta una caracterización de la zona y un MDT para la modelación, en este estudio solo se tuvo en cuenta dentro de la macha de inundación, la profundidad y la velocidad del flujo que fueron modelados en periodos de retornos de 15, 100 y 500 años en los cuales deja ver como en los períodos de retorno de 500 y 100 años con las velocidades obtenidas y las profundidades mayores a 1.6 m, se generarían pérdida de vidas humanas a causa de la inundación y en un período de retorno de 15 años los daños serían muy graves, como por ejemplo en las casas, vías, etc.; con este análisis se logró desarrollar un nuevo sistema de alertas tempranas para la zona de estudio la cual sirve para mitigar el riesgo por inundación.

Por su lado Castro Fernández (2018), intentó reproducir la inundación ocurrida el 19 de enero de 2013 en la ciudad de Lugo (Galicia, España) utilizando el software Iber. Para ello, se seleccionó un área de estudio específica que incluía las riberas del citado río Miño en dicha localidad. Para realizar las simulaciones numéricas se tomaron en cuenta la información de caudal y niveles de aguas registrados el día de la inundación, la elevación topográfica y el uso del suelo. Luego de realizar una simulación numérica del evento, se realiza una comparación entre las áreas inundadas reales y las obtenidas digitalmente, así como entre las profundidades máximas alcanzadas, tomando como referencia los distintos puntos de control ubicados dentro del area inundable. Con los resultados obtenidos se determina que el modelo Iber puede delimitar



áreas de inundación muy próximas a las registradas en el acontecimiento real, siendo además
Iber un software muy eficaz a la hora de predecir y modelar inundaciones fluviales.(Castro
Fernández, 2018)

Barrera Ochoa (2020) en un modelo hidráulico bidimensional de un tramo del río
Yanuncay entre el Puente de la Avenida Felipe II y el Puente Triple (Ecuador). utilizando
información obtenida del vuelo de un dron en el área de investigación Luego utilizando la
herramienta numérica Iber, se ejecutaron varias simulaciones con el modelo para capturar el
movimiento del agua en el momento de la crecida y las velocidades críticas del río. creo dos
escenarios, uno con un relleno el cual fue realizado en el margen derecho del río sobre la
camina y el segundo sin relleno, Por cada una de las modelaciones se obtuvieron las máximas
manchas de inundación, también la diferencia entre la modelación del tramo del río con un
relleno y el tramo del río sin relleno, como resultado del caso extremo con caudal de 300 m³/s en
el cual el desbordamiento fue impedido (con relleno) y otro en el cual la mancha de inundación
se presenta en hasta las avenidas (sin relleno).(Barrera Ochoa, 2020)

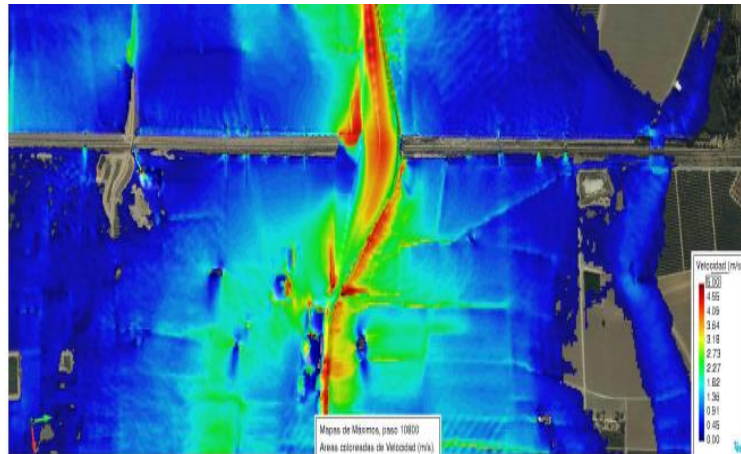


RESULTADOS DE LAS MODELACIONES CON IBER

IBER puede proporcionar una gran cantidad de resultados y variables, entre las que se encuentran la profundidad, la velocidad, el caudal específico, el nivel del agua, el número de Froude, la tensión máxima de fondo, la peligrosidad y la energía. Estos resultados son en su mayoría del tipo raster, y combinados con la localización del modelo y en un punto preciso en el tiempo, ayudan a estudiar el desarrollo de las particularidades del flujo de agua y explican mejor el fenómeno reportado por el modelado. Sin embargo, IBER también puede suministrar mapas máximos, asegurando la visualización de los peores escenarios para toda la simulación. Los valores máximos, principalmente calado, cota y velocidad, son valores comúnmente utilizados para probar y diseñar los elementos modelados, por lo que es útil determinarlos de inmediato. Como se mencionó, las salidas primarias de IBER son de tipo ráster y se pueden importar desde el software como imágenes o archivos que se pueden definir mediante aplicaciones GIS. El módulo de procesamiento de datos permite incluso crear y exportar animaciones del desarrollo de las variables presentadas en pantalla a varios formatos como GIF, AVI, FLV o MPEG. Un punto a tener en cuenta al utilizar IBER, es necesario contar con suficiente espacio de almacenamiento en el disco duro, además de alta capacidad de procesamiento, ya que el volumen de datos almacenados en archivos de programa puede estar fuera de orden. gigabytes de memoria para ciertos modelos de tamaño. (Ortega Prieto, Remedios Rebolledo, s. f.)

Imágenes de algunos resultados de modelaciones

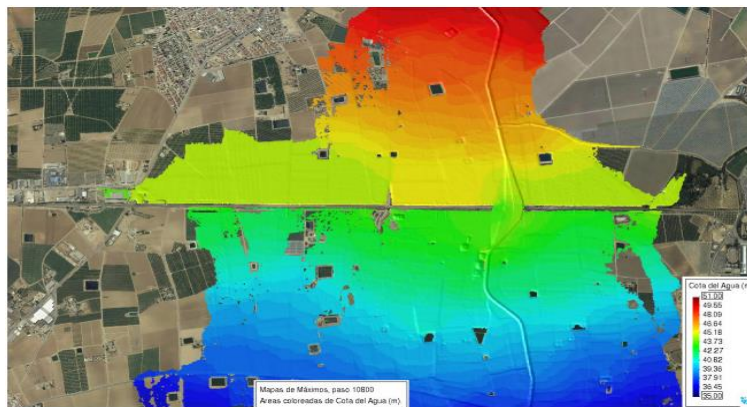
Ilustración 11: Mapa de máximos para velocidades del agua.



Descripción: Visualización de velocidades como resultado de las modelaciones en las que se pueden diferenciar desde la más veloz hasta la más lenta dependiendo del color.

Fuente: (Ortega Prieto, Remedios Rebolledo, s. f.)

Ilustración 12: Mapa de máximos para valores de cota del agua.



Descripción: Visualización de calados o cota de agua en las cuencas como resultado de las modelaciones en las que se pueden diferenciar por colores establecidos para cada uno de los rangos de profundidad. (Ortega Prieto, Remedios Rebolledo, s. f.)

Ilustración 13: Resultado tipo raster



Descripción: modelación de inundación en la que se muestra las partes o calles afectadas de la zona urbana debido a el desborde del cauce en estudio.

Fuente: (*Ibercursos*, s. f.)



REFERENCIAS

- Aragón Hernández, J. L. (2013). Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano [Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/129077>
- Barrera Ochoa, M. S. (2020). *Modelación hidráulica en 2D del tramo puente av. Felipe II-Tres Puentes del río Yanuncay utilizando Iber*.
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10171>
- Bladé i Castellet, E. (2021). *Iber V3. Módulo de drenaje urbano*. 17-33.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/363121>
- Caicedo Paez, Y. A. (2017). *MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS POR INUNDACIÓN EN LA ECOREGIÓN DE LA MOJANA - NECHÍ, ANTIOQUIA*. 84.
- Castro Fernández, A. (2018). *Grado en Ciencias Ambientales*. 80. https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/06/TFG_Ander_Castro_Fernandez.pdf
- E. Bladé, L. Cea, et al. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *01/03/14, Vol. 30*. https://www.scipedia.com/public/Blade_et_al_2012a
- EPN, P. de la R. (2013, septiembre 18). Tipos de lluvias e inundaciones. *gob.mx*.
<http://www.gob.mx/ejn/articulos/tipos-de-lluvias-e-inundaciones>
- Fenoglio, E. P. (2019). *INUNDACIONES URBANAS Y CAMBIO CLIMÁTICO, Recomendaciones para la gestión* (1a edición mejorada).
<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf>
- FLO-2D*. (2017, enero 29).
http://www.appsolutelydigital.com/ModelPrimer/chapter4_section2.html



HEC-RAS 5.0.1 Flujo 2D. (s. f.). Recuperado 17 de mayo de 2022, de

<https://academia.ingnova.es/cursos-online/hidraulica-e-hidrologia/hec-ras-5-0>

Iber 3.0: Jornada gratuita de presentación. (2021, noviembre 17).

<https://blogdelagua.com/actualidad/iber-3-0-jornada-gratuita-de-presentacion/>

Iberaula. (2018, mayo 9). *IBER*. IBERAULA. <https://iberaula.es/53/iber-model/modules>

Ibercursos. (s. f.). Recuperado 7 de junio de 2022, de

<https://www.ibercursos.com/space/1106/iniciacion>

IDEAM. (2015, mayo 14). *AMENAZAS INUNDACIÓN - IDEAM*.

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

IDEAM. (2018). PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.

Bogotá, D.C., 59.

[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf)

[HH.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf)

IMASGAL. (09 Feb). *¿Qué es iber? Un software libre para la modelización hidráulica* [BLOG].

IMASGAL. <https://imasgal.com/que-es-iber/>

Isabel victores. (2014, octubre 21). *Causas de la inundaciones*. Tierra y Tecnología.

<https://www.icog.es/TyT/index.php/2014/10/causas-las-inundaciones/>

Jordán, B. (2013, octubre 10). *IBER*. Potente software libre. Agua en 2D. *Blog del agua*.

<https://blogdelagua.com/actualidad/iber-potente-software-libre-agua/>

Ordúz Berdugo, S. M. (2022). *El modelo IBER como herramienta en el análisis de casos de riesgo por inundación* [Universidad Santo Tomás de Tunja].

<http://hdl.handle.net/11634/42755>



ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!



Ortega Prieto, Remedios Rebolledo, J. C., Ma. (s. f.). *Análisis de Herramientas de Modelización Hidráulica Bidimensional*.

<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:jYfcmUbRp74J:https://www.wsp.com/-/media/Insights/Spain/Documents/Analisis-de-Herramientas-de-Modelizacion-Hidraulica-Bidimensional.pdf+&cd=6&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>

Perez, J., Escobar, J. R., & Fragoso, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Agosto del 2018, Vol. 29 N4*.

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000400143&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Pérez, J. I., Nardini, A., Zuñiga, Y. P., Pérez, J. I., Nardini, A., & Zuñiga, Y. P. (2018).

Identification Multiattribute of Typologies of Flood-Vulnerable Housing in Riohacha, La Guajira- Colombia. *Información tecnológica, 29(5)*, 187-202.

<https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500187>

Romero Coca, J. A. (2015). *EFEECTO DE LA MODELACIÓN 1D Y 2D EN EL DISEÑO DE JARILLONES. CASO DE ESTUDIO: SECTOR SABANA DE BOGOTÁ [UNIVERSIDAD DE LOS ANDES]*.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12863/u703712.pdf?sequence=1>

Software FLO-2D. (2015, junio 15). *FLO-2D | Software FLO-2D*. <https://www.flo-2deurope.com/flo-2d/>



- Stella, J. M., Anagnostou, E. N., & University of Connecticut, Storrs, USA. (2018). Modeling the flood response for a sub-tropical urban basin in south Florida. *Tecnología y ciencias del agua*, 09(3), 128-141. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-05>
- TELEMAC. (s. f.). *TELEMAC-2D - Hidrodinámica bidimensional*. Recuperado 17 de mayo de 2022, de <http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>
- TUFLOW. (s. f.). *Modelo hidrodinámico 2D y 1D TUFLOW para simulación y modelado de inundaciones y mareas—Software de aguas subterráneas*. Recuperado 17 de mayo de 2022, de <http://www.mpassociates.gr/software/environment/tuflow.html>
- Veléz, J. J., & Ocampo, O. L. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: Caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58.
<https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a3>
- Warren, I. R., & Bach, H. K. (1992). MIKE 21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7(4), 229-240. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(92\)90006-P](https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-P)