

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

Autores

EDUARDO NEME RUIZ
YULDER GABRIEL PEREZ

Director

JORDI RAFAEL PALACIOS
MSC. Ingeniería Ambiental

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS CIVIL, AMBIENTAL Y QUIMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, diciembre 5 de 2022

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios por darme la salud, anhelo y constancia, para permitirme llegar a esta instancia de mi vida, la cual ha sido llegar a ser un profesional que pueda aportar un beneficio a la comunidad en general.

Esta monografía se la dedico a mis padres, hermanos; primos y cada una de las personas que han puesto su granito de arena para que esto sea posible, solo queda agradecerles a ellos por su dedicación, confianza y apoyo en todos los momentos difíciles de este proceso, ya que si bien sabemos esta es una etapa muy bonita de la vida, pero a su vez tiene momentos en los cuales sin el apoyo de buenas personas como ustedes no sería posible reponerse y seguir.

Estoy inmensamente agradecido con la Universidad de Pamplona por abrirme sus puertas; a todas las personas que hacen que esta funcione de forma adecuada, rector, personas de administración, encargados de manteniendo; celadores y claramente los docentes quienes me permitieron adquirir la mayor cantidad posible de conocimiento de esta bella carrera que es la Ingeniería Civil.

Agradezco también a todas las personas que he tenido la oportunidad de conocer y compartir en esta etapa, quienes me han permitido no solo adquirir nuevos conocimientos si no también formarme como una persona integral que vaya en pro del progreso de todo mi entorno.

Eduardo Neme Ruiz

Agradecimientos

A Dios le doy gracias, por permitirme llegar hasta aquí, por darme las fuerzas necesarias y la salud posible para llegar a la construcción de este gran proceso en mi formación como Ingeniero Civil, por permitirme culminar de manera amena mi vida como universitario para saltar ese gran paso esperado durante tantos años para poder obtener mi título.

A mis padres le doy las gracias por hacerme ese hombre fuerte y decidido para salir adelante, por ayudarme a perseguir mis sueños, por darme ese impulso cuando mas lo necesite, y agradecerles por esa formación tan hermosa que me dieron, por su dedicación y acompañamiento durante el transcurso de estos años, por los regaños y abrazos en los momentos más difíciles y en aquellos que no sentía que no podía, a mis hermanos y a mis primos porque son también personas de vital importancia en mi vida, ya que me ayudaron a tener un gran impulso en este camino por recorrer, y que siempre estuvieron cuando más los necesite por su apoyo, por ser tan excelentes personas e ir creciendo conmigo en este hermoso camino.

A las personas que me dieron la oportunidad de conocer y de compartir esta hermosa etapa también le doy las gracias porque me ayudaron a tener una mejor estadía como universitario, y me ayudaron a crecer en conocimientos y en mi formación personal.

Me encuentro gratamente agradecido con mis Docentes y con mi querida Universidad, ya que gracias a ellos, hoy por hoy, soy lo que soy como profesional, porque me extendieron una mano y me formaron en este sueño tan grande, que siempre nos alentaron a salir siempre

adelante y nunca desfallecer, dándonos ese conocimiento tan maravilloso de lo que es la vida, de lo que es crecer a nivel personal en nuestra querida Universidad de Pamplona, y en especial quiero agradecerle a nuestro querido Director de Trabajo de Grado, Jordi Rafael Palacios, por darnos la mano e instruirnos para lograr este gran sueño, por su acompañamiento incondicional y por darnos esos ánimos tan maravillosos de seguir adelante.

Yulder Gabriel Pérez

Tabla de Contenido

1.	Prólogo	1
2.	Capítulo I Marco Teórico	3
2.1.	Canaleta Hidráulica	3
2.1.1.	Clasificación de los canales	3
2.2.	Elementos Geométricos de un canal	4
2.3.	Modelamiento de Estructuras Hidráulicas	5
2.4.	Clasificación de modelos hidráulicos	7
2.4.1.	Modelamiento físico:	7
a)	Según su similitud con el prototipo de forma geométrica:	7
b)	Según su movilidad y deformación en el contorno:	8
2.4.2.	Modelo analógico	9
2.4.3.	Modelo matemático	9
2.4.4.	Modelos de diferencias finitas:	10
2.4.5.	Clasificación según el fluido utilizado	11
2.4.6.	Clasificación según el material de la frontera	11
2.4.7.	Clasificación según la escala de longitudes	12
2.4.8.	Clasificación según la condición de semejanza	14
2.5.	Programas de análisis estadístico y probabilístico	18
2.5.1.	Software HEC-RAS:	18
2.5.2.	PeakFQ	19
2.5.3.	Hyfran-Plus Hydrologic Frequency Analysis PLUSS DSS	20
2.6.	Periodo de recuperación del proyecto	20
2.7.	Análisis de costo mínimo	23
3.	Capítulo II Modelamiento Hidráulico 1D	25
3.1.	Evaluación hidráulica	25
3.2.	Modelamiento de hidráulica	25
3.3.	Saint Venant-1D	27
3.3.1.	Supuestos de las ecuaciones	28
3.3.2.	Sistema de Ecuaciones	28
3.3.3.	Aproximaciones y Simplificaciones	29
3.4.	Modelamiento Unidimensional	30

	6
3.4.1. Modelo empírico	31
3.4.2. Modelos linealizados	31
3.4.3. Modelo Hidrológico	31
3.4.4. Modelo Hidráulico	32
3.4.5. Shock Fitting method	35
3.4.6. Método de pseudoviscosidad	35
3.4.7. Shock Capturing methods	35
3.5. Esquema de Preissman	36
3.6. Esquema de McCormick	37
3.7. Esquemas Unidimensionales- “Shock Capturing”	38
3.8. Programas en Modelos 1D – Modelos Comerciales	39
3.8.1. HECRAS	39
3.8.2. ISISID	40
3.8.3. MIKE 11	41
3.8.4. SOBEK D-Flow 1D	41
3.8.5. WSPRO	42
3.8.6. FLWAV	42
3.8.7. SRH-1D	43
4. Capitulo III Estructuración Modelamiento 1D	43
4.1. Diagramas de modelamientos	43
4.2. Modelación comparada con la realidad	51
5. Conclusiones	54
6. Bibliografía	55

Lista de tablas

Tabla 1 Valores de las escalas de longitudes para los modelos que utilizan la condición de Froude	15
Tabla 2 Condiciones de cumplimiento en los modelos	16
Tabla 3 Retorno debido a su riesgo.....	22
Tabla 4 Tipos de flujo según su variación temporal	26
Tabla 5 Variación espacial de los tipos de flujo	27
Tabla 6 Términos de la ecuación de momento	29
Tabla 7 S_f en términos de momento	30
Tabla 8 Comparación de los modelos con la realidad	53

Lista de figuras

Figura 1 Flujo en Conductos.....	3
Figura 2 Geometría del canal.....	5
Figura 3 Modelamiento de estructuras hidráulicas	7
Figura 4 Esquema de Preissman	37
Figura 5 Diagrama HECRAS.....	44
Figura 6 Diagrama ISISID	45
Figura 7 Diagrama MIKE 11	46
Figura 8 Diagrama Sobek-River	47
Figura 9 Diagrama WSPRO.....	48
Figura 10 Diagrama FLWAV	49
Figura 11 Diagrama SRGH-1D	50

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Ejemplo 1	16
Ilustración 2 Ejemplo 2	17
Ilustración 3 Ejemplo 3	18
Ilustración 4 Costos de Infraestructura	23
Ilustración 5 Daños esperados	24
Ilustración 6 Análisis costo mínimo	24
Ilustración 7 Flujo de naturaleza variable	26
Ilustración 8 Esquemas clásicos de primer y segundo orden en altas resoluciones.....	39
Ilustración 9 Geo-Hecras	51
Ilustración 10 Modelo Hidráulico de la bocatoma.....	51
Ilustración 11 Obras hidráulicas modelación.....	51
Ilustración 12 Modelamiento canal.....	51
Ilustración 13 River network conectivity.....	51
Ilustración 14 Model structure and hydrologic.....	51
Ilustración 15 Sonek Suite	52
Ilustración 16 Desempeño del modelo Sobek.....	52
Ilustración 17 Infoworks WS Pro	52
Ilustración 18 Estudio del modelo físico hidráulico	52
Ilustración 19 Effects of FLWA	52
Ilustración 20 Unidades de potencia hidráulica	52
Ilustración 21 Input data impused in SRH-1D.....	53
Ilustración 22 Sedimentation and river hydraulics	53

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Escala de Longitudes	13
Ecuación 2 Función de las escalas de líneas	14
Ecuación 3 Escala de pendiente	14
Ecuación 4 Gasto máximo	14
Ecuación 5 Riesgo Hidrológico	21
Ecuación 6 Relación beneficio-costo	22
Ecuación 7 Mitigación de inundaciones	23
Ecuación 8 Continuidad conservativa	28
Ecuación 9 Continuidad no conservativa	28
Ecuación 10 Momento conservativo	29
Ecuación 11 Momento no conservativo	29
Ecuación 12 Masa en conservación	30
Ecuación 13 Momento de conservación	30
Ecuación 14 Conservación de la masa	31
Ecuación 15 Almacenamiento y flujo	32
Ecuación 16 Cinemática onda	32
Ecuación 17 Masa en conservación onda cinemática	32
Ecuación 18 Modelo de onda difusiva	33
Ecuación 19 Caudal de cambio	33
Ecuación 20 Estabilización de onda difusiva	33
Ecuación 21 Conservación de la masa explícita	34
Ecuación 22 Momento explícito	34
Ecuación 23 Estabilidad numérica	34
Ecuación 24 Consideración de las fuerzas de fricción	34
Ecuación 25 Método cuatro puntos	35
Ecuación 26 Diferencias finitas de preissman	36
Ecuación 27 Derivada espacial	36
Ecuación 28 Derivada temporal	36
Ecuación 29 Incremento del tiempo	37
Ecuación 30 Condición de Courant	37
Ecuación 31 Celeridad de propagación unidimensional	38

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

Resumen

La modelación matemática de los flujos de agua es la toma de variables hidráulicas, que por medio de la resolución de métodos numéricos de ecuaciones que se obtienen de hipótesis permiten llegar a una aproximación a la realidad, adaptando estas juntos con esquemas numéricos para poder solucionar los fenómenos reales, esta modelación ha venido evolucionado de manera paralela a la capacidad que tienen los ordenadores para desarrollar el cálculo numérico general y la modelación de las áreas de conocimiento que se encuentren próximas, es por eso que en el presente trabajo se quieren dejar expuestos cada una de las modelaciones matemáticas utilizadas para el modelamiento 1D de estructuras hidráulicas existentes, por medio de cálculos y programas que le permitan un mejor avance y conocimiento sobre a las diferentes obras desarrolladas ya sea para la propagación de avenidas, obtener valor de velocidades y niveles de agua, que se rigen por variadas herramientas ya sea temporal o no.

Por ello tenemos que la aparición de los modelos comerciales que permiten este desarrollo es relativamente sencilla de utilizar y se han popularizado a la hora de desarrollar un estudio concreto de problemas hidráulicos, incorporando esquemas de resolución innovadores, simulando de manera correcta los fenómenos, y proporcionando soluciones un poco cerca a lo que se quiere.

Palabras clave: Estructuras Hidráulicas, Modelación Matemática, Modelos comerciales, Modelamiento 1D, Flujo de agua, Fenómenos.

Abstract

The mathematical modeling of water flows is the taking of hydraulic variables, which numerical methods that are obtained from hypotheses allow reaching an approximation to reality, adapting these together with numerical schemes in order to solve the problems. real phenomena, this modeling has evolved in parallel to the capacity that computers have to develop general numerical calculation and the modeling of the knowledge areas that are close, that is why in the present work we want to expose each one of the mathematical models used for the 1D modeling of existing hydraulic structures, through calculations and programs that allow a better advance and knowledge about the different works developed, either for the propagation of floods, to obtain value of speeds and levels of water, which are governed by various tools, whether temporary or not.

For this reason, we have that the commercial models that allow this development are relatively easy to use and have become popular when developing a specific study of hydraulic problems, incorporating innovative resolution schemes, correctly simulating the phenomena, and providing solutions a little close to what is wanted.

Keywords: Hydraulic Structures, Mathematical Modeling, Commercial Models, 1D modeling, Water flow, Phenomena.

1. Prólogo

El recurso natural el cual ha influido en todas las actividades de la civilización debido a las necesidades biológicas de todas las especies, está causando daños debido a la amenaza de alta contaminación amenazando a las mismas. (Oms, 2020)

El agua no solo es un recurso necesario y sanitario, sino que también representa una amenaza cuando se producen lluvias o sequías extremas. Por esta razón, las intervenciones antropogénicas en los sistemas de agua son necesarias para eliminar los impactos que se desarrollan de manera negativa sobre las metrópolis comunitarias y estructuras.

Los eventos de inundaciones extremas que han ocurrido en la última década han aumentado el interés en el modelado de inundaciones fluviales en todo el mundo. Las inundaciones son uno de los desastres naturales más costosos, por lo que su análisis y prevención son factores clave para las autoridades y organizaciones involucradas con los recursos hídricos. Los modelos hidráulicos de ríos utilizados para el modelado de inundaciones se pueden clasificar como modelos hidrodinámicos 1D..

Los modelos hidrodinámicos 1D son ampliamente utilizados. Estos modelos calculan la superficie de agua libre para flujos estacionarios y no estacionarios en canales abiertos basados en la ecuación de St. Venant (la ley de conservación de la masa y el momento). Estas ecuaciones diferenciales parciales a menudo se resuelven mediante

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

dolarización numérica utilizando métodos de diferencias finitas, a veces utilizando elementos finitos o volúmenes finitos en esquemas implícitos. (Luis Timbe Castro, 2011)

Los modelos 1D son precisos en el cauce principal del río, no lo son para el desbordamiento de la orilla, por ejemplo, para modelar la propagación de las olas desde un río hasta una inundación.

2. Capítulo I Marco Teórico

2.1. Canaleta Hidráulica

Un canal es un tubo cerrado o abierto por donde circula un líquido (agua) sin presión y bajo la influencia de la gravedad, ya que el flujo que va sobre la canaleta lleva una atmosfera de presión. (CivilGeek, 2018)

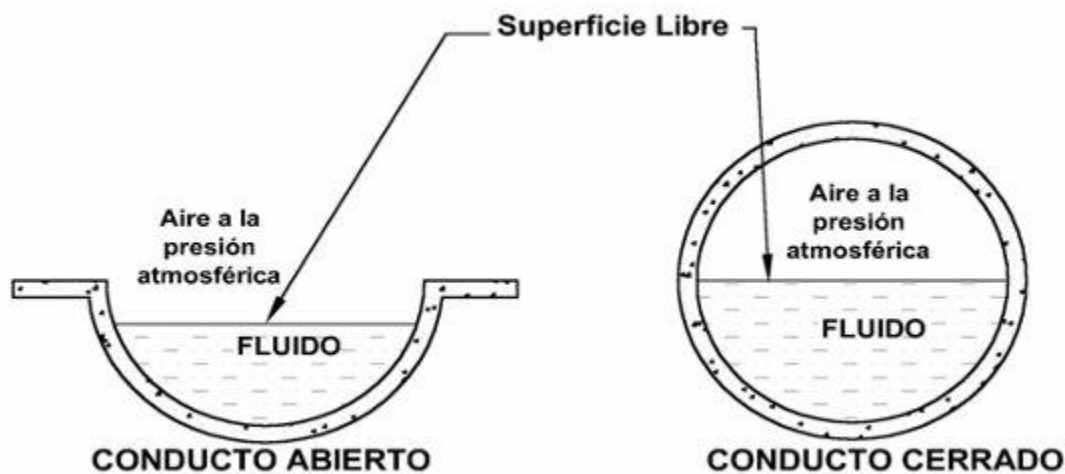


Figura 1 Flujo en Conductos

Fuente: (CivilGeek, 2018)

2.1.1. Clasificación de los canales

✚ **Canales naturales:** Un canal natural es un debilitamiento natural de la corteza terrestre, unos profundos y otros someros, según su ubicación. Estos canales ingresan a varias aguas subterráneas, desde pequeños arroyos de montaña hasta arroyos, barrancos, ríos grandes y pequeños y estuarios de marea.

✚ **Canales hechos por el hombre:** Los canales hechos por el hombre son hechos por el hombre e incluyen: canales de navegación, canales de riego, canales hidroeléctricos, canales de tormenta, aguas residuales, controles, canalones, desbordamiento, canaletas modelos, construido en investigación.

✚ **Conducto de riego:** Los canales de riego son canales cuya función es transportar las aguas residuales a una cobertura para que se riegan los cultivos. En el campo de la tecnología, son parte integral, porque tienen que ser cuidadosamente elaborados para tratar que se gaste la menor cantidad de agua posible y para evitar daños en el medio ambiente. Están reducidamente vinculados a las características que pueda tener el terreno siguiendo las curvas de nivel, descendiendo lentamente hacia una pendiente baja, para que el agua pueda fluir rápidamente y se gaste menos agua. (CivilGeek, 2018)

2.2. Elementos Geométricos de un canal

La sección de un canal este constituido por elementos geométricos, donde las características pueden estar determinadas por diferentes factores. Los elementos geométricos son muy importantes y ampliamente utilizados en los cálculos de flujo. Los elementos geométricos de los canales con sección transversal rectangular y simple se pueden definir matemáticamente en función de la profundidad del flujo y los diferentes tamaños de la sección transversal del canal. (Autodesk, 2015)

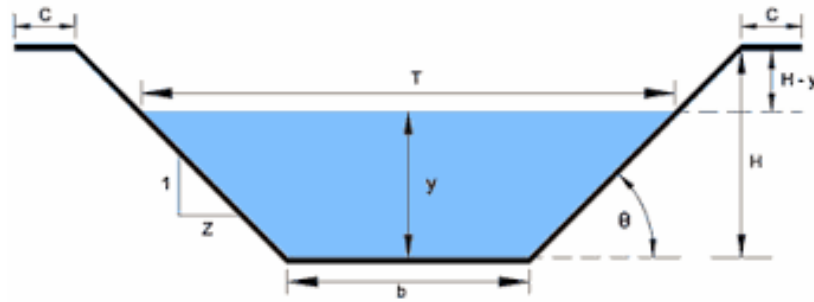


Figura 2 Geometría del canal

Fuente: (Autodesk, 2015)

Dónde:

- y : profundidad del agua, la altura a la que llega
- θ : ángulo de inclinación con respecto al plano
- b : fondo del canal.
- T : superficie del agua.
- H : profundidad total del canal.
- $H-y$: borde libre.
- C : ancho de copa.

2.3. Modelamiento de Estructuras Hidráulicas

Estos tipos de modelos también se utilizan para describir el flujo sobre llanuras aluviales, por medio de estructuras como aliviaderos, presas, alcantarillas etc. Los cálculos se pueden hacer con este tipo de herramienta de modelado.

Son importantes porque comprenden los patrones de flujo en los sistemas de agua. En el análisis de inundaciones, los modelos hidráulicos ayudan a describir la profundidad y la velocidad del agua para que se pueda evaluar el daño potencial. Los planificadores y administradores de infraestructura de suministro de agua pueden usar modelos hidráulicos para evaluar el diseño en varios escenarios operativos y definir estrategias operativas. (Ingeniería, 2022)

Su gama de aplicaciones es :

- Diseño de estructuras y análisis de la inundación.
- Estimaciones de caudales mínimos y sequía.
- Optimizar la operación de estructura.
- Análisis de rotura de presas.
- Transporte de sedimentos en ríos, canales, humedales, estuarios, zonas costeras, puertos y otros cuerpos de agua.
- Estudios morfológicos.
- Estudios de intrusión de agua salada.
- Estudios de calidad del agua y la ecología.
- Evaluación de impactos de vertimientos en corrientes superficiales.
- Diseño de sistemas de alerta ante cualquier eventualidad.
- Control del agua en tiempo real.
- Análisis de escenarios para el agua.



Figura 3 Modelamiento de estructuras hidráulicas

Fuente: (Ingeniería, 2022)

2.4. Clasificación de modelos hidráulicos

2.4.1. Modelamiento físico:

Es una simulación física de un fenómeno hidráulico relacionado con la técnica en un sistema similar simplificado, que permite identificarlo y controlarlo, optimizándolo o teniendo en cuenta los efectos secundarios que se deben tener en cuenta durante la cirugía. (Modelado Hidraulico para el Estudio de la Friccion de la Columna de Resortes y Analisis de sus Metodos Computacionales, 2022)

Según sus características estos pueden clasificarse en:

a) Según su similitud con el prototipo de forma geométrica:

- Modelo geoméricamente similar: Es conservada la similitud de todas las variables geométricas. Además de la igualdad de los ángulos correspondientes

entre el modelo y el prototipo existe un factor de reducción o refuerzo llamado escala.

- Modelos distorsionados geoméricamente: su similitud con el prototipo, son diferentes para las mismas dimensiones. El uso de distorsiones a menudo es necesario cuando un factor provoca una reducción demasiado grande en el tamaño vertical para tener un efecto significativo en las fuerzas que son insignificantes en el modelo o que no están presentes. Este tipo de diseño es común en estructuras marinas.

b) Según su movilidad y deformación en el contorno:

- Contornos Fijos: la deformación no es importante para un fenómeno estricto, representándose en un modelo informe o fijo.
- Contorno en movimiento: “|existen situaciones en las que el modelo debe representar el contorno en movimiento de forma fiel y confiable”, debido a los fenómenos relacionados con el drenaje están determinados por el movimiento y la deformación de la pieza. Estos casos son comunes, especialmente en hidráulica y mecánica de fluidos.

2.4.2. Modelo analógico

Es una reproducción del fenómeno investigado en un sistema físico diferente del prototipo original. No es muy común en la actualidad.

A menudo, uno de los fenómenos es más leve, por lo que se utiliza para resolver el otro. Brinda la oportunidad para solucionar problemas hidráulicos en base a mediciones realizadas sobre un fenómeno analógico, siendo el más común (Modelado Hidraulico para el Estudio de la Friccion de la Columna de Resortes y Analisis de sus Metodos Computacionales, 2022):

- Analogía entre flujo en medio permeable.
- Similitud entre flujo turbulento y laminar.
- Analogía entre el flujo en un medio permeable y la mala formacion de una placa elástica bajo carga.

2.4.3. Modelo matemático

Son aquellos que utilizan ecuaciones o expresiones matemáticas que simplemente definen el fenómeno que se estudia en el prototipo. Hay tres modelos matemáticos. (Modelado Hidraulico para el Estudio de la Friccion de la Columna de Resortes y Analisis de sus Metodos Computacionales, 2022):

- *Modelos deterministas:* Procedimiento físico expresado en función deterministas, la probabilidad no es una ocurrencia del fenómeno.
- *Modelos estocásticos:* los procesos físicos se representan mediante variables aleatorias de probabilidad relacionadas con el fenómeno a estudiar.
- *Modelamiento en simular:* modelos que utilizan principalmente ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de contorno resueltas mediante técnicas de análisis numérico como los métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

2.4.4. Modelos de diferencias finitas:

Los métodos de diferencias finitas se pueden utilizar para simular algunos procesos que no se pueden resolverse mediante un cálculo simple.

Una vez encontrados los valores que se buscan en los puntos discretos mencionados, se puede aproximar la solución en cualquier otro punto por método de interpolación. (Modelado Hidraulico para el Estudio de la Friccion de la Columna de Resortes y Analisis de sus Metodos Computacionales, 2022)

Otra forma de clasificar los modelos hidráulicos, se debe a la forma en la que se definen los problemas que se dan, tomando en cuenta los aspectos como:

- El fluido que se utiliza
- Según el material de la frontera
- Según la escala de longitudes
- Según la condición de semejanza

2.4.5. Clasificación según el fluido utilizado

Aquí los modelos se pueden clasificar en hidráulicos y eólicos, debido a que estos provienen del agua y del aire, siendo los más utilizados, obteniendo una mayor importancia al estudio de estos modelos, frecuentemente se presentan en la ingeniería civil se utiliza el fluido generado por el agua.

El estudio realizado a problemas de hidráulica ban de la mano con los escurrimientos a superficie libre que se llevan a cabo utilizando modelos que se operan con aire, teniendo la ventaja de que estos resultan siendo de menor tamaño, más económicos y más fáciles de operar. En este tipo de modelos la superficie libre es representada con un vidrio o material transparente, en donde empiezan a funcionar como conductos a presión.

2.4.6. Clasificación según el material de la frontera

Cuando el fluido se encuentra en movimiento, los modelos pueden clasificarse como (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015):

- a) **Fondo fijo:** Son aquellos que al estar el fluido en movimiento no son capaces de alterar la frontera, debido a que las características que posee el material del fondo, no le permiten su fácil erosión, son contruidos por morteros, vidrios, lucitas y al fondo cuentan con material granular y el fluido en movimiento no es capaz de moverlo o arrastrarlo. Este modelo se encuentra implementando en el estudio de empujes, distribuciones de presión, tirantes, así como para el estudio de trayectorias seguidas por las partículas del fondo en ríos o litorales y poder delimitar zonas de depósitos y posible erosión.

- b) **Fondo móvil:** Son aquellos en los que al encontrarse el fluido en movimiento se altera y se modifica su frontera. Son destinados generalmente a procesos fluviales o marítimos en los que exista transporte de sedimentos y se desee conocer las erosiones que puedan producirse debido a la construcción de una obra de protección, también para delimitar zonas de depósitos, y poder estudiar procesos fluviales como estabilidad de cauces ya sea natural o producto de la construcción de obras.

2.4.7. Clasificación según la escala de longitudes

Para poder empezar a diseñar se necesita conocer su tamaño, dado por:

$$Le = \frac{Lp}{Lm}$$

Ecuación 1 Escala de Longitudes

En donde a mayor tamaño, existe una menor escala, y el modelo va a ser mas costoso y las mediciones van a ser de mejor calidad. A un menor tamaño, mayor va a ser la escala, el modelo será mucho más económico pero los resultados no tendrán una buena calidad (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015).

Tomando en cuenta las escalas de longitudes en la dirección de los tres ejes coordenados, los modelos se pueden clasificar en:

- a) **Modelos no distorsionados:** Son aquellos en los cuales es aplicada la misma escala de longitudes en dirección, es decir solo existe una escala entre el modelo y el prototipo. En este tipo de modelos se alcanza una mayor semejanza entre el modelo y el prototipo, algunos ejemplos en los que se puede utilizar son: Modelos de obras hidráulicas, agitación de puertos, socavaciones locales, estabilidad de escolleras.

- b) **Modelos distorsionados:** Son aquellos en los que la escala de longitudes en una dirección es diferente de las otras dos o bien cuando las tres escalas de longitudes x, y, z, difieren entre sí, este tipo de modelos es conveniente usarlos cuando la rugosidad quiera representarse muy aproximadamente, ya que, al distorsionar el modelo, la rugosidad teórica aumenta, usualmente se dice que en este tipo de

modelos existe una escala para longitudes verticales y otra para longitudes horizontales. Otra forma de distorsionarlo se presenta cuando la pendiente es mayor que la teórica con objeto de aumentar la velocidad media y garantizar el arrastre de partículas, al hacer esto tiene una escala de pendientes.

$$Se_t = \frac{Lve}{Lhe}$$

Ecuación 2 Función de las escalas de líneas

Y otra escala de pendientes dada por la relación

$$Se_r = \frac{Sp}{Sm} \quad Se_t \neq Se_r$$

Ecuación 3 Escala de pendiente

Límite del valor mínimo de Le, debido a que:

$$Qm = \frac{Qp}{(Le)^{\frac{5}{2}}}$$

Ecuación 4 Gasto máximo

2.4.8. Clasificación según la condición de semejanza

Los modelos se pueden clasificar de acuerdo a la condición que cumple, tomando como base la variable de mayor importancia, la mayoría de los problemas donde se estudian fluidos en movimiento, generalmente cumplen con la Ley de Froude o la Ley de Reynolds.

En los modelos de Froude se estudian los fenómenos en los que la acción de la gravedad juega un papel importante, este tipo de modelos son los más utilizados para la solución de los problemas de ingeniería civil, ya que las obras hidráulicas, procesos fluviales y marítimos son estudiados con estos modelos, son un caso de modelos de superficie libre, estos modelos son generalmente distorsionados, mientras que los utilizados en los fluviales pueden ser distorsionados o no distorsionados. Al presente se muestra una tabulación con lo que se cumplen los diferentes tipos de problemas, de acuerdo a la variable de mayor importancia en los mismos (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos, 2015).

Relación de escalas Material de las fronteras	NO DISTORSIONADO		DISTORSIONADO		
	Estudio	Valores más usuales de la longitud	Estudio	Valores más usuales de la escala de longitudes	
				Horizontal	Vertical
Fondo fijo	Compuertas y ahujas	5-40	Flujo en ríos y canales	250-1000	50-100
	Vertederos, tanques amortiguadores, rápidas, túneles.	20-70			
	Agitación en puertos	80-200	Corrientes litorales	100-300	50-100
	Conductos cerrados con escurreimiento a superficie libre.	10-25			
	Flujo alrededor de estructuras.	20-60	Estuarios	200-2500	50-150
Fondo móvil	Oleaje contra estructuras. Pérdidas en estructuras	20-60			
	Erosión local por corrientes.	20-60	Erosión en ríos y arrastre de sedimentos	100-500	50-100
	Erosión local por oleaje	40-80			
			Arrastre litoral y azolve de puertos.	80-200	30-100

Tabla 1 Valores de las escalas de longitudes para los modelos que utilizan la condición de Froude

Fuente: (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos, 2015)

Condición con que cumplen	Variable de mayor importancia	Tipología del problema en los que interviene.
REYNOLDS	Viscosidad	Flujo laminar, fricción; conductos a presión.
FROUDE	Gravedad	Escurrimientos a superficie libre
EULER	Presión	Cavitación, empujes
MACH	Velocidad del sonido dentro del fluido.	Flujo compresible, ondas de Mach, ondas de choque.
WEBER	Tensión superficial	Ondas capilares
CAUCHY	Compresibilidad	Ondas de choque
STROUHAL	Periodicidad	Formación de vórtices, mov. de ondas
SHIELDS	Esfuerzo cortante sobre el fondo	Inicio y transporte de sedimentos
EINSTEIN	Transporte de sedimentos	Cuantificación de arrastre

Tabla 2 Condiciones de cumplimiento en los modelos

Fuente: (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015)

Aquí se presenta un ejemplo de los modelos especificados anteriormente.

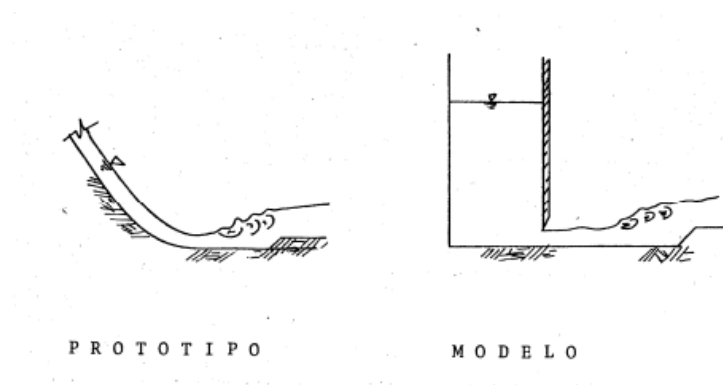


Ilustración 1 Ejemplo 1

Fuente: (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015)

Para poder representar un tanque amortiguador, se emplea un modelo hidráulico, de Froude no distorsionado con fondo fijo.

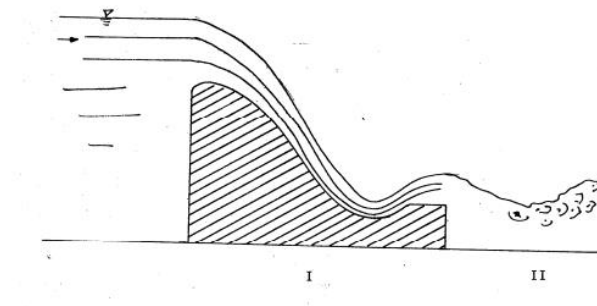


Ilustración 2 Ejemplo 2

Fuente: (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015)

Si se quiere modelar un vertedor y además conocer los problemas de socavación que se tendrían en la sección II, se empleara en la sección I un modelo hidráulico, de Froude, no distorsionado con fondo fijo. En la sección II un modelo hidráulico de Froude, no distorsionado, pero con fondo móvil.

Aquí se presenta un problema resuelto con diferentes tipos de modelos, que ilustran algunas de las ideas expuestas en lo anterior. El proyecto hidráulico el caracol se encuentra localizado sobre el río de Balsas en el estado Guerrero, el área de la cuenca es de 48.837 Km² con un caudal de medio anual de doscientos metros cúbicos sobre segundo, la cortina será de materiales graduados con una altura máxima de 134 m, y una longitud de 345 m. El tipo de modelo hidráulico a superficie libre, donde se domina la influencia de la geometría y del número de Froude, su rugosidad es poco importante.

La simbología de la figura es la siguiente:

- 1) Cortina
- 2) Vertedor

- 3) Estructura disipadora
- 4) Canal de retorno
- 5) Compuerta
- 6) Tramo del cauce

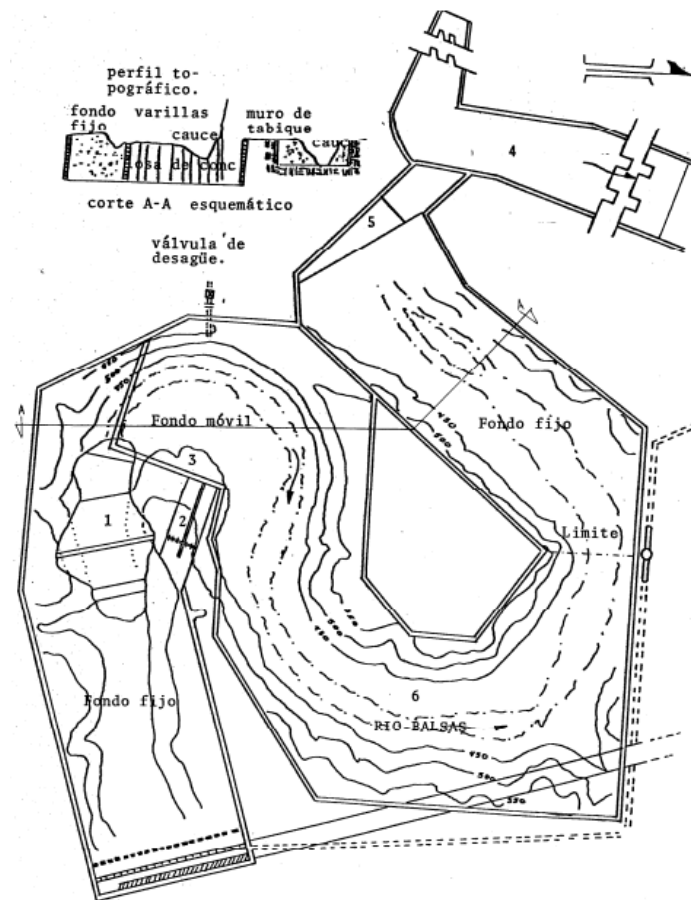


Ilustración 3 Ejemplo 3

Fuente: (Capítulo 2. Clasificación de los Modelos , 2015)

2.5. Programas de análisis estadístico y probabilístico

2.5.1. Software HEC-RAS:

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

“HEC-RAS (Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Análisis de Ríos), es un programa para el modelado hidráulico unidimensional que consta de cuatro tipos de análisis”:

- Modelado de flujo de sistema suave.
- Modelado en un sistema no estacionario.
- Análisis de la calidad del agua.
- Modelización del transporte de sedimentos. Modelado del transporte de sedimentos.

“Consiste en un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados, permitiendo que los datos geométricos sean modelados e importados a HEC-RAS”. (Hec.Usase.Army, 2020)

2.5.2. *PeakFQ*

“El programa PeakFQ es un programa que permite estimar el pico de corriente anual a intervalos de 1,5, 2, 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Este software utiliza una distribución de frecuencias tipo Pearson 3 Además, sigue las pautas del Comité Asesor Inter agencial de Datos de Agua 17B. Los parámetros de la curva de frecuencia tipo 3 de Pearson se estiman utilizando el método de momento de muestra, que también determina la media, la desviación estándar y los coeficientes de asimetría. Este software

fue creado en los EE.UU. Servicio Geológico y distribución gratuita” (Usgs Science for a changing world , 2014).

2.5.3. Hyfran-Plus Hydrologic Frequency Analysis PLUS DSS

“Es un software especial para ajustar distribuciones estadísticas, además incluye una gran cantidad de herramientas matemáticas para realizar análisis de frecuencia de eventos extremos sobre cualquier conjunto de datos independiente e idénticamente distribuido. Este software es un sistema de soporte de decisiones, abreviado como DSS en inglés, el programa está disponible en dos idiomas, inglés y francés, también funciona con casi todos los conjuntos de datos, por lo que puede usarse fuera de la ingeniería, como medicina, sociología, psicología., etc.”. (Water resources publications, LLC, 2008).

2.6. Periodo de recuperación del proyecto

Los planes hidrológicos son integrales en el sentido de que tratan eventos extremos de corto plazo, eventos pequeños, de largo plazo o cero. Por lo tanto, los factores más importantes al elegir un plan a término son el costo y la seguridad que ofrece. También, “se sabe que la cantidad de agua en el planeta es limitada porque es un ciclo cerrado y se puede estimar un valor límite estimado (VLE)”, que es el tamaño máximo de un evento hidrológico en esa región, con base en sus datos hidrológicos. disponibles los cuales dependen de valores del evento, para precipitaciones el VLE sería Precipitación Máxima Probable (PMP) y para corrientes el Incremento Máximo Probable (CMP). Una estructura diseñada con un valor VLE resistiría cualquier evento y tendría la

ventaja de estar libre de hielo. En áreas densamente pobladas, dicha planificación se justifica debido a los riesgos económicos y sociales que la acompañan, pero en áreas menos pobladas es más importante planificar con una recuperación más corta, protegiendo a las poblaciones humanas (Chow, 1998).

1. Enfoque Empírico

Esta práctica se utilizó en todo el mundo alrededor de 1900 para elegir un factor de seguridad arbitrario como criterio de diseño, pero se clasificó como inapropiado porque muchas estructuras fallaron en poco tiempo (Chow, 1998).

2. Análisis de la estructura del riesgo

Es la probabilidad en la cual puede que ocurra.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$$

Ecuación 5 Riesgo Hidrológico

Donde:

R= “riesgo hidrológico”

N= Vida útil de la estructura

Riesgo	Vida útil esperada (años)					
	5	10	25	50	75	100
0.01	498	995	2488	4975	7463	9950
0.05	98	195	488	975	1463	1950
0.1	48	95	238	475	712	950
0.2	23	45	113	225	337	449
0.3	15	29	71	141	211	281
0.4	10	20	49	98	147	196
0.5	8	15	37	73	109	145
0.6	6	11	28	55	82	110
0.7	5	9	21	42	63	84
0.8	4	7	16	32	47	63
0.9	3	5	11	22	33	44
0.95	2	4	9	17	26	34

Tabla 3 Retorno debido a su riesgo

Fuente: (Granados, 2014)

3. Análisis hidroeconómico

Rendimiento óptimo del periodo el cual se puede determinar mediante el hidroeconómico, se puede calcular de dos maneras: análisis de costo mínimo y análisis de costo-beneficio (Chow, 1998).

- Análisis costo-beneficio

El propósito de este método es cuantificar el beneficio y el costo totales por la gestión de riesgo.

$$BN(T_D) = B_{IR}(T_D) + B_I(T_D) + B_L(T_D) - C(T_D)$$

Ecuación 6 Relación beneficio-costos

Donde:

BN= Beneficio neto

B_{IR} = Inundación y medidas de mitigación “Beneficio”

$$B_{IR}(TD) = [D_E(TD)]_{sin} - [D_E(TD)]_{con}$$

Ecuación 7 Mitigación de inundaciones

Donde:

B_I = Incremento de actividades- “Beneficio”

B_L = Producto de medias tomadas “Beneficio”

C = Costo de mantenimiento, operación, construcción, rehabilitación y reparación de estructuras

TD = Periodo de retorno

2.7. Análisis de costo mínimo

Este análisis parte del hecho que si se conoce la probabilidad de ocurrencia de un debido “evento hidrológico” y al “daño”, provoca se encuentra el tiempo óptimo de recuperación, ya que cuando aumenta el tiempo de recuperación aumentan los costos de las estructuras, pero disminuye el riesgo porque hay más protección. (Chow, 1998).

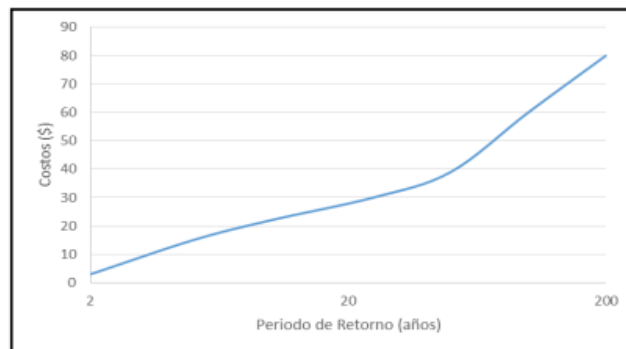


Ilustración 4 Costos de Infraestructura

Fuente: (Chow, 1998)

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

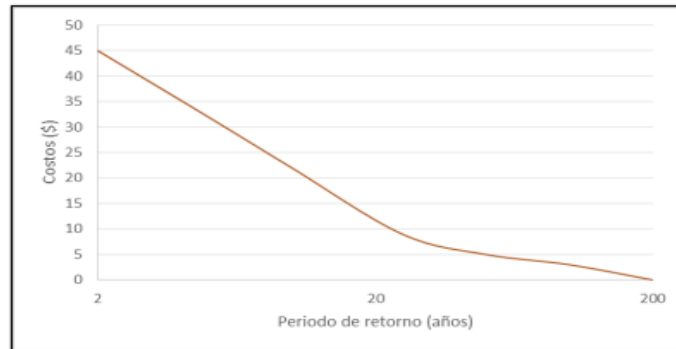


Ilustración 5 Daños esperados

Fuente: (Chow, 1998)

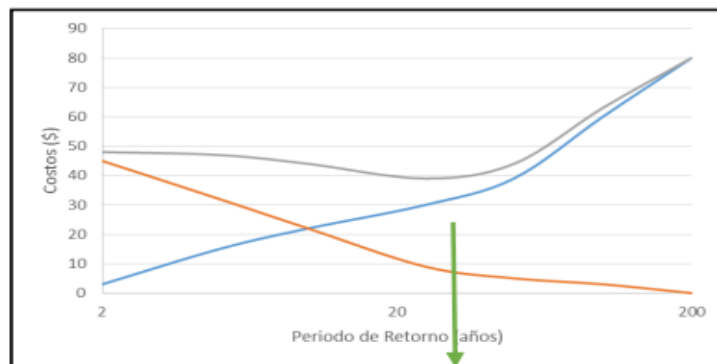


Ilustración 6 Análisis costo mínimo

Fuente: (Chow, 1998)

- **Evaluación hidrológica:** Calcula la extensión de eventos extremos, todas las teorías relacionadas (Quijano, 2012).
- **Análisis económico:** Este análisis se puede utilizar para estudiar el comportamiento físico de un río a través del modelado hidráulico para determinar el daño económico causado por eventos extremos en el balance hidrológico.

3. Capítulo II Modelamiento Hidráulico 1D

3.1. Evaluación hidráulica

Se trata de la creación de modelos para la implicación de un fenómeno por medio de la conceptualización dada de menos a mayor.

Hay 2 tipos de evaluaciones físicas, donde se construye en el laboratorio un modelo en miniatura del área de interés, y numéricos, donde se utilizan fórmulas matemáticas para describir las propiedades físicas, se desarrolla típicamente en paquetes de software (Uk, 2009).

3.2. Modelamiento de hidráulica

“Todos los modelos se aproximan a la realidad, por lo que los resultados obtenidos de los modelos hidráulicos son representaciones superficiales del hecho real debido a variaciones en los sistemas de agua reales que son difíciles de representar” (Chow, 1998).

1. Eventualidad aleatoria
2. Tres dimensiones
3. Variabilidad temporal, cambio en relación en el tiempo y el espacio

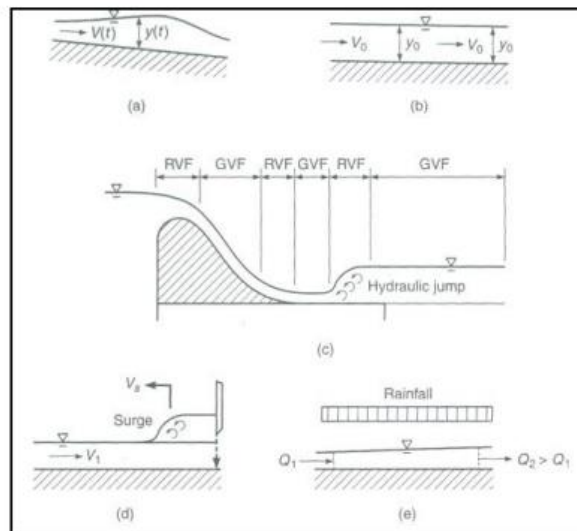


Ilustración 7 Flujo de naturaleza variable

Fuente: (Stum, 1976)

La variación temporal se clasifica de la siguiente manera:

Evaluación Intermedia	Condición
“Permanente”	Flujo estacionario en el tiempo no es constante
“No permanente”	Flujo no adaptable a lo estacionario en tiempo

Tabla 4 Tipos de flujo según su variación temporal

Fuente: (Uk, 2009)

Las variaciones especiales se clasifican de la siguiente manera:

VARIACION EN EL ESPACIO	DESCRIPCION
Uniforme	Cuando la velocidad y la profundidad son constantes en la distancia.
Variado Gradualmente	Cuando la velocidad y distancia del flujo cambia de manera rápida.
Variación Rápida	Se influencia por la estructura.
Espacialmente Variado	Producto dado por medio gravitaciones, el flujo, debido al aumento de agua en un canal.

Tabla 5 Variación espacial de los tipos de flujo

Fuente: Elaboración propia

3.3. Saint Venant-1D

“Ecuaciones diferenciales, las cuales modelan el cambio de un caudal y el nivel de un líquido a lo largo de un espacio unidimensional y el tiempo en el que esta no está en un canal y tubería de manera abierta o libre. Es utilizada en múltiples contextos como en la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para poder trasladarse a través de un río de un sistema de tuberías en drenaje, también es utilizada para el tránsito de las salidas de agua someras en sistemas de irrigación por medio de un río” (Arandia, 2018).

3.3.1. Supuestos de las ecuaciones

- Velocidad en la que viaja el flujo y la profundidad que esta tiene, solo varia en la dirección referente a la longitud del canal
- La variación es realizada gradualmente
- El canal debe ser aproximadamente lineal
- La pendiente debe de ser pequeña
- No debe existir ni erosión, ni acreción
- La resistencia se calcula por medio de salidas de flujo uniformes y permanentes
- Ser de densidad constante e incompresible

3.3.2. Sistema de Ecuaciones

3.3.2.1. Continuidad

Se tiene en cuenta el balance de masa sobre un volumen de control, de manera conservativa (Arandia, 2018).

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

Ecuación 8 Continuidad conservativa

O de manera no conservativa de la siguiente forma:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Ecuación 9 Continuidad no conservativa

3.3.2.2. Ecuación de Momento

Surge de la igualación de fuerzas externas que se apliquen al control del volumen como la presión, fricción el viento, gravedad, entre otras. En forma conservativa se puede escribir de la siguiente forma (Arandia, 2018):

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

Ecuación 10 Momento conservativo

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

Ecuación 11 Momento no conservativo

3.3.3. Aproximaciones y Simplificaciones

Debido a que muchas veces este tipo de ecuaciones se muestran dificultades para encontrar una respuesta satisfactoria se procede a utilizar términos de ecuaciones conocidas como “onda dinámica”, “onda difusiva” & “onda cinemática” (Arandia, 2018).

Aproximación	$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$	$+\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	$+g \frac{\partial y}{\partial x}$	$-gS_0$	$+gS_f$	$= 0$
	Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción	
	<i>Términos Inerciales</i>					
Onda dinámica	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí
Onda difusiva	✗ No	✗ No	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí
Onda cinemática	✗ No	✗ No	✗ No	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí

Tabla 6 Términos de la ecuación de momento

Fuente: (Hypherphysics , 2018)

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

	$S_f =$	$-\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t}$	$-\frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	$-\frac{\partial y}{\partial x}$	$+S_0$
Aproximación		Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional
		Términos inerciales			
Flujo no uniforme, no permanente		✓ Sí	✓ Si	✓ Sí	✓ Si
Flujo no uniforme, permanente		✗ No	✓ Si	✓ Sí	✓ Si
Flujo uniforme, permanente		✗ No	✗ No	✗ No	✓ Si

Tabla 7 S_f en términos de momento

Fuente: (Hypherpysics , 2018)

3.4. Modelamiento Unidimensional

“Los modelos unidimensionales son la forma más fácil de representar el flujo en los canales, reducen toda la teoría a una dimensión y también encuentran el nivel y el flujo de cada sección transversal del río” (Chow, 1998).

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

Ecuación 12 Masa en conservación

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

Ecuación 13 Momento de conservación

Se puede llegar a clasificar en diferentes categorías, ya que su complejidad en lo numérico, no permite que se llegue a una solución analítica, por ello se tiene que.

3.4.1. Modelo empírico

Este método se basa en la observación e intuición del oleaje, modelos de referencia basados en retrasos en la entrada y salida de masas de agua y relaciones basadas en relaciones empíricas. entre aguas arriba y aguas abajo (Burt, 1985).

3.4.2. Modelos linealizados

En este método se busca linealizar las ecuaciones de Saint Vernant, para poder solucionar de manera analítica, simplificando términos, “entre el más común esta ignorar el segundo término de la ecuación 9, asumir una sección transversal contante, asumir una pendiente constante, linealizar la pendiente de fricción con respecto a la velocidad y profundidad, no existe flujo lateral y el comportamiento de onda es descrito por una expresión sencilla que se soluciona de manera analítica” (Burt, 1985).

3.4.3. Modelo Hidrológico

“Son modelos basados en la ecuación de la conservación de la masa y una aproximación entre el flujo y el almacenamiento” (Fried, 1990)

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

Ecuación 14 Conservación de la masa

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

Ecuación 15 Almacenamiento y flujo

3.4.4. Modelo Hidráulico

“Estos se encuentran basados en la ecuación 8 y ecuación 9, estos se encuentran divididos entre simplificados o complejos” (Burt, 1985).

- **Modelos Simplificados:**

“Estos modelos se clasifican según el grado de los términos de la ecuación de la conservación de momento, dividiéndose en”:

a) Modelamiento cinemática en onda: Debido al debilitamiento de las fuerzas de inercia y los términos del gradiente de presión. (Victor M. Ponce, 2015):

$$S_o = S_f$$

Ecuación 16 Cinemática onda

Esta simplificación fue anunciada por primera vez con Lighthill & Whitman en el año de 1955, al asumir esta simplificación, quedando de la siguiente manera:

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

Ecuación 17 Masa en conservación onda cinemática

b) Modelo de onda difusiva: Se consideran el efecto de gradiente de presión, implicando que (Victor M. Ponce, 2015):

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x}$$

Ecuación 18 Modelo de onda difusiva

Expresándose en términos de conservación se tiene que debe existir un valor único:

$$Q = -K_c \left(\frac{h_x}{|h_x|} \right) (h_x)^{1/2}$$

Ecuación 19 Caudal de cambio

$$\Delta t \leq \frac{BS_0^{\frac{1}{2}} \Delta x^2}{\left(K_c + \frac{S_o \Delta x \Delta K_c}{\Delta h} \right)}$$

Ecuación 20 Estabilización de onda difusiva

c) Modelos cuasi-constante: Su problema es que provoca más errores que el modelo de ondas en propagación, por lo que no es muy utilizado y no es recomendable. (Abc Puertos , 2019).

d) Modelos holísticos: Los avances en el tratamiento de la información han permitido mejorar la transmisión de facturas de muchas áreas de la ciencia y la hidráulica no fue la excepción, estas mejoras le permitieron a Stoker y Isaac, crear las primeras metodologías para solucionar todos los términos de las ecuaciones nombradas anteriormente, a estos tipos de modelos se le llaman modelos dinámicos y se clasifican según el método de solución pueden ser explícitos o implícitos (Scielo, 2016).

e) Modelo explícito: Resuelve ecuaciones algebraicas lineales y resolverlas en todos los puntos y en cualquier tiempo requerido. En un diagrama explícito, se conocen “derivadas espaciales”, solo se desconocen “las derivadas temporales”. Toma la siguiente forma (Comportamiento de las ecuaciones de Saint Venant 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable, 2018):

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} + Br \frac{\partial y}{\partial t} - q = 0$$

Ecuación 21 Conservación de la masa explícita

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f \right) + \frac{(V - V_x)q}{A} = 0$$

Ecuación 22 Momento explícito

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V + \sqrt{g \frac{A}{B}}}$$

Ecuación 23 Estabilidad numérica

$$\Delta t \leq \frac{C_1 R^{3/4}}{gn^2 |V|}$$

Ecuación 24 Consideración de las fuerzas de fricción

f) Modelo implícito: “Los modelos implícitos son modelos que permiten la solución simultánea de las ecuaciones de Saint-Venant propone un sistema de dos

ecuaciones para todas las secciones y las resuelve simultáneamente. Definido como lineal o no lineal dependiendo de cómo se aproximen los términos”. (Ga, 2004).

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\theta(f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}) + (1 - \theta)(f_{i+1}^j - f_i^j)}{\Delta x}$$

Ecuación 25 Método cuatro puntos

3.4.5. Shock Fitting method

Aísla la discontinuidad y la trata como un contorno, para ello se deben de conocer la localización de la discontinuidad, lo que en muchos casos no sucede y por ello se procede a que su práctica no es inviable para un problema general (M, 2020).

3.4.6. Método de pseudoviscosidad

“Se introduce un término artificial en las ecuaciones que aumentan la difusión, de manera en la discontinuidad desaparece, uno de sus grandes inconvenientes es que al frente de onda se puede repartir en puntos cercanos de la malla que afecta una zona más extensa de la realidad quitándole rigor a la solución” (Tecno Cruzfiero, 2020).

3.4.7. Shock Capturing methods

“Son métodos capaces de localizarse, simular y propagar soluciones discontinuas sin ninguna técnica en especial gracias a la utilización integral de las ecuaciones de Saint

Vernant, funcionando para un flujo variable como rápidamente variable” (Chemeurope , 2020).

3.5. Esquema de Preissman

“Esquema clásico utilizado por varios modelos comerciales, entre ellos Hec-Ras.

En este se aproximan las funciones de $f(x, t)$ en cualquier punto P de (x, t) , para ello tenemos que”: (Victor Ponce, 2019)

$$f(x, t) = \theta [\psi f_{j+1}^{i+1} + (1 - \psi) f_j^{i+1}] + (1 - \theta) [\psi f_{j+1}^i + (1 - \psi) f_j^i]$$

Ecuación 26 Diferencias finitas de preissman

Para sus derivadas espaciales y temporales, se tiene que, de manera respectiva:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_j^{i+1}}{\Delta x_j} + (1 - \theta) \frac{f_{j+1}^i - f_j^i}{\Delta x_j}$$

Ecuación 27 Derivada espacial

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \psi \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_{j+1}^i}{\Delta t_i} + (1 - \psi) \frac{f_j^{i+1} - f_j^i}{\Delta t_i}$$

Ecuación 28 Derivada temporal

El parámetro de teta se encuentra localizado en el punto P en donde se aproximan las derivadas en el tiempo, mientras que su otro parámetro se encuentra localizado en el espacio habitualmente mente estos se establecen entre 0.5 para su segundo parámetro y 0.6 para su primer parámetro, encontrándose en un rango de 0.5 y 1

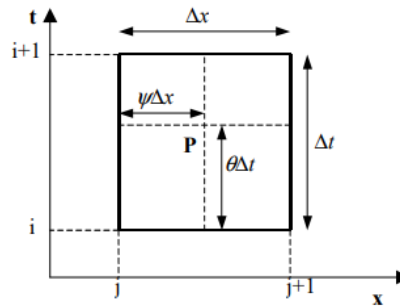


Figura 4 Esquema de Preissman

Fuente: (SlidePlayer , 2016)

3.6. Esquema de McCormick

Se divide “en dos pasos, predictor y corrector, de un segundo orden con una precisión del espacio y tiempo, como en el sistema de ecuaciones que no son lineales con un término independiente. Esto se desarrolla de la siguiente manera”: (University, 2018)

$$U_i^P = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (U_i^n - U_{i-1}^n) + H_i^n$$

Ecuación 29 Incremento del tiempo

Los esquemas explícitos alcanzan un coste computacional por cada paso pequeño que se de en el tiempo, si estos son estables es necesario que se trabaje en incrementos de tiempo que sean pequeños. Deben cumplir con la siguiente condición:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|u \pm c|}$$

Ecuación 30 Condición de Courant

Siendo c la celeridad de la propagación dada por:

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

$$c = \sqrt{g \frac{A}{b}}$$

Ecuación 31 Celeridad de propagación unidimensional

3.7. Esquemas Unidimensionales- “Shock Capturing”

Se desarrollo desde el principio de “ resolución de problemas de la dinámica de gases compresibles, para la resolución de ecuaciones de Saint, se producen oscilaciones espurias en el entorno de discontinuidades, que pueden llegar a dar problemas de estabilidad de cálculo y discontinuidades no reales mientras que los métodos de primer orden son poco precisos en las zonas de solución suave” (Researchgate , 2019).

Estos obtienen técnicas de volumen finito y dan una alta resolución, deben cumplir con:

- 1) “Solución numérica al menos de un segundo orden de precisión en regiones suaves de solución”
- 2) “Producir soluciones numéricas libres de oscilaciones espurias”
- 3) “Discontinuidades suavizadas que se concentran en zonas estrechas con uno o dos incrementos en la malla”

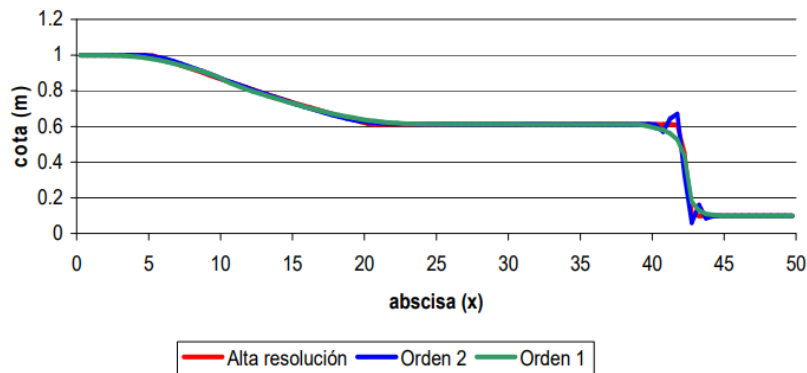


Ilustración 8 Esquemas clásicos de primer y segundo orden en altas resoluciones

Fuente:

3.8.Programas en Modelos 1D – Modelos Comerciales

Actualmente existe una gran variedad de programas que implican modelar o resolver toda la ecuación de onda dinámica. Aquí hay algunos:

3.8.1. HECRAS

Creado por “Instituto de Recursos Hídricos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos”. Especialista en los campos técnicos de hidrología de aguas superficiales y subterráneas, hidráulica fluvial, permite el análisis de los sistemas de agua y los riesgos que presentan. Estas ecuaciones se almacenan en la matriz del horizonte en cada delta de tiempo y se resuelven mediante “un método directo especialmente desarrollado por el Dr. Robert Barkau para la hidráulica fluvial no estacionaria”. Su variable se da en el nivel y caudal, que se calculan en cada sección transversal y se colorean de manera similar “en cada intervalo de tiempo, la resistencia al flujo se rige por

la ecuación de Manning, donde el total n se ve afectado por unos pesos calculados en la cruz. -sección”. Este software de modelado hidráulico y otro software de modelado hidrológico son completamente gratuitos. (US Army Corps of Engineers , 2015)

3.8.2. ISISID

“Es un simulador hidrodinámico para desarrollar modelación de flujos y niveles en canales abiertos y estuarios. Este modelo permite hacer modelación de redes cerradas y ramificadas. Además, este provee modelación de flujo permanente y no permanente con métodos que permiten optimizar el tiempo de corrida para ambos flujos. Este modelo, soluciona las ecuaciones de conservación de masa y momento por medio de una “caja” de diferencias finitas de Preissmann para ambos flujos, además para permanente provee la opción de solucionar la Ecuación de Saint-Venant por medio del método de Runge-Kutta de cuarto orden. También este software permite hacer análisis de la hidráulica de una gran variedad de estructuras hidráulicas, análisis lluvia escorrentía y permite hacer compilaciones entre modelo 1D con 2D. Este software es desarrollado por la empresa CH2MHILL con sede principal en el sur de Tampa, USA. Además de la herramienta ISIS 1D, esta compañía también ha creado diferentes herramientas las cuales se complementan al modelo 1D y 2D, entre las más importantes están ISIS FAST, ISIS MAPPER, ISIS wáter Quality, ISIS Sediment Transport y ISIS-TUFLOW-PIPE Link. Este software es gratuito hasta 250 nodos y todo el software completo tiene un costo de €5990 con 1000 nodos” (Ch2mhill, 2014)

3.8.3. MIKE 11

“Es un modelo unidimensional que proporciona una solución para flujo estacionario o no estacionario en redes ramificadas cerradas y llanuras aluviales. Este software es adecuado para condiciones de flujo con pendientes pronunciadas, cruces de estuarios y describe la ubicación del flujo subcrítico y supercrítico. Para la hidráulica, el modelo resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y el momento utilizando un método de iteración de diferencias finitas desarrollado por Abbott e Ionescu en 1967, en el que el usuario debe especificar el número deseado de iteraciones. Permite resolver cualquier forma de la ecuación de Saint-Venant (onda cinemática, difusa o dinámica), el modelo calcula el delta de cada nivel seccional y caudal en cualquier momento, la resistencia al flujo puede ser controlada por la ecuación de Manning o Chey. MIKE 11 también permite el modelado, operación y demolición de estructuras hidráulicas”. (Dhi , 2014).

3.8.4. SOBEK D-Flow 1D

“La herramienta SOBEK-RIVER es un modelo que le permite modelar redes cerradas y ramificadas de ríos y estuarios. De esta forma se pueden simular los cambios de flujo, calidad y morfología de los sistemas. Respecto a la hidráulica, es un modelo unidimensional que permite modelar hidráulicamente mediante la solución completa de las ecuaciones de Saint-Venant (conservación de masa y cantidad de movimiento), el programa permite modelar flujo estacionario o no estacionario. De forma predeterminada, la resistencia actual se calcula utilizando la ecuación de Chezy, pero también puede

utilizar las ecuaciones de Bos-Bijkerk, Manning, Nikuradse, Strickler y White-Colebrook. Además, permite modelar diversas estructuras hidráulicas, modelar el efecto del viento sobre cuerpos de agua, controlar en tiempo real el transporte de sedimentos, y se complementa con los diferentes programas de SOBEK. Este software fue desarrollado por la empresa holandesa Deltares Systems” (Deltares System , 2012)

3.8.5. WSPRO

Es un programa de modelado hidráulico que se puede utilizar para calcular perfiles de “flujo subcrítico, crítico o supercrítico cuando el flujo se puede clasificar como flujo unidimensional, escalonado o constante. Con este software se pueden analizar: caudales en canales, caudales sobre puentes, caudales en canales, desbordamientos en carreteras y diferentes edificaciones en un mismo tramo. Pero su objetivo principal es ser una herramienta para analizar el flujo de puentes. Para la hidráulica de canal abierto, el programa utiliza técnicas de reflujo estándar, para flujo libre de puentes, utiliza la ecuación de balance de energía usando el coeficiente de flujo de salida, para reflujo en puentes. , usa la ecuación de boquilla desarrollada por FHWA, para flujo a través de tuberías principales de agua, usa el cálculo de FHWA de la ecuación de la técnica de regresión para controlar la entrada y salida para controlar el balance de energía, y finalmente usa la ecuación de arrastre para flujo sobre carreteras o llanuras aluviales” . (Usgs Science for a changing world , 2014).

3.8.6. FLWAV

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

Es un modelo que permite el flujo a través y permite “modelar el flujo a través de un solo sistema o sistemas interconectados. En términos de hidráulica, el software se basa en la solución implícita en diferencias finitas de las ecuaciones de Saint Venant para flujo no estacionario, por otro lado, la resistencia al flujo se calcula utilizando la ecuación de Manning. FLDWAV es esencialmente una unión de NWS DAMBRK y DWOPER, pero sin las limitaciones de los dos modelos. Las características de este software incluyen: modelado de múltiples ríos, modelado de presas, muelles y puentes, comparación de diferentes modelos, modelado de flujo subcrítico y supercrítico y una combinación (mixta) de los dos, también permite la calibración automática”. (Nws, 2015)

3.8.7. SRH-1D

Es un programa de límite móvil unidimensional para el modelado hidráulico y el “transporte de sedimentos en canales naturales y artificiales. El programa le permite modelar un flujo constante utilizando la ecuación de conservación de energía entre aguas arriba y aguas abajo. También permite modelar el flujo no estacionario a través de la solución de ecuaciones de conservación de masa y momento”. (Usbr , 2014)

4. Capítulo III Estructuración Modelamiento 1D

4.1. Diagramas de modelamientos

1. Modelamiento HECRAS



Figura 5 Diagrama HECRAS

Fuente: Elaboración Propia

2. Modelamiento ISISID

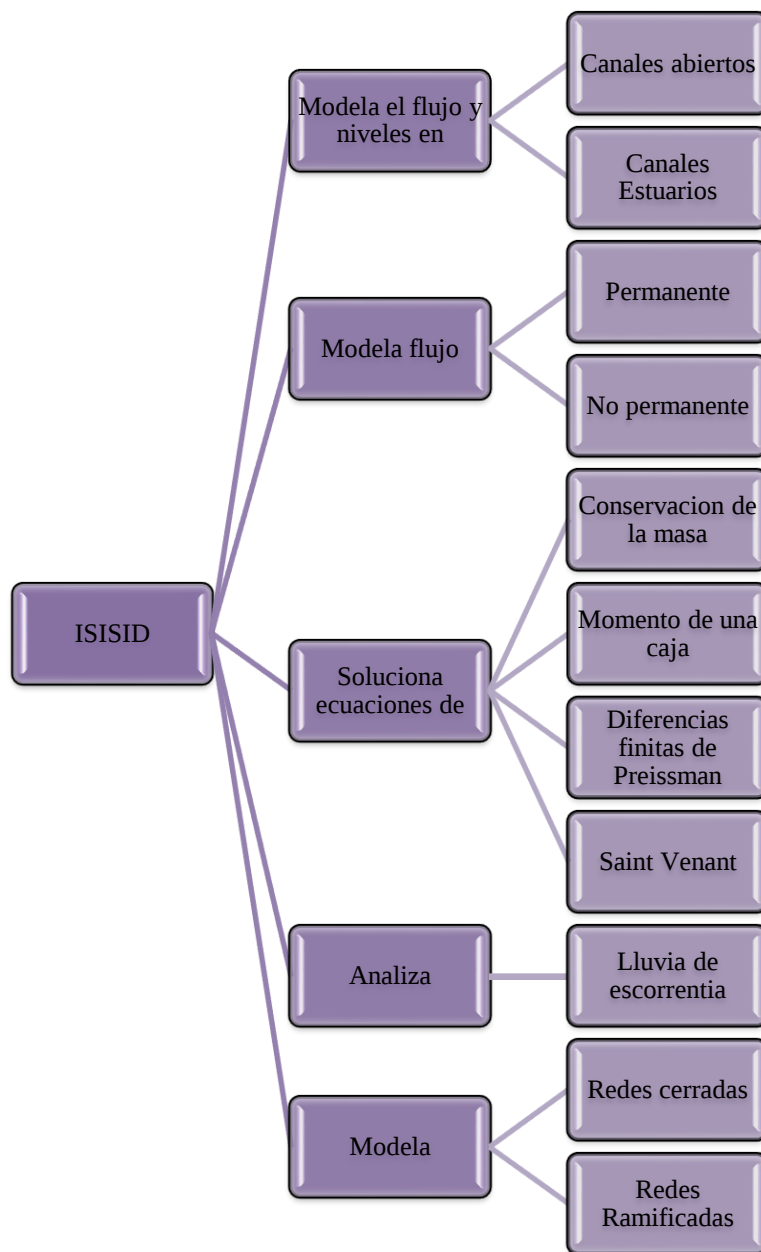


Figura 6 Diagrama ISISID

Fuente: Elaboración Propia

3. MIKE 11

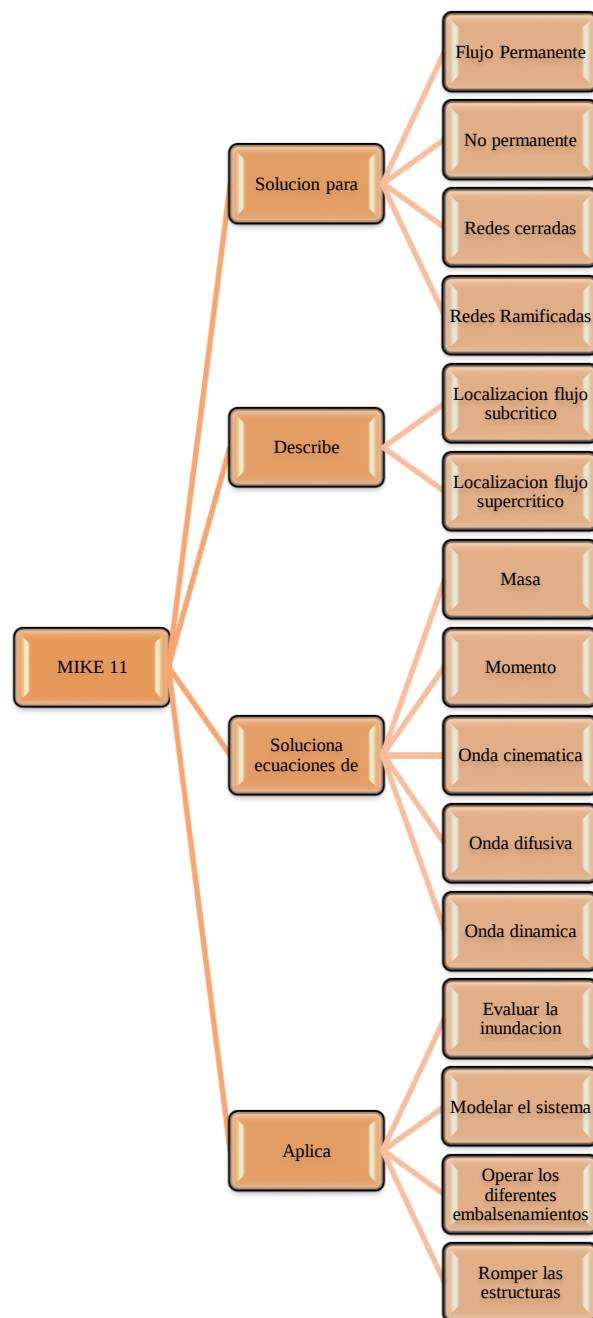


Figura 7 Diagrama MIKE 11

Fuente: Elaboración Propia

4. SOBEK-RIVER

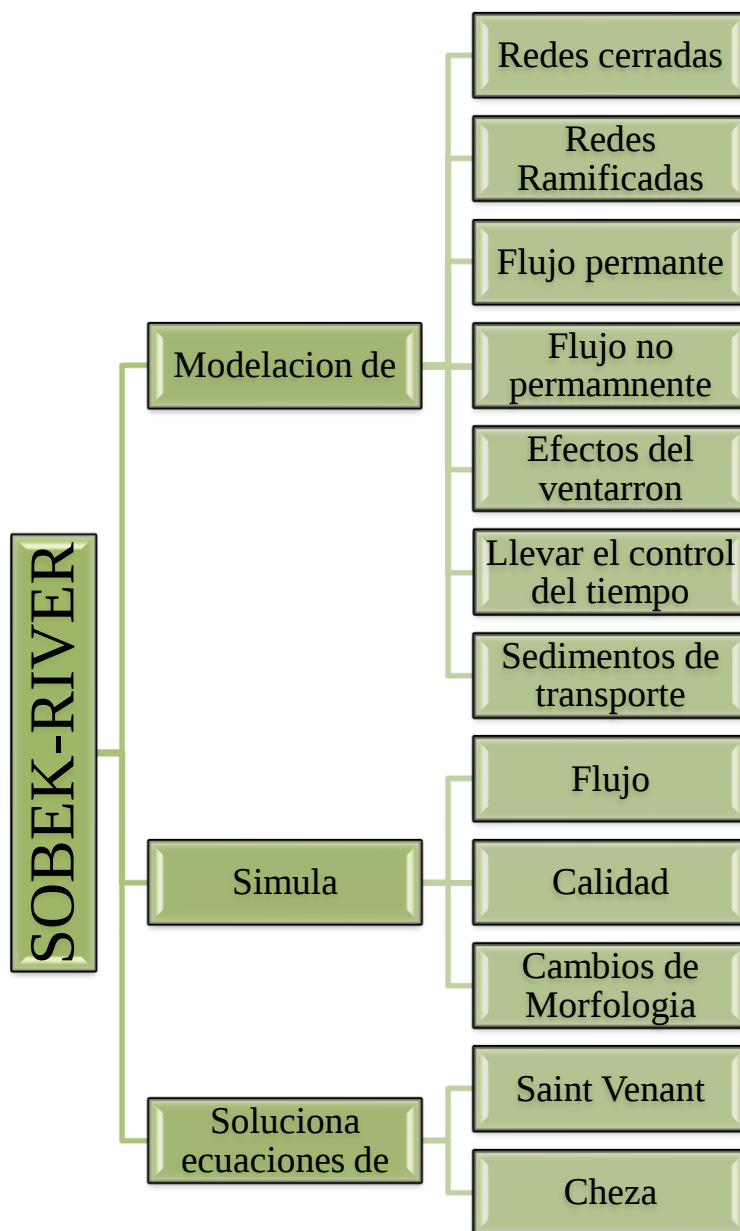


Figura 8 Diagrama Sobek-River

Fuente: Elaboración Propia

5. WSPRO

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

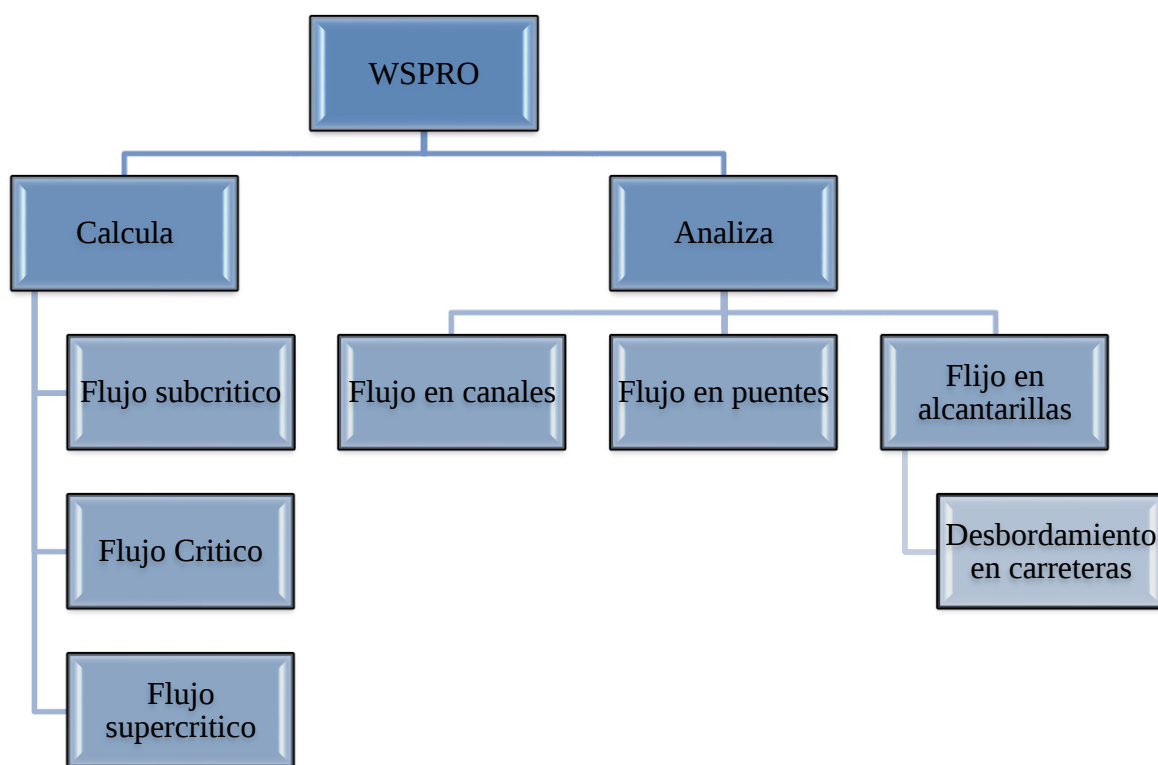


Figura 9 Diagrama WSPRO

Fuente: Elaboración Propia

6. FLWAV

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

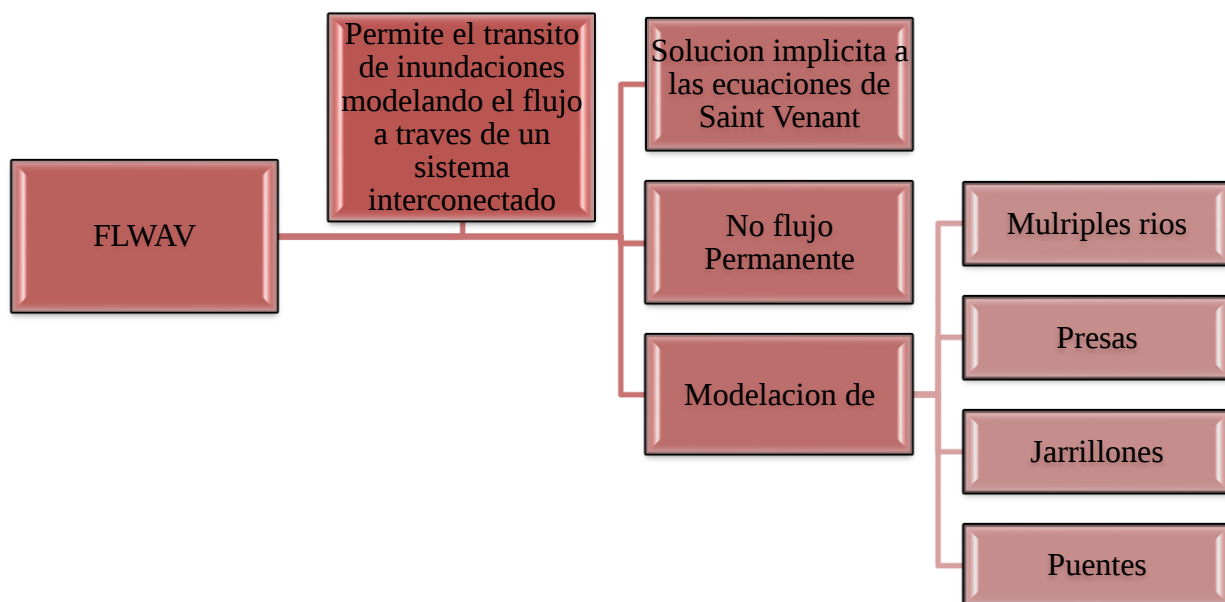


Figura 10 Diagrama FLWAV

Fuente: Elaboración Propia

7. SRH-1D

Estructuras Hidráulicas en Modelos 1D

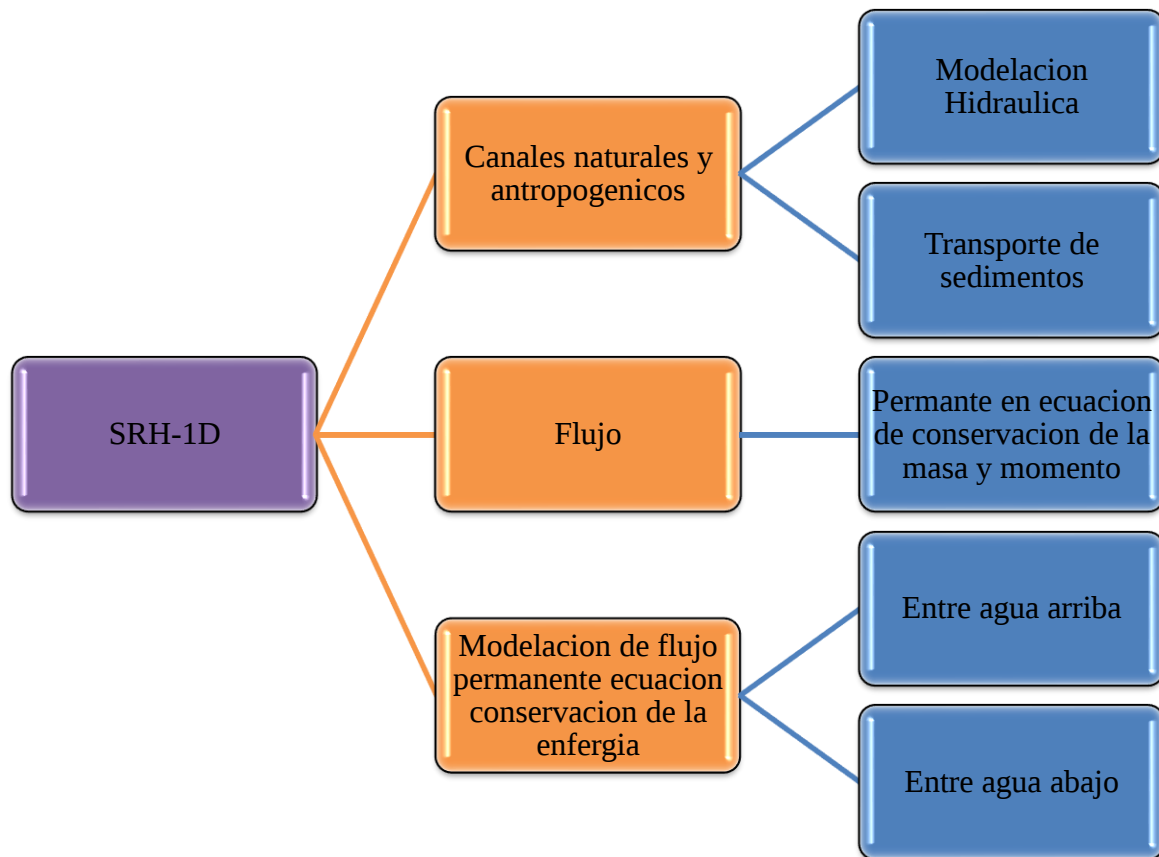
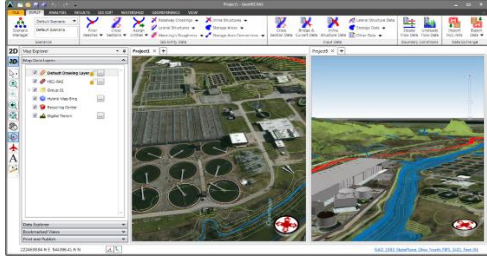
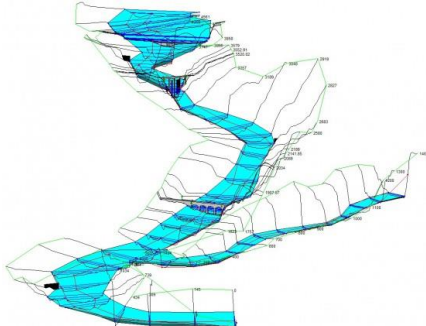
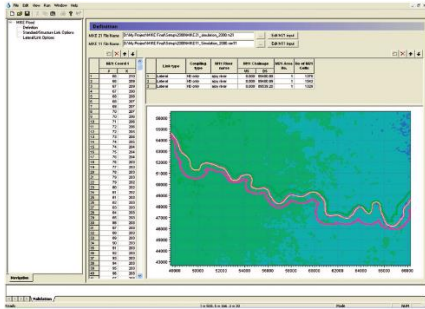
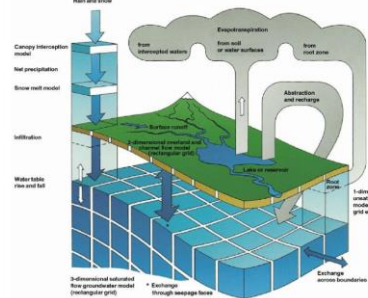


Figura 11 Diagrama SRGH-1D

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Modelación comparada con la realidad

MODELACION	VIRTUAL	REALIDAD
HEC-RAS	 Ilustración 9 Geo-Hecras Fuente: (HidroJng, 2016)	 Ilustración 10 Modelo Hidráulico de la bocatoma Fuente: (Flickr , 2019)
ISISID	 Ilustración 11 Obras hidráulicas modelación Fuente: (Eadic , 2018)	 Ilustración 12 Modelamiento canal Fuente: (Arcux , 2019)
MIKE 11	 Ilustración 13 River network connectivity Fuente: (Researchgate , 2012)	 Ilustración 14 Model structure and hydrologic Fuente: (Mike She , 2018)

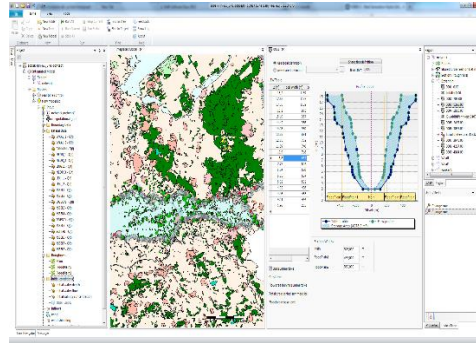
SOBEK-RIVER

Ilustración 15 Sonek Suite
Fuente: (Deltares , 2016)

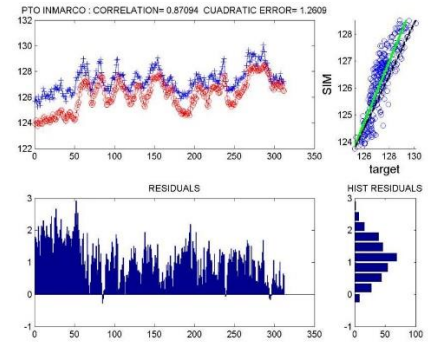


Ilustración 16 Desempeño del modelo Sobek
Fuente: (Lozano, 2014)

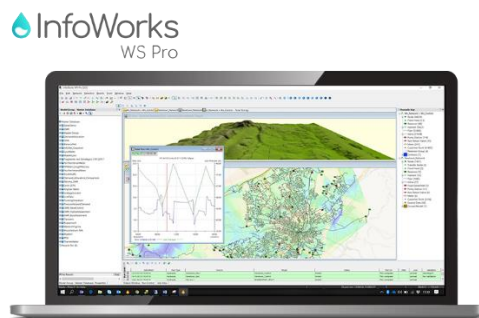
WSPRO

Ilustración 17 Infoworks WS Pro
Fuente: (Store Innovyze , 2022)



Ilustración 18 Estudio del modelo físico hidráulico
Fuente: (Imta , 2020)

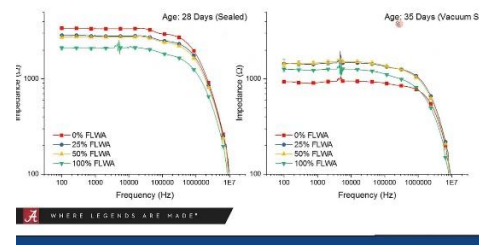
FLWAV

Ilustración 19 Effects of FLWA
Fuente: (Based IC , 2016)



Ilustración 20 Unidades de potencia hidráulica
Fuente: (Dycsa , 2019)

Fuente: Elaboracion propia

5. Conclusiones

- ✚ Los modelos unidimensionales proporcionan un tiempo de recuperación óptimo para el desarrollo de herramientas de modelos matemáticos, con ello nos damos cuenta que los modelos comerciales “HECRAS e ISIS utilizan un método numérico completamente diferente para resolver las matrices que contienen las ecuaciones de conservación de la masa y el momento que crean las variaciones para calcular la velocidad y el nivel”.
- ✚ ISISID “crea problemas en la obtención de mapas de velocidad”, por lo que el programa HECRAS genera mayores costos por inundaciones.
- ✚ La red de triángulos irregulares modela mejor los fenómenos de inundación porque pueden tener triángulo coreano real en el campo para recibir los elementos que lo controlan. Dispondrás de menos tiempo para el modelado por ordenador.
- ✚ Los modelos unidimensionales producen se producen a mayor velocidad, ya que su capacidad de procesamiento por medio de la máquina, necesitan de potencia que se pierde en medio de una dirección.

6. Bibliografía

- Abc Puertos* . (2019). Obtenido de http://www.abcpuertos.cl/documentos/Rom_00/rom_00_esp_cap5_Metodos_Nivel_I.pdf
- Arandia, G. (2018). *Ecuaciones de Saint-Venant 1D* .
- Arcux* . (2019). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Farcux.net%2Fblog%2Fque-es-la-hidraulica-de-canales%2F&psig=AOvVaw3Ct4giPy3IFoZr0Tb0Mq9p&ust=1670166240580000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxxqFwoTCLj11Ynf3fsCFQAAAAAdAAAAABAD>
- Autodesk. (2015). *Autodesk* . Obtenido de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ESP/MoldflowAdvisor/files/GUID-99D48FE8-21F9-425F-9DD0-B3475D9FDE1D-htm.html#:~:text=La%20forma%20de%20la%20secci%C3%B3n,en%20la%20superficie%20del%20ca>
- Based IC* . (2016). Obtenido de <https://i.ytimg.com/vi/hjy1xNuBOoU/maxresdefault.jpg>
- Burt, A. y. (1985). *Tipos de modelos* .
- Capítulo 2. Clasificación de los Modelos* . (2015).
- Ch2mhill*. (2014). Obtenido de <https://ar.linkedin.com/in/norberto-da-ch2mhill-21501498>
- ChemEurope* . (2020). Obtenido de https://www.chemurope.com/en/encyclopedia/Shock_capturing_methods.html
- Chow. (1998). *Consideraciones generales para la realización del diseño* .
- CivilGeek. (2018). Conceptos y elementos de un Canal . *Mecánica de Fluidos* .
- Comportamiento de las ecuaciones de Saint Venant 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable . (2018). *Revista Tecnura* .
- Deltares* . (2016). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.deltares.nl%2Fnl%2Fsoftware%2Fsobek-suite%2F&psig=AOvVaw3abItJZFt1Y6dFpXAU0lHe&ust=1670167346421000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxxqFwoTCPigka3g3fsCFQAAAAAdAAAAABAJ>
- Deltares System* . (2012). Obtenido de <https://www.deltares.nl/>
- Dhi* . (2014). Obtenido de <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-11>
- Dycsa* . (2019). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.dycsa.com.co%2Fproducto%2Funidades-de-potencia-hidraulica-lpp-6-c75%2F&psig=AOvVaw0ELYvb84t9GkKGe99kJ7fT&ust=1670168279387000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxxqFwoTCNji7-nj3fsCFQAAAAAdAAAAABAE>

- Eadic . (2018). Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Feadic.com%2Fblog%2Fentrada%2Fsoftware-de-obras-hidraulicas%2F&psig=AOvVaw3Fq75iuEtsTI_7t1FhfPC6&ust=1670166072953000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCOjx0t_e3fsCFQAAAAAdAAAAABAD
- Flickr . (2019). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.flickr.com%2Fphotos%2Fudep%2F13737767845&psig=AOvVaw1D0vs4gk1ybvXCm7cMu0W9&ust=1670164752212000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCJCsquvf3fsCFQAAAAAdAAAAABAD>
- Friedad. (1990). *Modelos hidrológicos*.
- Ga, A. (2004). *Los Modelos Implícitos*.
- Granados, D. (2014). *Metodología para el retorno optimo* .
- Hec.Usace.Army. (2020). Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- HidroJing. (2016). Obtenido de <https://www.hidrojing.com/geohecras-el-hecras-del-siglo-xxi/>
- Hyperphysics . (2018). Obtenido de <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTo9T3TXNJ3y6D5rTTuDVzdcVfTCovlWdLG0Q&usqp=CAU>
- Imta . (2020). Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Flabhidraulica.imta.mx%2Findex.php%2Fslideshow%2F1-laboratorio-hidraulica-enzo-levi&psig=AOvVaw3T8a8IXSRCva6fYEgiAxNc&ust=1670167955500000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCJjLvM_i3fsCFQAAAAAdAAAAABAE
- Ingeniería, G. d. (2022). Desarrollo de modelos Hidráulicos .
- Lozano, J. L. (2014). *Researchgate* . Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Desempeno-del-Modelo-SOBEKR-en-las-series-de-tiempo-de-Nivel-en-la-estacion_fig2_280273791
- Luis Timbe Castro, P. W. (2011). *Desempeño de modelos Hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones*. Maskana Vol 2.
- M, C. (2020). *Briding shock-fitting and embedded boundary methods*.
- Mike She . (2018). Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FMIKE-SHE-Model-structure-and-hydrologic-componentsDHI-2004_fig4_48854512&psig=AOvVaw35E2BfD5gsFXR5rZrSCx6l&ust=1670166395469000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCNjt3ef
- Modelado Hidráulico para el Estudio de la Fricción de la Columna de Resortes y Análisis de sus Métodos Computacionales*. (2022). Library.
- Nws. (2015). Obtenido de <http://ups.savba.sk/parcom/anfas/fldwav.html>
- Oms. (2020). *Protección de la Calidad del Agua* .

- Quijano, G. (2012). *Scielo* . Obtenido de <https://es.scribd.com/document/430872795/Estudio-Hidrologico-Garcia-Quijano-Juan-Francisco>
- Researchgate* . (2012). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/MIKE-11-river-network-connectivity-with-MIKE-21-cells-in-MIKE-FLOOD-To-view-a-colour_fig3_254245123
- Researchgate* . (2017). Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FInput-data-used-in-SRH-1D-simulations-of-the-Tachia-River-where-the-black-circles_fig2_321262107&psig=AOvVaw03RjmYbdorfYLHr3NdbCdv&ust=1670168445958000&source=images&cd=vfe&
- Researchgate* . (2019). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-31-Eschema-del-dominio-unidimensional-con-cambio-de-fase-unicamente-con-difusii_fig2_303975194
- Scielo*. (2016). Modelo de ecuaciones estructurales .
- Slide Serve* . (2014). Obtenido de <https://www.slideserve.com/ronny/srh-1d-sedimentation-and-river-hydraulics-in-one-dimension>
- SlidePlayer* . (2016). Obtenido de <data:image/jpeg;base64,/9j/4AAQSkZJRgABAQAAQABAAD/2wCEAAkGBxASEBMTExEEhUWGBYVFRUVFRYSGBUVFRYZGBUZFRRYHSGgGBolHBUVIjEhJSkrLi4uFx8zODMtNygtLisBCgoKDg0OGxAQGisLICUtKy0yMi0tLS0rLystLS0tLS8tLS0vLS0tLS0tLS0vLS0tLS0tLS8tLS0tLS0tLS0tLf/AABEIAMIBAwMBIgACEQEDEQH/>
- Store Innovyze* . (2022). Obtenido de https://store.innovyze.com/WaterDistribution/InfoWoWSP?cclcl=en_US
- Stum. (1976). *El flujo de fluidos* .
- Tecno Cruzfiero*. (2020). Obtenido de <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/viscosidad.pdf>
- Uk, E. A. (2009).
- University, C. S. (2018). *Courserhero*. Obtenido de <https://www.coursehero.com/file/p79olmg/Esquema-de-MacCormack-El-esquema-de-MacCormack-Lyon-LavanteThompkins-para-una/>
- US Army Corps of Engineers* . (2015). Obtenido de <https://www.usace.army.mil/>
- Usbr* . (2014). Obtenido de https://www.usbr.gov/research/projects/download_product.cfm?id=224
- Usgs Science for a changing world* . (2014). Obtenido de <https://water.usgs.gov/software/PeakFQ/>
- Victor M. Ponce, R.-M. D. (2015). *Ponce Sdsu*. Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/aplicabilidad_de_los_modelos_de_onda_cinematica_y_difusiva.html#:~:text=El%20modelo%20cinem%C3%A1tico%20supone%20que,de%20presiones%2C%20fricci%C3%B3n%20y%20gravedad.

Victor Ponce, H. I. (2019). *Ucn Sdsu*. Obtenido de
http://uon.sdsu.edu/convergencia_de_modelos_implicitos_de_cuatro_puntos_de_flujo_no_permanente_en_canales.html
Water resources publications, LLC. (2008). Obtenido de
<https://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/indexhyfranplus3.html>