

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SOLUCIÓN DE LAS
ECUACIONES DE SAINT-VENANT UNIDIMENSIONALES PARA FLUJO
GRADUALMENTE VARIADO NO PERMANENTE EN CANALES ABIERTOS

CRISTIAN DAVID OSORIO ÁLVAREZ

LUIS DAVID NIÑO VARÓN

Trabajo de investigación para adquirir el título de Ingeniero Civil

Asesor

Leandro Duran Santana

Msc. en recursos hídricos

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

BOGOTA D.C

2025

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	5
2. PROBLEMÁTICA	6
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	7
4. PREGUNTA	9
5. OBJETIVOS.....	10
6. ESTADO DEL ARTE.....	11
7. MARCO TEÓRICO.....	12
8. MARCO CONCEPTUAL.....	14
9. METODOLOGÍA.....	15
10. CRONOGRAMA	19
11. PRESUPUESTO DEL TRABAJO DE GRADO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN	19
12. PRODUCTOS A ENTREGAR.....	20
13. ALCANCE Y LIMITACIONES	20
14. BIBLIOGRAFÍA.....	22

Lista de Figuras

Figura 1. Relación causa y efecto entre condiciones de entrada y resultados15

Lista de Tablas

Tabla 1. Cronograma	19
Tabla 2. Presupuesto del trabajo de grado y fuentes de financiación.....	20

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las inundaciones se han pronunciado con mayor frecuencia a nivel global y regional, afectando a millones de personas y generando grandes pérdidas económicas. Estudios de organismos como la OMM, el BID y la CEPAL evidencian que los modelos hidráulicos tradicionales no capturan la dinámica real de los canales sometidos a variaciones temporales y espaciales importantes. Este vacío en la capacidad de predicción motiva el origen de la presente investigación, donde se busca construir una herramienta computacional de código abierto y gratuito que resuelva las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant para flujo gradualmente variado no permanente en canales abiertos.

Comúnmente, el análisis hidráulico se ha basado en modelos simplificados de flujo permanente o uniforme; sin embargo, estos resultan insuficientes para describir situaciones reales donde predominan variaciones temporales y espaciales significativas. En este contexto, las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant constituyen una herramienta fundamental para la representación del flujo gradualmente variado no permanente.

No obstante, su carácter no lineal dificulta la obtención de soluciones analíticas, lo que ha impulsado el desarrollo de métodos numéricos y herramientas computacionales cada vez más robustas.

En este marco, el presente proyecto tiene como propósito el desarrollo de una herramienta computacional de código abierto para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en condiciones de flujo no permanente. La implementación se llevará a cabo mediante métodos numéricos robustos y verificación con casos académicos de referencia, con el fin de garantizar precisión, estabilidad y confiabilidad en los resultados. El modelo resultante no solo busca fortalecer las capacidades académicas e investigativas en hidráulica computacional, sino también aportar una herramienta práctica para la ingeniería civil en la planificación y mitigación de riesgos por inundaciones en Colombia y Latinoamérica.

2. PROBLEMÁTICA

Globalmente, según informa la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los desastres por inundación se dispararon, un alarmante incremento del 134% desde el 2000, respecto a las dos décadas anteriores [1]. El aumento en los eventos de inundación es notable, observándose en la región latinoamericana durante las décadas recientes. Varios estudios de organismos multilaterales evidencian que las inundaciones son el desastre climático más común en Latinoamérica. Por ejemplo, el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), quién señala que, entre 2000 y 2022, las inundaciones fueron casi el 60% de los desastres meteorológicos reportados, con un impacto que afectó un promedio de 2 millones de personas anualmente, además, generó pérdidas económicas por encima de los 30.000 millones de dólares [2]. Latinoamérica, a este respecto, muestra una vulnerabilidad significativa: de acuerdo con la CEPAL, tanto la frecuencia como la magnitud de los eventos extremos se han intensificado, atribuido esto al calentamiento global [3].

Mientras, en Colombia, debido a su geografía tropical y a la variabilidad climática, experimenta patrones de lluvias muy particulares, dos temporadas anuales, y esto la hace sensible al fenómeno ENSO. Se ha visto en los últimos años, un incremento en los eventos de inundación que se asocian tanto a La Niña como a las lluvias extremas locales.

Evaluando los efectos y pérdidas de la ola invernal entre 2010 y 2011, según el BID y CEPAL, la afectación total suma unos 11,2 billones de pesos. Esto equivale a 6.052 millones de dólares, con 6,9 billones reflejando un impacto significativo en el capital productivo [4]. Aparte, la temporada invernal 2021-2022 golpeó a más de 1'015.000 personas y causó daño a 311.555 viviendas en el país [5]. En mayo de 2024, con lluvias intensas, se reportaron 350 emergencias por inundaciones en 27 departamentos. Hubo 85.893 personas damnificadas, 14.699 viviendas sufrieron daños y 297 se demolieron. Aparte, 13 individuos fallecieron y 31 quedaron heridos [6].

Estas estadísticas claramente demuestran un aumento de las inundaciones en Colombia, con un numero de damnificados creciente y daños materiales anuales muy grandes. Modelos hidráulicos clásicos, que postulan flujos constantes o uniformes, no reproducen fielmente el comportamiento dinámico de los canales. Aquí, existen cambios temporales y espaciales significativos. Para estas circunstancias, el flujo gradualmente variado no permanente se modela a través de las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales, estas incorporan la inercia, fricción, y pendiente.

Las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant, son no lineales, y presentan obstáculos significativos al resolverlas, lo que demanda métodos numéricos de alta robustez y eficiencia. Implementarlos en código de programación se vuelve esencial para crear una herramienta de simulación de escenarios hidráulicos, optimizar el diseño de canales y, crucialmente, prever eventos peligrosos como inundaciones.

Modelos hidráulicos convencionales, basados en la simplificación del flujo constante o uniforme, muestran deficiencias claras al simular el comportamiento real de flujos canalizados, en contextos con cambios espaciotemporales importantes. Esta investigación propone resolver esta necesidad con un modelo que, escrito en código abierto, es totalmente accesible.

Palabras clave: Ecuaciones de Saint-Venant, Flujo no permanente, Modelo numérico, Código abierto, Canales abiertos, Método numérico.

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

3.1 Antecedentes

Las ecuaciones de Saint-Venant se originaron en 1871, cuando el ingeniero francés Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant formuló un conjunto de ecuaciones de tipo de ecuaciones diferenciales parciales, para representar el flujo no permanente de canales. Las ecuaciones de Saint-Venant son las ecuaciones de aguas poco profundas que explican el principio de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Estas se pueden utilizar para representar los procesos de onda de crecida, el tránsito de avenidas, la propagación de inundaciones, así como la interacción entre cauces y llanuras aluviales. Durante el siglo XX, la solución de estas ecuaciones se centró en métodos analíticos simplificados y posteriormente en aproximaciones numéricas con modelos computacionales, lo que permitió la aparición de modelos hidráulicos más completos [7].

El primero en aparecer fue TUFLOW, este modelo nació entre 1989 y 1990 como fruto de un proyecto conjunto de investigación y desarrollo entre WBM Pty Ltd y la Universidad de Queensland (Australia). El objetivo era construir un sistema de modelado 2D que se vinculara dinámicamente con un modelo unidimensional. El desarrollo culminó en una herramienta profesional y robusta, lanzada comercialmente hacia 2001. Su esquema ADI clásico se complementa con métodos de volúmenes finitos de alto orden para versiones más avanzadas, lo que ha consolidado su rol en evaluaciones detalladas de inundaciones en Australia, Reino Unido y EE. UU [8].

Posterior a 1990 El River Analysis System (HEC-RAS) fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, diseñado como sucesor de los antiguos sistemas HEC-2 y UNET. La versión 1.0 fue lanzada en 1995, con el objetivo de integrar flujos estacionarios, no estacionarios y transporte de sedimentos bajo una interfaz gráfica en Windows, aprovechando una arquitectura basada en Fortran 90 y Visual Basic; su difusión gratuita permitió su rápida adopción en ingeniería fluvial e hidráulica río abajo, con mejoras continuas que llegaron hasta la versión 5.0 (con modelado 2D incluido en 2016) y más allá [9].

A principios del 2000 el modelo LISFLOOD-FP fue inicialmente desarrollado por Paul Bates (Universidad de Bristol) junto con Adam P.J. De Roo (Centro Común de Investigación de la UE). Diseñado para simular inundaciones en llanuras aluviales de manera rápida y eficiente, que combina dinámicas 1D en cauces con flujos 2D en la superficie. Desde 2010, ha sido ofrecido como código abierto, con múltiples versiones y evoluciones académicas impulsadas por el equipo de Bates, incluyendo participación de investigadores como Horritt, Hunter, Neal, Sampson y De Almeida. Además, LISFLOOD se integró en sistemas operacionales como EFAS, para pronóstico de inundaciones a nivel europeo [10].

Después de muchos años de distribución comercial, en enero de 2010 se constituyó formalmente un consorcio, denominado Consorcio TELEMAC-MASCARET, con el objetivo de gestionar la distribución del sistema TELEMAC-MASCARET como software de código abierto, el cual ahora se encuentra disponible bajo la licencia GPLv3. [11].

Y por último en 2010 Iber fue desarrollado en España a partir de una colaboración entre Flumen (UPC), GEAMA (Universidad de A Coruña), CIMNE, CEDEX y otras instituciones. Se diseñó como una herramienta 2D en volúmenes finitos sobre mallas no estructuradas para abordar flujos libres, ruptura de presas, dinámica sedimentaria y calidad del agua, con soporte para procesos ambientales y hábitat fluvial. Iber es gratuito para investigación y docencia, y ha sido empleado en múltiples estudios comparativos e implementaciones en entornos ibéricos [12].

3.2 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación, centrada en la construcción de un modelo numérico de código abierto, explorará la resolución de las ecuaciones de

Saint-Venant unidimensionales, específicamente aplicadas a flujos no permanentes. Este estudio se motiva en la búsqueda de alternativas a los modelos comerciales existentes, aquejados por código cerrado y costos prohibitivos.

Esto no solo dificulta el acceso a estas herramientas, sino que también frena la planificación hidráulica en regiones propensas a inundaciones un problema serio. Esta investigación busca manejar el riesgo hídrico contra inundaciones, centrada en Colombia y Latinoamérica, un área geográfica en especial vulnerable, donde el cambio climático y fenómenos como La Niña, aumentan la frecuencia e intensidad de los eventos. Un modelo de acceso simple y gratuito que permite predecir escenarios posiblemente peligrosos y a la vez, optimiza el diseño de infraestructuras hidráulicas.

Este enfoque también promueve medidas preventivas basadas en análisis técnicos que hasta ahora no se habían abordado. Considerase esta investigación una valiosa contribución al ámbito de la hidráulica computacional y al desarrollo de herramientas libres que son de utilidad para la investigación académica, como también, para su empleo en la ingeniería civil.

4. PREGUNTA

¿Cómo el desarrollo de un modelo numérico de código abierto puede solucionar las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en flujo no permanente, que permita representar la dinámica del flujo en canales y cauces fluviales?

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general:

Construir un modelo numérico de código abierto y gratuito para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales, en condiciones de flujo no permanente, para el moldeamiento de la dinámica del flujo en canales y cauces fluviales.

5.2. Objetivos específicos:

1. Revisar el estado del arte sobre la solución de las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales, por medio de métodos numéricos, en la modelación hidráulica de flujo gradualmente variado no permanente, identificando limitaciones y oportunidades de mejora.
2. Implementar por medio de un lenguaje de programación, un modelo computacional, basado en métodos numéricos robustos que resuelva las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en condiciones no permanentes, asegurando estabilidad y precisión en los resultados.
3. Verificar la exactitud del modelo desarrollado mediante la comparación con casos académicos (benchmark) que permita determinar la calidad de los resultados del modelo.

6. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se presentan las investigaciones más relevantes sobre la solución numérica de las ecuaciones Saint-Venant unidimensionales para flujo no permanente en canales abiertos. Se tuvieron en cuenta estudios desarrollados en la última década que aportan información sobre métodos numéricos, variaciones con respecto al terreno, validaciones y aplicaciones en gestión de inundaciones.

En el ámbito internacional, I. Magdalena, R. Imawan, y M. A. Nugroho (2024) publicaron “Numerical investigation for water flow in an irregular channel using Saint-Venant equations”, donde proponen un modelo numérico para simular flujo de agua en canales, con el objetivo de desarrollar y validar un modelo numérico que simule la evolución del flujo en canales irregulares usando las ecuaciones de Saint-Venant; y resolvieron las ecuaciones numéricamente mediante un método de volúmenes finitos en malla escalonada, después introdujeron un método de suma de Riemann para aproximar áreas en secciones irregulares. Finalmente realizaron la validación a partir de ensayos de laboratorio y comparación con resultados en HEC-RAS, obteniendo así que la técnica propuesta es robusta para representar canales irregulares.

Otros trabajos complementan esta línea como es el de Hu Pengbo et al. (2019) quienes propusieron un método para construir la topografía del lecho fluvial a partir de datos de secciones transversales limitados, mejorando la fidelidad del relieve cuando no hay DEM de alta resolución, este método lo llaman Quartic Hermite Spline with Parameter (QHSP), los resultados los contrastan frente a métodos existentes mediante pruebas de resistencia sintéticas y obtienen que la reconstrucción con QHSP mejora la exactitud del terreno interpolado.

Esto mejora la representación espacial en simulaciones de inundación, el problema es que aumenta los requerimientos de datos y procesamiento directamente relacionados al compromiso entre fidelidad geométrica y exigencia computacional. Por eso el presente proyecto se enfoca en un ámbito unidimensional, eficiente y de libre acceso.

Con respecto a implementación numérica, B. A. Sulistyono, L. H. Wiryanto, y S. Mungkasi (2020) presentaron un esquema diseñado para aguas poco profundas en canales con topografía y ancho variables, donde desarrollaron un método numérico capaz de resolver las ecuaciones de aguas someras unidimensionales para canales con sección rectangular no uniforme, y obtienen que la técnica que propusieron resuelve adecuadamente problemas unidimensionales con topografía y ancho variable, ya que, muestran que valores altos de fricción reducen significativamente

la velocidad y aumentan la profundidad, lo cual son resultados consistentes con la física esperada.

Frente a un contexto colombiano, Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., y Sánchez Ortiz, E. A. (2015) analizaron el comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en diversas condiciones de régimen y pendiente, con el objetivo de proponer un esquema de solución simple y útil para ingeniería, a través de experimentaciones numéricas computacionales sobre un tramo de cauce con distintas pendientes comparando y analizando la respuesta de las ecuaciones en régimen permanente y no permanente. Dándonos referencias locales para la calibración y validación de modelos hidráulicos en la región. De forma similar el artículo realizado por A. J. C. Aragón y G. A. Peña-Olarte. (2019) nos brinda una evaluación práctica de como la velocidad media bajo condiciones de flujo uniforme se ve afectada por la geometría del cauce, pendiente y rugosidad. En su investigación analizaron como varia la velocidad media en cauces naturales en estado estable a partir de la ecuación de Chezy-Manning frente a cambios en factores geométricos y morfodinámicos como el radio hidráulico, pendiente y rugosidad, obteniendo que la variación más sensible de la velocidad media está influenciada principalmente por la pendiente, y aunque los cambios en el radio hidráulico y la rugosidad producen efectos menores estos no son despreciables. Aunque este artículo aborda condiciones en flujo uniforme, nos permite contrastar los valores de velocidad media y rugosidad sirviendo como benchmark local.

Con base a la literatura consultada se puede evidenciar como los modelos existentes han permitido grandes avances en la representación de modelos hidráulicos, pero persisten limitaciones con respecto a la adaptabilidad de estos modelos a contextos latinoamericanos, lo que justifica el desarrollo de un modelo propio que combine robustez numérica, accesibilidad y aplicabilidad a escenarios que presentan condiciones extremas.

7. MARCO TEÓRICO

De acuerdo con [18, pp. 3-14], la dinámica del agua en canales abiertos constituye un dominio importante en hidráulica, vital para proyectar y administrar la infraestructura hídrica. La complejidad del flujo se aborda mediante una clasificación de sus estados, con las fluctuaciones de profundidad y velocidad, tanto en el tiempo como en el espacio.

El flujo en canales se categoriza, primordialmente, según la alteración de sus parámetros clave:

Flujo Uniforme (FU): Representa la situación más sencilla, tanto la profundidad del flujo (y) como la velocidad media (V), permanecen estables en el espacio (x) y en el tiempo (t). Implícitamente, la pendiente de fricción (S_f), la pendiente de la superficie libre (S_w), y la pendiente del fondo del canal (S_o) resultan iguales, expresándose matemáticamente $S_o=S_w=S_f$. La profundidad específica, bajo tales circunstancias, recibe la denominación de tirante normal (y_n).

Flujo Gradualmente Variado (FGV): Se caracteriza por una variación suave, gradual de la profundidad a lo largo del canal, mientras el flujo se asume permanente (es decir, las variables no cambian con el tiempo, $\partial y/\partial t=0$ y $\partial V/\partial t=0$). Este tipo de régimen se modela usando la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado, que es esencialmente una versión simplificada de la ecuación de momentum de Saint-Venant.

Flujo Rápidamente Variado (FRV): Por otro lado, el FRV, muestra un cambio brusco, notorio en la profundidad y velocidad en una distancia espacial corta. Este tipo de flujo suele exhibir turbulencias y aceleraciones verticales considerables. El salto hidráulico representa el ejemplo más característico.

Como se demostró en [18, pp. 515-533] Para modelar la dinámica del flujo no permanente, es decir, aquel en el que las variables cambian con el tiempo, y que además es un flujo unidimensional y gradualmente variado, se utilizan las Ecuaciones de Saint-Venant. Estas ecuaciones se derivan aplicando los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, lo que da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de tipo hiperbólico. En el caso de un flujo unidimensional, normalmente se expresan en términos del área mojada $A(x,t)$ y del caudal $Q(x,t)$, o bien, en función de la profundidad del flujo $y(x,t)$ y de la velocidad promedio $V(x,t)$. En su forma no conservativa, para un canal de ancho superficial T , se tiene:

Ecuación de Continuidad (Conservación de la Masa):

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

Ecuación de Cantidad de Movimiento (Conservación del Momentum):

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

Donde:

- A : Área mojada.
- Q : Caudal ($Q=V \cdot A$).

- V: Velocidad media.
- y: Profundidad (tirante).
- x: Coordenada espacial longitudinal.
- t: Tiempo.
- g: Aceleración de la gravedad.
- S0: Pendiente del fondo del canal.
- Sf: Pendiente de fricción

Dado que las ESV no son lineales, generalmente no tienen solución analítica y deben resolverse mediante métodos numéricos. Los enfoques se centran en resolver el sistema unidimensional discretizando el dominio espacio-temporal.

El Método de Diferencias Finitas (MFD), es uno de los enfoques más clásicos, se basa en el reemplazo de las derivadas parciales de las EDP por diferencias finitas, implementado sobre una malla discreta en espacio (Δx) y en tiempo (Δt).

La aproximación de las derivadas se consigue a través de cocientes de diferencias entre los valores de la función evaluados en puntos discretos de la malla. Esto es común tanto en esquemas explícitos, (por ejemplo, el esquema de Lax) o implícitos (por ejemplo, el esquema de Crank-Nicolson, que es incondicionalmente estable).

El Método de Volúmenes Finitos (MVF), es un enfoque más moderno, se aplica a las EDP expresadas en su forma conservativa. Es particularmente importante para tratar discontinuidades, por ejemplo, saltos hidráulicos en el flujo rápido, porque garantiza la preservación precisa de la masa y el momentum en cada celda, también conocida como volumen de control.

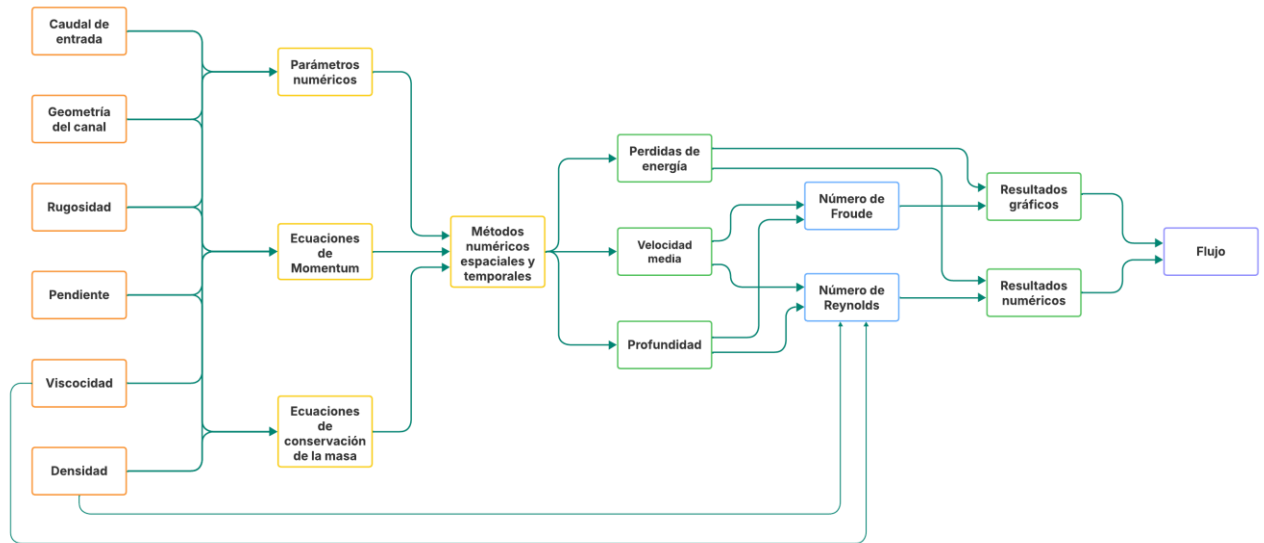
El dominio unidimensional se divide en celdas, y las ecuaciones se integran en cada volumen. Los flujos de masa y momentum se calculan en las interfaces de las celdas, utilizando a menudo técnicas basadas en solucionadores de Riemann [19].

8. MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual del presente proyecto se fundamenta en los principios físicos y matemáticos que rigen el comportamiento del flujo en canales abiertos dentro de un marco de modelación unidimensional. A partir de las condiciones de entrada, se estructuran las ecuaciones de conservación de la masa y de momentum que al momento de resolverlas permiten obtener magnitudes como pérdidas de energía, velocidad media y profundidad. Los resultados derivados del proceso, tanto gráficos

como numéricos, proporcionan una representación integral del flujo, facilitando su análisis y la verificación de la herramienta computacional que se va a desarrollar.

Figura 1. Relación causa y efecto entre condiciones de entrada y resultados.



Fuente. Propia.

9. METODOLOGÍA

La presente investigación adoptará un enfoque cuantitativo-computacional para desarrollar una herramienta de código abierto que resolverá las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en condiciones de flujo no permanente. Se implementará una metodología sistemática que combinará la revisión bibliográfica especializada, el desarrollo algorítmico, la programación en lenguaje Fortran, y la validación computacional mediante casos benchmark reconocidos en la literatura hidráulica. Para lograr los objetivos de la investigación, ejecutaremos actividades distribuidas en cuatro capítulos metódicos, que facilitarán el desarrollo sistemático y meticuloso de la herramienta computacional sugerida.

Capítulo 1: Recopilación de Información

Se realizará una exhaustiva búsqueda científica iniciando con la consulta de libros especializados fundamentales incluyendo "Hidráulica de canales abiertos" de Ven Te Chow [18], el libro "Introducción a la hidráulica de canales" de Carlos Duarte [20], para fundamentos teóricos de flujo en canales. Para métodos numéricos aplicados, el libro "Computational Fluid Dynamics for Engineers" de J. Xamán y M. Gijón-Rivera [19].

Posteriormente se consultarán bases de datos académicas especializadas mediante búsquedas sistemáticas en Scopus utilizando las palabras clave "Saint-Venant equations" AND "finite difference" AND "unsteady flow", en ScienceDirect buscando "Saint-Venant" AND "validation", en ASCE Library con "hydraulic modeling" AND "benchmark cases" AND "Saint-Venant". Durante esta fase se procederá a identificar y catalogar sistemáticamente los métodos numéricos más robustos reportados y se analizarán comparativamente las limitaciones computacionales.

De manera complementaria, se recopilarán y examinarán manuales técnicos de software hidráulico reconocido internacionalmente tales como HEC-RAS, TELEMAC, TUFLOW, LISFLOOD-FP e Iber, los cuales, además de servir como referencia metodológica, permitirán catalogar los métodos numéricos más robustos empleados y las estrategias de implementación algorítmica utilizadas en cada caso. La inclusión de estos manuales permitirá construir un cuadro comparativo de fortalezas y limitaciones, en el que se evaluarán aspectos como la precisión en diferentes regímenes de flujo, el tratamiento de condiciones de frontera, la gestión de discontinuidades hidráulicas y las exigencias computacionales asociadas.

Capítulo 2: Algoritmo de Programación

La secuencia algorítmica iniciará con el procedimiento de lectura y validación de datos de entrada que incluirá la verificación de consistencia dimensional de parámetros geométricos del canal (ancho, pendiente, rugosidad de Manning), validación de rangos físicos para condiciones iniciales (profundidad > 0 , velocidad finita). Después se realizará la discretización del espacio dividiendo la extensión total del canal en celdas o nodos para los cálculos. Esto ayudará a representar matemáticamente la forma del cauce y establecer una base sólida para aproximaciones numéricas.

Luego se calcularán propiedades geométricas básicas en cada celda incluyendo áreas hidráulicas perímetros mojados y radios hidráulicos, ya que esto, es fundamental para las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento del modelo. Finalmente se inicializarán las variables de cálculo, o sea asignando valores iniciales a la profundidad y caudal en todo el dominio e implementando las condiciones de frontera al principio y final del canal.

Luego de fijar la base, se iniciará el manejo del paso temporal, este cambiará el tiempo de cálculo, dependiendo de la estabilidad y la convergencia. Tal control asegura un equilibrio algorítmico entre precisión numérica y eficiencia computacional. Dentro del bucle temporal, se repetirá la actualización de variables hidráulicas, a cada iteración, se reunirán los términos de masa y momento. Luego

se fijarán las fronteras, cambiando valores internos y verificando la estabilidad y conservación física. Paralelamente, habrá rutinas de almacenamiento de resultados, para las principales variables del flujo, estas variables quedarán disponibles en intervalos regulares, para análisis y comparación con casos de referencia.

Y finalmente, se hará un diagrama de flujo que resuma todo el procedimiento algorítmico de la lectura de datos iniciales, hasta obtener los resultados, buscando coherencia en la estructura del programa y facilitando su futura implementación en lenguaje de programación.

Capítulo 3: Desarrollo del Código Computacional

El desarrollo del código computacional procederá utilizando un lenguaje de programación, que permitirá la estructuración modular de las rutinas necesarias para la resolución de las ecuaciones propuestas. En esta etapa, se organizarán los procedimientos en submódulos aislados, abarcando lectura de datos, cálculos geométricos, la aplicación de condiciones de frontera, la ejecución de los esquemas de cálculo, y el post-procesamiento de resultados. Tal división ayudará en la comprensión del algoritmo, mientras simultáneamente brindará flexibilidad para expansiones o modificaciones futuras.

Dentro de la lógica del programa se emplearán de manera recurrente bucles que permitirán recorrer de forma sistemática todas las celdas del dominio espacial y todos los pasos de tiempo de la simulación. Dichos bucles operaran como el núcleo estructural, que hará viable la actualización progresiva de las variables hidráulicas en cada lapso temporal. El diseño procurará eficiencia y claridad, asegurando la estabilidad programática, incluso frente a escenarios de mayor complejidad. Del mismo modo, se habilitarán condicionales que funcionarán como mecanismos de control dentro del flujo de instrucciones.

Estos aspectos serán útiles para asegurar que los parámetros físicos se mantengan dentro de límites permisibles, también, para distinguir el tratamiento en secciones específicas del canal, y para manejar las condiciones de contorno, según la naturaleza del flujo que ingresa o sale del sistema. Los condicionales posibilitarán insertar alertas o mensajes de error cuando se descubran inconsistencias en los datos, o también, en resultados intermedios.

El programa incluirá una rutina de manejo de errores diseñada a detener la ejecución si surgen fallas en el código, asimismo, con procedimientos de registro informarán al usuario sobre el avance de los cálculos y sobre circunstancias que

merezcan especial atención. De esta manera, la herramienta ofrecerá no solo una solución matemática, sino también una interfaz de uso seguro y confiable.

Por último, la fase de desarrollo concluirá con la integración de todos los módulos en una estructura coherente. Un núcleo, que será una subrutina principal responsable de coordinar la ejecución de cada bloque. El resultado será un código organizado, legible y preparado para someterse a las pruebas de verificación que se abordarán en el siguiente capítulo.

Capítulo 4: Verificación de la Herramienta Computacional

La fase de revisión de la herramienta computacional se encargará de que los resultados que dé el modelo creado sean estables, coherentes y físicamente consistentes. Para lograr esto, se hará una prueba interna usando ejemplos de libros de hidráulica consolidados, que serán la guía para la comparación.

Durante la verificación, se compararán variables hidráulicas clave, como el tirante de agua, la velocidad media y el caudal a lo largo del canal. Estas variables se compararán con los valores que hay en los libros de estudio, para ver la concordancia y la precisión que ha alcanzado la herramienta computacional.

Para medir esta comparación, se utilizarán métricas de desempeño que son comúnmente aceptadas en la modelación numérica. Estas métricas ayudarán a evaluar la proximidad entre los resultados obtenidos de los datos de referencia.

Además, se realizarán análisis de sensibilidad variando la discretización espacial, el paso temporal y los coeficientes de rugosidad, con el objetivo de observar cómo responde el modelo ante cambios en los parámetros de entrada. De esta forma, nos aseguramos de que el sistema siga siendo estable y de que los resultados tengan sentido físico en diferentes situaciones.

Con todas estas revisiones, la herramienta computacional no solo mostrará que sirve en contextos académicos, sino que también estará listo para usarse en casos reales de análisis hidráulico.

10. CRONOGRAMA

Tabla 1. Diagrama de Gantt: Control de actividades.

	Septiembre 2025				Octubre 2025				Noviembre 2025				Febrero 2025				Marzo 2025				Abril 2025			
Actividades / Tiempo en semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica en bases de datos																								
Análisis de modelos numéricos existentes																								
Diseño del algoritmo de programación en Fortran																								
Identificación de variables, condiciones de frontera y parámetros geométricos																								
Codificación en lenguaje Fortran del modelo numérico																								
Pruebas de estabilidad y coherencia del código																								
Selección y descripción de casos de verificación																								
Definición de parámetros																								
Simulación y validación con casos benchmark																								
Análisis de resultados y evaluación de desempeño																								
Calibración y ajustes finales del modelo																								

Fuente. Propia.

11. PRESUPUESTO DEL TRABAJO DE GRADO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

El presupuesto para la propuesta de investigación es el siguiente:

Tabla 2. Presupuesto del trabajo de grado y fuentes de financiación.

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario (COP)	Valor Total (COP)	Fuente de Financiación
1	Horas de investigación (revisión bibliográfica, codificación, análisis)	340	Hora	\$ 5.000	\$ 1.700.000	Aporte propio
2	Computador portátil (capacidad para programación y simulaciones)	1	Unidad	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000	Aporte propio
3	Licencias y software como Fortran, Python, Visual Studio (versiones gratuitas)	1	Paquete	\$ 0	\$ 0	Gratuito (software libre)
4	Servicios de energía e internet durante el desarrollo del código	6	Mes	\$ 130.000	\$ 780.000	Aporte propio

5	Material bibliográfico (libros especializados, artículos, descargas de bases de datos académicas)	10	Documentos	\$ 0	\$ 0	Biblioteca universitaria, bases de datos online
7	Transporte a la universidad (reuniones con asesor, presentaciones de avance)	350	Viajes en transmilenio	\$ 3.200	\$ 1.120.000	Aporte propio

Fuente. Propia.

12. PRODUCTOS A ENTREGAR

De acuerdo con los objetivos específicos planteados, se presentarán los siguientes resultados, mostrando el avance y el cumplimiento de la investigación.

Para empezar, como resultado del objetivo uno, se entregará un informe de revisión bibliográfica, agrupando el conocimiento actual sobre las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant y sus métodos numéricos para resolverlas. Este documento incluirá una compilación de estudios importantes, las herramientas de computación disponibles, sus problemas y que áreas se pueden mejorar.

En relación con el objetivo dos, se ofrecerá un modelo informático capaz de resolver las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant utilizando un método numérico particular. Este entregable involucrará la creación del algoritmo básico del modelo y su implementación en un lenguaje de programación, mostrando resultados iniciales que faciliten la evaluación de su funcionamiento general y su estabilidad numérica.

Para concluir, como resultado del objetivo específico 3, se hará un informe de verificación del modelo, donde se confrontarán los resultados arrojados por la herramienta computacional con aquellos de casos de referencia encontrados en la literatura técnica. Examinado bajo las condiciones de flujo predefinidas, confirmando su validez y utilidad en futuros usos y aplicaciones.

13. ALCANCE Y LIMITACIONES

13.1. Alcance

La investigación va a centrarse en la creación de un modelo numérico unidimensional para mostrar el comportamiento del flujo gradualmente variado no permanente en canales abiertos. Para esto, se implementarán las

ecuaciones unidimensionales de Saint Venant. Este estudio requerirá una revisión teórica a fondo de los métodos numéricos más utilizados en la literatura, además de crear y verificar una herramienta computacional. Esta herramienta facilitará la simulación de diferentes condiciones de flujo.

El alcance del proyecto se orienta hacia el fortalecimiento del conocimiento en hidráulica computacional y la modelación numérica, centrándose en la comprensión de la formulación, codificación, y validación de las ecuaciones de flujo en un contexto académico. Por lo tanto, la investigación se limitará al desarrollo conceptual y computacional del modelo, además de la verificación con casos de referencia. Pero, no incluirá aplicaciones prácticas ni simulaciones con datos reales. De esta manera, el estudio busca brindar una base fundamental, para impulsar futuros avances en la modelación hidráulica.

13.2. Limitaciones

La investigación estará delimitada temporalmente al periodo de desarrollo del trabajo de grado durante el año 2026. El modelo, se empleará únicamente en situaciones de flujo controlado, usando datos teóricos o de estudios ya publicados, no se hará uso de mediciones experimentales ni de campo.

En cuanto a su alcance técnico, el modelo será unidimensional, lo cual, evitará el análisis de efectos tridimensionales o eventos tales como el transporte de sedimentos, la erosión, o la calidad del agua. Además, la herramienta computacional se creará en un entorno de programación sencillo, priorizando la funcionalidad básica sobre el diseño visual y la complejidad operativa.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres.* (s. f.). México. <https://mexico.un.org/es/155387-sequ%C3%ADas-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-clim%C3%A1tico-dominan-la-lista-de-desastres#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20desde%20al%20a%C3%B1o%20200%2C,los%20sistemas%20de%20alerta%20temprana>
- [2]. Latino, P. (2025, 15 agosto). *Ciudades resilientes: cerrando la brecha en América Latina y el Caribe.* Panorama Latino. <https://revistapanoramalatino.com/expertos-y-columnistas/riesgo-de-inundaciones/#:~:text=Por%20Impact%20Report%20Team,UNDRR%2C%202023>
- [3]. *Acerca de cambio climático.* (s. f.). Comisión Económica Para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/temas/cambio-climatico/acerca-cambio-climatico#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20ha%20intensificado,y%20la%20disponibilidad%20de%20agua>
- [4] *Valoración de daños y pérdidas: Ola invernal en Colombia 2010-2011.* (2012, enero). CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/ola_invernal_colombia_2010-2011_0.pdf
- [5]. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), Fondo Adaptación & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2024). *Evaluación de daños, pérdidas e impactos asociados a la ocurrencia del Fenómeno de La Niña 2021–2023 en Colombia* [PDF]. UNGRD. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Manejo/EVALUACION-DANOS-PERDIDAS-IMPACTOS-FENOMENO-LA-NINA.pdf>
- [6]. *Colombia registró 350 emergencias por lluvias en mayo.* (s. f.). <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2024/Colombia-registro-350-emergencias-por-lluvias-en-mayo.aspx#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20informe,5%20hecta%CC%81reas%20afectadas>
- [7]. “Jean Claude Saint-Venant,” Maths History. <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Saint-Venant/> (accedido 18 de septiembre de 2025).
- [8]. BMT, TUFLOW Flood, Urban Stormwater & Coastal Simulation Software, Brisbane, Australia: BMT Group, 2018. [Online]. Available:

https://www.bmt.org/media/3671/tfl_001_180306_tuflow_aus_brochure_doublepag_e_email.pdf

[9]. V. Moya, "Datos sobre la evolución de HEC-RAS," iAgua, Oct. 17, 2016. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/vladimir-moya/datos-evolucion-hec-ras>

[10]. X. Wu, Z. Wang, S. Guo, C. Lai, and X. Chen, "A simplified approach for flood modeling in urban environments," *Hydrology Research*, vol. 49, no. 6, pp. 1804–1816, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.149>

[11]. Hydro-Informatics, «TELEMAC», TELEMAC. <https://hydro-informatics.com/numerics/telemac/telemac.html> (accedido 4 de septiembre de 2025).

[12]. Iber, «Iber», Iberaula. <https://www.iberaula.es/50/the-project/presentation> (accedido 4 de septiembre de 2025).

[13]. I. Magdalena, R. Imawan, y M. A. Nugroho, «Numerical investigation for water flow in an irregular channel using Saint-Venant equations», *Journal Of King Saud University - Science*, vol. 36, n.o 7, p. 103237, may 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103237>

[14]. P. Hu, J. Hou, Z. Zhi, B. Li, and K. Guo, "An improved method constructing 3D river channel for flood modeling," *Water*, vol. 11, no. 3, p. 403, Feb. 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/w11030403>

[15]. B. A. Sulistyono, L. H. Wiryanto, and S. Mungkasi, "A Staggered Method for Simulating Shallow Water Flows along Channels with Irregular Geometry and Friction", *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 952–958, Jun. 2020. doi: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.3.7413>

[16]. Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Revista Tecnura*, 19(45), 75-87. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a06>

[17]. A. J. C. Aragón and G. A. Peña-Olarte, "Determination of the factors of variation of mean velocity in natural channels at steady state.," *DYNA*, vol. 86, no. 210, pp. 240-246, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.78860>

[18]. V. Chow. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, 1994, capítulo 1, pp. 3-14, pp. 515-533.

[19]. J. Xamán y M. Gijón-Rivera, *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*, Palibrio, 2015, capítulo 3 y capítulo 4.

[20] C. A. Duarte Agudelo, *Introducción a la hidráulica de canales*, 4ta. edición. Bogota D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2016.