
Artículos

Traslado de ondas de crecida: una solución al sistema de ecuaciones de Saint Venant en script de Autocad

Mg. Ing. Angel Queizán

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Ing. Juan Arrospide

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Mg. Ing. Diana Chavasse

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina,
ghidraulica@gmail.com / UTN FR Buenos Aires,
Argentina, ghidraulica@gmail.com, Argentina

Ing. Alicia Gámido

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Ing. Guillermo Mena

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Lorenzo Elías

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Tobías Simian

Grupo GIH, UTN FR La Plata, Argentina, Argentina

Ingenio Tecnológico

vol. 7, e066, 2025

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ISSN-E: 2618-4931

Periodicidad: Frecuencia continua

ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 05 diciembre 2025

Aprobación: 11 diciembre 2025

URL: <https://portal.amelica.org/amelia/journal/266/2665247008/>

Resumen: Se presenta en este artículo una solución al traslado de ondas de crecida en cursos de agua. Se realiza un enfoque numérico implícito para resolver el sistema de las ecuaciones de Saint Venant, a través de la aplicación del método de diferencias finitas. Como enfoque singular para alcanzar la solución, se plantea tanto la solución numérica como su visualización en un sistema CAD. Se busca así aprovechar los recursos que presenta el software Autocad, largamente convalidados por su utilización y permanencia a lo largo del tiempo a nivel mundial.

Palabras clave: Crecidas, Inundaciones, Saint Venant, Diferencias finitas, Script Autocad.

Abstract: A solution for routing flood waves in natural watercourses is presented in this article. An implicit numerical approach is applied to solve the Saint Venant equations through the use of the finite difference method. As a distinctive feature of the proposed methodology, both the numerical solution and its visualization within a CAD environment are developed. This approach seeks to take advantage of the capabilities offered by AutoCAD software, widely validated worldwide through its long-standing use and reliability.

Keywords: Flood waves, Flooding, Saint Venant, Finite differences, AutoCAD Script.



INTRODUCCIÓN

El creciente interés en la planificación de los recursos hídricos ha estimulado numerosas investigaciones sobre la modelación de los procesos de transformación lluvia-escorrentía y de las modificaciones que sufren los hidrogramas al transitar por un curso de agua.

Durante los siglos XVIII y XIX tuvo lugar el desarrollo de la hidráulica con los aportes de Bernouilli, Chézy, Pitot, Saint Venant, Venturi, pero su resolución numérica resultaba inabordable en ese momento. En 1847, en Irlanda, Mulvaney propone el Método Racional para estimar caudales pico, que aún hoy es aplicado en el análisis de preliminar de sistemas de desagües urbanos. Se trata de una técnica conceptual acorde a los recursos de cálculo de la época.

Durante la crisis del 30 en Estados Unidos de Norteamérica se promovió el desarrollo de obras de infraestructura para generar trabajo y reactivar la economía. En este período se desarrollaron nuevas técnicas conceptuales para la modelación de los procesos hidrológicos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.
Principales aportes históricos a la modelación de procesos hidrológicos.

Autor	Modelo	Proceso
Sherman (1932)	Hidrograma unitario	Transformación precipitación caudal
Richards (1931) Horton (1933)	Ecuación de Richards Modelo de Horton	Infiltración
Mc Carty (1938)	Método Muskingum	Propagación de ondas de crecida en canales
Thornwaith (1944)	Modelo de Thornwaith	Evapotranspiración Potencial

Acorde con el desarrollo de la capacidad de cálculo vinculada a la aparición de las computadoras, fue posible resolver numéricamente el conocimiento de la hidráulica desarrollado en los siglos XVIII y XIX así como desarrollar modelos hidrológicos conceptuales de transformación precipitación-caudal de mayor complejidad. Desde fines de la década de 1960 hasta inicios de los 80 se desarrollaron modelos agregados espacialmente de balance hídrico en el perfil de suelo. Asociado al desarrollo de la informática, que implicó un ágil manejo de la información, fue posible el desarrollo de modelos discretos tanto temporalmente como espacialmente.

En este artículo se simulará el proceso de traslado de ondas de crecida en canales. Se trata de un escurrimiento a superficie libre cuyas variables fundamentales serán el caudal, la velocidad y la profundidad del agua las cuales varían con el espacio y con el tiempo. En este proceso la onda de crecida entrante al canal es susceptible de sufrir modificaciones en su forma debido a los efectos de almacenamiento en el canal. Como resultado de este proceso puede observarse simplemente un retardo en el pico del hidrograma y modificaciones en su forma, así como una atenuación del pico y una extensión en el tiempo de base de la onda de crecida.



DESARROLLO

Las ecuaciones de Saint Venant son la base teórica del análisis unidimensional del escurrimiento, tienen la forma de ecuaciones en derivadas parciales, y permiten el cálculo del caudal y la altura de agua como funciones del espacio y del tiempo, representando el carácter gradualmente variado e impermanente del flujo.

Estas ecuaciones contemplan las leyes de la física que gobiernan el escurrimiento en un curso de agua, que son: a) el principio de conservación de la masa (ecuación de continuidad) y b) el principio de conservación de la cantidad de movimiento (momentum).

Tales ecuaciones pueden presentarse de dos formas: conservativa (en función del caudal Q), como se muestra en las Ec. (1) y (3), y no conservativa (expresada en función de la velocidad de flujo promedio V es una variable independiente, en lugar del caudal Q), que se presenta en las Ec. (2) y (4).



<i>Ecuaciones de continuidad</i>							
Forma conservativa		$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$					
Forma no conservativa		$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (2)$					
<i>Ecuaciones de momentum</i>							
Forma conservativa							
$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3)$							
Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción			
Forma no conservativa (elemento de ancho unitario)							
$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (4)$							
Onda cinemática: $\frac{\partial V}{\partial t} = 0, V \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \frac{\partial y}{\partial x} = 0$							
Onda de difusión: $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$							
Onda dinámica: todos los términos de la Ec. (4).							

En estas ecuaciones:

q : ingreso lateral

S_0 : pendiente del fondo del canal

S_f : pendiente de la línea de energía

y : altura de agua en el canal medida desde el fondo (tirante)



Como se advierte, las ecuaciones de Saint Venant contemplan términos que tienen en cuenta la aceleración convectiva, la aceleración local, y términos que involucran a las fuerzas de presión, gravitacionales y de fricción. Cuando se consideran solamente los términos de las fuerzas gravitacionales y de fricción, el modelo de cálculo se denomina de *Onda Cinemática*.

Las ecuaciones de Saint Venant han sido verificadas mediante numerosa experimentación, pero la solución de estas ecuaciones en derivadas parciales resulta sumamente compleja. Se tratan acá algunos de los métodos numéricos basados en hipótesis simplificativas que resultan buenas aproximaciones de las observaciones experimentales.

Para el cálculo del tránsito de crecientes, se pueden considerar los modelos distribuidos, llamados modelos de tránsito hidráulico, que están basados en las Ecuaciones de Saint Venant para flujo unidimensional. En este abordaje, tanto el caudal Q como el tirante hidráulico tienen una doble dependencia del espacio y del tiempo. Es decir, $Q=Q(x,t)$ y $h=h(x,t)$

La formulación adoptada es la llamada Onda cinemática, que incluye solo los términos de pendiente y roce para flujo impermanente gradualmente variado, identificada como modelo hidrodinámico unidimensional.

La resolución por diferencias finitas se propone sobre una malla $x-t$, buscando una solución numérica del caudal Q en una sección $i+1$ del canal y un instante $j+1$ de tiempo (esquema implícito [2]).

Conociendo las condiciones geométricas (dimensiones y pendiente del canal), las condiciones iniciales (el caudal inicial en todas las secciones a analizar) y la condición de borde (hidrograma de crecida a analizar), se procede a desarrollar un algoritmo como script en el software Autocad, de forma que la ventana gráfica de éste se convierta en la salida de los cálculos, incluyendo la representación de la solución a través del tiempo, en distintos puntos del espacio, es decir el hidrograma que se estima sucederá en cada sección transversal.

Fundamentalmente se busca encontrar cómo ha cambiado el hidrograma de entrada, al transitar la longitud total del canal L , es decir se busca determinar los valores para $Q(L,t)$, es decir el hidrograma de salida.

En el modelo de cálculo adoptado (onda cinemática), las ecuaciones (1) y (3) resultan:

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

(5)

$$g(S_0 - S_f) = 0$$

(6)

Reemplazando y combinando, se llega a:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} = q$$

(7)



Esquema numérico de solución: Para resolver la ecuación (7), las derivadas espaciales (8) y temporales (9) del caudal Q se aproximan en la malla $x - t$ tal como se muestra en la Figura 1. Allí se identifican los nodos de la malla que participan en el esquema numérico (es decir qué nodos intervienen en el cálculo de las derivadas parciales, y qué nodos se consideran para el cálculo del Q promedio (10) adoptado como representativo del caudal que interviene en dicha ecuación).

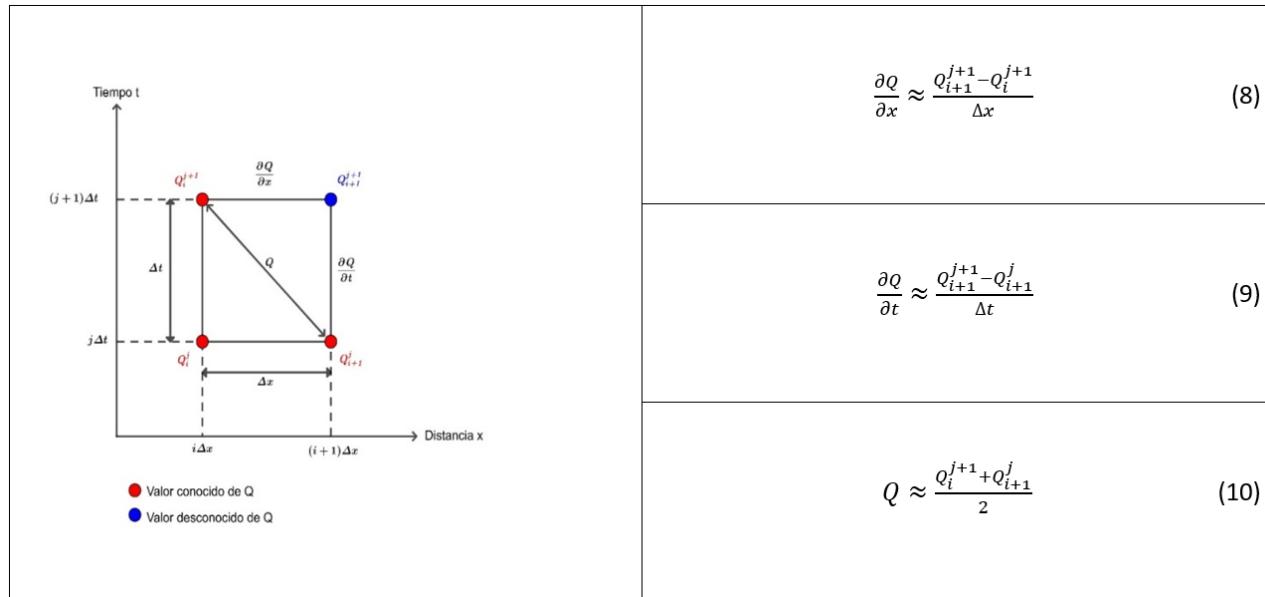


Figura 1
Caja de diferencias finitas para la ecuación de onda cinemática lineal

Reemplazando, la formulación numérica de la ecuación (7), resulta:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (11)$$

Con:
 $\beta=0.6$



$$\alpha = \left(\frac{n P^{2/3}}{1.49 S_0^{1/2}} \right)^{0.6}$$

En resumen, como resultado del esquema implícito se busca calcular utilizando los valores de Q en la j -ésima línea de tiempo que se han determinado previamente, como asimismo sucede con el valor de Q^{j+1}

Implementación computacional: El núcleo de cálculo del algoritmo en el lenguaje de programación Visualbasic del utilitario Autocad, se puede pensar como un bucle anidado en otro bucle, esto es un contador “for next” en i , que varía desde la sección 1 hasta la $n-1$ (Cantsecciones-1) anidado en otro contador “for next” en j , variando desde el instante 1 hasta la cantidad de intervalos totales menos 1 (canttiempos-1).

También en los mismos bucles anidados se puede ver (Figura 2) la función “ThisDrawing.Modelspace.AddText..” que es la que dibuja en la ventana gráfica de AutoCAD la lista de resultados calculados.

```

For j = 1 To canttiempos - 1

    For i = 1 To Cantsecciones - 1

        A = ((Q(i + 1, j) + Q(i, j + 1)) / 2) ^ (Beta - 1)
        B = (Atc / Ax) + Alfa * Beta * A

        Q(i + 1, j + 1) = ((Atc / Ax) * Q(i, j + 1) + Alfa * Beta * Q(i + 1, j) * A) / B

        ' Define the text object
        textString = "Q(" + Str$(i + 1) + "," + Str$(j + 1) + ")" + Str$(Int((Q(i + 1, j + 1))))
        insertionPoint(0) = 0 + (i) * 50: insertionPoint(1) = -(j) * 20: insertionPoint(2) = 0
        height = 3
        ' Create the text object in model space
        Set textObj = ThisDrawing.ModelSpace.AddText(textString, insertionPoint, height)
        textObj.color = acBlue

    Next
Next

```

Figura 2
Algoritmo núcleo para el cálculo de Q_{i+1}^{j+1}

Teniendo en cuenta que se dispone de los valores de caudal para cada sección, en cada instante analizado, se puede implementar el código para graficar las curvas que representen la relación entre estas variables (dibujadas en la ventana gráfica del AutoCAD) utilizando la función “ThisDrawing.Modelspace.AddSpline..”, que se muestra en la Figura 3.



```

For j = 1 To canttiempos
DesplazamientoX = 50000

For i = 1 To Cantsecciones - 1

    ' Asignar las coordenadas al array de puntos
    puntos(i * 3) = DesplazamientoX + (i) * Ax / Escala ' Coordenada X
    puntos(i * 3 + 1) = (Val(Q(i + 1, j)) - 500 * j) / Escala ' Coordenada Y
    puntos(i * 3 + 2) = 0 ' Coordenada Z

Next

' Crear la Spline en el ModelSpace
Dim nuevaSpline As AcadSpline

Set nuevaSpline = ThisDrawing.ModelSpace.AddSpline(puntos, startTan, endTan)
nuevaSpline.color = acBlue

Next

ZoomAll

```

Figura 3
Algoritmo de dibujo de curvas en Autocad, basadas en cálculos de $Q(x,t)$.

Ejemplo de aplicación: Con el objeto de probar el algoritmo implementado, se adopta el ejemplo resuelto en [1], que consiste en un canal de sección transversal rectangular de 200 pies de ancho, que tiene una longitud de 15000 pies, una pendiente del 1% y un coeficiente de Manning $n=0.035$, en el que transita el hidrograma que se muestra en la Tabla 2, para un Δx de 3000 pies y un Δt de 3 minutos (algunos datos en unidades inglesas, dada la fuente de la bibliografía considerada).

Tabla 2
Hidrograma de crecida



Tiempo (min)	
	Caudal Q (pies³/seg)
0	2,000
12	2,000
24	3,000
36	4,000
48	5,000
60	6,000
72	5,000
84	4,000
96	3,000
108	2,000
120	2,000

El ingreso de los datos en el algoritmo se ha implementado mediante una caja de diálogo personalizada a la problemática como se muestra en la Figura 4, para que el usuario disponga de una interacción que le permita una fácil interpretación de los datos del problema a resolver.



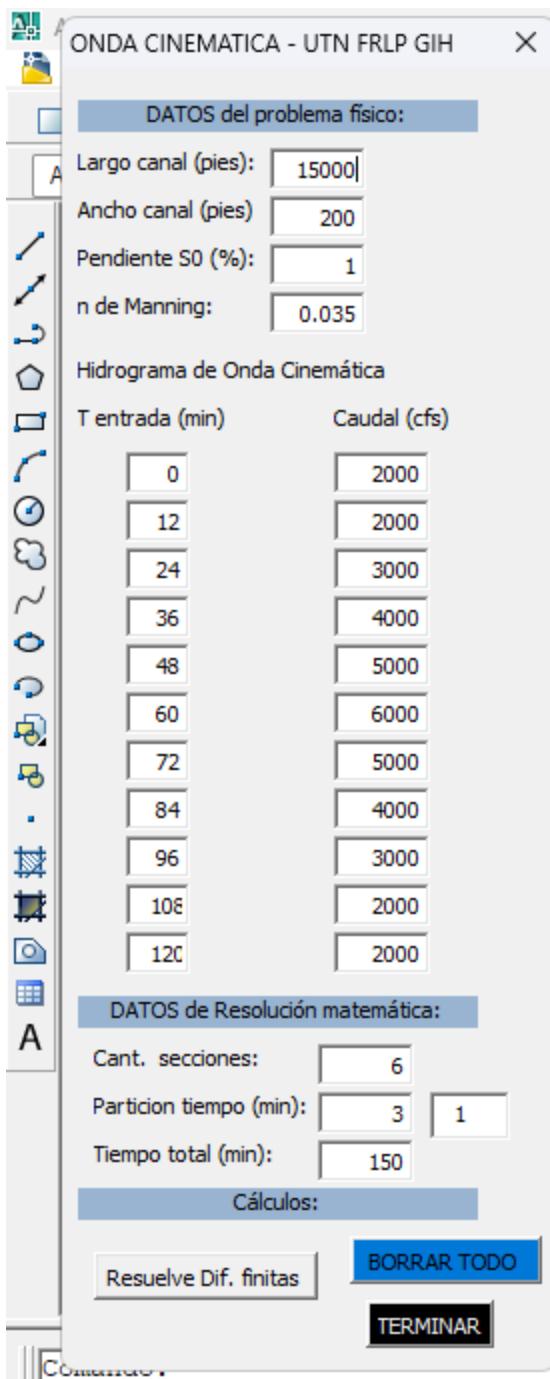


Figura 4
Caja de diálogo para el cálculo

En ese sentido, el programa permite el ingreso de las condiciones geométricas, las condiciones iniciales y las condiciones de borde, a saber:

- Condiciones geométricas: son las características geométricas del canal y su rugosidad, tales como “Largo” y “Ancho” del canal, “pendiente” y “coeficiente de Manning”.

- Condiciones iniciales: caudal que circula por todo el canal en el instante inicial, que en el ejemplo resulta ser de 2000 cfs, en cada una de las secciones consideradas.
- Condición de borde (en el extremo de aguas arriba del canal): hidrograma de crecida reflejado en la Tabla 2 y se puede ver en la columna “T entrada (min)” y “Caudal (cfs)” de la Figura 4.

Para la resolución del problema se debe definir la discretización del dominio (x,t) para el cálculo por diferencias finitas. Esto se vuela en el casillero “Cant. secciones:”, que refleja la cantidad de secciones en que se divide el largo del canal. En el casillero “Partición de tiempo (min):” se vuela el paso de tiempo adoptado para el cálculo, y en el casillero “Tiempo total (min):” se consigna el tiempo total considerado para el cálculo.

Por último, para la ejecución del programa, se disponen de botones de control que pondrán en funcionamiento el algoritmo, mostrando los resultados en la ventana gráfica del Autocad a través del botón “Resuelve Dif. Finitas”. También se dispone de un botón que borra todo lo dibujado para poder cambiar valores y volver a dibujar las veces que se necesite con el botón “BORRAR TODO” y terminar el proceso con el botón “TERMINAR”.

RESULTADOS

Al implementar el algoritmo de la onda cinemática en el entorno del utilitario Autocad, se ha obtenido una herramienta sencilla en términos de recursos de hardware y software, y de fácil acceso en el entorno de las carreras de grado, ya que se encuentran disponibles licencias educativas que funcionan en computadoras de modesta configuración.

Los resultados pueden visualizarse en la ventana gráfica de Autocad, donde se detalla una lista de los valores de $Q(i,j)$ calculados, para los instantes de tiempo analizados y en cada sección transversal (en la Tabla 3, se muestran estos resultados hasta el instante 27 min).

Asimismo, junto con los valores numéricos obtenidos, el programa permite una visualización gráfica del fenómeno, por un lado, mostrando la evolución espacial de los hidrogramas (Figura 5), y también la evolución de la onda a lo largo del canal (Figura 6). En ella se representan las secciones transversales mediante líneas verticales y las ondas de crecida para cada instante. También se muestra en el gráfico el valor de caudal en cada instante y sección.

Para mejorar la salida gráfica de los resultados, se utilizaron curvas de tipo “Splines”. Éstas son interpolaciones segmentarias que permiten la obtención de curvas suaves entre puntos dato, y que se encuentra incorporada entre las herramientas que suministra el utilitario Autocad.

Tabla 3
Resultados para c/ caudal en cada instante y sección del canal.



Instante de Cálculo (minutos)	Caudales Calculados (pie³/seg)					
	Sección 1 (progresiva 0 pies)	Sección 2 (progresiva 3000 pies)	Sección 3 (progresiva 6000 pies)	Sección 4 (progresiva 9000 pies)	Sección 5 (progresiva 12000 pies)	Sección 6 (progresiva 15000 pies)
0	2000	2000	2000	2000	2000	2000
3	2000	2000	2000	2000	2000	2000
6	2000	2000	2000	2000	2000	2000
9	2000	2000	2000	2000	2000	2000
12	2000	2000	2000	2000	2000	2000
15	2250	2095	2036	2013	2005	2002
18	2500	2252	2118	2053	2023	2010
21	2750	2449	2246	2127	2062	2030
24	3000	2672	2414	2238	2129	2067
27	3250	2910	2613	2385	2228	2129
...

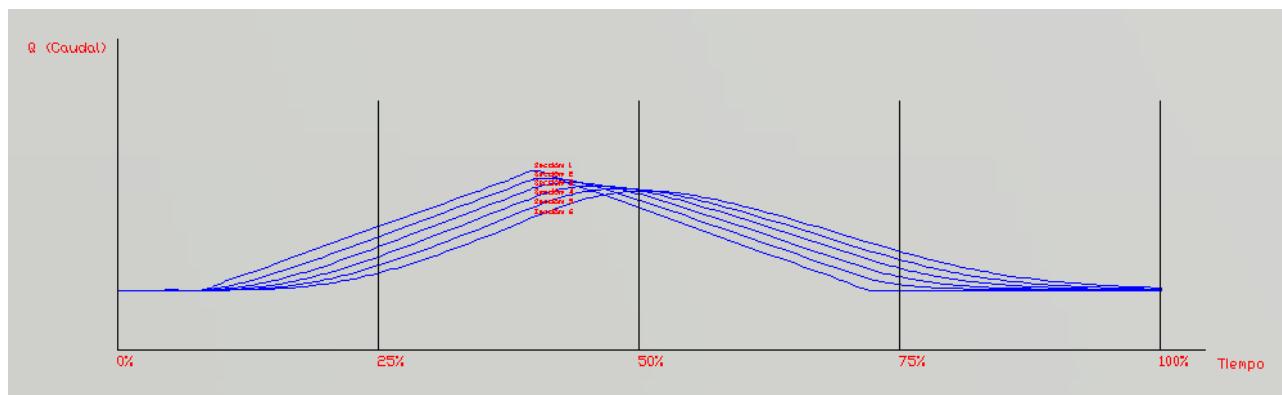


Figura 5
Evolución espacial de los hidrogramas calculados.

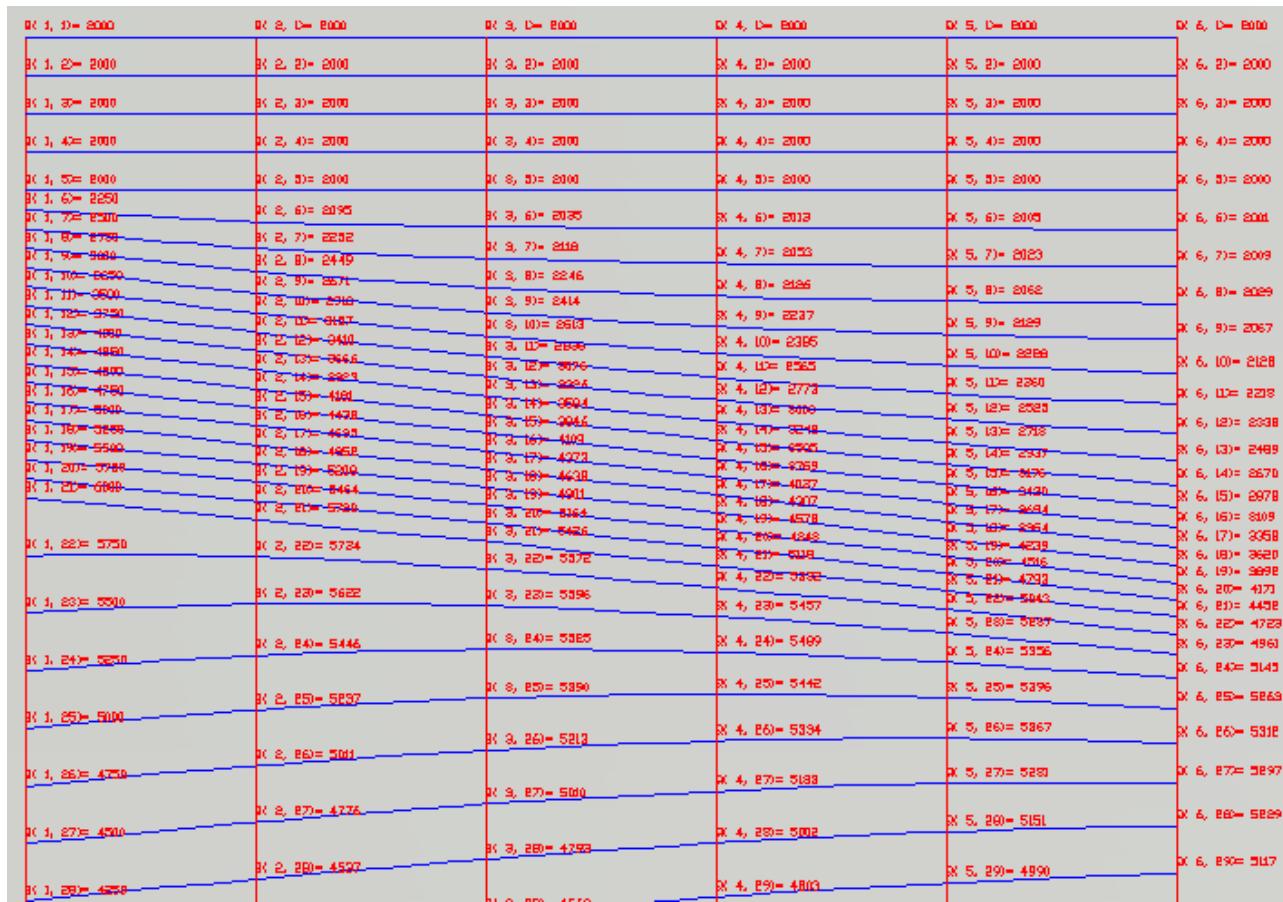


Figura 6
Evolución temporal de la onda a lo largo del canal.

CONCLUSIONES

El programa elaborado permite la implementación numérica del cálculo del traslado de ondas de crecida en un curso de agua, utilizando la metodología de la onda cinemática, adaptable a cualquier tipología de secciones transversales, temática en desarrollo por el Grupo de Investigación en Hidráulica de la UTN.

La herramienta computacional permite apreciar cómo evoluciona la onda de crecida en la medida en que se traslada hacia aguas abajo en el canal. La Figura 5 refleja este comportamiento, ya que se observa una atenuación del pico de los hidrogramas que se incrementa en la medida en que evoluciona en el canal. Asimismo en la misma Figura 5, puede evidenciarse un retardo en el tiempo al pico, como es de esperar en un proceso de este tipo.

Constituye, además, una herramienta de aplicación que, ajustándose a los contenidos temáticos de la asignatura Hidrología y Obras Hidráulicas de la Universidad Tecnológica Nacional, permite una mejor visualización del fenómeno, al explotar las potentes herramientas gráficas del utilitario AutoCAD acoplado a su resolución numérica. Así entonces, resulta ser un refuerzo analítico y académico disponible para su utilización en la carrera de Ingeniería Civil.

AGRADECIMIENTO



En esta publicación el Grupo de Investigación en Hidráulica (UTN-FRLP), expresa su sincero agradecimiento al Ing. Ángel Queizan (Ruqui), quien fuera integrante fundador del grupo de investigación, destacándose por su valioso aporte, en el área numérica (uno de los ejes de trabajo del grupo).

Su dedicación y responsabilidad se mantuvo hasta sus últimos días, siendo este trabajo parte de su investigación para uno de los proyectos en curso.

Su calidad como ser humano, como colaborador y formador de nuevos investigadores quedará en todos los que lo conocimos y nos impulsará a seguir su ejemplo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. México D.F., México: McGraw-Hill Interamericana.
- Nocedal, J., & Wright, S. J. (2000). *Numerical Optimization*. New York, United States: Springer.



AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/266/2665247008/2665247008.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA

Ciencia Abierta para el Bien Común

Mg. Ing. Angel Queizán, Ing. Juan Arrospide,
Mg. Ing. Diana Chavasse, Ing. Alicia Gaminò,
Ing. Guillermo Mena, Lorenzo Elías, Tobías Simian
Traslado de ondas de crecida: una solución al sistema de ecuaciones de Saint Venant en script de Autocad

Ingenio Tecnológico
vol. 7, e066, 2025
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
ingenio@frlp.utn.edu.ar

ISSN-E: 2618-4931



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.