



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGON

“SOFTWARE DISPONIBLE PARA EL ANALISIS  
DEL TRANSITO DE AVENIDAS”

**T E S I S**

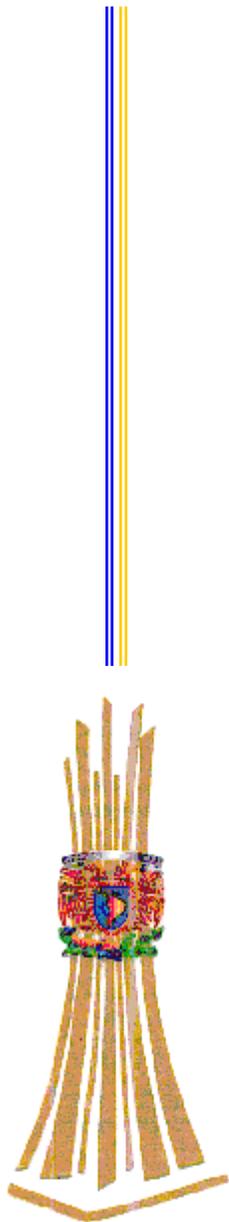
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R O C I V I L**

P R E S E N T A:

**ELOY MENDOZA ZAMORA**

ASESOR: ING. PATROCINIO ARROYO HERNANDEZ



San Juan de Aragón, México

Enero 2006.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

---

# DEDICATORIA

A mi **Madre** por su entereza, fuerza y valor  
para sobresalir ante las adversidades.  
Gracias por tu cariño y gran apoyo.

A mi **Padre** por haberme inculcado  
el valor de la honestidad y el respeto hacia los demás,  
Gracias.

A mis **Hermanos**: Juan Víctor, Antonia, Rolando,  
Emilio, Agustín, Hilda, Miriam y Lupita  
parte integral de mi familia cuya relación fortalece  
mi formación y crecimiento como ser humano.  
Gracias, siempre estarán en mi corazón.

Con especial reconocimiento a mi  
Asesor de tesis: Ing. **Patrocinio Arroyo Hernández**.  
por su paciencia y colaboración en la realización del presente trabajo.

Agradezco también a la Ing. **Elaine Valencia**  
por su apoyo académico y amistad incondicional.

---

---

**AGRADECIMIENTO:**

Un reconocimiento profundo y sincero a Fer y familia Aguilar Meléndez  
por su gran apoyo en la conclusión de mis estudios,  
en especial a la Sra. Rafaela  
que donde quiera que se encuentre  
acepte mi más sincero agradecimiento.

**“ .....Tenemos a nuestra disposición el mundo -  
el que para cada uno de nosotros constituye el mundo,  
una suma de datos, de experiencias, de valores....”**

**Italo Calvino**

---

---

# Í N D I C E

PREFACIO.

OBJETIVOS.

## 1. ASPECTOS GENERALES.

1.1.	Antecedentes	10
1.2.	Descripción del tránsito de avenidas en vasos de almacenamiento.	11
1.3.	Funcionamiento de vasos de almacenamiento.	13
1.4.	Descripción del tránsito de avenidas en cauces.	15
1.5.	Funcionamiento de cauces.	15
1.6.	Ecuaciones básicas.	15
1.7.	Expresiones matemáticas para el tránsito de avenidas en cauces.	16
1.8.	Expresiones matemáticas para el tránsito de avenidas en vasos.	18

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS.

2.1.	Introducción a los métodos de análisis al tránsito de avenidas en vasos.	23
2.2.	Método semigráfico.	24
2.3.	Método gráfico.	26
2.4.	Método numérico.	31
2.5.	Introducción a los métodos de análisis al tránsito de avenidas en cauces.	33
2.6.	Método de Muskingum.	34
2.7.	Método de las Curvas características.	38

### 3. SOFTWARE DISPONIBLE

3.1	Introducción.	43
3.2	Características del software	45
3.3	Breve descripción del software de aplicación	47
3.4	Software desarrollado por la U.A. P.	47
3.5	HEC-RAS.	55

### 4. APLICACIONES.

4.1.	Introducción	75
4.2.	Caso de Estudio 1	75
4.3.	Caso de Estudio 2	84
4.4.	Caso de Estudio 3	90

### 5. CONCLUSIONES.

97

### 6. BIBLIOGRAFIA.

100

---

# **P R E F A C I O**

El enorme avance tecnológico de las últimas décadas aunado con el rápido desarrollo de la computación electrónica, ha dado origen a múltiples programas de computadora orientados a la simulación de sistemas continuos.

El uso de tales programas se ha extendido ampliamente a todas las áreas del conocimiento, en particular, a la ingeniería hidráulica, lo que ha permitido ejemplificar de una manera más accesible el comportamiento de los distintos fenómenos hidráulicos, como lo es, el del tránsito de avenidas, motivo del desarrollo de este trabajo.

La presente investigación forma parte del proyecto **HIDTA03** denominado “**Simulación del Tránsito de Avenidas**” que tiene como objetivo la implementación del estudio y análisis computarizado de dicho fenómeno, el cual complementará la formación profesional de los estudiantes de la carrera de Ingeniero Civil que se imparte en la Facultad de Estudios Superiores Aragón.

De acuerdo con lo anterior, y debido a lo extenso del proyecto mencionado, mi participación involucra solo una de las distintas etapas que lo conforman y que es parte esencial para la continuidad del mismo.

El interés en el tema, surgió durante mi estancia como prestador de servicio social en el Laboratorio de Hidráulica y Fluidos de nuestra Escuela y atendiendo a un plan de desarrollo<sup>1</sup> para dicho laboratorio, el cual me ha permitido entre muchas satisfacciones, integrar los conocimientos adquiridos enfocándolos con una visión distinta hacia las nuevas generaciones, es decir, dar a conocer una de múltiples opciones para la comprensión natural del tema.

La etapa inicial en la cual trabajé, consistió en una metodología de investigación que incluyó, ubicar la información básica del tema, investigar el tipo y características del software disponible aplicándolo a un problema en específico para poder emitir así un juicio y, finalmente hacer una crítica personal y un análisis comparativo sobre los avances alcanzados en la simulación del fenómeno con la cual se habrá de decidir si es necesario desarrollar y/o complementar en su caso, un software alternativo o propio con fines didácticos, de acuerdo con los objetivos de HIDTA03.

---

<sup>1</sup> Elaborado por el Ing. Patrocinio Arroyo Hernández.

---

---

# **INTRODUCCIÓN**

Se puede afirmar de manera contundente que la invención de la computadora marca el inicio de la “Segunda Revolución Industrial” en la cual se automatiza, no solo la fuerza del hombre, como sucedió en la Primera, sino también su capacidad intelectual.

La computadora está interviniendo de manera notable en la práctica de la ingeniería, rápidamente se ha convertido en un medio indispensable para auxiliar al ingeniero en diversas formas. De tal suerte que hoy por hoy, la utilización de ésta, se considera una necesidad indispensable en la formación integral del proceso enseñanza-aprendizaje, esto debido a sus características para manejar y controlar grandes cantidades de información, las cuales permiten visualizar una variedad infinita de problemas que requieren de un análisis complejo, como el del tránsito de avenidas, cuyo análisis está enfocado hacia un conjunto de parámetros con características particulares y cuyas relaciones matemáticas describen su comportamiento físico en el que intervienen procesos meteorológico, hidrológicos e hidráulicos relacionados con el proceso precipitación-escurrimiento.

La representación de cada componente hace posible la conformación de un modelo matemático hidrológico con determinadas variables y parámetros físicos, que al ejecutarse por medio de un software de modelación, permite simular el escurrimiento superficial a lo largo de un cauce o un vaso para determinar el caudal de flujo cuando se presente una avenida.

Así, el proceso de simulación se considera como una técnica numérica que se usa para conducir experimentos por medio de una computadora, al describir el comportamiento de un sistema o de algún componente de él mediante expresiones matemáticas y relaciones lógicas, en períodos extensos de tiempo real.

En síntesis, la finalidad del presente trabajo, consiste en exponer dentro de una amplia variedad de software comercialmente disponible, aquellos que en particular están enfocados hacia los modelos unidimensionales que suponen una variación de las propiedades del flujo sólo a lo largo del cauce, aplicaciones y metodología, se adecuan mejor a los objetivos del presente estudio.

Por lo antes mencionado, los objetivos planteados en este trabajo son:

## Objetivo General:

**Difundir el estudio y el análisis computarizado del tránsito de avenidas.**

## Particular:

**Aplicar el software disponible a casos particulares.**

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, el trabajo se dividió en las siguientes etapas:

## ALCANCES

Aun cuando el tema que nos ocupa es muy amplio y bastante documentado, este trabajo se limita solo a presentar los conceptos necesarios para la programación y sistematización de los métodos con un enfoque didáctico y esto se logrará mediante la siguiente estructura.

En el primer capítulo, se presenta una breve descripción de los conceptos básicos que apoyan la mejor comprensión para el desarrollo del tema. En el segundo, se abordan los principales métodos de análisis para el tránsito de avenidas en vasos y cauces.

En el capítulo tres se expone de manera general el software disponible considerado compatible a los propósitos del Proyecto HIDTA-03.

Una serie de aplicaciones del software tratado anteriormente, se incluyen en el capítulo IV.

Finalmente, en el capítulo V se da una serie de recomendaciones y la conclusión a la que se llegó en este estudio.

Como apoyo complementario a éste, se incluye al final, información bibliográfica para consultas adicionales.

# CAPITULO

# 1

# ASPECTOS GENERALES

# CAPITULO 1

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1 Antecedentes

Entendemos por *tránsito de una avenida*, la circulación de un volumen extraordinario de agua<sup>2</sup>, que en su paso se manifiesta como un cambio en el nivel de la superficie libre de la corriente. Se conoce también con el mismo nombre a la técnica ingenieril que mediante una metodología permite cuantificar y pronosticar para un área definida del flujo, sus niveles y los gastos asociados a los mismos, respecto al tiempo.

La avenida es el resultado de una lluvia de alta intensidad de duración corta o de baja intensidad y larga duración, de acuerdo con el punto anterior, resulta de interés la circulación del flujo que puede ocurrir en un cauce o en un vaso de almacenamiento, por lo tanto, su comportamiento, importancia y utilidad práctica son distintas en cada uno de ellos.

Hidrológicamente, una avenida depende de la magnitud de una tormenta o de la magnitud de un afloramiento superficial y debido a la evolución de éstos en el espacio y en el tiempo se hace necesario el tratamiento estadístico o probabilística de la información hidrológica disponible, a tal grado que la ayuda proporcionada por los modelos de simulación matemáticos o físicos, es indispensable, así como la suministrada por la fotogrametría aérea y el empleo digitalizado de las elevaciones empleando GIS no solo para el **diseño hidrológico e hidráulico de estructuras de control de avenidas**, sino también para la **provisión y aprovechamiento de recursos hídricos procedente de la escorrentía superficial**, en la **recarga artificial de acuíferos**, en **control de avenidas**, etc.

Se sabe que la magnitud de una avenida depende o está en función de un evento de lluvia, la cual a su vez depende de diversas variables climáticas, fisiográficas y de usos del suelo, siendo la intensidad y duración de la lluvia los factores más importantes del proceso lluvia-escorrimento, seguidos por las características de la cuenca que transforman la precipitación en el hidrograma de respuesta a la salida de la misma.

---

<sup>2</sup> Debido a la precipitación o al afloramiento del agua subterránea

Con base a estas variables y parámetros físicos, es factible el uso de un modelo que simule la escorrentía superficial de un cauce o vaso como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas, que apoyándose en un programa de computación, permita desarrollar y aplicar un modelo hidrológico de simulación de respuesta de una cuenca para una tormenta en particular, constituyendo está una técnica eficaz en la planificación hidrológica y en la implementación de una metodología a seguir.

Simular el comportamiento hidrológico de una cuenca bajo diversas condiciones de lluvias extremas y para diferentes períodos de retorno a partir de la caracterización física e hidrológica de la cuenca correspondiente, permite

- a) El aprovechamiento de recursos superficiales de agua o delimitación de llanuras de inundación para determinar el efecto medioambiental y económico de supuestas inundaciones,
- b) La previsión y control de avenidas por lluvias torrenciales (prever la ubicación de las obras de protección y las construcciones permisibles en las proximidades de los cauces de agua principales),
- c) La evaluación preventiva de daños por inundación y medidas protectoras consecuentes en cuencas urbanas ó rurales.
- d) La previsión de hidrogramas en puntos de interés de una red de drenaje para el diseño de obras hidráulicas (de contención, encauzamiento, aprovechamiento etc).

## 1.2 Descripción del tránsito de avenidas en vasos de almacenamiento.

El propósito principal de un vaso de almacenamiento es retener, almacenar y regular los volúmenes de agua que escurren en exceso durante la temporada de lluvias, para que posteriormente sean aprovechados, cuando los escurrimientos son escasos.

Entre los principales usos de un vaso se pueden mencionar: la generación de energía eléctrica, el abastecimiento de agua potable, la acuicultura<sup>3</sup>, recreación, retención de sedimentos y el **control de avenidas** entre otros.

Las características hidráulicas de un vaso están compuestas por distintos niveles de altura de agua que garantizan cierto volumen aprovechable del mismo y que tienen como limite

---

<sup>3</sup> Cultivo de especies acuáticas vegetales o animales

la altura de la cortina. Dichos niveles contemplan una altura correspondiente a azolve y se pueden distinguir los siguientes según la Tabla 1:

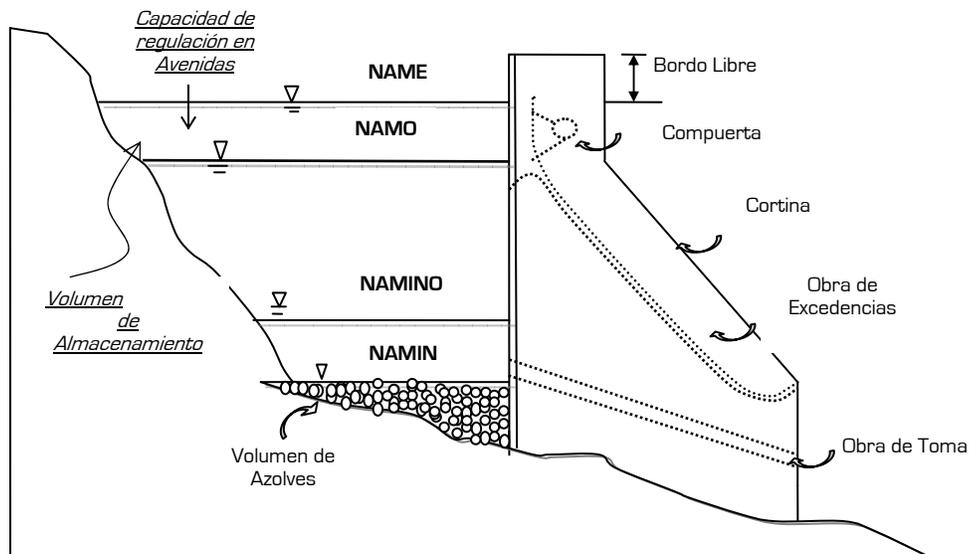
De lo anterior se desprende la importancia de conocer las distintas elevaciones de agua en un vaso para calcular la avenida de diseño, útil para el dimensionamiento de la obra de excedencias la cual se ocupa de regular las avenidas y garantizar la seguridad del vaso cuando se presenten avenidas con periodos de retorno extraordinarios.

**Tabla 1: Clasificación de los niveles de agua dentro de un vaso de almacenamiento**

<b>NAME</b>	<b>Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias</b> Nivel máximo que se espera alcance el agua en el vaso bajo cualquier circunstancia.
<b>NAMO</b>	<b>Nivel de Aguas Máximas de Operación</b> Nivel máximo con el que puede operar un vaso de almacenamiento, este nivel se fija de acuerdo a las condiciones, y el uso específico a que se vaya a destinar el vaso.
<b>NAMINO</b>	<b>Nivel de Aguas Mínimas</b> Es el volumen más bajo con el que puede operar la presa, en el caso de presas para generación eléctrica, el NAMINO se fija de acuerdo con la carga mínima necesaria para que las turbinas puedan operar en condiciones óptimas.
<b>Volumen de superalmacenamiento</b>	Es el volumen que se encuentra entre el NAMO y el NAME y es en base a éste con el que se controla una avenida que se presentan cuando el nivel en el vaso está cercano al NAMO.
<b>Capacidad útil</b>	Llamado así al nivel que se encuentra entre el NAMINO y el NAMO y con el que se satisface la demanda de agua.
<b>Volumen de azolves</b>	El aquel que queda por debajo del nivel de la toma y su función es la de recibir el acarreo de sólidos por el río durante la vida útil de la presa

Lo anterior se ejemplifica a partir de la siguiente figura :

Figura 1. Componentes de un vaso de almacenamiento



### 1.3 Funcionamiento de vasos de almacenamiento.

El flujo de caudales entrante en un vaso de almacenamiento se manifiesta en una diferencia de niveles como consecuencia del sistema hidrológico de escurrimientos al que capta, para saber en todo momento, su variación y efecto de almacenamiento.

El estudio del comportamiento de un vaso de almacenamiento, parte del análisis de la ecuación de continuidad expresada en un intervalo de tiempo dado, permite realizar un balance hidrológico entre la descarga que entra, el almacenamiento que se crea y la descarga que sale del mismo, es decir, se consideran en general todos los volúmenes de agua.

$$V_E - V_S = \Delta V$$

Durante dicho proceso, los intervalos de tiempo se eligen principalmente de acuerdo con el tamaño del vaso;

$$1 \text{ día} \leq \Delta T \text{ Vasos pequeños} \leq 1 \text{ mes}$$

$$1 \text{ mes} \leq \Delta T \text{ Vasos grandes} \leq 1 \text{ año}$$

Las aportaciones al vaso llegan en distintas formas, que consideradas dentro de este estudio como *Entradas* se clasifican en:

**E<sub>cp</sub>:** Escurrimiento por cuenca propia o virgen, definidos como el escurrimiento total medio anual que proviene de una cuenca sin aprovechamientos.

**E<sub>t</sub>:** Transferencia de otras cuencas se refiere al volumen medio anual de agua a través de un cauce natural proveniente de otra(s) cuenca(s) que se encuentra aguas arriba.

**E<sub>ll</sub>:** Entradas por lluvia directa sobre el vaso, cuantificada como  $hp \times \text{área}$  que tiene la superficie libre del vaso.

**E<sub>r</sub>:** Debidas a retornos utilizables, que se reincorporan a la red de drenaje fluvial de la cuenca hidrológica con carga suficiente.

Con respecto a las *Salidas* se cuantifican como:

**S<sub>d</sub>:** Salidas que se extraen para satisfacer una determinada demanda de agua, pueden ser para uso consuntivo y no consuntivo

**S<sub>ev</sub>:** Volumen de agua que se evapora debido al incremento en la energía cinética entre las moléculas de agua provocada por la radiación solar y su ascenso a la atmósfera en forma de gas.

**S<sub>ex</sub>:** Cantidad de agua superficial o subterránea que se transfiere de una cuenca hidrológica a otra u otras, hacia las que no drena en forma natural

**S<sub>r</sub>:** Es el volumen de agua reservado, escurrimiento que sale de la cuenca y que contribuye a satisfacer las extracciones de las cuencas aguas abajo.

De tal forma que la ecuación de continuidad se presenta finalmente de la siguiente manera:

$$E_{cp} + E_t + E_{ll} + E_r - S_d - S_{ev} - S_{ex} - S_r = \Delta V$$

## 1.4 Descripción del tránsito de avenidas en cauces.

El tránsito de avenidas en cauces es un procedimiento que se utiliza para determinar la magnitud del gasto respecto al tiempo<sup>4</sup> y poder seguir su evolución en puntos de interés de un curso de agua. Esta técnica permite entonces, delimitar llanuras de inundación (zonas federales), el diseño de bordos de protección contra inundaciones, definir los niveles de agua en el cauce, establecer el nivel de descarga de estructuras pluviales y sanitarias, determinar el efecto de las presas reguladoras aguas abajo, determinar el tiempo de llegada del gasto y su valor de pico entre cada estación y la formulación de modelos para la predicción de avenidas.

En un sentido más amplio, el tránsito de caudales puede considerarse como un análisis para seguir el caudal a través de un sistema hidrológico.

## 1.5 Funcionamiento de cauces.

Con la llegada de una precipitación, se presenta una escorrentía la cual produce una variación en el volumen de agua con respecto al tramo del cauce (río) que varía en el tiempo a lo largo de él, esto se traduce en una diferencia de elevaciones en su superficie libre y a su vez en un cambio en la velocidad del flujo de agua en cada una de ellas.

## 1.6 Ecuaciones básicas

Para analizar el comportamiento del tránsito de una avenida es importante contar con procedimientos de cálculo para estimar el área cubierta por el agua y las magnitudes de la velocidad del flujo y del tirante en cualquier tramo de estudio. Estos se basan usualmente en la aplicación de las ecuaciones básicas que describen el flujo del agua a superficie libre.

Sin embargo, el carácter dinámico de las avenidas y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear ecuaciones de flujo en dos dimensiones horizontales las cuales son tomadas en cuenta cuando se requiere crear modelos numéricos

---

<sup>4</sup> Hidrograma.- Representación gráfica que relaciona gasto contra tiempo.

bidimensionales basados principalmente en dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. El flujo se considera sobre una región con o sin agua.

Por las características hidráulicas de este fenómeno, se requiere tomar en cuenta la influencia de la pendiente del terreno en dos direcciones horizontales. Además, se consideran las velocidades de desplazamiento del agua en cada dirección y la profundidad del agua en las zonas donde se presenta la avenida.

## 1.7 Expresiones matemáticas para el tránsito de avenidas en cauces

Matemáticamente, el flujo en cauces naturales se puede describir mediante las variables independientes espacio ( $x$ ) y tiempo ( $t$ ), de las cuales dependen el tirante, la velocidad y el gasto a lo largo del cauce. Por lo tanto, aun cuando se dispone de tres ecuaciones fundamentales<sup>5</sup>, y dado que para describir el flujo solo es necesario el uso de dos variables, es suficiente contar con dos ecuaciones:

La primera, es la ecuación de continuidad y la segunda puede ser la de cantidad de movimiento o la de energía dependiendo de que si hay o no discontinuidades<sup>6</sup> en la superficie libre del flujo, o bien, no se conocen las pérdidas, entonces es aplicable la ecuación de cantidad de movimiento, en caso contrario, ambas se consideran equivalentes.

La aplicación de las ecuaciones fundamentales, se logra con una serie de suposiciones que simplifiquen la complejidad del fenómeno, para nuestro caso de estudio, las hipótesis de Saint Venant dan una aproximación aceptable desde un punto ingenieril, a saber:

- a) El flujo es unidimensional y por lo tanto la distribución de velocidades es uniforme en toda la sección transversal, y la superficie del agua, es horizontal en todo su ancho.
- b) La curvatura de las líneas de corriente es pequeña, entonces las aceleraciones verticales son despreciables y la distribución de presiones es hidrostática.
- c) Los efectos de fricción entre el flujo y las paredes del canal se pueden calcular con las expresiones usadas para flujo uniforme y permanente.

---

<sup>5</sup> Continuidad, energía y cantidad de movimiento

<sup>6</sup> Como un salto hidráulico, un frente de onda, entre otros.

d) La pendiente de la plantilla del canal es pequeña, por lo que se acepta que los tirantes verticales y perpendiculares a la plantilla del canal son iguales.

e) La sección del cauce tiene generalmente una forma arbitraria y puede variar a lo largo del mismo, siempre y cuando dicha variación no cause una fuerte curvatura en las líneas de corriente.

f) Las hipótesis planteadas permiten obtener, en su versión diferencial, las ecuaciones que describen el flujo no permanente en un tramo de canal o río (ver figura No. 1.7) , dichas ecuaciones se presentan a continuación:

**Ecuación de Conservación de Continuidad :**

$$\frac{\partial(Av)}{\partial v} + B \frac{\partial h}{\partial t} = q$$

(1.1)

**Ecuación de Cantidad de Movimiento:**

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + S_f - S_0 = -\frac{q}{gA} (V - V_x) \quad (1.2)$$

donde:

- $A$  es el área hidráulica en m<sup>2</sup>,
  - $v$  la velocidad media en m/s,
  - $B$  es el ancho de superficie libre en m,
  - $h$  es el tirante en m,
  - $g$  es la aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>,
  - $S_0$  pendiente del fondo m/m
  - $S_f$  pendiente de la línea de energía m/m
  - $q$  es el gasto lateral por unidad de longitud en m<sup>3</sup>/s/m,
  - $V_x$  es el componente en la dirección x de la velocidad del gasto lateral;
- Además, x representa la distancia (m) y t es el tiempo (s).

En la ecuación (1.2) el segundo y tercer término corresponden a la aceleración local y convectiva (llamados comúnmente términos de inercia).

Es de importancia mencionar que la ecuación de continuidad es utilizada en todos los métodos para el tránsito de avenidas; no así la ecuación dinámica la cual es complicada en su resolución por lo que habitualmente se utiliza una simplificación de la misma, dependiendo de

que si el flujo es uniforme permanente, flujo no uniforme permanente o flujo no uniforme no permanente.

Entonces, los parámetros del tipo de flujo que se analicen dan como resultado distintas hipótesis para calcular la pendiente de fricción y como consecuencia diferentes métodos para simular el tramo del cauce, los cuales se expondrán más adelante.

Si se considera en la ecuación dinámica que el gasto lateral es nulo ( $q = 0$ ) la expresión resultante puede escribirse como:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.3)$$

Por otra parte, la pendiente de fricción se calcula con las ecuaciones de flujo uniforme. Las fórmulas de fricción, del tipo de la de Manning o Chezy, permiten plantear el cálculo del gasto normal  $Q_n$  de la siguiente manera:

$$Q_n = K \cdot A \cdot R^x \sqrt{S_0} \quad (1.4)$$

Para el caso en cual el flujo es no permanente,  $Q$  podría escribirse como

$$Q_n = K \cdot A \cdot R^x \sqrt{S_f} \quad (1.5)$$

Al sustituir la ecuación (1.3) en (1.5) y después de tomar en cuenta la ecuación (1.4), se obtiene

$$Q = Q_n \sqrt{1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g S_0} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g S_0} \frac{\partial v}{\partial t}} \quad (1.6)$$

## 1.8 Expresiones matemáticas para el tránsito de avenidas en vasos.

El volumen almacenado en un vaso se puede obtener a través de la ecuación de continuidad:

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad (1.7)$$

donde:  $S$  es el gasto de salida,

$E$  es el gasto de entrada y

$dV/dt$  es el cambio en el volumen de almacenamiento.

Integrando esta expresión de  $t_0$  a  $t_1$  obtenemos el volumen total almacenado.

$$\text{Volumen almacenado} = \int_{t_0}^{t_1} (I - O) dt$$

o bien, expresando la ecuación de continuidad en diferencias finitas tenemos:

$$\frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t} = \frac{I_{i+1} + I_i}{2} - \frac{O_{i+1} + O_i}{2} \quad (1.8)$$

en donde los subíndices  $i$  e  $i+1$  denotan valores al inicio y al final del intervalo de tránsito  $\Delta t$ , respectivamente.

El valor de  $\Delta t$  que se usa en el tránsito es más pequeño que el considerado en el funcionamiento de vasos; pues en el primero  $\Delta t$  se toma en horas, mientras que en el segundo, es generalmente de un mes. Habitualmente, se recomienda que el  $\Delta t$  que se utilice sea menor o igual a una décima parte del tiempo de pico del hidrograma de entrada:  $\Delta t \leq 0.1 t_p$ .

Por medio de los hidrogramas de entrada y salida de la figura (1.2) se representa el tránsito de una avenida por un vaso, estos representan antes del tiempo  $t_0$ , condiciones que permanecen estables, es decir, la entrada es igual a la salida, por el contrario, en el intervalo entre  $t_0 < t < t_1$ , la entrada es mayor que la salida y, ejemplificando esto por medio de la ecuación (1.7) se observa que el volumen almacenado en el vaso aumenta y, en consecuencia, su nivel.

El área que se encuentra dentro del hidrograma entre  $t_0$  y  $t_1$  se considera como el volumen máximo almacenado, por lo tanto, éste considerado como **volumen de superalmacenamiento** requerido para una entrada  $I(t)$  considerada y el nivel que se tenga en el tiempo  $t_1$  será el NAME para esa misma avenida. Cuando  $t > t_1$ , las salidas son mayores que las entradas y, por la ecuación (1.7), el volumen almacenado en el vaso disminuye.

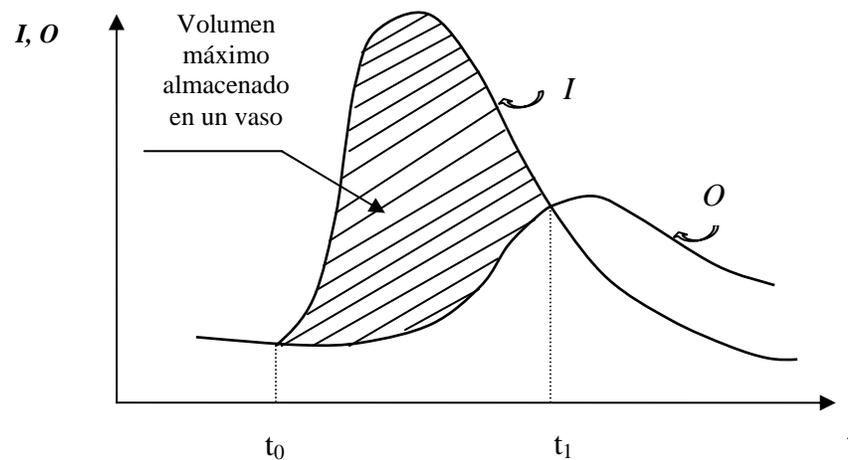


Figura 1.2 Hidrogramas de entrada  $I$  y salida  $O$

Partiendo de la ecuación de diferencias finitas (1.8) conocemos tanto el valor inicial de la entrada, la salida y el volumen en la presa ( $I_i$ ,  $O_i$  y  $V_i$ ) y como resultado del tránsito de la avenida deseamos conocer para los siguientes incrementos en la entrada,  $I_{i+1}$ , el valor de la salida y el volumen acumulado  $O_{i+1}$  y  $V_{i+1}$  respectivamente. Por lo tanto tenemos una sola ecuación y dos incógnitas, para poder resolverlo entonces se requiere de una ecuación más para tener un sistema determinado.

La ecuación que se busca es la que relacione el gasto de salida a través del vertedor con la elevación del nivel del agua. En forma general para vertedores, el gasto se determina a través de la siguiente ecuación:

$$G_v = CL (Ea - Ec)^{3/2} \text{ para } E > Ec \quad (1.9)$$

donde:  $G_v$  es el gasto a través del vertedor en  $m^3/s$ .

$C$  es el coeficiente de descarga del vertedor

$Ea$  es la elevación de la superficie libre del agua en m.

$Ec$  es la elevación de la cresta del vertedor en m.

$L$  es la longitud de la cresta del vertedor en m.

El coeficiente de  $C$  es del orden de 2, y éste es un valor muy aproximado para realizar el tránsito de la avenida. Si se elige que  $E < E_0$ , entonces  $G_v = 0$ .

Cuando la descarga por el vertedor es libre; entonces se toma la ecuación (1.9), en el caso de que se tengan compuertas para llevar una regla de operación durante el paso de la avenida, la anterior tendrá una restricción en la que el gasto de descarga debe ser menor o igual que  $G_v$ .

En situaciones en las que la obra de toma funcione al mismo tiempo en que se presente la avenida, la salida total de la presa ( $G$ ) será igual a la suma de gasto que descarga la obra de toma ( $O_T$ ) más la descarga del vertedor ( $G_v$ ) será:

$$G = G_v + O_T \quad (1.10)$$

Así, al contar con las ecuaciones (1.8), (1.9) y (1.10) y debido a que la ecuación (1.9) está en función de la elevación así como el volumen, se necesita entonces obtener la relación entre estas dos variables en el vaso la cual se obtiene a partir de la gráfica Elevación-Area-Volumen del vaso (figura 1.3), con esto, se tiene un sistema de ecuaciones determinado, cuya solución permite obtener las salidas y los volúmenes en el vaso en cada intervalo de tiempo.

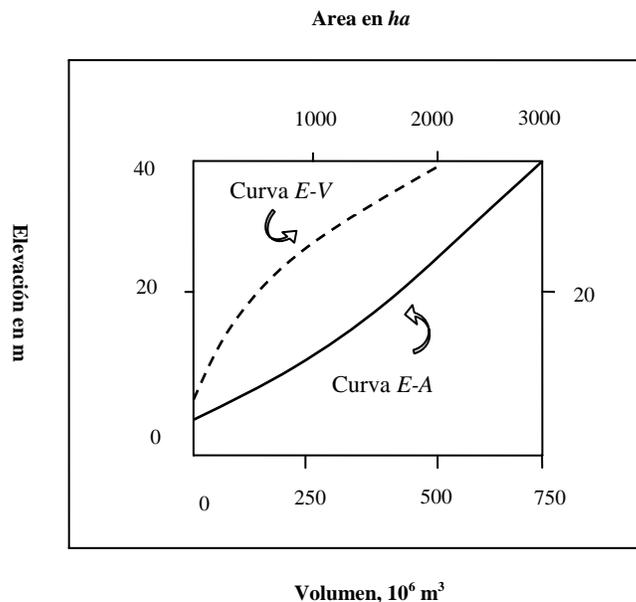


Figura 1.3 Gráfica Elevación-Area-Volumen

CAPITULO  
2  
MÉTODOS DE ANÁLISIS

## CAPITULO 2

# MÉTODOS DE ANÁLISIS

### 2.1 Introducción a los métodos de análisis al tránsito de avenidas en vasos.

Como se mencionó anteriormente, entre los distintos usos de un vaso de almacenamiento se encuentra la regulación y control de una avenida, y para que este tenga un adecuado funcionamiento, es necesario que todos sus componentes <sup>7</sup>estén bien diseñados.

Para obtener las dimensiones y características del vertedor de excedencias es necesario obtener la avenida asociada a un cierto periodo de retorno llamada avenida de diseño. Como avenida de diseño se entiende el régimen de escurrimiento que entra a un vaso de almacenamiento en cierto tiempo y cuyo tránsito por el mismo produce condiciones de descarga que permiten decidir sobre su regulación.

El cálculo de la avenida de diseño se puede llevar a cabo con métodos empíricos, estadísticos o bien por medio del hidrograma unitario<sup>8</sup>. En los métodos estadísticos no se obtiene el volumen, duración o forma de la avenida de diseño. Estas características junto con el gasto máximo o de pico, influyen de manera sustancial en el diseño del vertedor de excedencias o en la regulación de la descarga.

En el presente capítulo, se describirán los métodos **semigráfico, gráfico y numérico**, los cuales permiten calcular la capacidad de almacenamiento de un vaso para suplir una determinada demanda, la selección de cada uno de ellos dependerá de la precisión que se desee obtener, es evidente que los métodos son laboriosos, sobre todo en la primera etapa en la que se requiere hacer un análisis minucioso de los datos hidrológicos de acuerdo con el registro hidrológico que se considere.

La información necesaria para su correcta aplicación comprende:

- a) Hidrograma de entrada,
- b) Elevación del nivel del agua en el vaso y gasto de salida por el vertedor cuando

entra la avenida que corresponde al punto anterior.

---

<sup>7</sup> Obra de excedencias, Obra de Toma y Obra de desvío.

<sup>8</sup> Permite predecir la forma del hidrograma de la avenida de diseño a partir de datos de lluvia

- c) En el instante en que se presenta el hidrograma del inciso a.
- d) Gasto de salida por la obra de toma
- e) Curva elevaciones-volúmenes de almacenamiento
- f) Curva elevaciones-gasto de salida de la obra de excedencias o su ecuación correspondiente.

## 2.2 Método semigráfico.

Partiendo de la ecuación de continuidad  $\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(I_1 + I_2)}{2} = \frac{(V_2 + V_1)}{\Delta t}$  y multiplicando por 2 ambos miembros se tiene  $I_1 + I_2 - (O_1 + O_2) = \frac{2V_2}{\Delta t} - \frac{2V_1}{\Delta t}$  ahora agrupando términos conocidos y desconocidos a la derecha e izquierda, respectivamente nos queda  $I_1 + I_2 + \left(\frac{2V_1}{\Delta t} - O_1\right) = \frac{2V_2}{\Delta t} + O_2$

Para llevar a efecto el tránsito de avenidas, es necesario construir una curva auxiliar, como la de la figura 2.1 cuyas coordenadas son

$$\left(\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i\right) \text{ contra } O_i$$

Ésta se obtiene mediante el siguiente procedimiento:

- i) Se selecciona el intervalo de tiempo  $\Delta t$  que se usará en el cálculo.
- ii) Se elige una elevación de la superficie libre del vaso  $h_i$  mayor que la elevación de la cresta del vertedor  $H$ .
- iii) Se calcula  $V_i$ , con la curva elevaciones-volúmenes de almacenamiento y la elevación  $h_i$ .
- iv) Con  $h_i$  en la curva elevaciones-Gastos de salida de la obra de excedencias, se obtiene el  $O_e$
- v) Se calcula  $O_i = O_e + O_i$ , donde  $O_i$  es el gasto de salida por la obra de toma.

- vi) Se obtiene  $\left(\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i\right)$
- vii) Se regresa al paso No. 2 tantas veces como sea necesario para definir la curva auxiliar.
- viii) Se dibuja la curva  $\left(\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i\right)$  contra  $O_i$

Obtenida la curva auxiliar se procede a calcular el tránsito de la avenida de la siguiente manera.

- ①) Se fija un nivel inicial en el vaso hi es recomendable que este nivel sea igual al del NAMO, para realizar el tránsito en las condiciones más desfavorables.
- ②) Con este nivel se calculan sus correspondientes gasto de salida  $O_i$  y volumen almacenado  $V_i$ , con las curvas y/o ecuación dadas.
- ③) Se calcula  $\left(\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i\right)$
- ④) Del hidrograma de entrada se conocen  $I_{i+1}$ , y con el resultado del paso 3 se calcula  $\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1}\right)$  usando la ecuación de continuidad  $\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1} = I_i + I_{i+1} + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i\right)$
- ⑤) El valor de  $\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1}\right)$ , obtenido en el paso anterior, se localiza en la curva auxiliar para obtener  $O_{i+1}$ .
- ⑥) Se resta  $O_{i+1}$  2 veces al término  $\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1}\right)$ , con esto se obtiene  $\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} - O_{i+1}\right)$
- ⑦) Se hace  $i = i + 1$  y se vuelve al paso 4 tantas veces como sea necesario para terminar con el hidrograma de entrada, observando que ahora  $\left(\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} - O_{i+1}\right)$  corresponde al cálculo del paso 3 para el nuevo valor de  $i$ .

Se recomienda la siguiente guía (Tabla 2.1) para tabular los resultados del tránsito de avenidas por el método semigráfico.

Tiempo hr	i	$I_i$ (m <sup>3</sup> /s)	$I_i + I_{i+1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i$ (m <sup>3</sup> /s)	$\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i$ (m <sup>3</sup> /s)	$O_{i+1}$ (m <sup>3</sup> /s)
$t_1$	1	$I_1$	$I_1 + I_2$			
$t_2$	2	$I_2$	$I_2 + I_3$			
$t_3$	3	$I_3$	$I_3 + I_4$			
:	:	:				
$t_i$	$I$	$I_i$	$I_i + I_{i+1}$			
:	:	:				
$t_n$	$n$	$I_n$	$I_n + I_{n+1}$			

Tabla 2.1

Para utilizar este método es necesario hacerlo con detenimiento, ya que el error de lectura en las figuras es acumulativo. Su aplicación requiere fijar de antemano la curva elevaciones de salida por la obra de excedencias por lo que no es utilizable cuando se selecciona una política operación compleja.

### 2.3 Método gráfico.

Así como el método semigráfico, éste consiste en relacionar el volumen almacenado ( $V$ ) y el gasto de salida ( $O$ ), el parámetro que las relaciona es la elevación ( $I_i$ ), altura que generalmente se considera a partir de la cresta del vertedero o la plantilla del túnel, según se trate de obra de excedencias u obra de desvío.

Los datos iniciales son los mismos que para el método semigráfico.

Antes de realizar el tránsito de avenidas, es necesario calcular las curvas auxiliares, las cuáles tienen como coordenadas  $\frac{2V_i}{\Delta t} \pm O_i$  vs  $V_i$

Por medio de una tabla como la siguiente (tabla 2.2) se obtiene las gráficas auxiliares:

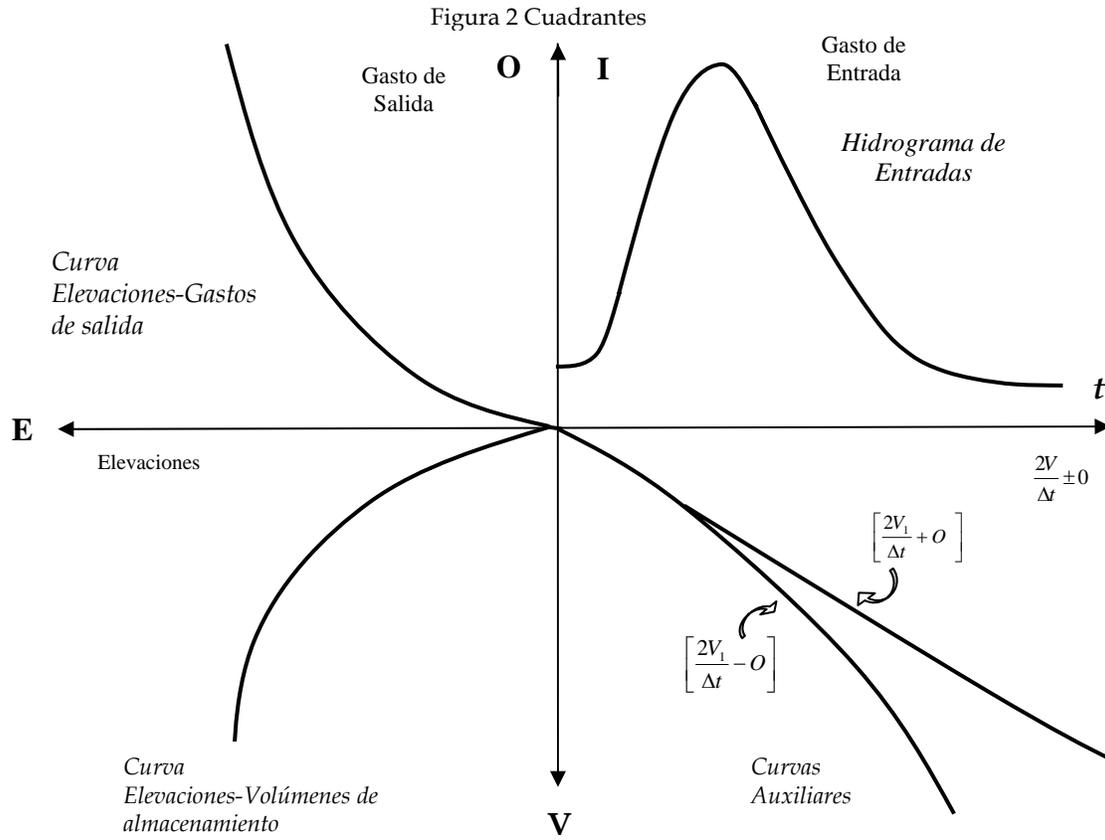
$h_i$	$V_i$	$O_i$	$\frac{2V_i}{\Delta t}$	$\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i$	$\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i$
-------	-------	-------	-------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Tabla 2.2

Como se puede observar, la construcción de las curvas auxiliares es similar a la del método analizado anteriormente, y para obtenerlas se puede proceder como sigue.

- ①. Se elige un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .
- ②. Se selecciona una elevación de la superficie libre del vaso ( $h_i$ ), mayor que la elevación de la cresta del vertedor  $H$ .
- ③. Se calcula  $V_i$ , con la curva elevaciones-volúmenes de almacenamiento y la elevación  $h_i$ .
- ④. Con  $h_i$  en la curva elevaciones-gastos de salida de la obra de excedencias, se obtiene el  $O_e$ .
- ⑤. Se calcula  $O_i = O_e + O_i$ , donde  $O_i$  es el gasto de salida por la obra de toma.
- ⑥. Se calcula  $\left(\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i\right)$  y  $\left(\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i\right)$
- ⑦. Se regresa al paso 2 tantas veces como sea necesario para definir las 2 curvas auxiliares.
- ⑧. Se dibujan las curvas  $\frac{2V_i}{\Delta t} + O_i$  vs  $V_i$  y  $\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i$  vs  $V_i$

Para hacer más práctico el método, las gráficas de elevaciones-volúmenes de almacenamiento, elevaciones-gasto de salida, curvas auxiliares e hidrograma de entradas utilizadas en el método semigráfico se reúnen para conformar un cuadrante (Figura 2) que resume todas las anteriores, para una construcción adecuada, es necesario que se elija una misma escala y sus unidades sean homogéneas.



Una vez que se cuenta con estas gráficas se procede a realizar el tránsito de la siguiente manera.

Tomando la ecuación de continuidad y denotando a los subíndices "i" e "i + 1" como el principio y el final del intervalo considerando se tiene que

$$\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1} = I_{i+1} + I_i + \left( \frac{2V_i}{\Delta t} - O_i \right)$$

para  $i = 0$

$$\frac{2v_1}{\Delta t} + O_1 = I_1 + I_0 + \left( \frac{2V_0}{\Delta t} - O_0 \right)$$

Si se observa, el segundo miembro de la ecuación se conoce ya que todos los términos son datos iniciales y por lo tanto solo basta calcular el primer miembro.

Con el valor de  $\left( \frac{2V_i}{\Delta t} + O_i \right)$  se ingresa a la curva auxiliar que se puede visualizar en la figura 2 que corresponde al cuarto cuadrante para obtener así el  $V$  y  $O$  para  $i = 1$ .

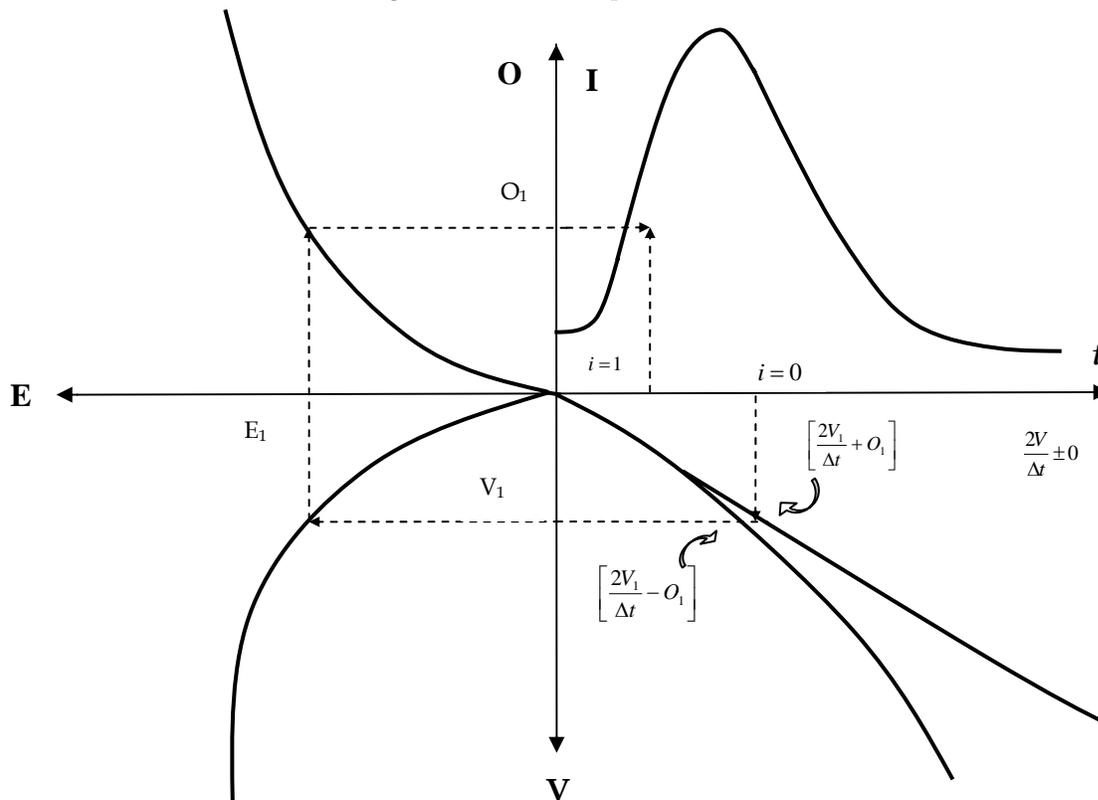
Gráficamente, se recorre el camino marcado en la figura 2.1

Para un mejor control se recomienda realizar una tabla tipo 2.3 de la siguiente manera.

$\Delta ti$	$I_i$	$I_i + I_{i+1}$	$V_i$	$O_i$
0	DATOS	DATOS	DATOS	DATOS
1			$V_i$	$O_i$
2				
:				
$i$				
:				
$n$				

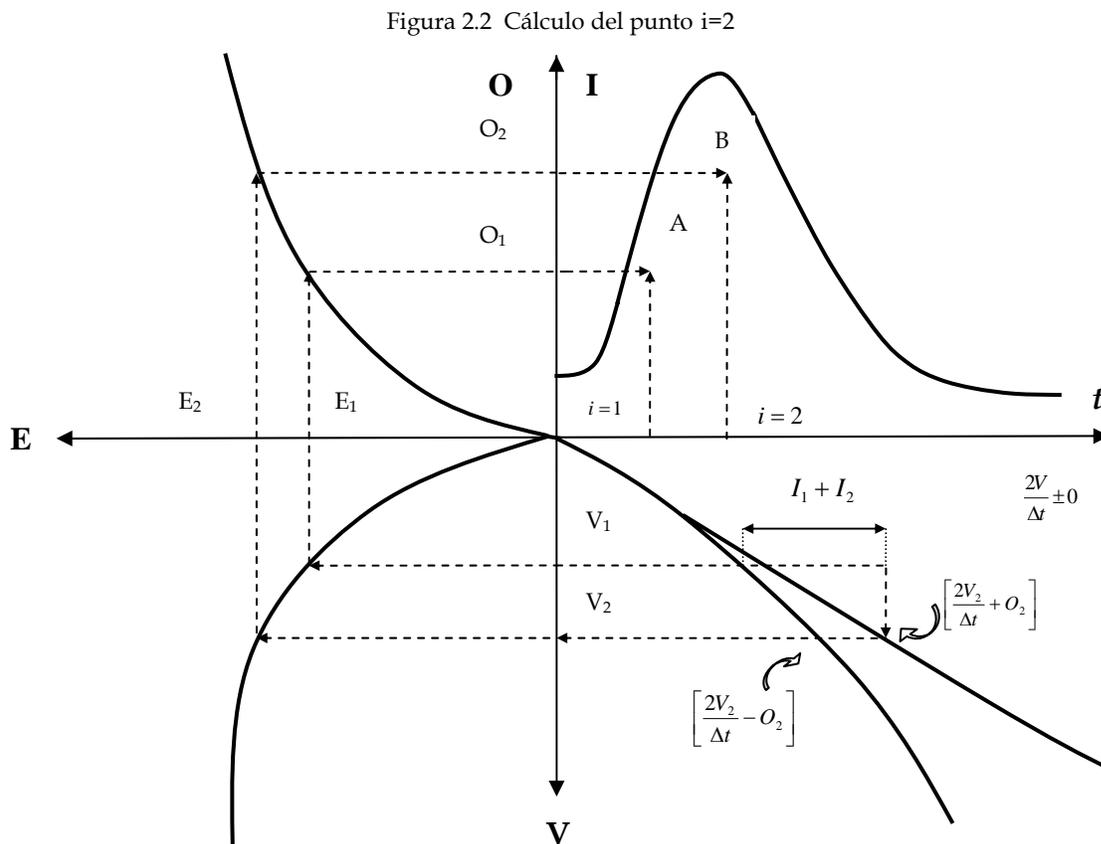
Tabla 2.3

Figura 2.1 Cálculo del punto  $i=1$



Para el cálculo de  $V_2$  y  $O_2$ , se empieza en el punto  $\left(\frac{2V_1}{\Delta t} - O_1\right)$  marcado en la secuencia anterior que corresponde a la curva (-) sumándole el valor de  $(E_2 + E_1)$ , se traza una vertical hasta cortar la curva (+) empezando el ciclo y terminando con la obtención de  $V_2$  y  $O_2$ , este procedimiento se repite hasta cubrir todo el hidrograma de entradas.

La figura 2.2 muestra el recorrido para obtener  $i = 2$ .



Finalmente se obtienen los puntos A y B correspondientes al primero y segundo puntos del hidrograma de salida o hidrograma final transitado.

## 2.4 Método numérico

Este método es un procedimiento de aproximaciones sucesivas para calcular el volumen de almacenamiento y el gasto de salida al final del intervalo  $t$ . Para aplicarlo es necesario contar con 1 computadora debido a sus características para analizar varias curvas elevaciones – gastos de salida que son muy complicadas, que se utilizan cuando se quieren aplicar reglas de operación de compuertas si el vertedor es de cresta controlada.

De acuerdo al diagrama (Figura 2.3) se puede deducir que el método consiste en:

- I. Leer los datos  $I_i, h_i, V_i, O_i, \Delta t$ , es decir la TOLERANCIA.
- II. Suponer el gasto de salida igual al que se tuvo en el instante anterior  $O_{i+1} = O_i$ .
- III. Calcular el volumen de almacenamiento al final del intervalo usando la ecuación de continuidad.
- IV. Con el volumen calculado en el paso anterior y la curva elevaciones – volúmenes de almacenamiento se calcula la elevación  $h_{i+1}$
- V. Con la elevación  $h_{i+1}$  y utilizando la curva elevaciones – gastos de salida, se obtiene el gasto de salida nuevo  $O_{i+1}$ .
- VI. Con el gasto de salida obtenido,  $O_{i+1}$ , se calcula un nuevo volumen el cual se compara con el volumen anterior y si son semejantes se imprimen los resultados y se pasa a un nuevo intervalo de tiempo, de lo contrario se hace una nueva iteración.

Tabla 2.4 Variables del método numérico

$I$	Gasto de entrada al vaso en $m^3/s$
$O$	Gasto de salida del vaso en $m^3/s$
$O_e$	Gasto de salida por la obra de excedencias en $m^3/s$
$O_t$	Gasto de salida por la obra de toma en $m^3/s$
$V$	Volumen de almacenamiento en millones de $m^3$
$h$	Elevación en el vaso en m
$\Delta t$	Intervalo de tiempo en seg.
$f(V)$	Curva Elevaciones-volúmenes de almacenamiento
$f(h)$	Curva Elevaciones-gastos de salida por la obra de excedencias
$i, i + 1$	Subíndices que representan los valores de las variables al inicio y al final del intervalo de tiempo, respectivamente

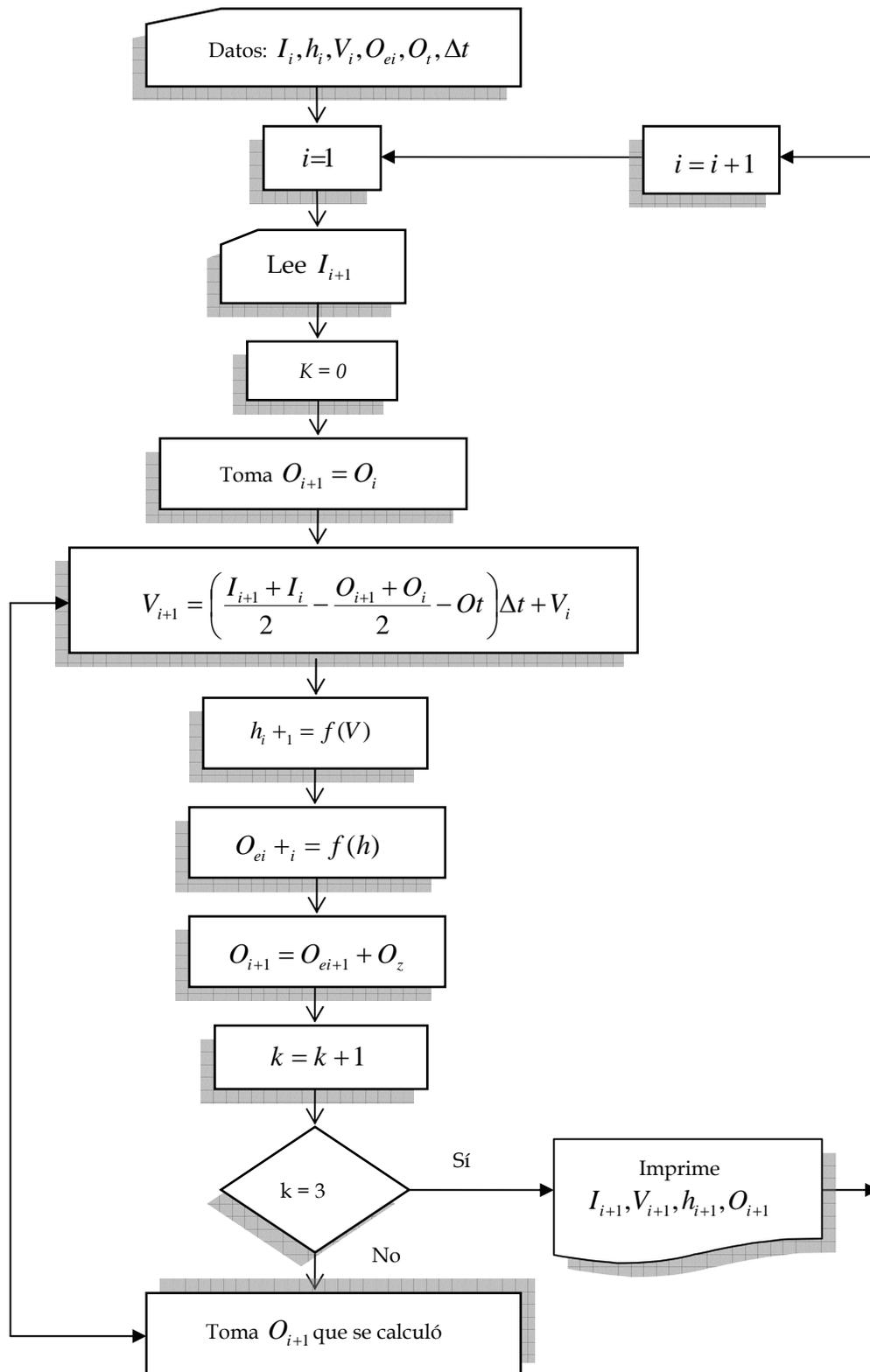


Figura 2.3 Diagrama de flujo utilizado para el método numérico

## 2.5 Introducción a los métodos de análisis al tránsito de avenidas en cauces

La importancia de transitar una creciente se refleja precisamente en la cantidad de métodos que han sido desarrollados a partir de la formulación de las ecuaciones de Saint-Venant que describen matemáticamente el comportamiento del flujo gradualmente variado no permanente en canales a superficie libre, que parten de la ecuación de continuidad y de la de cantidad de movimiento, y es a partir de ésta que, dependiendo de los términos que se excluyan, se obtienen distintos métodos (Ver la tabla 2.5) que pueden clasificarse en dos grandes grupos: a) Métodos hidrológicos o de almacenamiento, b) Métodos hidráulicos. A su vez, éstos pueden subdividirse tanto como se desee.

Los métodos hidrológicos son más numerosos y, en general, más simples. Se basan en el concepto de almacenamiento del agua y no incluyen directamente los efectos de la resistencia del flujo, es decir, se toma al río como una “caja negra” en la que el almacenamiento depende de los gastos de entrada y salida, y necesariamente se cuenta con uno o más parámetros cuyos valores son particulares del río en estudio. Una forma simple para calibrar dichos parámetros es similar el modelo en una computadora y variar su valor hasta obtener la mejor aproximación entre el hidrograma pronosticado y el medio.

Tabla 2.5 Clasificación de algunos métodos para el tránsito de avenidas

<b>Ecuaciones de Saint-Venant</b>	
<b>Simplificación</b>	<b>Método de Solución</b>
Ninguna	Esquema de diferencias finitas basado en las ecuaciones (1) y (2)
Considerando $\delta y/\delta x$ como pequeño	Método de difusión de parámetros variables
Despreciando los términos de inercia en la ecuación dinámica	Método de la onda cinemática
Sustituyendo la ec. dinámica por una expresión lineal para el almacenamiento	Método de Muskingum-Cunge

Algunas de las limitaciones de los **métodos hidrológicos** son:

- No se consideran efectos locales de cambios en el perfil de la superficie libre del agua (como los remansos y efectos de mareas).

- Suponen la existencia de una relación (tirante-gasto) única a lo largo de un tramo dado, contrario a lo observado en el nivel de la superficie libre del agua en donde el gasto es mayor cuando el flujo se incrementa.

Por su parte, los **métodos hidráulicos** describen en forma **más precisa** el proceso del tránsito, tanto en el espacio como en el tiempo, para realizarlos, se requiere información adicional de la rugosidad, geometría del cauce, condiciones de frontera, a demás de técnicas numéricas complejas.

A continuación se presentan dos métodos, el primero es un método de tránsito hidrológico que se usa comúnmente para manejar relaciones caudal-almacenamiento variables llamado método de Muskingum que para fines de este estudio resulta adecuado debido a que su simulación forma parte del software que se describirá más adelante, y el segundo corresponde a la creación de gráficos basadas en un método adecuado para fines prácticos denominado; Método de las curvas características:

## 2.6 Método de Muskingum.

Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal de un río mediante la combinación de dos tipos de almacenamiento como se muestra en la figura 2.4 .

Un almacenamiento *prismático*, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático y un almacenamiento *en cuña*, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o bien, por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado.

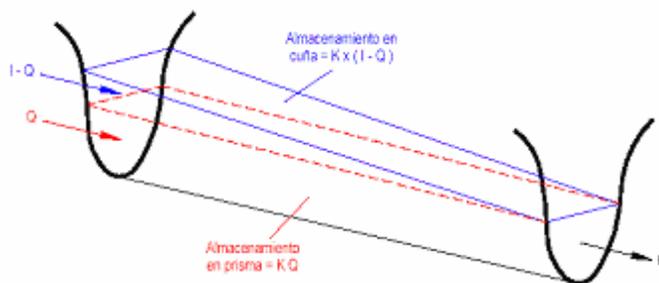


Figura 2.4 Almacenamiento por prisma y cuña en el tramo de un cauce

Durante el avance de la onda de creciente (avenida) el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida formándose lo que se llama cuña positiva y durante la recesión, el caudal de entrada es menor al caudal de salida resultando en una cuña negativa. El volumen de almacenamiento prismático es proporcional al caudal de salida, ya que se supone que el caudal de salida es proporcional al área de la sección del cauce.

Este método fue desarrollado por McCarthy en 1969 y aplicado al río Muskingum, basado en la ecuación de la continuidad y de almacenamiento que considera la relación entre el almacenamiento (V) en un tramo considerado y las entradas (I) y las salidas (O) como:

$$V = \frac{a}{b} * [X * I^{m/n} + (1-x) * O^{m/n}] \quad (2.1)$$

donde:

$a, n$  = Constantes de la relación media de elevaciones-descargas para el tramo considerado

$b, m$  = Son las constantes de la relación media de las elevaciones-almacenamiento para el tramo considerado.

$X$  = Factor que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas al tramo, en el almacenamiento del mismo.

El método considera los siguientes supuestos:

$$\frac{m}{n} = 1 ; \quad \frac{b}{a} = K$$

De manera que la ecuación (2.1) se transforma en  $V = K * [X * I + (1 - X) * O]$  (2.2)

donde “K” se conoce como la constante de almacenamiento y es una relación entre el almacenamiento y la descarga, su dimensiones esta en función del tiempo.

Considerando un intervalo de tiempo, donde “i” e “i+1” denotan el principio y final del mismo, se tiene en la ecuación (2.2) como:

$$\Delta V = V_{i+1} - V_i = K * [X * (I_{i+1} + I_i) + (1 - X) * (O_{i+1} - O_i)]$$

Sustituyendo  $\Delta V$  de la ecuación anterior próxima, en la ecuación de continuidad se tiene que:

$$\frac{(I_{i+1} + I_i)\Delta t}{2} - \frac{(O_{i+1} + O_i)\Delta t}{2} = K[X(I_{i+1} - I_i) + (1 - X)(O_{i+1} - O_i)] \quad (2.3)$$

despejando  $O_{i+1}$  resulta:

$$O_{i+1} = \frac{\left(KX + \frac{\Delta t}{2}\right)I_i}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} + \frac{\left(\frac{\Delta t}{2} - KX\right)I_{i+1}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} + \frac{\left(K(1-X) - \frac{\Delta t}{2}\right)O_i}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (2.4)$$

Si aceptamos las siguientes consideraciones

$$C_1 = \frac{\left(KX + \frac{\Delta t}{2}\right)}{\alpha}; \quad C_2 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{2} - KX\right)}{\alpha} \quad C_3 = \frac{\left(K(1-X) - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\alpha}$$

donde  $\alpha = K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}$

La ecuación (2.4) queda como

$$O_{i+1} = C_1 * I_i + C_2 * I_{i+1} + C_3 * O_i \quad (2.5)$$

Nótese que si se combinan los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se tiene  $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Es recomendable que se utilice el mismo criterio que en el tránsito de avenidas en vasos, al seleccionar  $\Delta t$ . Con la ecuación (2.5) se puede realizar el tránsito de avenidas en cauces teniendo como datos  $\Delta t$ ,  $K$  y  $X$ .

Cuando no existen datos disponibles de otras avenidas, las constantes  $K$  y  $X$  se toman como sigue:

El parámetro  $X$  varía entre 0.0 y 0.5, cuando  $X = 0.0$  el volumen almacenado en el tramo es sólo función de la salida (O) (las entradas no tienen efecto), si las entradas y las salidas fueran igualmente importantes  $X$  sería igual a 0.5. En términos generales, se puede decir que  $X$  se aproxima a 0.0 en cauces muy caudalosos y de pendiente pequeña y a 0.5 en caso contrario.

A falta de otros datos, es recomendable tomar  $X = 0.2$  como un valor medio.

El parámetro K es aproximadamente igual al tiempo de viaje de la onda a través del

tiempo 
$$K = \frac{L}{\omega}$$

donde: L = longitud del tramo

$\omega$  = Velocidad promedio del pico de la avenida, la cual puede estimarse en relación con la velocidad media del agua (V)

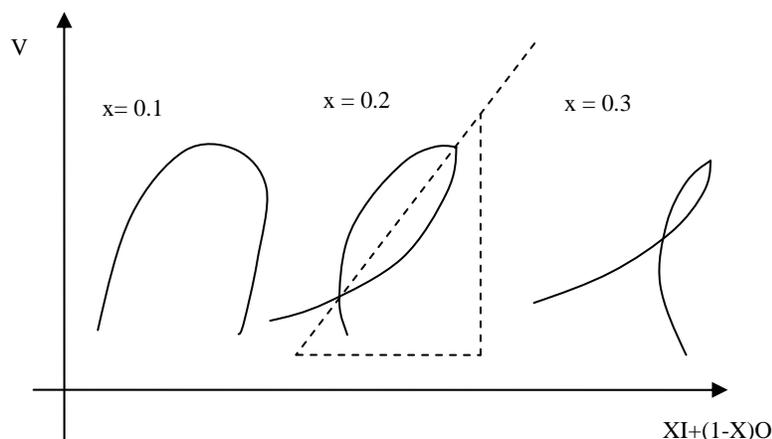
$$\omega = 1.5 V$$

Si existen datos disponibles de otras avenidas, los parámetros "K" y "X" pueden ser estimados a partir de un gráfico de V como las ordenadas Y  $[XI + (1 - X)O]$  como abcisa.

El criterio se toma de la siguiente manera:

Se supone un valor de "X" y se calcula  $[XI + (1 - X)O]$  y el resultado se grafica contra el volumen almacenado, la gráfica tendrá que ser una línea recta de pendiente K si el valor de X es el correcto. En caso contrario, es necesario suponer otro valor de X hasta que se obtenga aproximadamente una línea recta como la de la figura 2.5

Figura 2.5 Determinación de los parámetros del método de Muskingum



## 2.7 Método de las curvas características

Este método se considera como aproximado pero simple y adecuado para fines prácticos, está basado en las siguientes hipótesis:

a. El canal está dividido en un número de tramos. Cada tramo es relativamente corto y tiene prácticamente características físicas constantes. La avenida es entonces desplazada sucesivamente de tramo en tramo. En general, el tramo práctico más corto es la sección entre las 2 estaciones más próximas de nivelación.

b. Los datos de caudal son dados a iguales intervalos de tiempo o periodos de desplazamiento. Dentro de este periodo, el aumento o disminución de flujo de entrada y salida es supuesto que varía linealmente.

c. El flujo de entrada y salida son ambos tomados como una medida de almacenaje en el tramo. Esta hipótesis es cierta si una avenida está siendo desplazada a través de un embalse a nivel tranquilo donde la variación en el almacenamiento entre los niveles creciente y decreciente de la onda de avenida, no es apreciable. En el caso de una corriente, la longitud de un tramo para el tránsito no debe ser demasiado largo o estas variaciones serán exageradas. Teóricamente, la longitud del tramo no debe exceder del flujo en el tramo, aunque se ha encontrado en muchos casos que tramos considerablemente más largos son permitidos.

d. El flujo en el tramo, aumentos locales desde flujos tributarios no medidos, agua subterránea, lluvia o cualquier forma de precipitación, y decrementos locales debidos a la evaporación o pérdidas, son ignorados si las cantidades son pequeñas. Si las cantidades son grandes, ellas son agregadas o deducidas del flujo de entrada según sea el caso.

Si retomamos la ecuación de continuidad para el intervalo dado se tiene que

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(O_1 + O_2)}{2} = \frac{(V_2 - V_1)}{\Delta t}$$

Simplificando y agrupando términos

$$\frac{2V_1}{\Delta t} - O_1 + I_1 + I_2 = \frac{2V_2}{\Delta t} + O_2$$

Cuando  $\Delta t = 1$  día, la ecuación anterior resulta  $2V_1 - O_1 + I_1 + I_2 = 2V_2 + O_2$  (2.6)

o de otra forma  $I_1 + I_2 - (O_1 + O_2) = 2(V_2 - V_1)$

Esta ecuación constituye la base del método presente. Si  $\Delta t$  no es igual a 1 día, entonces los valores de  $\frac{V_1}{\Delta t}$  y  $\frac{V_2}{\Delta t}$  deberán ser utilizados en lugar de  $V_1$  y  $V_2$ , respectivamente, en el cómputo y construcción de las curvas en el desplazamiento a ser descrito como sigue:

**A.- Construcción de las curvas características:**

Estas curvas se construyen sobre el gráfico de coordenadas (V) vs. (O+V) (ver la figura 2.6).

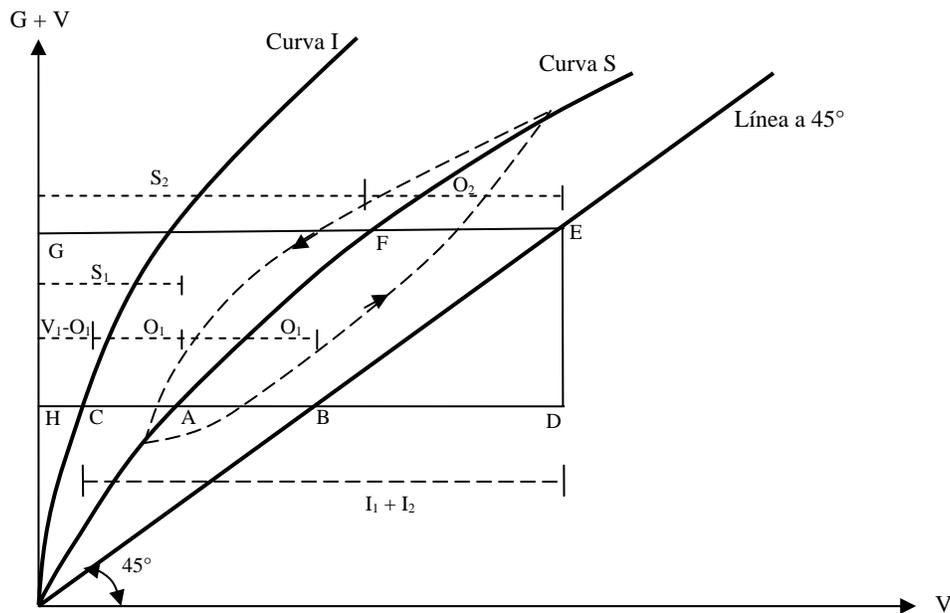


Figura 2.6 Curvas características para el tránsito de avenidas

La abcisa representa el almacenamiento en  $m^3$ , y la ordenada representa la suma de la salida del flujo en  $m^3$  por segundo y el almacenamiento en  $m^3$ , se obtienen de la siguiente manera:

- ①) Dibujar la línea a 45° empezando en el origen con una pendiente de 45°.
- ②) Trazar (V) contra (O + V) , obteniendo la curva S.

Al trazar la curva S se obtendrá una figura en forma de bucle, si dicho bucle no es ancho, una curva media fijada a ojo puede ser dibujada para representar una relación lineal entre (V) y (O+V) . Si el ancho del bucle es ligeramente grande, la curva media S puede ser construida tal como se ve en la figura 2.7 . En esta, una curva de (V) contra (I+V) también en la forma de un bucle es trazada sobre el lado derecho del eje. En ambos lados de los ejes coordenados, se han

construido líneas verticales en las abscisas iguales correspondientes a un cierto almacenamiento  $V$ . Las líneas intersecan los bucles en los puntos  $A, B, A'$  y  $B'$ . Los puntos  $A$  y  $A'$  están sobre los bordes del periodo de descanso.

Se dibujan líneas rectas  $AA$  y  $BB$ , las cuáles se intersectan en  $C$ . Dibujar una línea horizontal desde  $C$  a la derecha para encontrar la intercepción vertical  $AB$  en el punto  $C$ , éste es el punto ( $C'$ ) requerido sobre la curva de almacenamiento  $S$  correspondiente al almacenamiento dado  $V'$ .

Se puede mostrar que la ordenada de  $C'$  representa la suma de  $V'$  y una cierta descarga  $Q$  cuyo valor es el promedio para el ascenso y descenso de los niveles de la avenida.

③) Construir la curva Imagen (curva I en la figura 2.6), cuya abscisa es igual a  $(V_1 - O_1)$ .

Esta es una imagen de la línea a  $45^\circ$  reflejada horizontalmente sobre el lado izquierdo de la curva. La curva puede ser construida fácilmente, haciendo la intercepción horizontal entre la curva y la curva  $S$  igual a la intercepción horizontal entre la curva  $S$  y la línea a  $45^\circ$ .

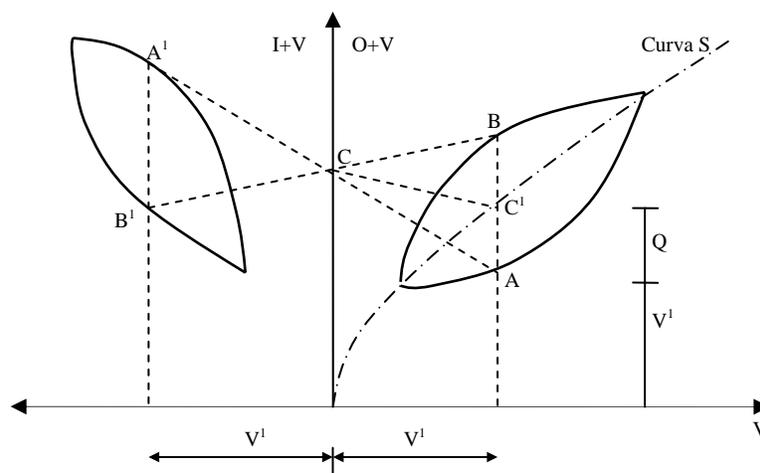


Figura 2.7 Construcción de la curva media S

### **B.- Determinación del flujo de salida**

Este se basa sobre las curvas características (figura 2.6) y el hidrograma de entrada de la avenida a ser transitada. El periodo de desplazamiento se ha tomado como 1 día.

- ①) El flujo de salida inicial al principio del primer periodo de tránsito debe ser conocido o supuesto. Se debe notar que, si el valor supuesto, el error incluido al sumir el valor no será magnificado lo bastante para producir efectos apreciables en el resultado.
- ②) Localizar una intersección horizontal AB igual al flujo de salida inicial entre la línea a 45° y la curva S.
- ③) Extender AB hacia la izquierda para encontrar la curva I en C.
- ④) Extender AB hacia la derecha al punto D, de tal forma que  $CD = I_1 + I_2$
- ⑤) Dibujar la línea vertical DE desde D hacia arriba para encontrar la línea a 45° en E.
- ⑥) Dibujar la línea horizontal EF desde E a la izquierda para encontrar la curva S en F.
- ⑦) Medir la longitud de EF, la cuál es igual al flujo de salida en el extremo del periodo de tránsito, o lo que es lo mismo  $O_2$ .
- ⑧) Continuar el ciclo de los pasos anteriores arrancando desde el punto F, el que corresponde al punto A en el ciclo previo. Así, los valores sucesivos de flujo de salida se pueden obtener, y el hidrograma de salida puede construirse.

El procedimiento anterior para determinar el flujo de salida se puede desarrollar como sigue: Extender Cd y EF horizontalmente hacia la izquierda para encontrar los ejes coordenados en H y G, respectivamente. Entonces, a partir de la figura 2.6 se tiene:

$$HD = HA - CA + CD = V_1 - O_1 + I_1 + I_2$$

$$GE = GF + FE = V_2 + FE \text{ pero } HD = GE ,$$

por lo tanto:  $V_1 - O_1 + I_1 + I_2 = V_2 + FE$  si se compara esta ecuación con la ecuación (2.6) , es evidente que Fe debe ser igual a  $O_2$ .

CAPITULO  
3  
SOFTWARE DISPONIBLE

## CAPITULO 3

# SOFTWARE DISPONIBLE

### 4.1 Introducción.

La mayoría de los distintos casos de interés práctico que se presentan dentro del campo de la hidráulica están relacionados con el movimiento del agua en cauces naturales o en estructuras hidráulicas artificiales<sup>9</sup> que debido a sus características, resultan ser demasiado complejos, lo cual no resulta fácil tratarlos únicamente con expresiones matemáticas complicadas, esto hace necesario el uso de modelos de simulación numérica hidrológica.

La simulación hidrológica pretende reproducir con la ayuda de un computador, todos los procesos físicos utilizando un modelo matemático que los represente adecuadamente. Los modelos de simulación hidrológica diseñados hasta la actualidad, incluyen modelos de simulación de eventos que pueden modelar un evento único de precipitación-escorrentía, modelos de simulación continua que incluyen procedimientos que permiten determinar la entrada, salida y almacenamiento del agua en un río, también existen modelos que permiten simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

Los primeros modelos numéricos se desarrollaron exclusivamente para resolver un problema particular, generalmente de flujo agua. Actualmente, los modelos son genéricos con capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo similares, con módulos adicionales para resolver otros fenómenos como: transporte de sedimentos, dispersión de contaminantes, calidad del agua e inclusive modelación de hábitat de peces u otras especies acuáticas.

El éxito de la simulación radica en la representación de los fenómenos involucrados en cada fenómeno de estudio en la forma más detallada y precisa posible, por ejemplo, en casos simples de simulación en modelos unidimensionales, la discretización se realiza a nivel de secciones transversales, siendo el método de cálculo por etapas: se hace el balance energético

---

<sup>9</sup> Presas, canales, desarenadores, bocatomas, puentes.

en una sección y se procede a la siguiente, hasta terminar con todas. Si hay problemas de convergencia en una sección, se asume el tirante crítico y se continúa con la siguiente. Por ello estos programas son robustos, rápidos y numéricamente confiables.

Para casos en 2D y 3D en los que se requieren resolver ecuaciones diferenciales, se hace uso de una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos principales son el Método de Elementos Finitos (MEF), el Método de Diferencias Finitas (MDF) y más recientemente el Método de Volúmenes Finitos (MVF).

Estos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finitos de puntos discretos en dicho dominio. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación. Estos modelos numéricos proporcionan mucho detalle y precisión, siendo capaces de manejar condiciones de borde e iniciales complejas, para los cuales no existen en la mayoría de casos soluciones analíticas.

Sin embargo, la mayoría de estos métodos requieren la solución simultánea de todos los nodos del dominio, lo que incrementa la carga computacional haciéndolos más lentos.

Con respecto a los regímenes de flujo como en el caso del **subcrítico** (Números de Froude  $Fr < 1$ ) resulta ser simple por lo que casi todos los programas tienen capacidad para modelarlo. En cambio, el flujo **supercrítico** (Número de Froude  $Fr > 1$ ) resulta ser más complejo para muchos modelos numéricos debido a la posibilidad que se formen ondas de choque o saltos hidráulicos en los cambios a régimen subcrítico, lo cual da lugar a un flujo rápidamente variado de difícil modelación.

Además, en rigor el flujo supercrítico en tramos largos sólo se produce en canales artificiales revestidos; ya que en la naturaleza los ríos aluviales ajustan su pendiente para evitar la aparición del flujo supercrítico en tramos muy largos, pues en el fondo se producen escalonamientos que forman una sucesión de pozas y rápidos con una mezcla de flujos subcrítico y supercrítico alternados, que los programas numéricos difícilmente pueden modelar con precisión.

### Variación en el tiempo

En el **flujo permanente** se asume que todas las magnitudes hidráulicas son constantes en el tiempo. Esta es la opción por defecto de todos los modelos numéricos. En el **flujo no permanente** o transitorio las magnitudes como tirantes o velocidades pueden cambiar con el tiempo, como en el caso del tránsito de una onda de avenidas a través de un río. Algunos programas tienen capacidad para modelación en régimen no permanente, siendo especialmente útiles para estudios de transporte de sedimento, pues la erosión y deposición modifican gradualmente la sección hidráulica. Sin embargo, los flujos no permanentes muy bruscos, como los originados por la rotura de presas, requieren de tratamientos especiales.

### Contornos del cauce

Las expresiones clásicas de la hidráulica consideran los contornos o fronteras del canal como **lecho rígido** indeformable, lo cual es cierto para muchas estructuras artificiales; pero no para cauces fluviales, en los cuales se presenta un **lecho móvil**. La modelación de ríos fluviales, especialmente los de lecho fino, requieren casi siempre capacidades de modelación en lecho móvil y flujo no permanente para lograr reproducir los cambios reales del fondo. La deformación del cauce durante una avenida es un fenómeno extremadamente complejo, y a pesar que no existen métodos universalmente aceptados para el transporte de sedimento, si existen modelos numéricos con opciones para calcular erosión y sedimentación, ya sea general o local, aunque casi siempre requieren ser calibrados con datos medidos en campo, lo cual limita mucho su aplicación práctica.

## 3.2 Características del software.

La modelación numérica en hidráulica con respecto a las dimensiones del flujo de estudio se clasifica en unidimensional, bidimensional y tridimensional (ver figura 3.1).

**Unidimensional:** se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras, esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. La información topográfica e

hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Asumen por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a 20 veces el ancho y cuando se busca principalmente determinar el máximo nivel de agua (por ejemplo, para diseño de diques).

Los modelos **bidimensionales** consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos (como estuarios, lagos, etc.) donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas. Estrictamente no son aplicables a casos en los que la variación vertical de la velocidad es apreciable, como por ejemplo el flujo sobre un vertedero o a través de un orificio sumergido; sin embargo mediante el uso de expresiones empíricas o similares pueden incorporarse estas singularidades dentro de la modelación.

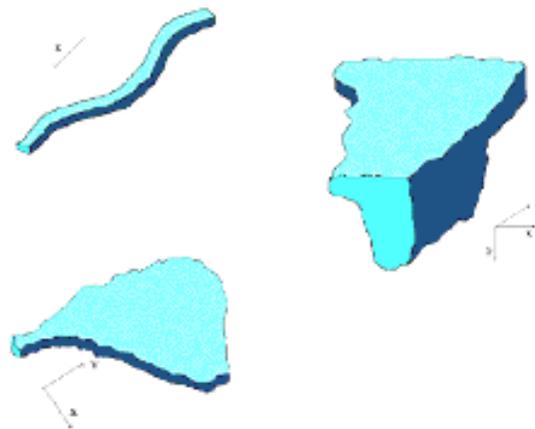


Figura 3.1 Dimensiones del flujo de estudio

Los **tridimensionales (3D)** representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico.

### 3.3 Breve descripción del software de aplicación.

En este estudio, se expone el software que mejor se adapta a los objetivos del proyecto HIDTA03-02, el primero es un software desarrollado por la Universidad de las Américas-Puebla denominado **Paquete Interactivo para el tránsito de avenidas por vasos y cauces**, el siguiente es un software libre conocido por sus siglas en inglés **HEC-RAS** (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*), este “Sistema de Análisis de Ríos” es un modelo numérico para flujo unidimensional no permanente, sin transporte de sedimentos y con capacidad para trabajar con flujos mixtos subcrítico y supercrítico. Este software permite realizar estudios de perfiles de agua, hidráulica en puentes y planicies de inundación entre otros.

### 3.4 Software desarrollado por la U. A. P.

Es un paquete interactivo para el tránsito de avenidas por vasos y cauces, que ha sido programado para ejecutarse de manera rápida y sencilla. Para esto, es necesario que el usuario identifique correctamente cada uno de los elementos que aparecen en la pantalla para poder ejecutar el programa de acuerdo al estudio en particular que va a ser analizado.

El software está diseñado para ejecutarse bajo la plataforma de Windows 98, Me, XP permitiendo acceder e introducir, datos a través de una interfase de ventanas de fácil manejo.

La interfaz del programa de usuario permite visualizar las distintas pantallas encargadas de responder a los comandos que se ingresan a través de la misma mostrando una serie de pantallas con indicaciones y datos a almacenar las cuales van solicitando la información que se necesita para ejecutar el programa de acuerdo con el menú principal seleccionado.

Este capítulo tiene como propósito explicar de manera clara la forma en que se deben introducir los datos, el uso correcto de los mismos. así como, los menús y submenús incluidos dentro del programa.

En principio, se describen las instrucciones básicas para poder acceder al programa:

**Instalación del programa.-** Para instalar el programa es necesario contar con el disco de instalación del mismo, contar con una plataforma a partir de Window 95 o superior , monitor VGA o superior por lo menos 2 MB de memoria RAM y 1000 Kilobytes en espacio de disco duro.



Figura 3.2

Para hacer la instalación debe ejecutarse el archivo “setup.exe” (figura 3.2) por medio de un doble clic desde la carpeta del PAQUETE INTERACTIVO.



Figura 3.3

### Acceso al Paquete interactivo

Para acceder al programa se da un doble clic en el icono de la Universidad de las Américas Puebla ubicado en la carpeta PAQUETE INTERACTIVO (figura 3.3).

### Pantalla de presentación

El programa inicia con una pantalla de presentación, en donde se muestra un icono de la Universidad que lo creó, la Escuela y Departamento al que pertenece, el nombre del paquete interactivo, autor y asesor que lo realizaron. (figura 3.4).

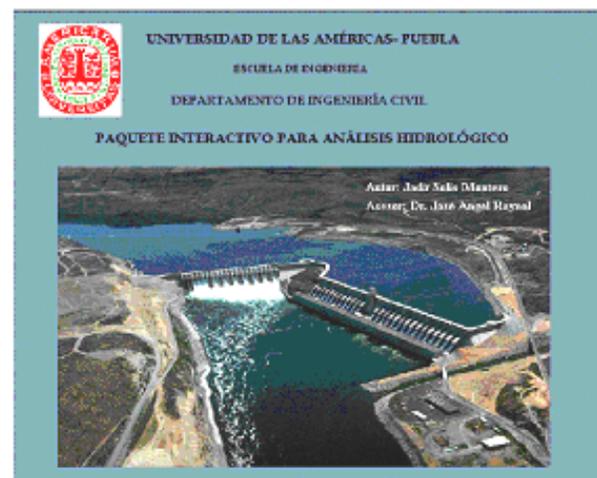


Figura 3.4

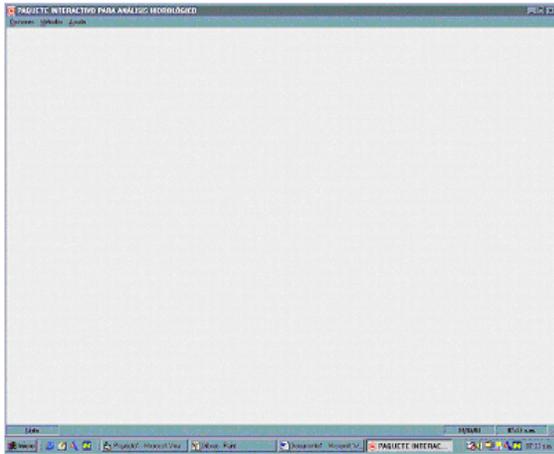


Figura 3.5

El menú Opciones (figura 3.6) de la ventana principal contiene el submenú acerca de, donde se menciona el autor y asesor del paquete interactivo, sí como el periodo en el que se realizó el programa.

El submenú permite salir completamente de la aplicación.

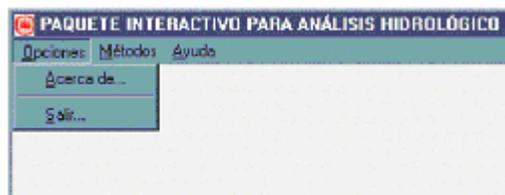


Figura 3.6

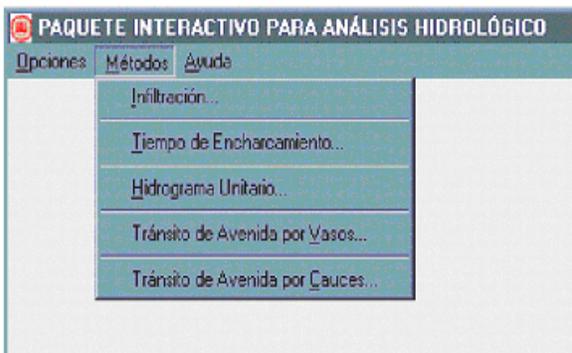


Figura (3.7)

El menú Métodos (figura 3.7) contiene las funciones principales del programa, que es calcular la infiltración, el tiempo de encharcamiento, el hidrograma unitario instantáneo, el tránsito de avenidas por vasos y tránsito de

avenidas por cauces, que es de particular interés para su aplicación la cual se realizará posteriormente.

### Cálculo del tránsito de Avenidas por Vasos.

Para ingresar a este método se deberá colocar en el menú Métodos y hacer clic en tránsito de avenidas por vasos (figura 3.8). Al realizar esta orden, aparece una pantalla inicial en la cual se ingresan los datos de entrada correspondientes para un cálculo en particular.



Figura 3.8

Existen dos formas para ingresar los datos en esta pantalla, la primera se puede realizar ingresando los datos en ese momento o mediante la creación de un archivo de datos realizado en Excel (figura 3.9). Si se elige la primera, se inicia con el ingreso en las casillas de los datos correspondientes a las curvas de elevación-capacidad y elevación-gasto vertedor para ambos casos, en cambio, si se crea un archivo, es necesario que se elabore como sigue:

Ingresar en la primera hoja de Excel, los datos relacionados con el tiempo en la columna A y al gasto de entrada en la columna B.

En la segunda hoja, se crearán dos columnas A y B en las que se anotarán respectivamente los datos correspondientes a la Curva Elevación-Capacidad expresados en  $Mm^3$

A	B
t [min]	I (m <sup>3</sup> /s)
0	50
6	75
12	180
18	380
24	450
30	500
36	506
42	445
48	360
54	290
60	250
66	210
72	175
78	140
84	118
90	85
96	65
102	55
108	50
114	45
120	40
126	38

HOJA 2	
A	B
Elevación (m)	Capacidad (Mm <sup>3</sup> )
54	0
56	12
58	20
60	30
62	40
64	50
66	60
68	70
70	80
72	90

HOJA 3	
A	B
Elevación (m)	Orvedor (m <sup>3</sup> /s)
58	81
60	100
62	115
64	128
66	141
66.1	148
66.2	156
66.3	164
66.4	183
66.5	200
66.7	238
66.9	262
67	308
67.5	443
68	605

Figura 3.9

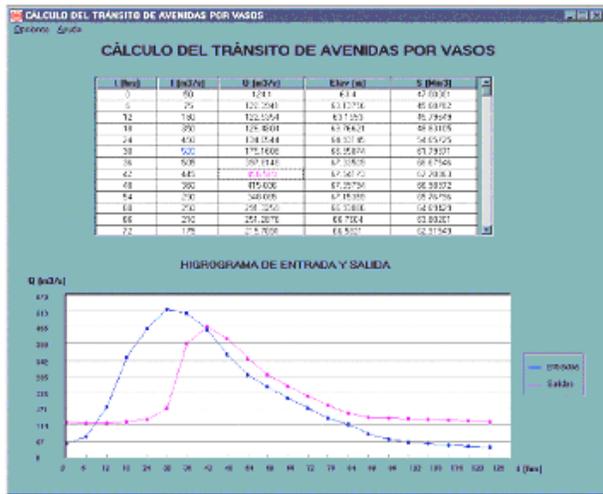


Figura 3.10

En seguida se mostrará un formulario (figura 3.10) en el que se desplegará una Tabla con los valores de las salidas calculadas  $O$  ( $m^3/s$ ), así como los valores correspondientes al tiempo y las Entradas  $I$  iniciales en ( $m^3/s$ ).

Esta pantalla muestra las gráficas correspondientes al hidrograma de entrada y al de salida, respectivamente, en ella también se puede observar las elevaciones con sus respectivas capacidades y gastos de salida por el vertedor, las cuales, pueden guardarse e imprimirse si se desea, para ello hay que desplazarse al menú Opciones.

### Cálculo del tránsito de Avenidas por Cauces (Muskingum Original)

Para ingresar tiene que pulsar el submenú Tránsito de Avenidas por cauces del menú métodos, al igual que el anterior, se desplegará una pantalla de ingreso de datos como el que se muestra en la figura 3.11

En la tercera hoja, se procederá de igual manera a la anterior, los datos correspondientes a las elevaciones se integrarán a la columna A y los del gasto del vertedor, en la columna B. Una vez realizado esto, se procede a introducir un valor inicial para el gasto de salida y pulsar el botón de calcular.

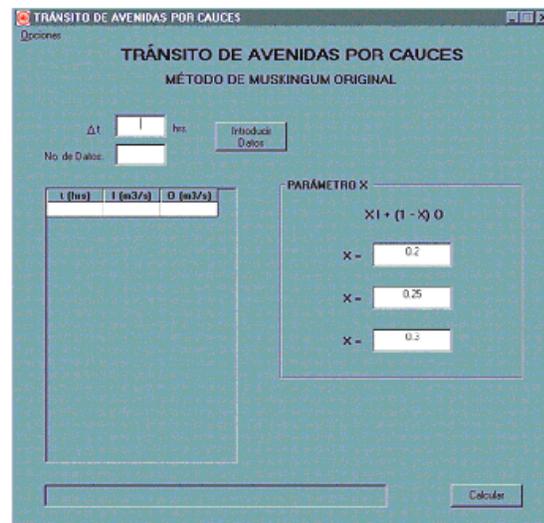


Figura 3.11

Si se quiere introducir los datos a partir de un archivo, se procede al igual que en el tránsito en cauces, se crea un archivo con el nombre Cauces.xls.

En la primera hoja, se crean tres columnas correspondientes a, tiempo, entradas I (m<sup>3</sup>/s) y salidas O (m<sup>3</sup>/s), respectivamente, obtenidas a partir de la sección de un río. En la segunda hoja, se introducirán en dos columnas A (tiempo) y B (entradas), correspondientes a los datos del Hidrograma de Entrada de una avenida, como se muestra en la Figura 3.12 .

HOJA 1				HOJA 2		
	A	B	C		A	B
1	t (min)	I (m <sup>3</sup> /s)	O (m <sup>3</sup> /s)	1	t (min)	I (m <sup>3</sup> /s)
2	0	22	22	2	0	40
3	6	29	21	3	1	59
4	12	35	21	4	2	130
5	18	71	26	5	3	240
6	24	109	34	6	4	350
7	30	111	44	7	5	610
8	36	139	55	8	6	1090
9	42	100	55	9	7	960
10	48	86	75	10	8	750
11	54	71	80	11	9	610
12	60	59	85	12	10	525
13	66	47	84	13	11	460
14	72	39	80	14	12	1520
15	78	32	75	15	13	1210
16	84	26	64	16	14	1190
17	90	24	54	17	15	1095
18	96	22	44	18	16	930
19	102	21	35	19	17	810
20	108	20	30	20	18	750
21	114	19	25	21	19	650
22	120	18	22	22	20	660
23	126	18	19	23	21	600
				24	22	500
				25	23	400
				26	24	310
				27	25	250
				28	26	150
				29	27	170
				30	28	140

Figura 3.12

Cabe mencionar que en este método se incluyen 3 parámetros a considerar con respecto a X, de los cuales dependerá la exactitud de los resultados finales. Este programa propone los siguientes valores: 0.2, 0.25 y 0.3, respectivamente. Sin embargo, se puede optar por elegir valores distintos a los anteriores, siempre y cuando estos no sean menores a 0 y no excedan a 0.5.

### Pantalla de resultados preliminares

La siguiente ventana (figura 3.13) muestra una tabla con los cálculos correspondientes a  $XI+(I-X)O$  para cada valor del parámetro X. Con estos datos preliminares, se grafican los valores para  $XI+(I-X)O$  contra el almacenamiento acumulado obteniéndose tres gráficas relacionadas con cada uno de los valores de X. De estas tres, solo deberá seleccionarse una, ésta debe ser aquella que muestre un comportamiento recto, es decir, en la que su regresión lineal se aproxime a 1.0. Una vez seleccionada la gráfica, se hace clic en el botón Transitar Avenida.

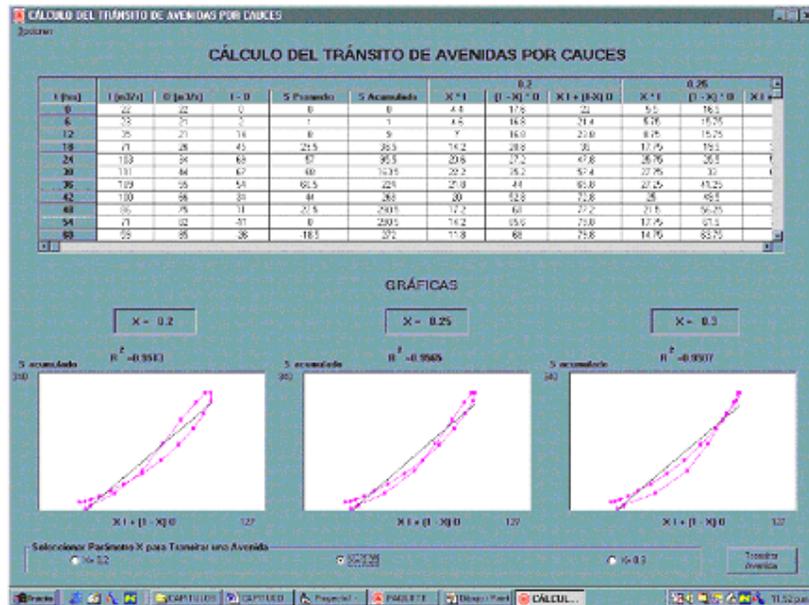


Figura 3.13

**Pantalla en la que se hace transitar una avenida**

En esta ventana (figura 3.14) se muestran los valores del parámetro K, las constantes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  que al sumarse deben dar un valor igual a la unidad. Con estos valores, el método de Muskingum obtiene el comportamiento del río y transita una avenida sobre él para saber el gasto máximo que transitaría sobre el río.

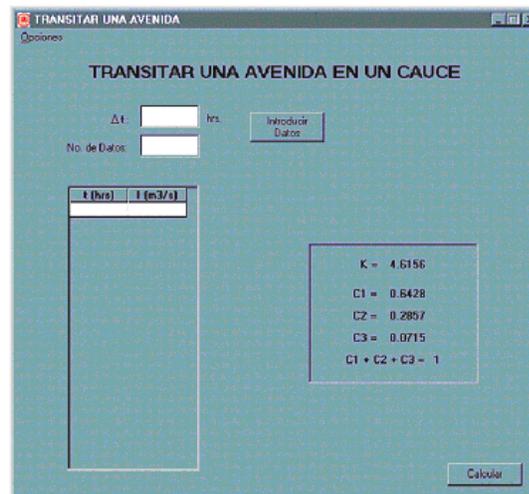


Figura 3.14

Pantalla del cálculo del tránsito de una avenida por el Método de tránsito de avenidas por Cauces.

En esta última ventana (figura 3.15), se muestra el hidrograma de salida, que resulta del cálculo del tránsito de avenidas por un cauce, donde a partir de un hidrograma de entradas se pretende encontrar el parámetro  $X$  que mejor se ajuste a las características del cauce.

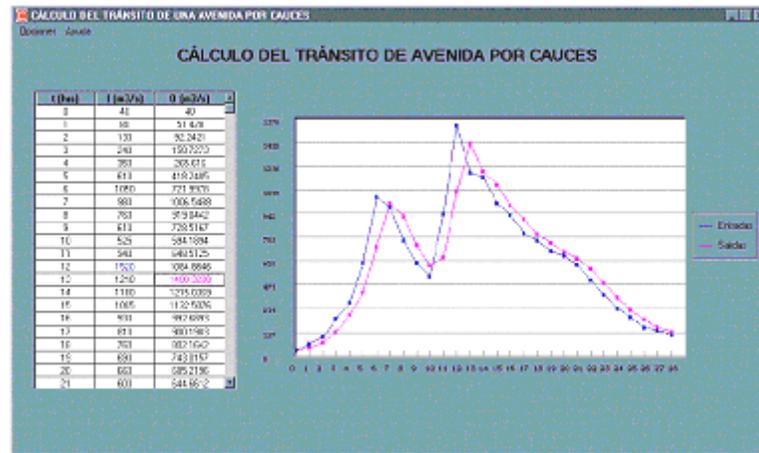


Figura 3.15

Estos resultados pueden guardarse en un archivo de Excel o imprimirse.

Pantalla inicial para el cálculo del método de tránsito de avenidas por cauces (Muskingum modificado)

Para ingresar al subprograma hay que acceder al menú principal Métodos. La metodología que se maneja en éste es igual al interior, solo que el archivo se guardará con el nombre de CaucesModificado.xls y los datos guardados en él se mostrarán en la pantalla inicial como se muestra en la figura 3.16

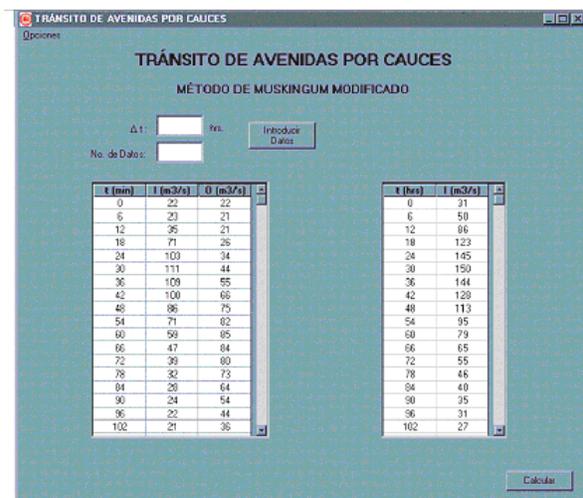


Figura 3.16

**Pantalla del cálculo del tránsito de una avenida por el método de tránsito de avenidas por cauces (Muskingum modificado)**

En esta pantalla (figura 3.17) se muestran los resultados del cálculo realizado mediante el método de Muskingum modificado en la que se observan los valores que corresponden a los parámetros  $k$  y  $\epsilon$  (o  $x$ ) obtenidos mediante este procedimiento, que a diferencia del método de Muskingum original en el en función del valor  $x$  seleccionado se obtendría un valor para  $k$ , aquí no es necesario esto, ya que se obtienen directamente

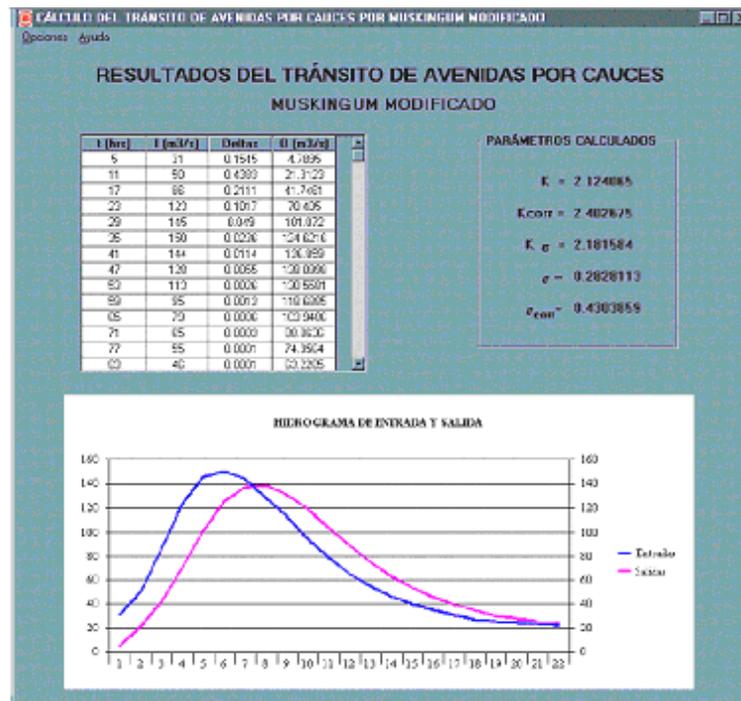


Figura 3.17

### 3.5 HEC-RAS

El programa computacional denominado **HEC-RAS 3.1** (Sistema de Análisis de Ríos) fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano. El modelo numérico incluido en este programa permite predecir las áreas inundables y de estructuras hidráulicas, obtener los perfiles de la superficie del agua asociados a

la forma del cauce, en régimen sub y supercrítico que permite conocer el efecto de diversos tipos de obstrucciones y evaluar las intrusiones de agua en zonas inundables.

La información obtenida mediante este programa puede ser útil entre otras cosas para:

- a) Estudios de riesgos de inundación.
- b) Ordenación de usos del suelo en márgenes y riberas.
- c) Dimensionado de encauzamientos.
- d) Análisis del efecto de infraestructuras sobre la circulación del agua en sistemas fluviales.
- e) Estudios de Hidráulica de puentes y planicies de inundación.

El programa está diseñado para el cálculo de perfiles hidráulicos para flujo de variación gradual fija, para canales naturales o artificiales. Puede calcular perfiles tanto de flujo subcrítico como de flujo supercrítico y considera los efectos causados por obstáculos en el lecho tal como puentes, alcantarillas, vertederos y otras estructuras. El procedimiento de cálculo se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional con pérdida de energía debido a la fricción por medio de la ecuación de Manning. El método de cálculo generalmente se le conoce como el método convencional por pasos. El programa esta diseñado para aplicación en estudios de manejo de lechos de crecientes y de seguridad de inundaciones. El ingreso de datos y los resultados pueden estar en unidades inglesas o métricas.

### Componentes del software

El sistema de modelación HEC-RAS está desarrollado para un uso interactivo en un ambiente amigable, el paquete incluye una Interfaz de Uso Gráfico (GUI) que permite el análisis apoyado en gráficas y tablas de los componentes de análisis hidráulico tales como:

*El análisis del perfil de la superficie del agua para el flujo gradualmente variado constante.* Este componente puede manejar una red completa de canales, de un sistema dendrítico, o de un solo alcance del río, es capaz de calcular los perfiles subcríticos, supercríticos y mezcla de los mismos al modelar el flujo del régimen del agua de la superficie. El procedimiento de cómputo básico se basa en la solución de la ecuación unidimensional de la energía. Las pérdidas de energía son evaluadas por la fricción y la contracción/expansión

(coeficiente multiplicado por el cambio en cabeza de la velocidad). La ecuación del ímpetu se utiliza en las situaciones donde el perfil de la superficie del agua varía rápidamente. Estas situaciones incluyen los cálculos mezclados del régimen del flujo (es decir, saltos hidráulicos), sobre todo en la hidráulica de puentes, y los perfiles de la evaluación en los confluencias del río (ensambladuras de la corriente).

*Simulación Inestable Del Flujo:* Este componente es capaz de simular el flujo inestable unidimensional que atraviesa una red completa de canales abiertos, el cual fue desarrollado sobre todo para los cálculos del régimen del flujo subcrítico. Los cálculos hidráulicos para las secciones representativas, los puentes, las alcantarillas, y otras estructuras hidráulicas que fueron desarrolladas para el componente del flujo constante fueron incorporados en el módulo inestable del flujo.

*Almacenaje y gerencia de datos:* El almacenaje de datos se logra con el uso "completamente" de archivos (ASCII y binario), así como el Hec-hec-dss. Los datos de entrada del usuario se almacenan en ficheros "planos" bajo categorías separadas del proyecto, del plan, de la geometría, del flujo constante, del flujo inestable, y de los datos del sedimento. Los datos se pueden transferir entre Hec-ras y otros programas utilizando el Hec-hec-dss.

*Gráficos y divulgación:* Los gráficos incluyen los diagramas x-y del diagrama esquemático del sistema del río, de las secciones representativas, de los perfiles, curvas de clasificación, hidrogramas, y de muchas otras variables hidráulicas. También se proporciona un diagrama tridimensional de secciones representativas múltiples. Los usuarios pueden seleccionar las tablas predefinidas o desarrollar sus propias tablas modificadas para requisitos particulares.

### **Hidráulica de Hec-Ras**

Si usted recuerda de la hidráulica, el flujo constante describe las condiciones en las cuales la profundidad y la velocidad en una localización de canal dada no cambian con el tiempo. El flujo gradualmente variado es caracterizado por los cambios de menor importancia en profundidad y velocidad del agua de seccionado transversalmente a la sección representativa. El

procedimiento primario usado por Hec-ras para computar los perfiles superficiales del agua asume un panorama constante, gradualmente variado del flujo, y se llama el método directo del

paso. El procedimiento de cómputo básico se basa en una solución iterativa de la ecuación de la

energía:  $H = Z + Y + \frac{\alpha V^2}{2g}$ , que indica que la energía total (h) en cualquier localización dada a lo largo de la corriente es la suma de energía potencial ( $Z + Y$ ) y la energía cinética ( $\alpha V^2 / 2g$ ). El cambio en energía entre dos secciones representativas se llama la pérdida principal ( $h_L$ ). Los parámetros de la ecuación de la energía se ilustran en la figura 3.18 siguiente:

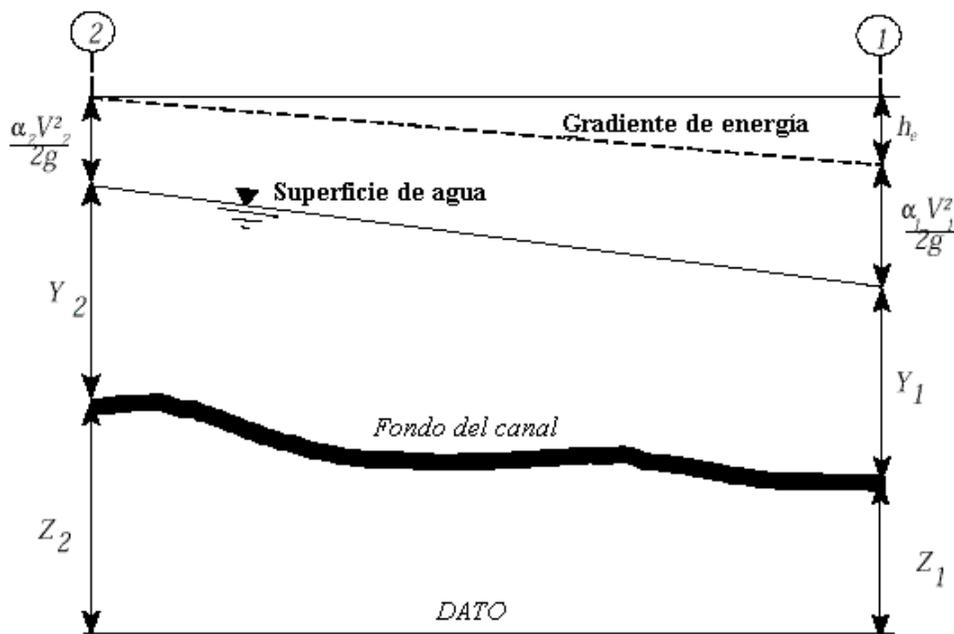


Figura 3.18

Dado el flujo y el agua la elevación superficial en una sección representativa, la meta del método directo del paso es computar la elevación de la superficie del agua en la sección representativa adyacente. Si los cálculos proceden de contra la corriente a río abajo o viceversa, depende del régimen del flujo. El número sin dimensiones de Froude se utiliza para caracterizar el régimen del flujo, donde:

- $Fr < 1$  denota el flujo subcrítico.
- El  $Fr > 1$  denota flujo supercrítico

- El  $Fr = 1$  denota flujo crítico

Para un panorama del flujo subcrítico, que es muy común en canales naturales y artificiales, los cálculos directos del paso comenzarían en el final en sentido descendiente del alcance, y progresan contra la corriente entre las secciones representativas adyacentes. Para el flujo supercrítico, los cálculos comenzarían en el final por aguas arriba del alcance y procederían río abajo.

### Requisitos de Hardware y Software

El programa HEC-RAS se encuentra libremente disponible y puede descargarse gratuitamente junto con el manual de instrucciones en la página del Centro Hidrológico de Ingeniería en: <http://www.wrc-hec.usace.army.mil/>. Antes de que usted instale el software de Hec-Ras, cerciórese de que su computadora tenga por lo menos el hardware y el software requeridos mínimos:

Se recomienda un Pentium III o más alto

Disco duro con por lo menos con 40 megabytes de espacio libre (se recomienda 100 megabites o más), unidad CD Rom, MS WINDOWS 95, 98, 2000 o XP.

### Procedimientos de Instalación

Inserte el CD de Hec-ras.

Si el programa de la disposición no funciona, utilice a explorador de las ventanas para comenzar **setup.exe** programa sobre el CD.

Siga las instrucciones de la disposición en la pantalla.

El programa de la disposición crea automáticamente un grupo de programa llamado **HEC** El icono del programa de Hec-Ras será contenido dentro del grupo de programa de HEC. El usuario puede crear un icono del atajo abriendo el explorador de Windows y arrastrando el Hec-Ras ejecutable sobre el tablero del escritorio. El Hec-Ras ejecutable se puede encontrar en el directorio de `c:\Program Files\hec\ras` con el nombre "RAS.EXE".

### ➤ Iniciar en HEC-RAS

Después de instalar el programa, aparecerá un icono que identifica al programa , al hacer clic en él aparecerá una ventana principal como la que se muestra en la figura 3.19 siguiente:

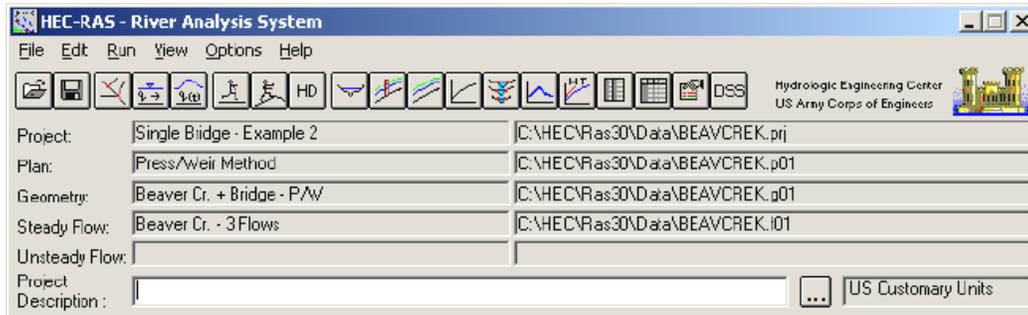


Figura 3.19

En adelante esta ventana se denominará como ventana principal.

La ventana principal contiene una barra de menú (figura 3.20) con las opciones siguientes:

**Archivo (File):** Esta opción se utiliza para la gerencia de archivo. Las opciones disponibles bajo menú de archivo incluyen: Nuevo proyecto; Abrir, Guardar proyecto, Re-titular el proyecto, Eliminar proyecto, Resumen, Importar datos a Hec-2; Importar datos a Hec-Ras; Generar informe, Exportar datos a GIS; Exportación al Hec-hec-dss y Salida.

**Editar (Edit):** Esta opción se utiliza para incorporar y corregir datos. Los datos se categorizan en cuatro tipos: Datos Geométricos; Datos Del Flujo Constante; Datos Inestables Del Flujo; y datos del sedimento.

**Ejecutar (Run):** Esta opción se utiliza para realizar los cálculos hidráulicos. Las opciones de menú incluyen: Análisis De Flujo Constante; Análisis De Flujo Inestable; Análisis Del Sedimento; y funciones hidráulicas del diseño.

**Ver (View):** Esta opción contiene un sistema de las herramientas que prevén exhibiciones gráficas y tabulares de la salida modelo. El artículo de menú de la visión incluye actualmente: Secciones transversales, Perfiles Superficiales del Agua, Diagrama general del Perfil, Curvas del Grado, Diagramas de la Perspectiva de X, Y y Z,

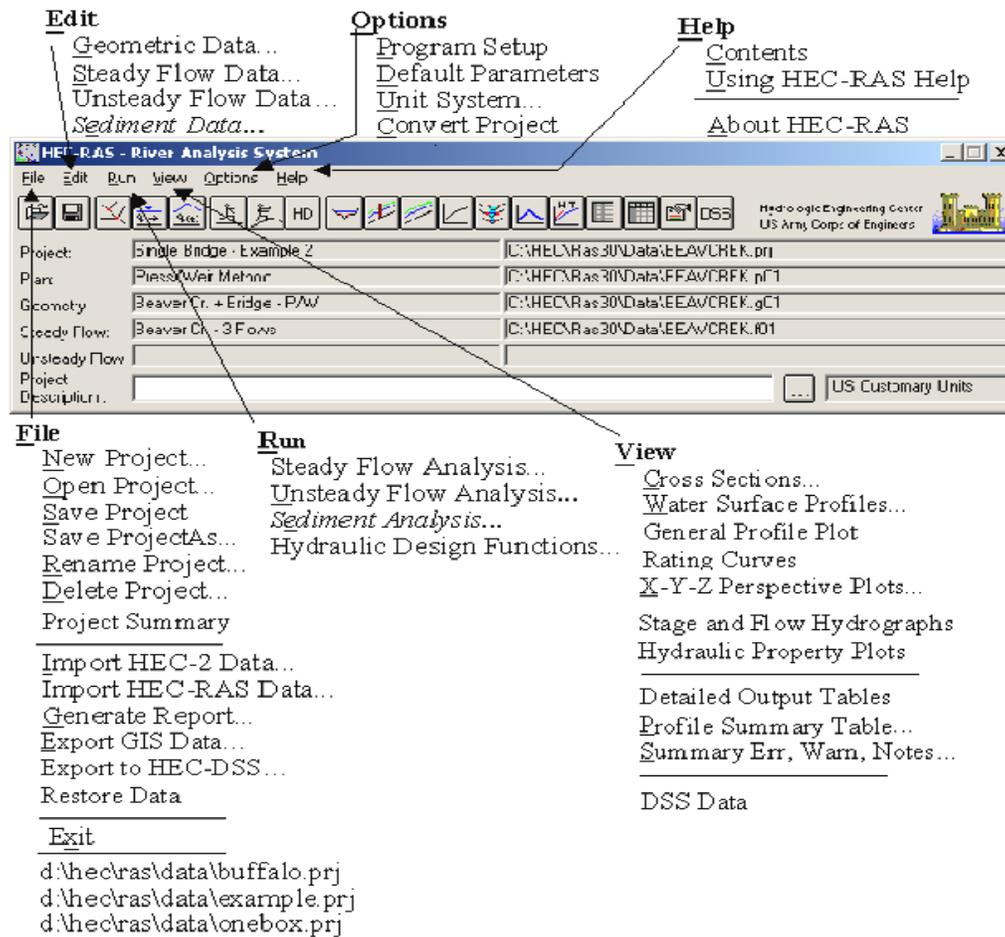


Figura 3.20

Hidrogramas del flujo, Diagramas Hidráulicos de las Características, Tablas detalladas de la Salida, Tablas Sumarias del Perfil, y Notas.

**Opciones (Options):** Este submenú permite que el usuario cambie de opción a partir de la disposición del programa, parámetros de defecto determinados y de que establezca el sistema de las unidades por defecto (E.U.) o Sistema Métrico así como la conversión del Sistema Métrico a unidades Internacionales.

**Ayuda (Help):** Esta opción permite que el usuario consiga ayuda en línea, así como información adicional de la versión actual sobre Hec-ras.

En la figura 3.21, se muestra la barra de herramientas de las funciones principales que conforman la interfaz del programa

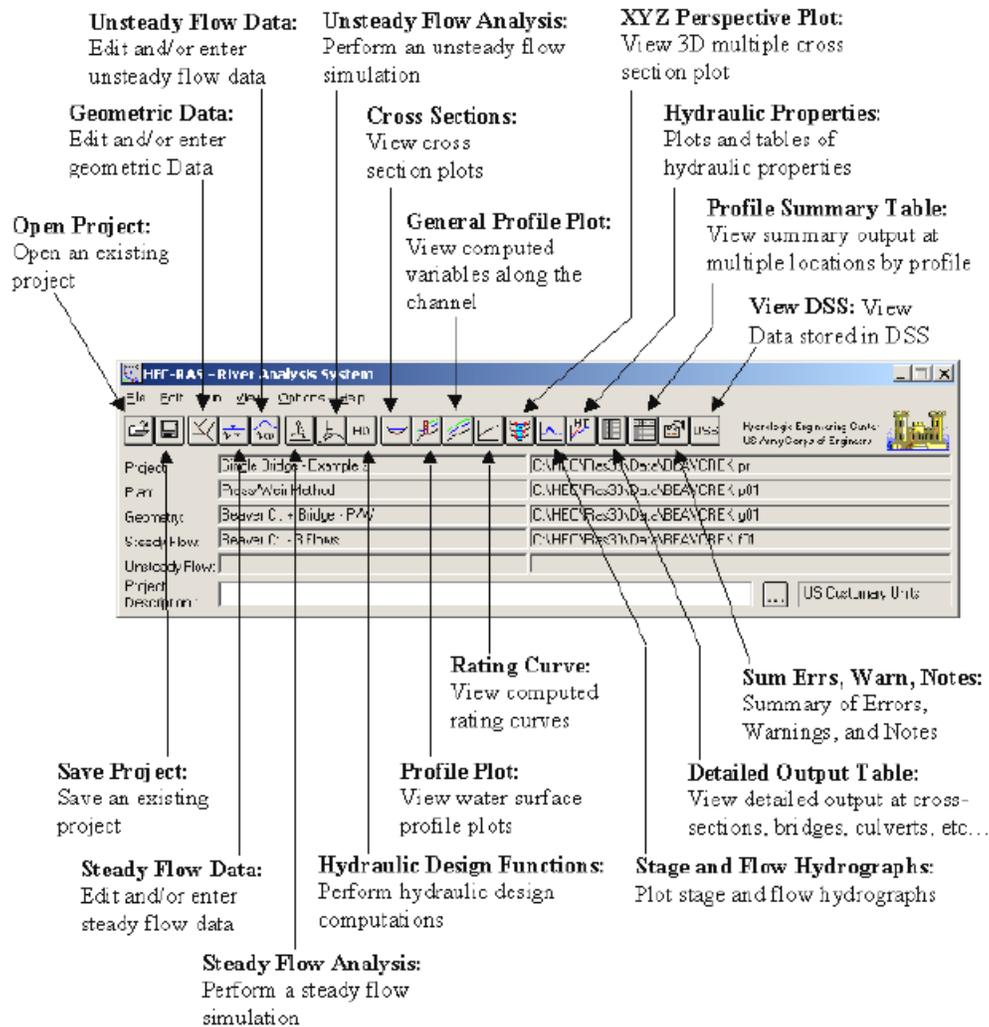


Figura 3.21 Barra de herramientas principales de la interfaz

### ➤ Empezar un proyecto nuevo

El primer paso en desarrollar un modelo hidráulico con Hec-Ras es establecer en qué directorio usted desea trabajar e incorporar un título para el nuevo proyecto. Al comenzar un nuevo proyecto, se accede al menú de archivo en la ventana principal de Hec-ras y se selecciona **Nuevo proyecto**. Esto traerá para arriba una ventana nueva del proyecto según lo demostrado en la figura 3.22

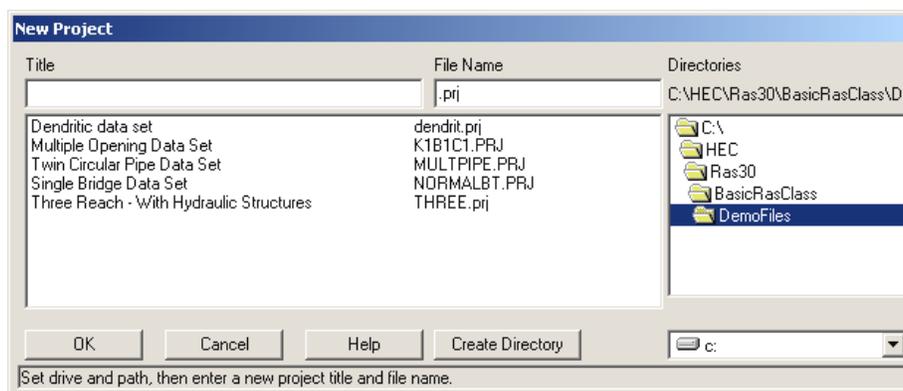


Figura 3.22

Todos los nombres de fichero del proyecto para Hec-Ras son asignados con la extensión "prj". **Nota:** Antes de que se incorporen cualquier dato geométrico y los datos del flujo, el usuario debe seleccionar las unidades del sistema (inglés o métrico) en que se desea trabajar.

### ➔ Definir un proyecto:

Para cada proyecto de Hec-Ras, se requiere de tres componentes básicos: los datos de la **geometría**, del **flujo** y del **plan**. Los datos de la geometría, por ejemplo, consisten en una descripción del tamaño, de la forma, y de la conectividad de las secciones representativas de la corriente. Asimismo, los datos del flujo contienen valores de la descarga. Finalmente, los datos del plan contienen la información pertinente a las especificaciones del funcionamiento del modelo, incluyendo una descripción del régimen del flujo. Cada uno de estos componentes se analiza más adelante de manera individual, básicamente la información necesaria está comprendida en dos campos los cuales son: información geométrica e información de flujo, los cuales se describen a continuación:

### ➔ Geometría del Río:

Para acceder a la opción (Geometric data) se hace clic en el tercer botón de la izquierda, con lo cual aparecerá la siguiente ventana (figura 3.23), en ella se incorporan los datos geométricos que definen el sistema de flujo, e incluyen los datos geográficos (localizaciones del río, elevaciones, secciones representativas) así como los datos hidráulicos; es decir **la Planta**.

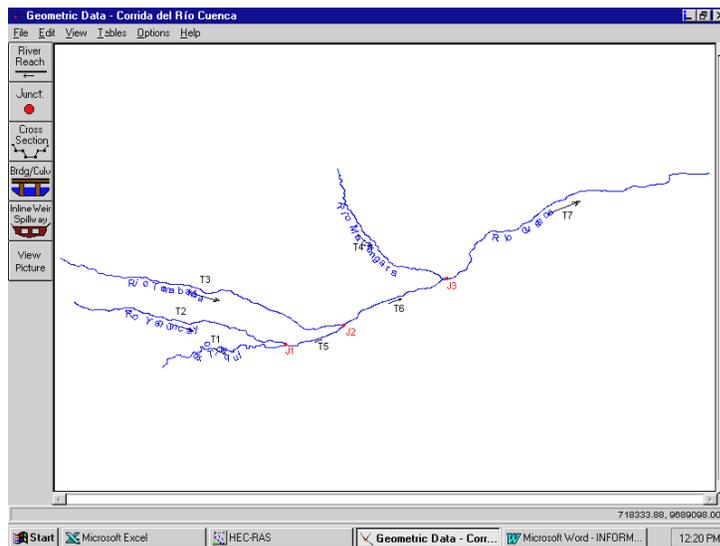


Figura 3.23

**Ingreso de la planta del río (River Reach)**, el ingreso puede hacerse mediante:

**A mano alzada:** se pica el icono de River Reach y se despliega un lápiz, con el cual vamos dibujando con el ratón, pero esta opción es un poco compleja puesto que la planta dibujada

puede no coincidir con la realidad.

**Ingreso de coordenadas reales x, y:** a través del icono Edit, se despliega esta posibilidad, pudiendo copiar las coordenadas previamente calculadas en una hoja de cálculo, esta opción resulta más exacta para representar la planta del río.

**Importado de un GIS (Sistema de Información Geográfica):** el cual facilita la entrada de las coordenadas reales (datos) ahorrando con esto tiempo.

**Ingreso de juntas (Junct):** las juntas van donde hay unión de dos ríos y son asignadas con un nombre. Es necesaria en el caso de una red la introducción de juntas, las mismas que se identifican con la letra J. Los tramos de ríos se introducen independientemente los cuales terminan y comienzan en la misma coordenada. Como se ve en la figura 3.23, la red está formada por siete tramos y tres juntas.

➡ **Ingreso de secciones transversales (Cross Section)**, para el ingreso de éstas, se despliega un cuadro de diálogo, en el cual se introducen la distancia y la elevación de cada

punto, pudiendo introducir hasta 500 puntos de una misma sección; el ingreso de datos se hace de izquierda a derecha, en la dirección del flujo. En este mismo cuadro de diálogo se introducen:

Los coeficientes de rugosidad, los cuales pueden ser ingresados en la sección transversal y en cualquier cantidad. En cuanto a la determinación de éstos, se han realizado salidas al campo para hacer una observación del tipo de material de los lechos y vegetación de los márgenes, para tener una idea preliminar del coeficiente de rugosidad.

Distancia entre secciones transversales, las distancias entre secciones que se debe ingresar son en número de tres: izquierda, centro y derecha, con lo cual queda establecida cada una de las secciones, con su respectiva ubicación.

Si la información es obtenida mediante GIS se hacen cortes transversales para cada río en los lugares donde se pueda representar un tramo, en donde hay curvas o cambio de pendiente o caudal, el ancho de la sección transversal es variable, dependiendo del tamaño de la orilla de inundación. Cabe indicar que las secciones en la planta del Hec Ras no se ven en algunos casos perpendiculares al eje del río, ya que para sacar la información del GIS, los cortes se realizan perpendicularmente.

En la figura 3.24 se presenta la planta con la ubicación de las secciones que ejemplifican para este caso, las del río Tarqui, en el que se incluyen también los principales puentes. Cabe indicar que las coordenadas del eje del río se ingresan de aguas arriba hacia aguas

abajo.

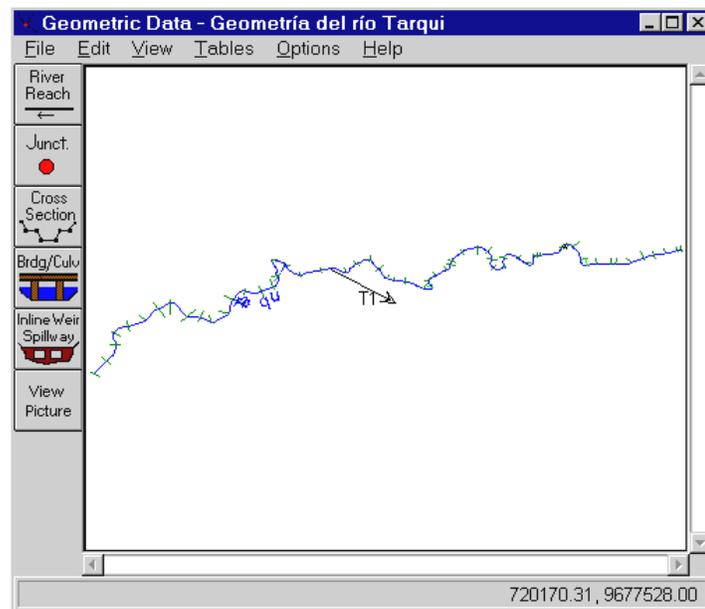


Figura 3.24

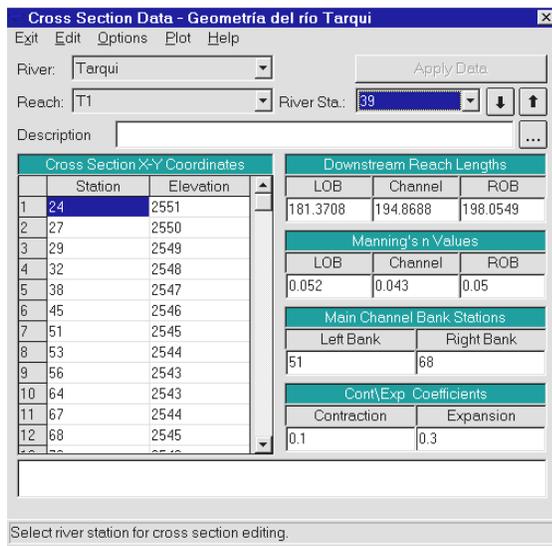


Figura 3.25

En esta misma ventana se introducen además (con el icono Cross Section): valores de  $x$  y  $y$  de las secciones transversales que se ingresan de izquierda a derecha siguiendo la dirección del flujo, las distancias entre secciones transversales, con lo que las secciones quedan establecidas sobre la planta y ésta queda dimensionada. Además los coeficientes de rugosidad para el canal, orilla derecha e izquierda, así como también los

coeficientes de contracción y expansión (como muestra la ventana representada por la figura 3.25), los que están comprendidos dentro de *coeficientes de pérdidas*. En la siguiente figura (3.25) se muestra la ventana de diálogo en la que se ingresan los datos antes señalados. Del cuadro anterior se obtiene el dibujo de la sección transversal al hacer clic en *Plot* y eligiendo *Plot Cross Section*, dando como resultado la ventana de la figura 3.26

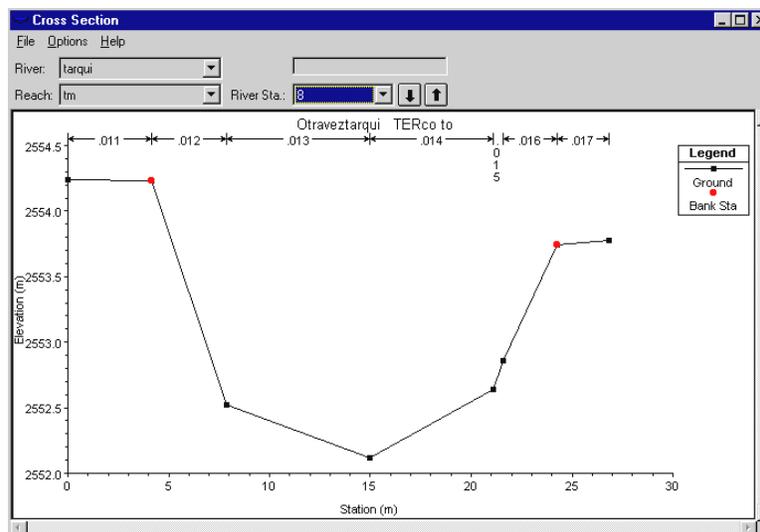


Figura 3.26

Luego de ingresadas las secciones transversales, se hace una comprobación de las mismas, así como también de las plantas de los ríos analizándolas con la información presente en el GIS.

El programa tiene la opción de interpolar secciones transversales cuando se requiere, generalmente cuando dos secciones levantadas están muy distantes. Esta aplicación se hace necesaria cuando hay que agregar secciones extras por si es que el río tiene muchos meandros.

➔ **Ingreso de puentes o alcantarillas (Bridge/Culvert)**, es otro aspecto geométrico importante en la ubicación de los puentes (figura 3.27), que para este caso del río Tomebamba son muchos, a pesar de que éstos están muy por encima del cause natural y no revierten de importancia en cuanto al caso de que el nivel de agua pueda alcanzarlos y provocar un taponamiento y por lo tanto una elevación peligrosa del nivel de agua.

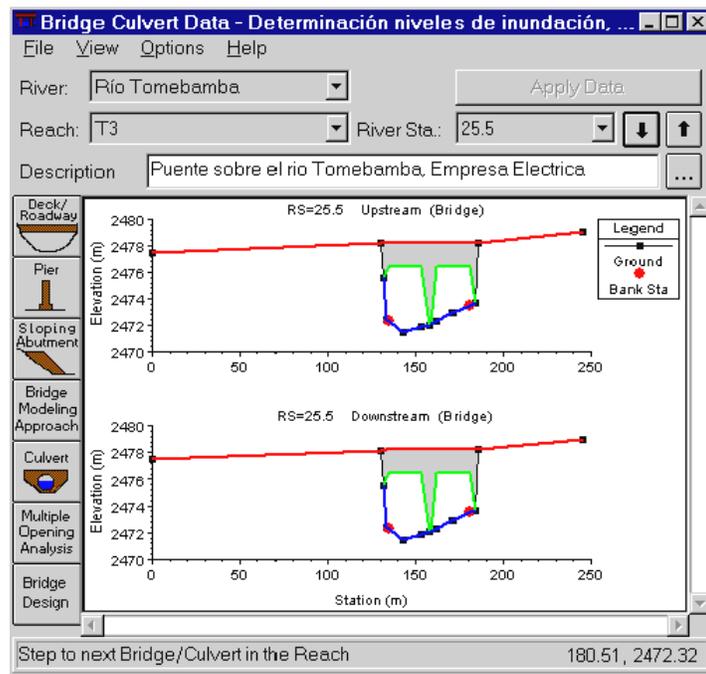


Figura 3.27

Como se puede observar, el cuadro consta de los siguientes íconos:

**Deck roadway**, aquí se introducen los niveles superior e inferior de la calzada del puente, distancia entre secciones que caracterizan al puente, ancho del mismo y otros datos necesarios.

**Pier**, datos de los pilares, si el puente los tiene.

El icono de **Bridge Modeling** sirve para introducir los métodos de pérdida en los puentes, según el flujo esté abajo, arriba o en ocasiones el flujo presionando la calzada del puente.

### ➤ Información de flujo

En cuanto al ingreso de la información del flujo (figura 3.28), ésta se integra cuando ya se tiene ingresada toda la geometría. Para los cual se requiere de la siguiente información: números de períodos de retorno, datos de caudales picos y algunas condiciones de contorno, como son las profundidades de agua, altura crítica, etc,

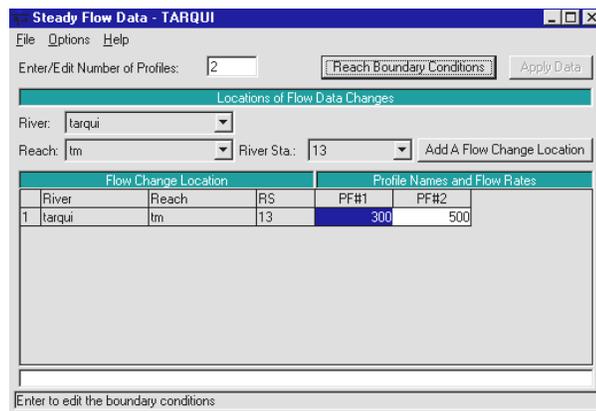


Figura 3.28

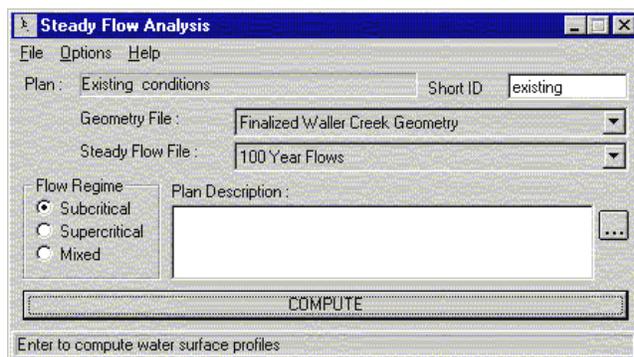


Figura 3.29

Al hacer clic en la ventana **Reach Boundary Conditions**, se despliega el cuadro siguiente en el que se introducen las condiciones de contorno antes nombrados. La posibilidad de análisis que permite el programa es un cálculo de flujo de régimen Subcrítico, supercrítico o mixto, para los cuales de debe dar alturas de agua iniciales,

(si es subcrítico, se debe dar el calado de agua, aguas abajo y calado de agua arriba, cuando el análisis de flujo es de régimen supercrítico). Los datos de flujo son entrados de aguas arriba a aguas abajo.

### ⇒ Ejecutar el modelo

Con los archivos del flujo y geometría puede ejecutarse el modelo para ello se selecciona **Simulate/ Steady Flow Analysis** a partir de la ventana del proyecto (figura 3.29). Pero antes de ejecutar el modelo, se requiere de una etapa final, la definición del plan. El plan especifica los archivos de flujo y geometría que van a usarse en la simulación. Para definir un plan se selecciona **File/New Plan**. (es decir, se pedirá un título del Plan, el cual debe tener como mínimo 12 caracteres).

Para ejecutar el modelo, hay que asegurarse de que el botón se encuentre en el régimen de flujo seleccionado, en este caso "Subcrítico" y enseguida se da un clic. Debido a que los cálculos se realizan actualmente mediante un programa basado en FORTRAN llamado SNET. Al hacer clic, se abre una ventana (figura 3.30) en el sistema DOS que muestra el progreso de la simulación. Cuando los cálculos terminan aparecerá el siguiente mensaje:

**PROGRAM TERMINATED NORMALLY** el cual da por terminado el cálculo.

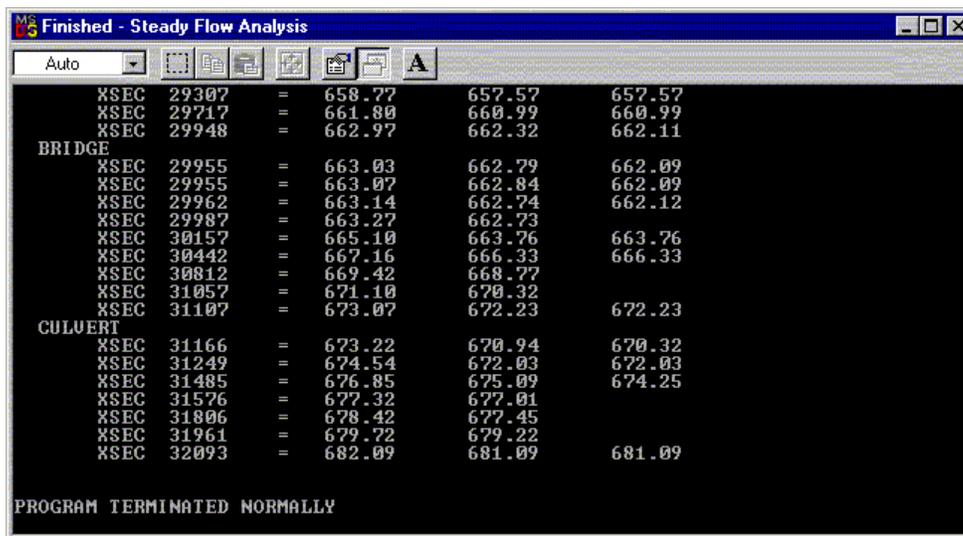


Figura 3.30

➔ **Visualización de Resultados:**

Una vez que el modelo ha finalizado con todos los cálculos, se puede empezar a ver los resultados. Varios tipos de salidas están disponibles bajo la opción **View** (Vista) de la ventana principal. Estas opciones incluyen: visualización de las secciones transversales, de los perfiles de la superficie de agua,

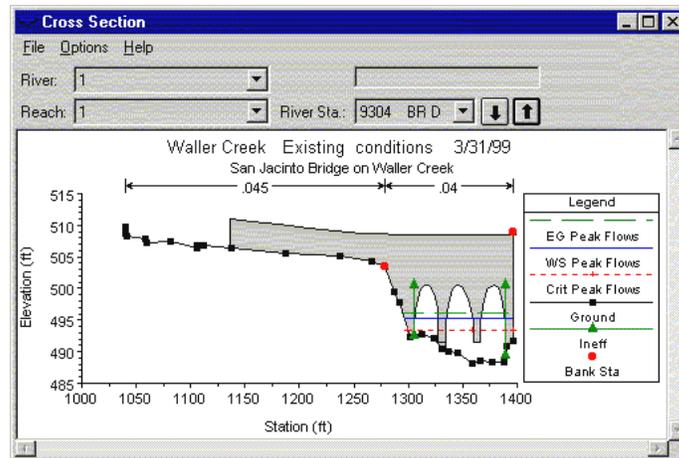


Figura 3.31

curvas de descarga, perspectivas en tres dimensiones del sistema fluvial, resultados en forma tabular en sitios específicos (Cross Section Table), (Tabla de la sección transversal) salida tabular para los perfiles (Profile Table) y un sumario de errores, precauciones y notas.

Para visualizar las secciones transversales (figura 3.31) hay que dirigirse a la ventana principal y seleccionar **View/Cross-Sections** .

La ventana cross-section es similar a la que se muestra cuando se editan los datos de la sección transversal. Sin embargo, la ventana salida muestra la elevación de la línea de energía (en la que se muestra la leyenda "EG Peak Flows"), la superficie de agua ("WS Peak Flows"), y profundidad crítica ("Crit Peak Flows"). Con el editor de la geometría de la sección transversal se pueden usar los botones   para desplazarse a las otras secciones transversales. Para ver el perfil completo solo basta seleccionar **View/Water Surface Profiles** de la venta principal del proyecto (figura 3.32).

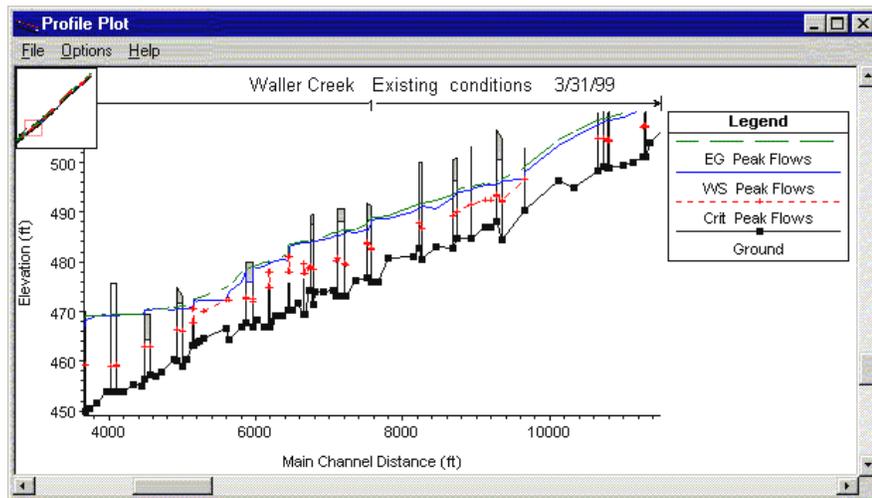


Figura 3.32

Para el diseño hidráulico, es frecuentemente útil conocer los valores calculados de distintos parámetros para esto hay que dirigirse a la ventana **View/ Cross Section Table** (figura 3.33).

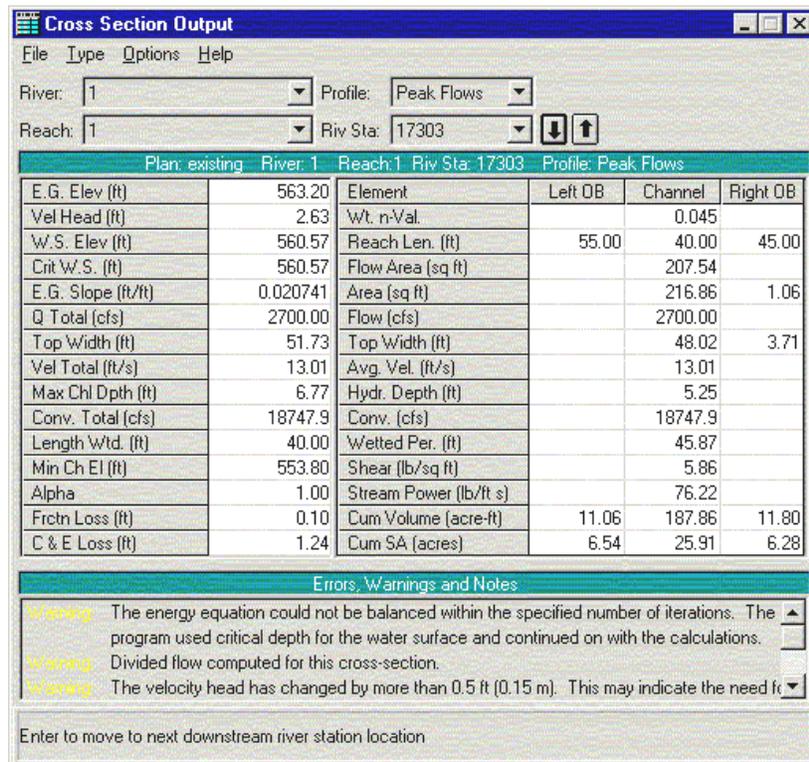


Figura 3.33

La tabla que se despliega incluye una variedad de parámetros hidráulicos, que incluyen la elevación de la superficie del agua, pérdida de carga hidrostática y el área de la sección transversal. Para ver los datos de salida, se puede acceder a ellos yendo a **View/Profile Table** de la ventana principal del proyecto.

Finalmente, el gráfico muestra la vista de la salida en tres dimensiones (figura 3.34), de la corrida de ejemplo del tramo de un río en la cual se tiene una visión global de la forma del río, de las secciones transversales, del perfil de la superficie de agua. Las líneas rojas delimitan el canal principal del río.

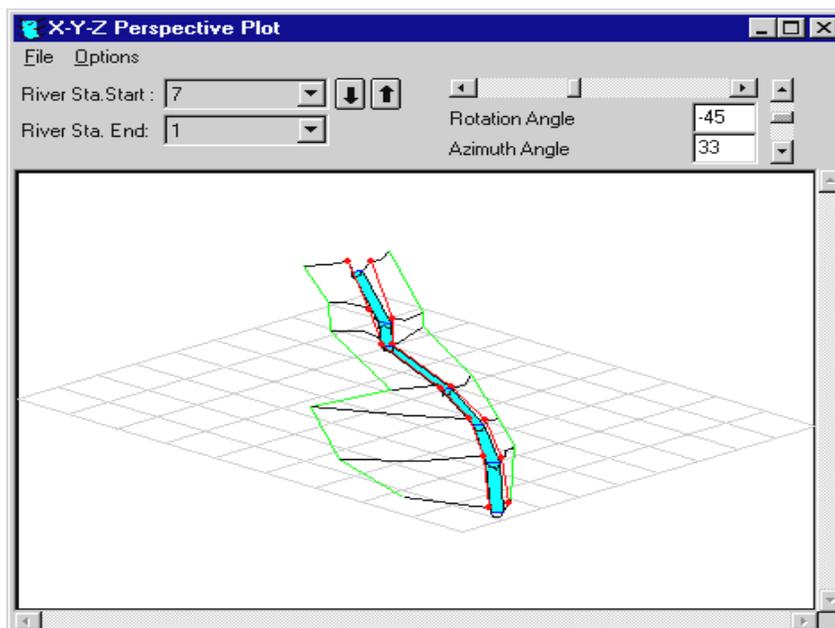


Figura 3.34

También se puede observar cualquier sección transversal seleccionando simplemente el río, el tramo y la estación del río correspondiente, en la ventana **Cross Section**.

Las salidas impresas de los gráficos pueden ser obtenidas de dos distintas maneras. La impresión puede ser enviada directamente desde el HEC-RAS a cualquier impresora o plotter que este disponible dentro del administrador de impresión de Windows. La impresión puede también ser enviada al Windows Clipboard una vez que la impresión está en el clipboard.

Si se desea, puede pegarse en cualquier otro programa tal como por ejemplo, un procesador de palabras. Ambas alternativas están disponibles en el menú File de las ventanas de visualización de resultados.

Las salidas tabulares están disponibles en dos formatos distintos. El primer tipo de tablas proveen detalladamente los resultados hidráulicos de una sección transversal requerida (cross section table). El segundo tipo de tablas muestra un limitado número de variables hidráulicas para varias secciones transversales y múltiples perfiles.

Existen varias tablas estándar que están predefinidas y se tiene acceso a ellas desde el menú **Tables**. Se pueden también definir tablas personalizadas, especificando uno mismo que variables se desea tener en ellas. Las tablas personalizadas pueden ser guardadas para pasar entonces a formar parte de las denominadas tablas estándar. Las salidas tabulares pueden ser enviadas directamente a imprimir o pasar por el clipboard de la misma manera que los gráficos. Estas opciones están también disponibles bajo el menú **File** en cada forma de presentación de tablas.

CAPITULO  
4  
APLICACIONES

## CAPITULO 4

# APLICACIONES

### 4.1 Introducción.

Para mostrar la versatilidad y adecuación del software que se analiza en el presente trabajo, se presentan a continuación una variedad de ejemplos de aplicación real, que al ser ejecutados en los programas de simulación mencionados anteriormente, muestran el entorno de trabajo, alcances y características propias de su estructura. Junto con ello, se presentan los resultados obtenidos tanto en el aspecto experimental (en su caso) como en el computacional, referidos al cálculo del perfil del agua a lo largo de un cauce, analizándose en el primer ejemplo, un caso comparativo entre valores obtenidos experimentalmente en un canal y los arrojados vía el programa HECRAS.

Para el segundo caso, se revisa la sección transversal del Arroyo “Agua bendita” vía HECRAS y se ejemplifica por medio de ventanas que muestran las diversas etapas seguidas a través del proyecto. Por último, se analizan los resultados para dar solución al problema de encharcamientos en una población perteneciente a la Delegación Xochimilco por medios ordinarios y vía el programa creado por la Universidad de las Américas Puebla.

### 4.2 Caso de Estudio 1: Análisis comparativo del tránsito de una avenida determinada experimentalmente en el canal de flujo universal, con los resultados que proporciona HEC-RAS.

Con el objeto de medir la confiabilidad de los resultados que proporciona HEC-RAS, se realizó un análisis comparativo entre los valores obtenidos a partir de la experimentación en el canal de flujo universal<sup>10</sup> y los resultados que proporciona dicho software para las condiciones de escurrimiento establecidas en el canal.

---

<sup>10</sup> Que se encuentra dentro del Laboratorio de Hidráulica y Fluidos Edificio L-2 de la FES Aragón.

## A. Tránsito de una avenida en el Canal de Flujo Universal.

### A.1 Breve descripción del Canal

El canal tiene 8 metros de longitud, su sección de trabajo es de 20 cm de plantilla y 30 cm de alto. El material que conforma su pared lateral está dividido en la mitad de su longitud por cristal y la otra por policarbonato, cuenta con dos manivelas, una que permite la selección y control de la pendiente del canal y la otra para la operación de una compuerta.

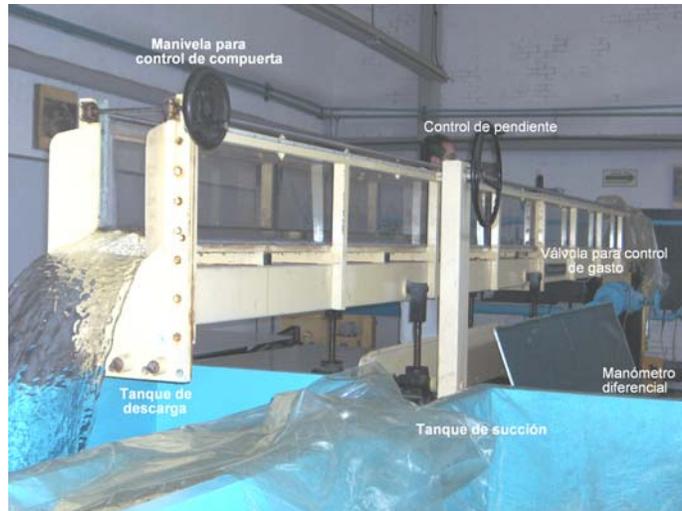


Figura 4.1 Elementos constitutivos del canal de flujo universal

El control del gasto se lleva a cabo mediante una válvula de compuerta que tiene adosado un manómetro diferencial. El flujo circula gracias a la energía que le proporciona una bomba centrífuga de 5 Hp y recircula a través de dos tanques de almacenamiento uno para la descarga y otro para la succión. Ver Foto 4.1.

### A.2 Material

Canal de Flujo Universal

Limnómetro

Flexómetro

Tabla de pendientes

### A.3 Procedimiento.

(a) Seleccione una pendiente de trabajo.  
(b) Energice el motor de la bomba.  
(c) Establezca un gasto regulándolo con ayuda de la válvula de compuerta y mida, después registre el  $\Delta H$  en el manómetro diferencial.

(d) Seleccione una longitud de trabajo y divídala en tramos con una separación de 50 cm uno del otro y para cada sección así definida, mida y registre el valor del tirante.

**A.4** Memoria de cálculo

- Con el  $\Delta H$  obtenido en el apartado A.3 inciso c), evalúe el gasto que se transitó con ayuda de la siguiente expresión:  $Q = 0.007124\sqrt{\Delta H}$  ( $m^3 / s$ ).
- Dibuje el perfil del flujo con ayuda de la información recabada en A.3 inciso d).

**A.5** Desarrollo

De acuerdo con el procedimiento anterior, se muestra a continuación la información obtenida en la Tabla 4.1 :

**Tabla 4.1** Datos obtenidos .

S=	0.009 (ver la figura 4.2)
$\Delta H$ =	2 mm (ver la figura 4.3 y 4.4)
Longitud de trabajo =	8.0 m
Tirante =	400 mm (ver figura 4.5)



Figura 4.2 Selección de la pendiente de trabajo



Figura 4.3 Acercamiento de la toma de lectura del  $\Delta H$  diferencial



Figura 4.4 Manómetro diferencial



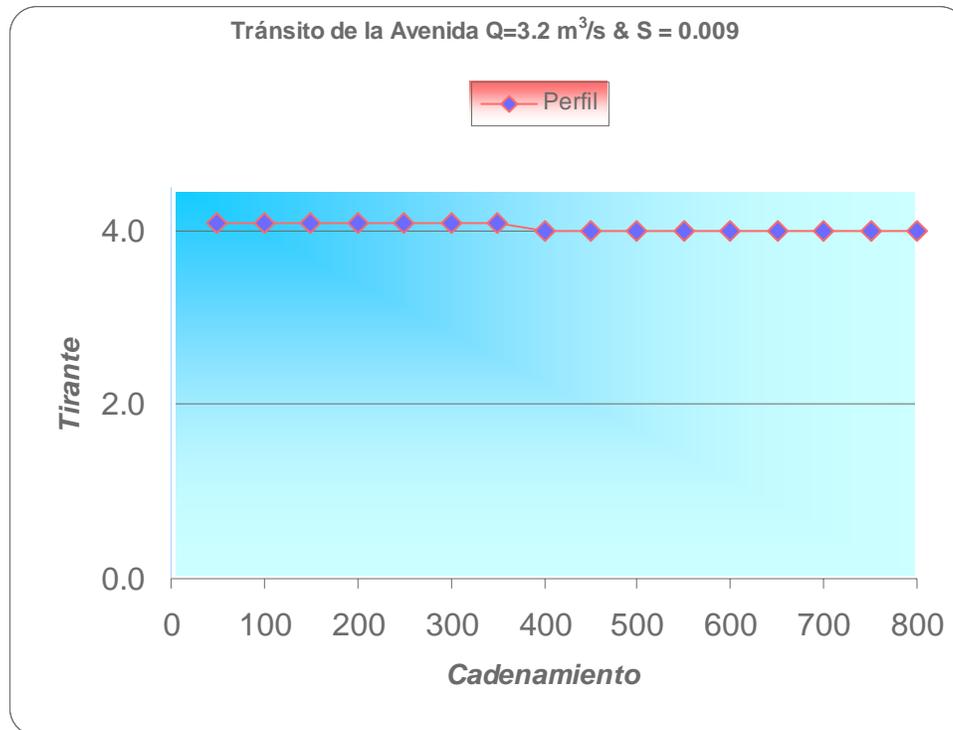
Figura 4.5 Acercamiento de la lectura del tirante por medio de un limnómetro

<b>TABLA 4.2 Ubicación de las secciones y sus tirantes</b>		
<b>Sección</b>	<b>Cadenamiento (cm)</b>	<b>Tirante (cm)</b>
1	800	4.0
2	750	4.0
3	700	4.0
4	650	4.0
5	600	4.0
6	550	4.0
7	500	4.0
8	450	4.0
9	400	4.0
10	350	4.0
11	300	4.0
12	250	4.1
13	200	4.1
14	150	4.1
15	100	4.1
16	50	4.1

Enseguida se muestran los resultados obtenidos en la práctica según la memoria de cálculo.

$$Q = 0.007124\sqrt{0.20} = 0.003187 \text{ m}^3/\text{s}.$$

El perfil resultante se muestra en la siguiente gráfica 1:



### Conclusiones.

El perfil obtenido en el Canal de Flujo Universal corresponde al tránsito de una avenida de  $Q = 0.003187 \text{ m}^3/\text{s}$  y como puede observarse en la gráfica no. 1 este mantuvo un tirante constante de 4.0 cm.

Dado que el canal es prismático, la pequeña diferencia observada puede deberse a las condiciones de uso del mismo.

**B. Tránsito de una avenida de 0.003187 m<sup>3</sup>/s en un canal prismático con HEC-RAS.**

**Ingreso de datos.**

Para poder realizar una comparación, los datos obtenidos en la etapa de experimentación serán introducidos en HEC-RAS. En el programa en estudio, se abre un nuevo proyecto denominado para este caso “Canal 2” y a continuación, se dibuja la forma del canal como se muestra en la Fig. 4.6

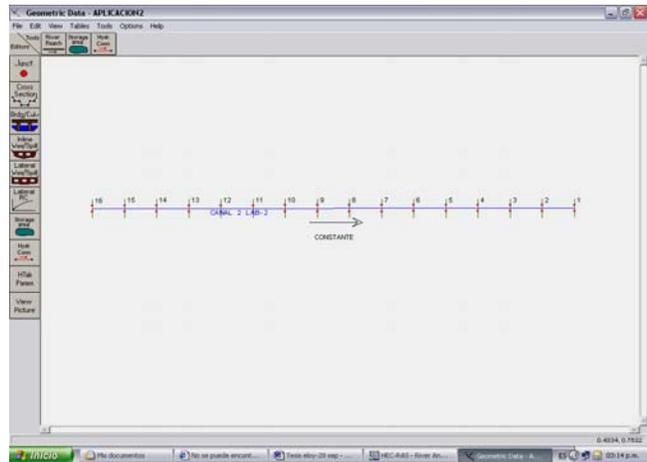
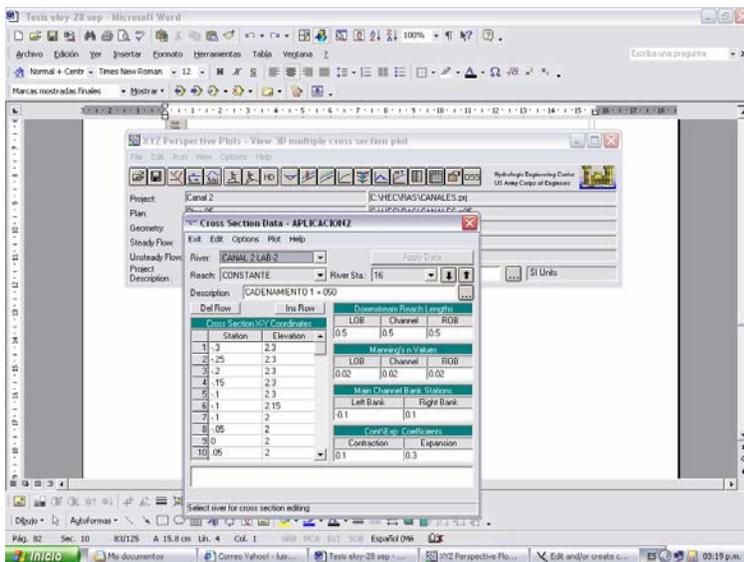


Figura 4.6 Dibujo del canal con sus respectivas secciones transversales



Posteriormente, se ingresan los valores de las coordenadas correspondientes a las 16 secciones transversales denominadas cadenamientos, en donde los valores negativos corresponden a la sección localizada a la izquierda del centro del canal y los positivos a la derecha de éste.

Figura 4.7 Ingreso de valores de las coordenadas en las secciones transversales, Manning y coeficientes.

Después, se introduce la distancia de análisis seleccionada en la dirección aguas abajo del río, se agregan los valores de Manning y la distancia a la izquierda y derecha de los márgenes del canal principal. Por último se agregan los coeficientes de contracción y expansión (cabe indicar que las coordenadas del eje del canal se ingresaron desde aguas arriba hacia aguas abajo del canal.) Figura 4.7. Es importante que después de introducida cada una de las secciones estas sean visualizadas e la vista previa para efecto de corroborar que la información introducida corresponde a la sección física.

### Datos del flujo a Transitar.

A continuación, al hacer clic en el icono de **Steady flood Date** se ingresa el número de avenidas a transitar (gasto). Ver la figura 4.8

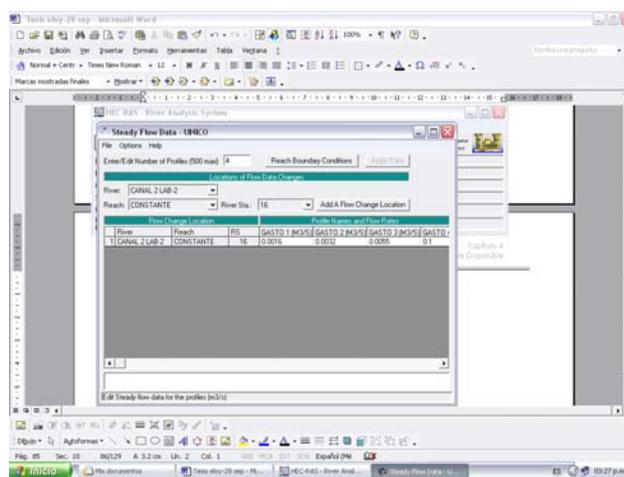


Figura 4.8 Ingreso del número de avenidas para transitar.

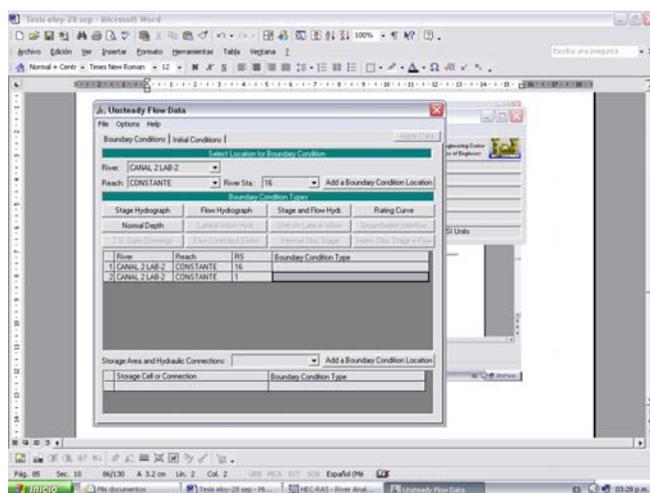


Figura 4.9 Incorporación de las condiciones de frontera

Se incorpora cualquier condición de frontera en **Reach Conditions Boundary** como se muestra en la figura 4.9 y en este caso el dato disponible es el valor de la pendiente  $S = 0.009$

### Ejecución de los cálculos hidráulicos

A continuación se correrá el programa con la información anteriormente señalada y cuyo resultado nos arrojará la forma del perfil en cada sección para el gasto transitado, esto se logra seleccionando un Plan (el cual define a los datos de la geometría y del flujo) para ello se selecciona un título y un identificador corto y enseguida selecciona la opción de flujo subcrítico. Finalmente, se presiona el botón COMPUTE. Ver la figura 4.10.

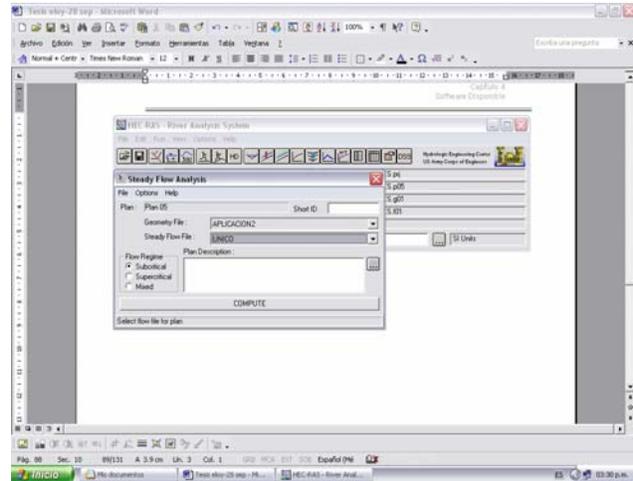


Figura 4.10 Ejecución de los cálculos

En caso de haber un error el programa indica el tipo de los mismos y nos dará resultados hasta que se corrija este.

### Visión de los resultados.

Una vez que se corrió el programa, es posible la visualización gráfica de los resultados auxiliándose con el View localizado en el menú principal del programa. Por medio de este podemos acceder a:

La visualización de los resultados sobrepuestos a la sección transversal y longitudinal del canal (Cross Section). Figura 4.11

La tabulación de la sección transversal. Figura 4.12

El diagrama del perfil (General Profile Plot). Figura 4.13

El diagrama del perfil en perspectivas X-Y-Z (X-Y-Z Perspective Plot) Figura 4.14 y 4.15

La tabulación del perfil. Figura 4.16

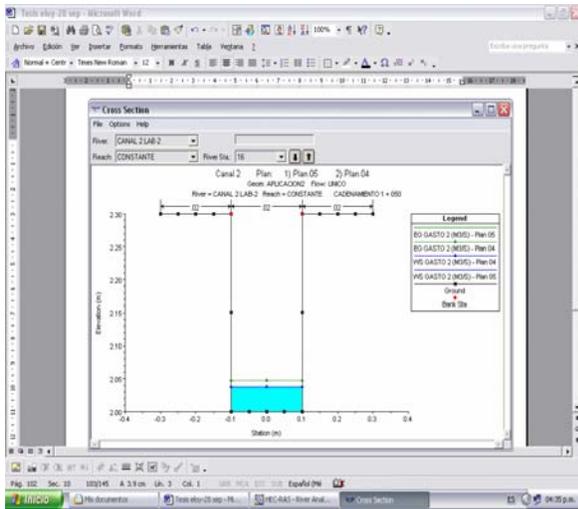


Figura 4.11 Sección transversal del canal

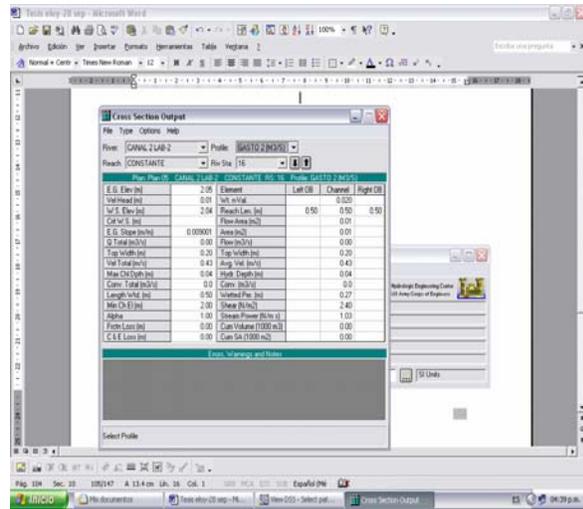


Figura 4.12 Tabulación de la sección Transversal

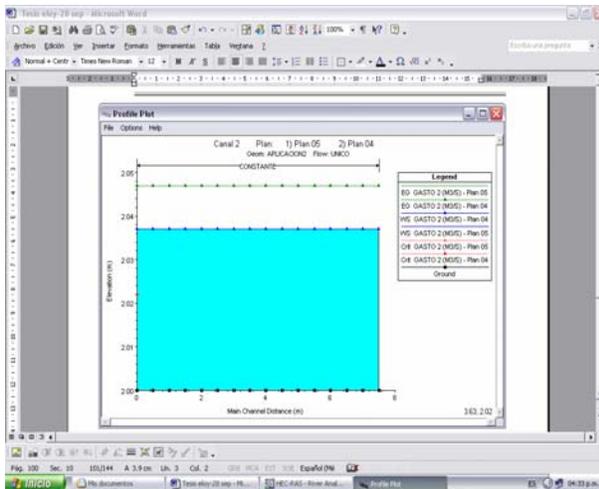


Figura 4.13 Diagrama general del perfil

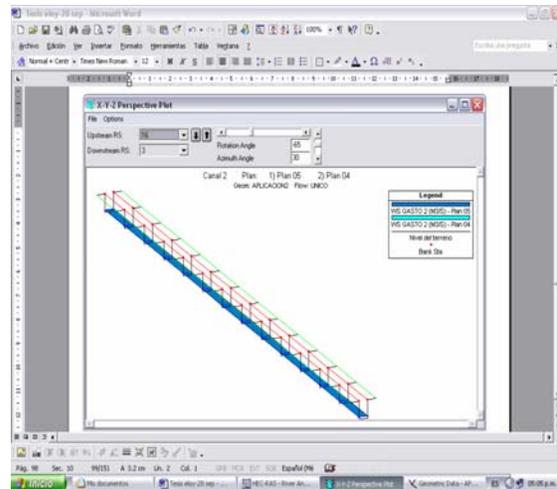


Figura 4.14 El perfil dividido en sus secciones transversales visto en las perspectivas X-Y-Z

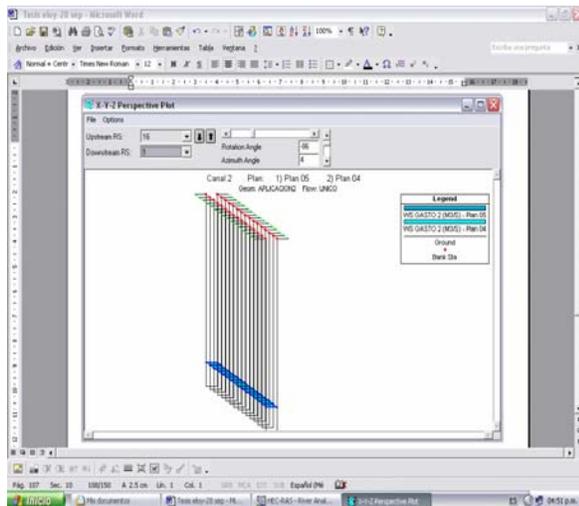


Figura 4.15 Rotación del diagrama del perfil

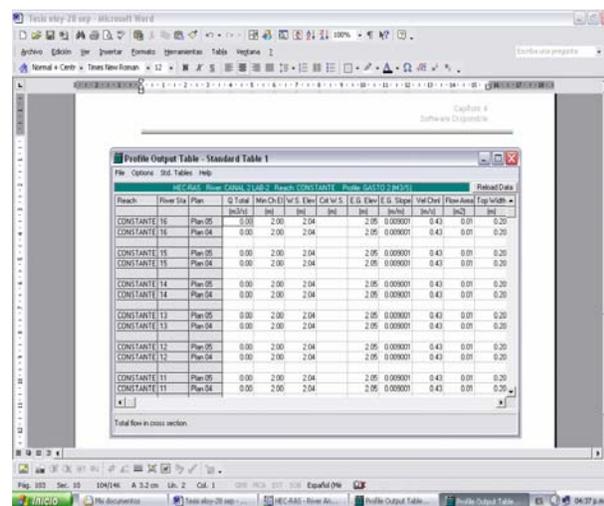


Figura 4.16 Tabulación del perfil

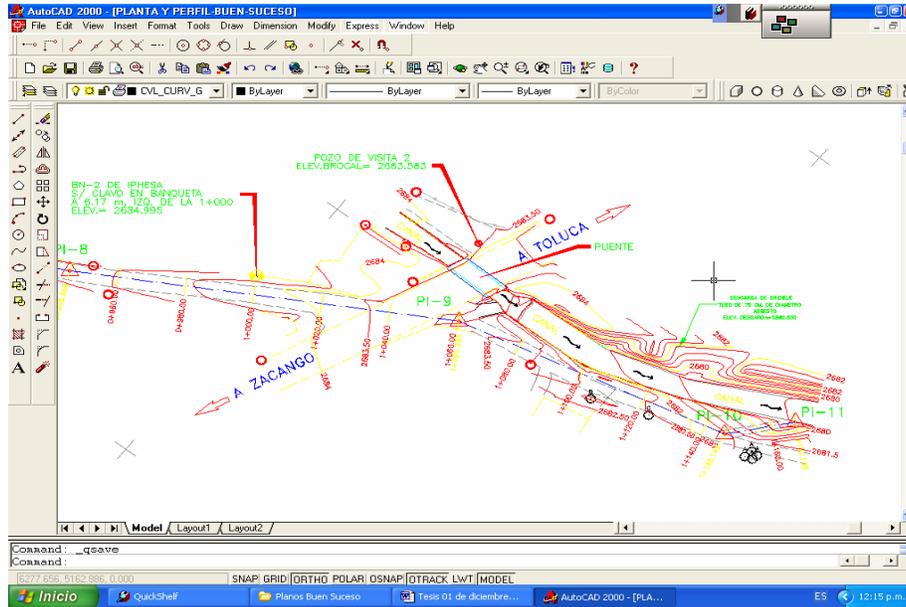
### 4.3 Caso de Estudio 2: Revisión de la sección transversal del Arroyo “Agua Bendita”

El Arroyo “Agua Bendita” en San Bartolomé Tlaltelulco Municipio de Metepec, Estado de México, se encuentra después de la confluencia de dos canales, como se puede apreciar en el plano 4.1, y se pretende saber si el paso de una avenida máxima extraordinaria con cierto período de retorno no desbordaría.

La revisión se hará con HEC-RAS y la información que alimentará a dicho programa se obtuvo de la topografía de la zona que se presenta a continuación.

Tabla No. 4.3 Nombre de las secciones transversales Arroyo “Agua Bendita” en San Bartolomé Tlaltelulco Municipio de Metepec, Estado de México.

Tabla 4.3 Secciones transversales	
Sección	Cadenamiento
5	1 + 080.00
4	1 + 100.00
3	1 + 120.00
2	1 + 140.00
1	1 + 160.00



Plano 4.1 del Arroyo “Agua bendita” y su confluencia

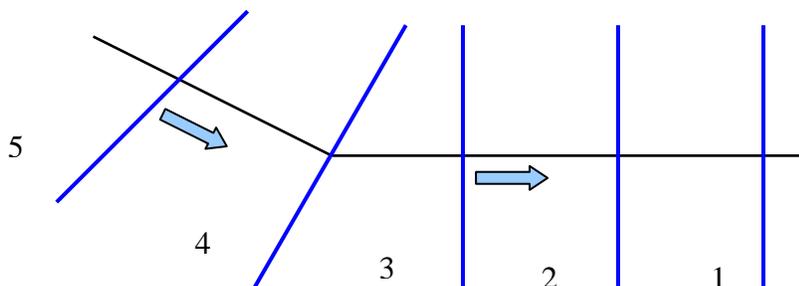
La captura de las secciones transversales es de izquierda a derecha viendo hacia aguas abajo y los valores de las estaciones crecen en este mismo sentido y son perpendiculares al río.

- El esquema del río no tiene influencia en los cálculos, solo se muestra para representar el cauce en planta. La entrada de agua corresponde al punto donde se inicio el trazo en el esquema.

Gastos de diseño

Tr (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)
25	18.643
50	26.395
100	33.507
500	52.119

Esquema del canal.



Codificación del perfil.

Sección transversal 1 + 0.80			
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
-16.822	2683.219	3.400	2680.007
-13.556	2683.909	4.272	2680.007
-8.845	2684.231	4.288	2680.406
-6.496	2684.445	4.455	2682.787
-5.357	2683.605	5.180	2683.221
-4.365	2682.542	6.002	2683.761
-4.272	2680.063	6.924	2683.744
-4.253	2680.063	8.656	2683.437
-3.200	2680.097	9.733	2683.539
-2.173	2680.126	13.503	2683.533

Sección transversal 1 + 100			
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
-14.775	2683.690	4.432	2682.212
-14.084	2683	4.551	2682.287
-9.483	2684.151	4.687	2682.267
-6.082	2681.808	6.733	2683.110
-4.780	2680.363	7.949	2682.982
-4.348	2679.899	10.857	2683.055
-4.336	2679.595	12.418	2682.807
-4.159	2679	13.716	2682.926
-4.030	2679.604	15.202	2682.722
3.353	2679.815	15.605	2682.724
4.336	2679.845	17.306	2682.394
4.429	2682.181	18.782	2682.203

Sección transversal 1 + 200			
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
-16.933	2682.718	3.637	2681.661
-14.148	2683.104	4.287	2682.067
-12.295	2681.796	5.309	2682.895
-10.866	2681.911	5.544	2682.863
-5.989	2682.047	7.838	2682.510
-3.452	2679.135	8.445	2682.525
-3.383	2679.137	11.053	2682.545
0.567	2679.233	11.387	2682.581
3.452	2679.322	12.274	2682.972
3.484	2680.124	13.021	2682.834

Sección transversal 1 + 400			
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
-17.190	2681.745	3.599	2678.990
-16.809	2681.798	3.760	2680.534
-16.451	2681.545	9.165	2681.594
-13.786	2680.968	10.671	2681.833
-8.594	2682.328	11.256	2681.838
-3.599	2678.752	14.007	2681.874
-1.158	2678.777	14.199	2681.968
3.311	2678.880		

Sección transversal 1 + 600			
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
-17.847	2681.623	5.988	2679.280
-17.765	2681.631	6.195	2679.302
-17.697	2681.583	6.535	2679.374
-17.380	2681.514	8.236	2679.479
-16.773	2681.829	9.551	2679.844
-10.508	2683.250	12.437	2681.515
-9.268	2682.300	13.308	2681.548
-3.926	2678.583	14.058	2681.285
2.121	2678.587	15.664	2681.270
3.926	2678.606	17.565	2681.232
4.749	2678.889	18.332	2681.237
4.776	2679.125		

A continuación, se ejemplifica el proceso de simulación a partir de una variedad de figuras que resumen las distintas etapas realizadas para este proyecto.

- **PLAN.-** El Plan va de 01 a 99 contiene una identificación y descripción corta del mismo, una lista de archivos, estado del flujo, opciones de simulación.
- 

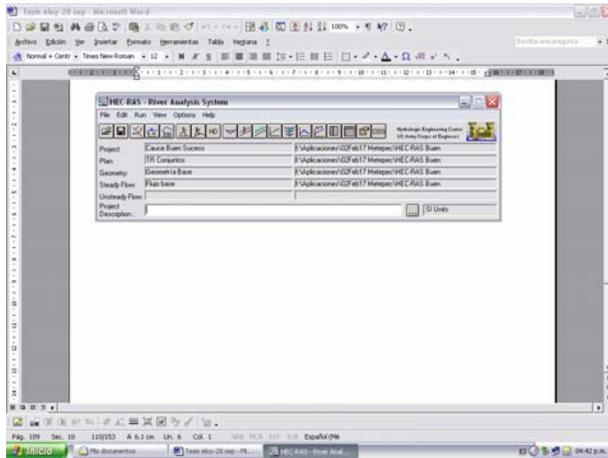


Figura 4.17 Visualización general del entorno al iniciar el programa

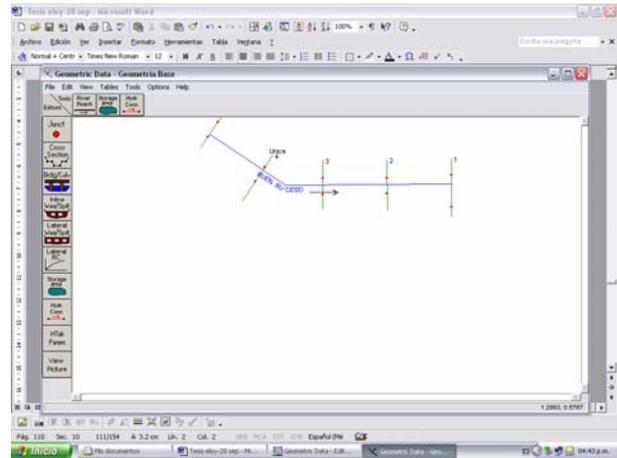


Figura 4.18 Esquema del canal con sus respectivas secciones transversales

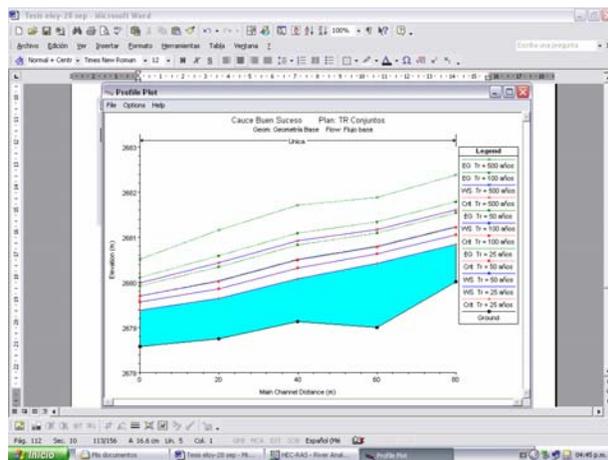


Figura 4.19 Muestra del diagrama del perfil

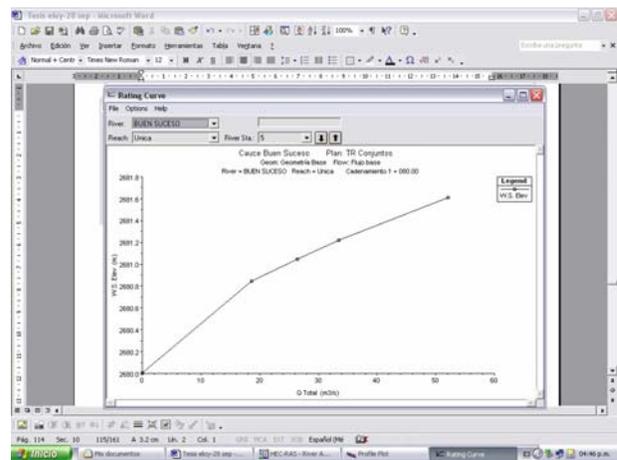


Figura 4.20 Gráfica de la curva de gasto contra elevaciones

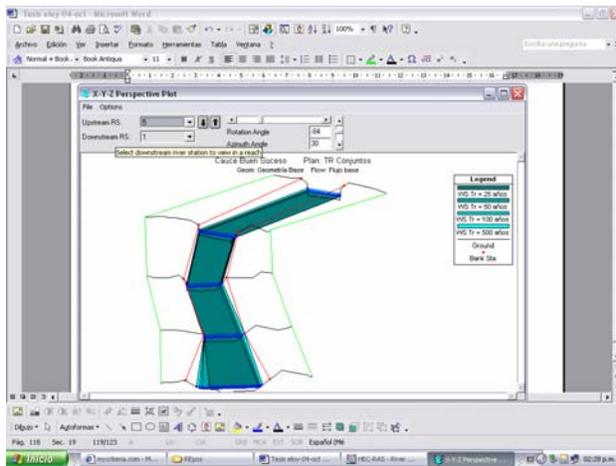


Figura 4.21 Gráfica de la 5 sección transversal

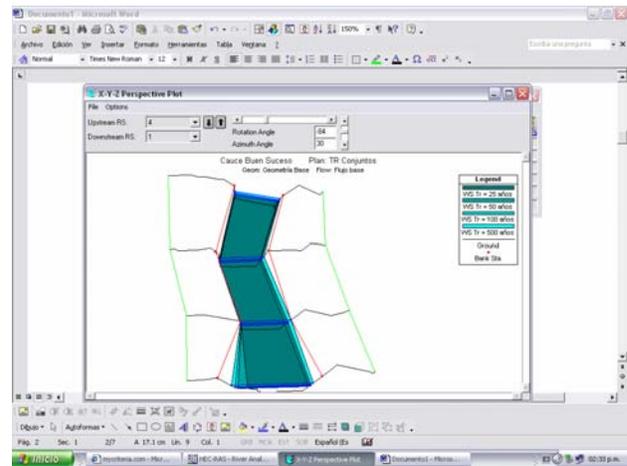


Figura 4.22 Gráfica de la 4 sección transversal

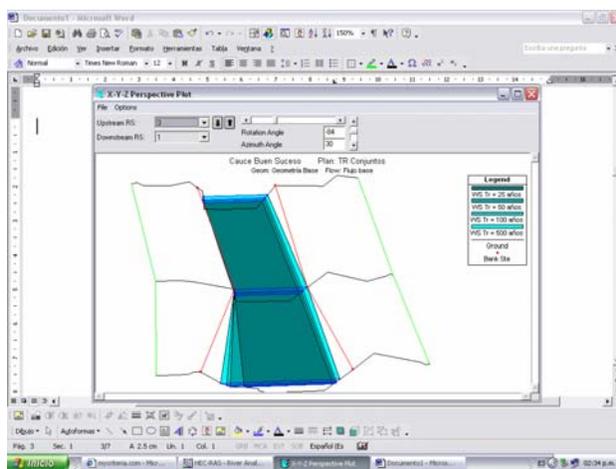


Figura 4.23 Gráfica de la 3 sección transversal

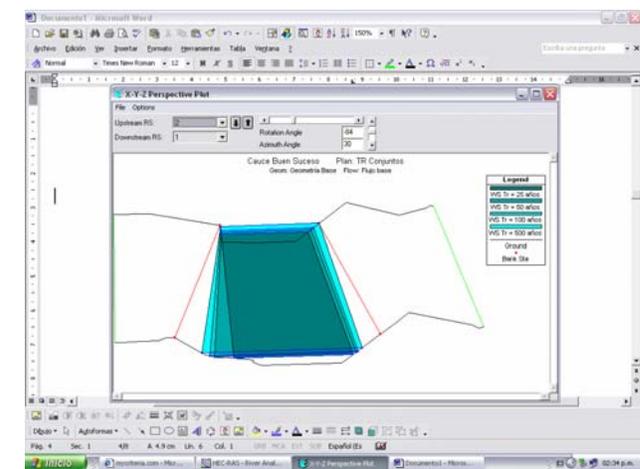


Figura 4.24 Gráfica de la 2 sección transversal

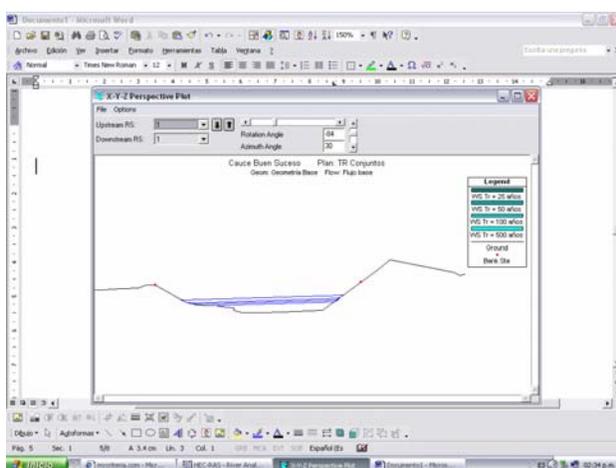


Figura 4.25 Gráfica de la 1 sección transversal

Section	Flow Vel. (m/s)	Flow Depth (m)	Flow Area (m²)	Flow Discharge (m³/s)	Flow Velocity (m/s)	Flow Depth (m)	Flow Area (m²)	Flow Discharge (m³/s)	Flow Velocity (m/s)	Flow Depth (m)	Flow Area (m²)	Flow Discharge (m³/s)
Section 1	1.16	26.80	2680.00	2680.00	2680.24	0.004331	2.77	6.72	6.42	1.02	26.80	2680.00
Section 2	2.40	26.80	2680.00	2680.00	2681.54	0.004216	3.11	6.46	6.64	1.02	26.80	2680.00
Section 3	3.51	26.80	2681.22	2681.22	2681.80	0.004147	3.36	5.96	6.46	1.02	26.80	2680.00
Section 4	52.12	26.80	2681.81	2681.81	2682.29	0.004141	3.90	13.25	8.70	1.02	26.80	2680.00
Section 5	18.64	26.78	2680.42	2680.42	2680.81	0.004273	2.74	6.80	5.19	1.02	26.78	2678.00
Section 6	26.40	26.78	2680.63	2680.63	2681.10	0.004491	3.04	6.68	5.30	1.02	26.78	2678.00
Section 7	33.51	26.78	2680.79	2680.79	2681.34	0.004218	3.27	10.24	5.54	1.02	26.78	2678.00
Section 8	52.12	26.78	2681.17	2681.17	2681.86	0.004136	3.75	13.91	8.89	1.02	26.78	2678.00
Section 9	18.64	26.78	2680.98	2680.98	2680.51	0.004156	2.88	6.46	7.76	1.02	26.78	2678.00
Section 10	26.40	26.78	2680.31	2680.31	2680.83	0.003979	3.20	6.25	7.86	1.02	26.78	2678.00
Section 11	33.51	26.78	2680.50	2680.50	2681.10	0.003909	3.44	5.75	6.16	1.02	26.78	2678.00
Section 12	52.12	26.78	2680.32	2680.32	2681.70	0.003900	3.91	13.31	8.57	1.02	26.78	2678.00
Section 13	18.64	26.78	2679.64	2679.64	2680.04	0.003972	2.79	6.69	8.51	1.02	26.78	2678.00
Section 14	26.40	26.78	2679.86	2679.86	2680.34	0.003824	3.09	6.53	8.03	1.02	26.78	2678.00
Section 15	33.51	26.78	2680.03	2680.03	2680.59	0.003727	3.31	10.11	9.09	1.02	26.78	2678.00
Section 16	52.12	26.78	2680.43	2680.43	2681.15	0.003597	3.77	13.04	8.69	1.02	26.78	2678.00
Section 17	18.64	26.78	2679.38	2679.38	2679.70	0.003937	2.90	7.46	11.74	1.02	26.78	2678.00
Section 18	26.40	26.78	2679.57	2679.57	2679.83	0.003822	2.86	8.91	11.90	1.02	26.78	2678.00
Section 19	33.51	26.78	2679.70	2679.70	2680.11	0.003622	2.84	11.80	14.57	1.02	26.78	2678.00
Section 20	52.12	26.78	2679.59	2679.59	2680.52	0.003420	3.21	16.25	15.77	1.02	26.78	2678.00

Figura 4.26 Tabla de datos generales obtenidos a partir del perfil

4.4. Caso de Estudio 3: Análisis comparativo de caudales de encharcamiento determinados de manera habitual, con los resultados que proporciona el paquete interactivo “Análisis hidrológico” de la U.P.

Para ilustrar la aplicación del Método de Muskingum se tomó como base la memoria de cálculo perteneciente al Proyecto Ejecutivo Xochitepec en la Delegación Xochimilco realizado con el fin de dar una solución a los problemas de encharcamiento mediante una revisión del colector hasta su descarga al canal Miramontes, y del cual se extrajo la información que a continuación se presenta.

**DATOS**

- 1.- Volumen de agua que ingresa al colector en estudio:  $Q = 0.5381 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2.- **Hidrograma de entrada al canal Miramontes.**

Duración efectiva	Tiempo pico	Tiempo base	Gasto pico	Tiempo de retraso	Tiempo de receso
( hrs )	( hrs )	(hrs)	m <sup>3</sup> /s	( hrs )	( hrs )
1.058	0.697	1.862	0.545	0.168	1.164

Los valores del tiempo y gasto de entrada se presentan en la tabla 4.4:

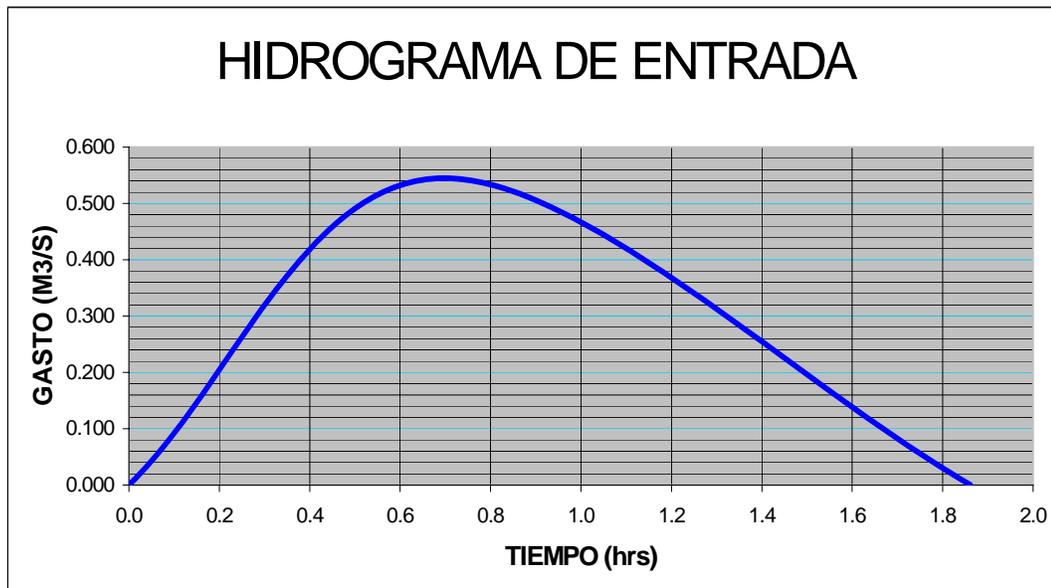
Tabla 4.4: Hidrograma de datos de origen

Tiempo hrs.	Ingreso (I) m <sup>3</sup> /s	Egreso (Q) m <sup>3</sup> /s
0	0	0.00
0.20	0.60	0.26
0.40	1.30	0.56
0.60	2.05	0.88
0.80	2.75	1.18
1.00	3.30	1.42
1.20	3.70	1.59
1.40	3.80	1.63
1.60	3.88	1.67
1.80	3.80	1.63
2.00	3.60	1.55

Tabla 4.4 continuación

Tiempo hrs.	Ingreso (I) m <sup>3</sup> /s	Egreso (Q) m <sup>3</sup> /s
2.20	3.35	1.44
2.40	3.05	1.31
2.60	2.70	1.16
2.80	2.35	1.01
2.00	2.00	0.86
3.20	1.60	0.69
3.40	1.25	0.54
3.60	0.90	0.39
3.80	0.50	0.22
4.00	0.20	0.09
4.20	0	0.01

De acuerdo a lo anterior el Hidrograma de entrada se presenta a continuación



El valor del parámetro de almacenamiento (k), factor de peso (x) e intervalo de tiempo son:

$k = -5.1027$	$X = 0.25$	$\Delta t = 0.0697$ horas.
---------------	------------	----------------------------

#### A. Tránsito de la Avenida calculado manualmente

De acuerdo con la expresión de Muskingum (ecuación 2.5 del capítulo 3), los valores de los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  se obtienen a continuación:

$$C_1 = \frac{-5.1027(0.25) + \frac{0.0697}{2}}{-5.1027(1-0.25) + \frac{0.0697}{2}} = 0.3272$$

$$C_2 = \frac{-5.1027(1-0.25) - \frac{0.0697}{2}}{-5.1027(1-0.25) + \frac{0.0697}{2}} = 1.01838$$

$$C_3 = \frac{-(-5.1027)(0.25) + \frac{0.0697}{2}}{-5.1027(1-0.25) + \frac{0.0697}{2}} = -0.3455866$$

en donde se cumple que la suma de los coeficientes es aproximadamente 1.

A continuación se transitará la avenida sobre el canal Miramontes de acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4.5 cuyo resultado arrojará finalmente la tabla 4.6 correspondiente al hidrograma de salida:

Tabla 4.5: Hidrograma de Entrada

Tiempo hrs.	Ingreso (I) m <sup>3</sup> /s
0	0.08
0.20	0.20
0.40	0.42
0.60	0.54
0.80	0.54
1.00	0.46
1.20	0.38
1.40	0.25
1.60	0.14
1.80	0.03
2.00	3.60

Tabla 4.5 continuación

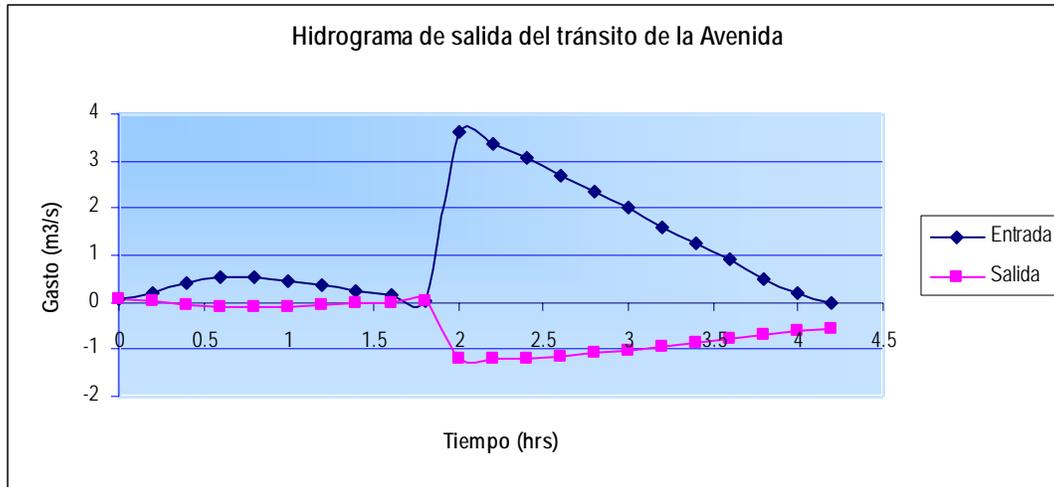
Tiempo hrs.	Ingreso (I) m <sup>3</sup> /s
2.20	3.35
2.40	3.05
2.60	2.70
2.80	2.35
3.00	2.00
3.20	1.60
3.40	1.25
3.60	0.90
3.80	0.50
4.00	0.20
4.20	0

Tabla 4.6: Hidrograma de Salida

Tiempo hrs.	Egreso (Q2) m <sup>3</sup> /s
0	0.08
0.20	0.04
0.40	-0.04
0.60	-0.09
0.80	-0.10
1.00	-0.09
1.20	-0.07
1.40	-0.03
1.60	0.00
1.80	0.04
2.00	-1.20

Tabla 4.6 continuación

Tiempo hrs.	Egreso (Q2) m <sup>3</sup> /s
2.20	-1.20
2.40	-1.18
2.60	-1.13
2.80	-1.08
3.00	-1.03
3.20	-0.94
3.40	-0.87
3.60	-0.79
3.80	-0.68
4.00	-0.60
4.20	-0.54



**B Tránsito de la avenida sobre Canal Miramontes obtenida por medio del Paquete interactivo para Análisis Hidrológico elaborado por la U.A.P.**

A continuación se muestran cada una de las etapas involucradas en el manejo de dicho programa para obtener el hidrograma de salida de la avenida transitada.

Antes de iniciar, se elaborará previamente un archivo en Excell denominado Cauces.xls cuya primera hoja contendrá los datos de origen correspondientes a la tabla 4.4, anterior y para la segunda hoja se ingresarán los correspondientes al hidrograma de entrada de la tabla 4.5.

1. Primero se hace clic en el icono de la Universidad, en este paso se presenta la interfase general del programa tal y como se muestra en la figura 4.27.

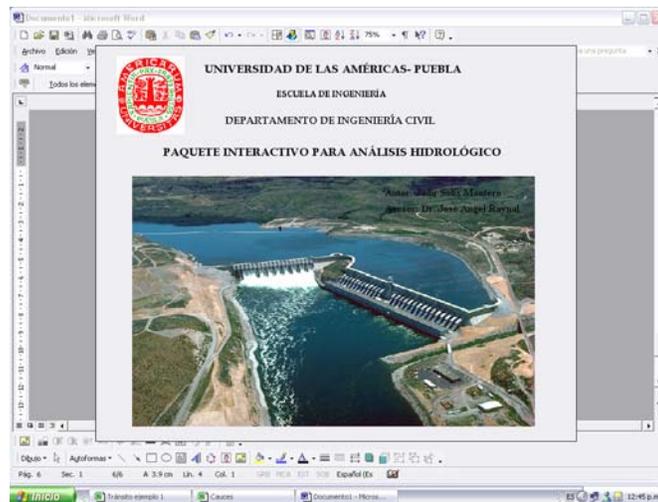


Figura 4.27 Interfaz general

2. Dentro del Menú principal se selecciona la opción “tránsito de avenidas por Cauces” apoyada en el método de Muskingum Original (figura 4.28).

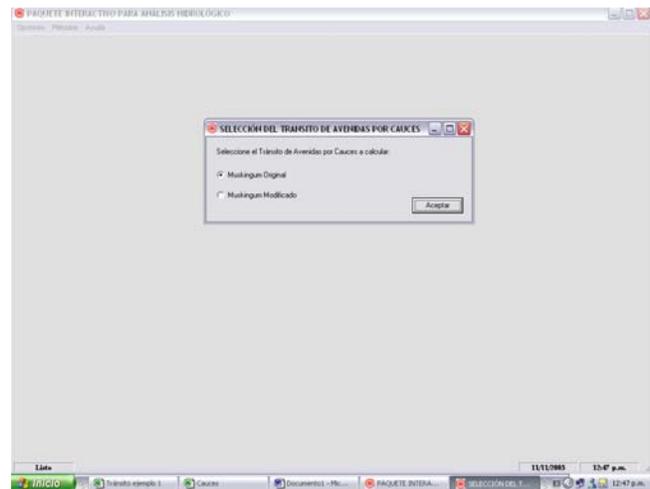
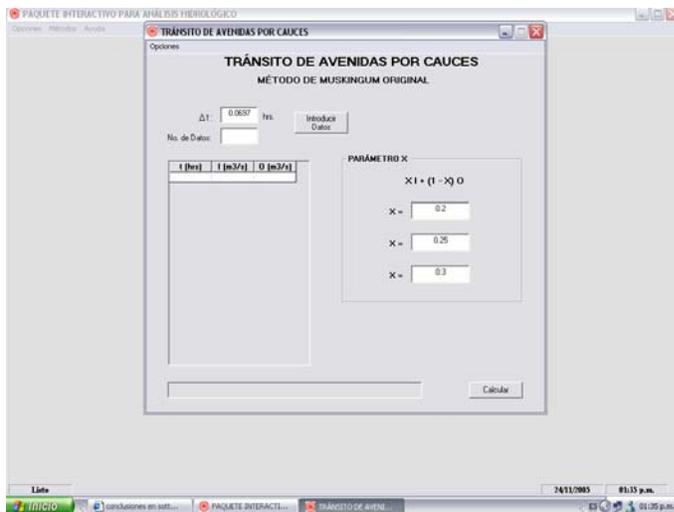


Figura 4.28 Botón para la selección del método



3. Se ingresa mediante el botón Opciones la tabla elaborada previamente con los valores correspondientes al tiempo, entrada y salida de los datos de origen para un  $\Delta t = 0.0697$  que permitirán calibrar el parámetro  $x$  y  $k$ . (figura 4.29)

Figura 4.29 Ingreso de datos del hidrograma de entrada



4. A continuación se presenta una tabla que muestra los resultados obtenidos para cada valor asignado a X, así como sus respectivas graficas. Es en esta ventana donde se decide el valor que tomara el parámetro X con el que se transitará la avenida, para este caso se eligió de 2.5 (figura 4.30).

Figura 4.30 Tabla que muestra cálculo, tablas y gráficos de del parámetro X

5. Se integran los valores de la segunda hoja correspondientes a la tabla 4.5 con los datos del tiempo e hidrograma de entrada, aquí también se muestra el parámetro K de almacenamiento obtenido y los coeficientes C<sub>1</sub> C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> para los cuales se calculará la avenida. (figura 4.31)

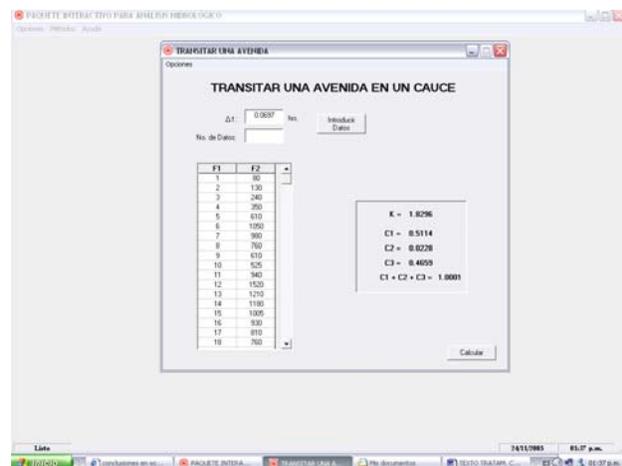


Figura 4.31 Ventana para el ingreso de datos del hidrograma de entrada

6. Por último se hace clic en calcular y se obtiene la tabla y la grafica pertenecientes al hidrograma de salida (figura 4.32) que muestra la avenida ya transitada.

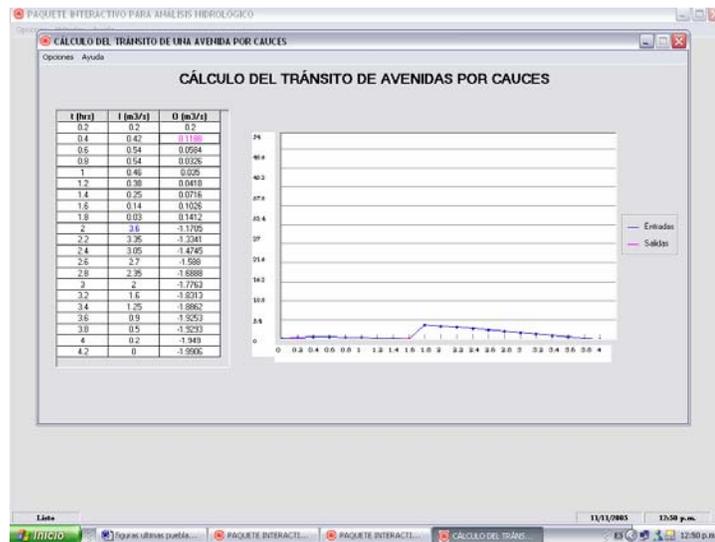


Figura 4.32 Tabla que muestra el hidrograma de salida con su respectiva gráfica

---

---

## CONCLUSIONES

Actualmente se tienen avances significativos en el desarrollo de modelos numéricos de simulación para flujo superficial, cuyos beneficios son:

- Apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje asistido por computadora.
- Fácil adaptación a problemas reales con una variedad infinita de condiciones utilizando un mínimo de tiempo para su análisis.
- Permiten reproducir los fenómenos
- Capacitación en el manejo de software.

*En cuanto al software computacional HEC-RAS* se puede concluir que si bien es una herramienta de utilidad que permite conocer el perfil de cualquier sistema fluvial, predecir un riesgo de inundación, dimensionar encauzamientos, etc. permite ser aplicado académicamente debido a las siguientes características:

- Es un paquete interactivo desarrollado en un ambiente amigable y fácil de usar, compuesto por una interfase gráfica donde se pueden distinguir componente de análisis hidráulico, gráficas y tablas.
- Se ha convertido en el estándar para el análisis hidráulico dentro de toda la comunidad ingenieril y actualmente se esta usando en muchos países del mundo, lo que permite que la educación de los alumnos vaya a la vanguardia.

Por lo mencionado anteriormente, sería conveniente implementar una serie de prácticas enfocadas al tránsito de avenidas en el que se incluya el manejo de HEC-RAS, esto permitiría realizar un comparativo experimental y analítico para una mejor comprensión y análisis del tema, además de capacitar al alumno para su vida profesional.

Con respecto al análisis comparativo entre los resultados obtenidos durante el tránsito de una avenida en el canal de flujo universal y los que proporciona HEC-RAS se deduce lo siguiente:

- Se observó que para el caso de estudio analizado los valores obtenidos mediante el programa no mostraron una variación significativa sobre los valores del perfil transversal

---

---

estimado experimentalmente y los cálculos vía el programa se adquirieron de manera rápida, y precisa.

- Se pudo visualizar vía una variedad de gráficas en las dimensiones X-Y-Z el comportamiento del perfil en sus distintas secciones así como sus respectivas tablas de resultados.
- Resultó ser un programa confiable en el que es posible simular una diversidad de fenómenos sin tener que recurrir a un modelo hidráulico y que puede manejarse en distintas situaciones.

Haciendo un análisis general del programa denominado *“Paquete interactivo para el Análisis Hidrológico”* creado por la Universidad de las Américas Puebla se puede mencionar lo siguiente:

- Los valores de la avenida transitada para el caso Xochimilco reflejaron una tendencia similar a los obtenidos mediante los métodos ordinarios, las pequeñas discrepancias entre los resultados se debieron probablemente a que los métodos de calibración y validación para la obtención de los parámetros X y K utilizados en este modelo no coincidieron con los aplicados en el proyecto.
- La interfase del programa es práctica y atractiva así como su entorno de trabajo lo que permite un ingreso rápido de datos.

Si bien, el programa se ejecuta adecuadamente y arroja valores aceptables, cabría hacer una serie de recomendaciones para que éste tuviese un mejor desempeño:

- a) Permita una mayor flexibilidad en el ingreso y corrección de los datos hacia las tablas,
- b) Proporcione una retroinformación sin limitarse a indicar que se ha cometido un error, brindando información acerca de su tipo y su posible solución.
- c) Apruebe acceder a una opción o ventana anterior sin necesidad de tener que salir de manera obligada del programa, para un rápido manejo del mismo.
- d) Incluya ventanas con información teórica acerca de los métodos empleados, así como sonido, imágenes e incluso animaciones.

Por último, respecto a la primera etapa del proyecto **HIDTA-03** del cual surge esta investigación, se apunta lo siguiente:

Considerando que el software educativo es una herramienta básica para las actuales generaciones y aun cuando ambos softwares analizados resultan ser adecuados para aplicaciones académicas, se hace necesario un estudio enfocado hacia el perfeccionamiento de software que incluya entornos de trabajo alternos cuyos sistemas de control estén abiertos hacia una infinidad de posibilidades dentro de la simulación de fenómenos, que contengan herramientas de interacción entre el programa y el alumno.

---

---

## BIBLIOGRAFIA

Aparicio Mijares Francisco J. *"Fundamentos de Hidrología Superficial"* Editorial Limusa, México 1992.

Fuentes Mariles Oscar Arturo *"Modelos matemático de Áreas de Inundación"* Coordinación de Investigación, área de riesgos hidrometeorológicos Cuaderno de Investigación No. 41 CENAPRED.

Fuentes Mariles Oscar Arturo *"Esgurrimientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento"* Coordinación de Investigación, área de riesgos hidrometeorológicos Cuaderno de Investigación CENAPRED.

Jaime Sánchez Flores *"Métodos típicos para la resolución del tránsito de avenidas y funcionamiento de vasos"* TESIS.

Universidad de las Américas, Puebla *"Paquete interactivo para tránsito de Avenidas por vasos y cauces"*. Manual del usuario.

US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center *"HEC-RAS River Analysis System. User's Manual"* versión 2.2 Septiembre de 1998.

Ven Te Chow, R. Maidment David, W. Mays. Larry *"Hidrología aplicada"* Editorial Mc Graw Hill Colombia 1994.

**Páginas Internet consultadas:**

<http://www.wrc-hec.usace.army.mil/>

<http://www.bossintl.com>

<http://www.uap.com.mx>