



MÉXICO

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

CONAGUA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES E
INGENIERÍA DE RÍOS

LINEAMIENTOS PARA LA ELABORACIÓN DE
MAPAS DE PELIGRO POR INUNDACION
(2014)

Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico es la base para definir la magnitud de los eventos de inundación a analizar. Debe realizarse para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años.

Es necesario realizar una descripción física de la cuenca de hidrológica, localización, su red de corrientes y tipo de clima. Se debe incluir un análisis de inundaciones históricas en las que se identificará su origen.

Para la realización del estudio hidrológico debe recopilarse toda la información hidrológica disponible. En general se pueden agrupar dos tipos casos para efectuar el análisis: el primero, la estimación de crecientes en cuencas aforadas y el segundo en cuencas no aforadas.

Estimación de crecientes en cuencas aforadas.

Este caso es aplicable en cuencas en las que se tengan registros de escurrimientos (información hidrométrica) entre los métodos que se pueden aplicar se mencionan los siguientes:

1. Análisis de frecuencias de crecientes y "mayoración" del hidrograma representativo
2. Análisis Regional:
 - Estaciones año
 - Avenida Índice
3. Método del gasto medio diario asociado a duraciones
4. Análisis bivariado de gasto pico y volumen del hidrograma
5. Proceso condicional hp-VOL-Qp

Los métodos que se explicarán en forma más amplia por su relativa facilidad de realización son el de la mayoración y el de gasto medio asociado a duraciones.



Análisis de frecuencias de crecientes y mayoración del hidrograma representativo.

Este método considera los registros máximos instantáneos anuales y la aplicación de diversas funciones de distribución de probabilidad; se selecciona la que tenga el mejor ajuste y con ella se estiman los gastos para diferentes periodos de retorno. Para la forma del hidrograma se sigue el procedimiento denominado de "Mayoración" el cual consiste en seleccionar la avenida representativa de la cuenca y "mayorarla" conforme a los gastos extrapolados para diferentes periodos de retorno.

Se requieren los registros instantáneos máximos anuales provenientes de una estación hidrométrica. Esta información puede ser consultada a través del sistema denominado Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS).

El método de mayoración es uno de los más populares y de mayor arraigo en México, debido a la rapidez y facilidad en su aplicación (Domínguez et al., 1980). A partir del análisis de los gastos se determina la máxima avenida registrada, la cual se puede considerar como la más adversa.

El criterio para seleccionar dicha avenida puede tomar en cuenta el valor registrado más grande de Q_p , V_t o una combinación de ambos. Una vez seleccionada, se deberá obtener un hidrograma adimensional, donde cada ordenada será Q_o/Q_p para $o = 1$ hasta la duración d (horas o días). Con el objetivo de estimar los eventos de diseño para diferentes periodos de retorno (QT), se deberá realizar un análisis de frecuencias a los gastos máximos anuales y, mediante un criterio de bondad de ajuste, seleccionar aquella distribución de probabilidad que mejor describa el comportamiento de la muestra analizada. Finalmente, para obtener la avenida de diseño solo se requiere multiplicar las ordenadas Q_o/Q_p del hidrograma adimensional por el valor estimado de QT,

obteniendo así una avenida con las mismas características de la más adversa registrada, solo que más grande (mayorada).

Para la obtención de los gastos asociados a diferentes períodos de retorno se puede hacer uso del programa AX.EXE el cual fue elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) o bien cualquier otro que incluya entre las funciones de distribuciones de probabilidad (FDP): Normal, Logaritmo Normal, Gumbel, Doble Gumbel, General de Valores Extremos, Pearson, y Exponencial entre muchas otras.

FDP Gamma de dos parámetros

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dx$$

FDP Gamma de Tres Parámetros (Pearson Tipo III)

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} dx$$

FDP LogPearson Tipo III (LPT III)

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\alpha x \Gamma(\beta)} \left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha}\right)} dx$$

FDP Gumbel (Valores Extremos Tipo I)

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}}$$

FDP Gumbel de dos poblaciones

$$F(x) = p e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu_1}{\alpha_1}\right)}} + (1-p) e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu_2}{\alpha_2}\right)}}$$

FDP General de Valores Extremos (GVE)

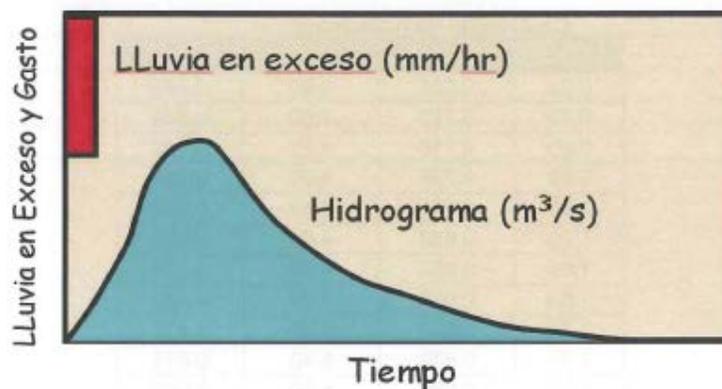
$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^\beta\right]^\beta}$$

Estimación de crecientes en cuencas no aforadas.

Para este caso es necesario inferir a partir de las lluvias registradas el escurrimiento (proceso lluvia-escurrimiento)

Para lo anterior es requerido obtener:

- Área de la cuenca (A) [km²]
- Longitud del cauce principal (L) [km]
- Desnivel del cauce principal (D) [m]
- Pendiente promedio del cauce, S (Taylor-Schwarz) [adimensional]
- N y C (Número y Coeficiente de escurrimiento)



Para la estimación del número de escurrimiento es necesario considerar la información del uso, cobertura, tipo de suelo, estructura, textura y condición de humedad. Esta información proviene de las cartas editadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

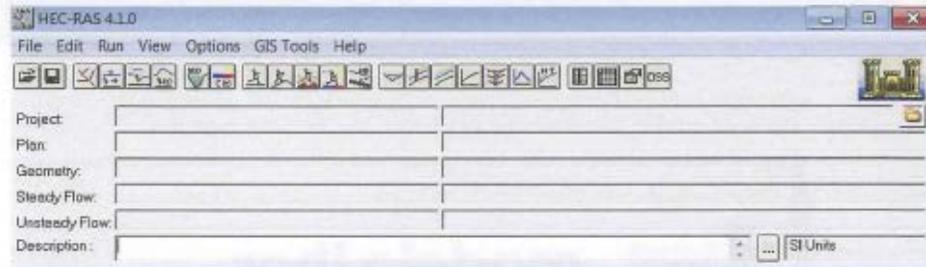
Modelos lluvia-escurrencimiento

Existen gran variedad de modelos lluvia escurrencimiento que pudieran aplicarse para la obtención de las crecientes de diseño. Entre los recomendados se tienen: Racional, Hidrograma Unitario Triangular (HUT) y Ven Te Chow.

Método	Gasto de diseño	Parámetros
Racional	$Qd = 0.278 * C * I * A$ <p>donde</p> $He = \frac{10 \left(\frac{Hp}{10} - \frac{508}{N} + 5.08 \right)^2}{\left(\frac{Hp}{10} + \frac{2032}{N} - 20.32 \right)}$ $C = \frac{He}{Hp} \quad ; \quad I = \frac{K}{(1-e) * Tc^e}$	<p>Qd: Gasto diseño, m³/s C: Coef de escurrencimiento, adim I: Intensidad de la lluvia, mm/h A: Área de la cuenca, km² N: Núm. de Escurrencimiento, adim</p>
HUT	$Qd = \frac{0.556 He A}{n * Tp}$ $Tp = 0.60 * Tc + \frac{Tc}{2} \quad ; \quad Tb = n Tp$ $n = 2 + \frac{A - 250}{1583.33}$	<p>He y Hp : lluvia efectiva y total, mm He₀: lluvia efectiva en la est base, mm Tc: Tiempo de concentración, h Tp y T_p; tiempo de pico y base, h</p>
Ven Te Chow	$Qd = A * X * Y * Z$ $X = \frac{He_s}{D_{diseño}} \quad (\text{factor de escurrencimiento})$ $Y = 0.278 \frac{He}{He_s} \quad (\text{factor climático})$ $Z = \frac{Qp}{Qe} \quad (\text{factor de reducción})$	<p>n: parámetro f(A) D_{diseño}: duración de diseño de la lluvia, h Qp y Qe: gasto pico y de equilibrio, m³/s</p>

Estudio Hidráulico:

Este sirve para identificar las zonas inundables. Es deseable se realice al considerar un flujo bidimensional; sin embargo, se acepta la modelación unidimensional. Para esta última forma de análisis existen varios softwares que tienen costo y algunos libres de ello tal como el HEC-RAS.



En el caso del análisis unidimensional se deberá verificar que los niveles obtenidos para los diferentes períodos de retorno no rebasen los puntos más altos de las secciones transversales utilizadas. El programa HEC-RAS a través de su utilidad HEC-GeoRAS permite obtener las trazas de inundación en forma continua a partir del modelo digital de elevaciones utilizado. Esto último es el producto final requerido para la evaluación de riesgos por inundación.



Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas

**GOBIERNO
FEDERAL**

SEGOB

Centro Nacional de Prevención de Desastres



SERIE: ATLAS NACIONAL DE RIESGOS
Fenómenos Hidrometeorológicos



Vivir Mejor

Por último, es necesario agregar un campo en la tabla de atributos anterior, el cual se nombra (PENDIENTE). Dado que dicha tabla cuenta con la longitud de cada tramo y la elevación en cada punto, para calcular la pendiente se selecciona esa nueva columna (PENDIENTE) y luego se da *clic* al botón derecho del ratón para que aparezca un menú del que se emplea la opción **Field Calculator...** (Figura 1.36).

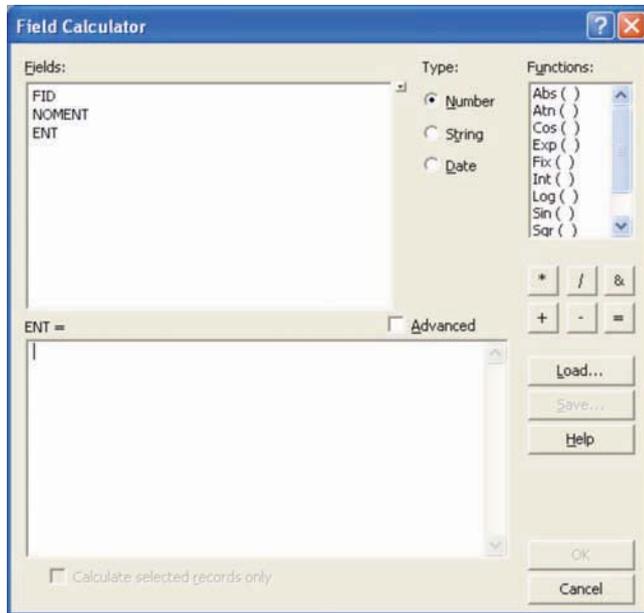


Figura 1.36 Ventana donde se calcula la pendiente de cada tramo de la red de drenaje

1.2 Gastos de diseño

Para estimar los caudales de diseño en cualquier cuenca, se requiere cualquiera de las siguientes opciones de información:

- Mapas de isoyetas, elaborados por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y el CENAPRED, o bien,
- Curvas $h_p - d - T_r$, o
- Curvas $i - d - T_r$, o incluso
- Estudio hidrológico de la zona

La primera puede descargarse de la página del CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/12122006Captulolanexoss.pdf>

Las otras tres opciones son el resultado de algún estudio hidrológico particular realizado en la zona de interés.

La metodología descrita a continuación es válida para cualquiera de los tres primeros casos. En el cuarto caso se deben presentar los gastos para los diferentes periodos de retorno.

1.2.1 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de una cuenca se obtiene con la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2001):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1.1)$$

donde:

- L longitud del cauce principal, (m)
- S pendiente del cauce principal, (adim)

En el inciso anterior se obtuvieron ambas características fisiográficas del cauce principal, por lo que es fácil calcular el tiempo de respuesta de la cuenca, conocido como *tiempo de concentración*.

1.2.2 Precipitación e intensidad

Para obtener este valor, es necesario contar con cualquiera de las cuatro opciones enlistadas al principio de este inciso. En esta metodología se supondrá que se cuenta con la primera de ellas, es decir, los mapas de precipitación del CENAPRED, mapas asociados a distintos periodos de retorno con distintas duraciones, (Anexo 1 de Eslava *et al.*, 2006).

Los mapas del Anexo 1 fueron elaborados sólo para duraciones de 1 y 24 h; sin embargo, el tiempo de concentración generalmente resulta diferente a cualquiera de esas dos duraciones, por lo que la necesidad de interpolar los valores de precipitación leídos de los mapas será muy frecuente. Para ello, deberán seguirse los pasos descritos en Eslava, 2006:

- a) Ubicar en cada mapa el sitio de interés (localidad o salida de la cuenca)
- b) Leer en cada mapa (20 en total, 10 para $d = 1$ h y 10 para $d = 24$ h) el valor de la precipitación asociada con un determinado periodo de retorno
- c) Llenar las dos primeras columnas de la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 1.2 Extrapolación de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración

Tr (años)	Precipitación (mm)		
	hp_1 (d = 1 h)	hp_{24} (d = 24 h)	hp_{tc} (d = t_c)
2			
5			
10			
25			
50			
100			
250			
500			
1000			
2000			

- d) Para cada periodo de retorno, aplicar la siguiente ecuación:

$$hp_{tc} = \frac{hp_{24} - hp_1}{3.1781} (\ln(t_c)) + hp_1 \quad (1.2)$$

donde:

hp_{tc} valor de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, mm

hp_{24} valor de la precipitación para una duración de 24 horas y un determinado periodo de retorno, mm

hp_1 valor de la precipitación para una duración de 1 hora y un determinado periodo de retorno, mm

t_c tiempo de concentración de la cuenca en estudio, h

- e) El resultado obtenido cada vez que se aplica la ec. 1.2, corresponde a la precipitación para un periodo de retorno y una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, y se anota en la columna **$d = t_c$** .
- f) Finalmente, la intensidad es igual a la cantidad de agua que se precipita por unidad de tiempo, por lo que ésta se obtiene dividiendo la lámina de precipitación entre su duración, que para fines de diseño es igual al tiempo de concentración (1.3).

$$i = \frac{hp_{tc}}{d} \quad (1.3)$$

1.2.3 Gastos o caudales

Para obtener el gasto de diseño existen varios métodos, pero dado el tamaño de cuenca con la que se trabajará (menor de 100 km²), la literatura recomienda el uso de la fórmula racional.

La fórmula racional es una de las más antiguas y probablemente una de las más utilizadas actualmente. Este método considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración. La fórmula racional es:

$$Q_p = 0.278 C i A \quad (1.4)$$

donde:

C coeficiente de escurrimiento. Representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa. Varía entre 0 y 1 (Tabla 1.3)

i intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, mm/h

A área de la cuenca, km²

Tabla 1.3 Valores para el coeficiente de escurrimiento (Aparicio, 1987)

Tipo de área drenada	Coeficiente de Escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales: Zona comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles Vecindarios	0.70	0.90
	0.50	0.70
Zonas residenciales: Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas industriales: Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles: Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas o empedradas, juntas con cemento	0.70	0.85
Adoquín sin juntar	0.50	0.70
Terracerías	0.25	0.60
Estacionamientos Techados	0.75	0.85
	0.75	0.95
Praderas: Suelos arenosos planos (pendientes: 0.02 ó menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 ó más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 ó menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.18	0.20
Suelos arcillosos escarpados (0.07 ó más)	0.25	0.35

1.2.4 Hidrogramas para diferentes periodos de retorno

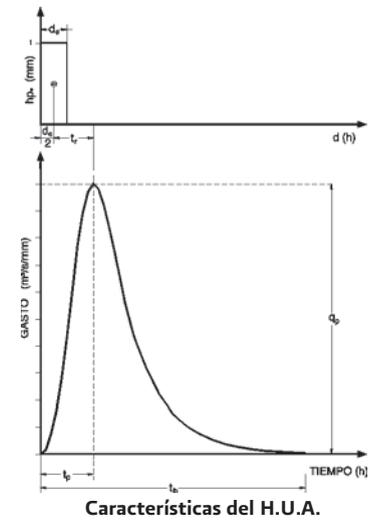
Después de estimar el gasto máximo para diferentes periodos de retorno, es necesario definir la forma del hidrograma de escurrimiento directo, para ello existen diferentes modelos que pueden ser usados, entre ellos:

- Hidrograma unitario adimensional
- Hidrograma unitario geomorfológico
- Hidrograma unitario triangular
- Método de Chow

La opción propuesta en esta metodología es usar el Hidrograma Unitario Adimensional (HUA, Tabla 1.4); sin embargo, puede ser cualquiera otra.

Tabla 1.4 Coordenadas del HUA

t / t_p	q / q_p
0.00	0.000
0.10	0.01
0.20	0.075
0.30	0.160
0.40	0.280
0.50	0.430
0.60	0.600
0.70	0.770
0.75	0.830
0.80	0.890
0.90	0.970
1.00	1.000
1.10	0.980
1.20	0.920
1.25	0.880
1.30	0.840
1.40	0.750
1.50	0.660
1.60	0.560
1.75	0.450
1.80	0.420
2.00	0.320
2.20	0.240
2.25	0.220
2.40	0.180
2.50	0.150
2.60	0.130
2.75	0.105
2.80	0.098
3.00	0.075
3.25	0.053
3.50	0.036
3.75	0.026
4.00	0.018
4.25	0.012
4.50	0.009
4.75	0.006
5.00	0.004



Las características del HUA se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Aparicio, 1987):

Tiempo de retraso:

$$t_r = 0.6 t_c \tag{1.5}$$

Tiempo de pico:

$$t_p = \frac{d_c}{2} + t_r \tag{1.6}$$

Tiempo base:

$$t_b = 2.67 t_p \tag{1.7}$$

Gasto de pico:

$$q_p = \frac{0.208 A_c}{t_p} \tag{1.8}$$

El hidrograma que debe transitarse a través del río se define multiplicando los valores obtenidos con las ecuaciones 1.6 y 1.8 por cada una de las HUA coordenadas de la Tabla 1.4.

1.3 Generación de escenarios de peligro

Para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad del agua, velocidad de la corriente, zona inundada, etc.) durante el paso de una crecida, se debe llevar a cabo el tránsito de la ave-

nida. Para ello se cuenta con diferentes programas de computadora, en algunos casos mejores que en otros.

1.3.1 Clasificación de modelos de simulación

Como se mencionó arriba, para simular una inundación existen diferentes modelos que son producto de las hipótesis simplificadoras aceptadas para resolver las ecuaciones que definen el comportamiento del fenómeno. De acuerdo con lo anterior, se cuenta con modelos hidráulicos y modelos hidrológicos, siendo los primeros los que mejores resultados obtienen. Más aún, dentro de los hidráulicos se tienen modelos que analizan el comportamiento del flujo en una, dos y tres dimensiones; obviamente su precisión mejora en función de las dimensiones usadas para su análisis; sin embargo, también los requerimientos de información son mayores.

Los programas empleados en esta parte de la metodología han sido seleccionados debido a su facilidad de uso y, aunque es software libre, cuentan con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico propuesto para ser usado es HecRAS, propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002) debido a que:

- 1) Es un modelo ampliamente reconocido y por ende está validado,
- 2) Es público, lo que significa que no tiene ningún costo y
- 3) Pese a que es un modelo unidimensional, en la mayoría de los casos esta hipótesis no tiene mayores repercusiones; sin embargo, habrá algunos casos en los que sea necesario emplear algún modelo bidimensional. En este sentido, actualmente se está revisando el programa de cómputo Mike Flood y, aunque no es el único en su tipo, es una opción para el modelado de flujo bidimensional. El uso de esta herramienta y la adecuación de sus resultados está fuera del alcance de este trabajo, por lo que serán motivo de un futuro manual.

A continuación se presentan los requerimientos para esta parte de la metodología:

- ArcGIS 8.0 ó mayor
- HecRAS 3.1.3 ó mayor
- Spatial Analyst 8.0 ó mayor

- Hec GeoRAS 4.1 ó mayor (Extensión)
- Hydrology Modelling (Extensión)
- Modelos Digitales del Terreno (MDT)
- Xtools Pro for ArcGIS 2.2.0 ó mayor

En esta parte de la metodología se detalla el uso de la herramienta Hec GeoRAS (Figura 1.37):

- Extracción desde un SIG de los datos básicos, como se muestra en la primera parte de esta guía metodológica (inciso 1.1).
- Completado de la información mínima requerida para simular en HecRAS las avenidas calculadas en el inciso anterior (1.2).
- Importación de los resultados obtenidos en HecRAS para su interpretación en ArcGIS.

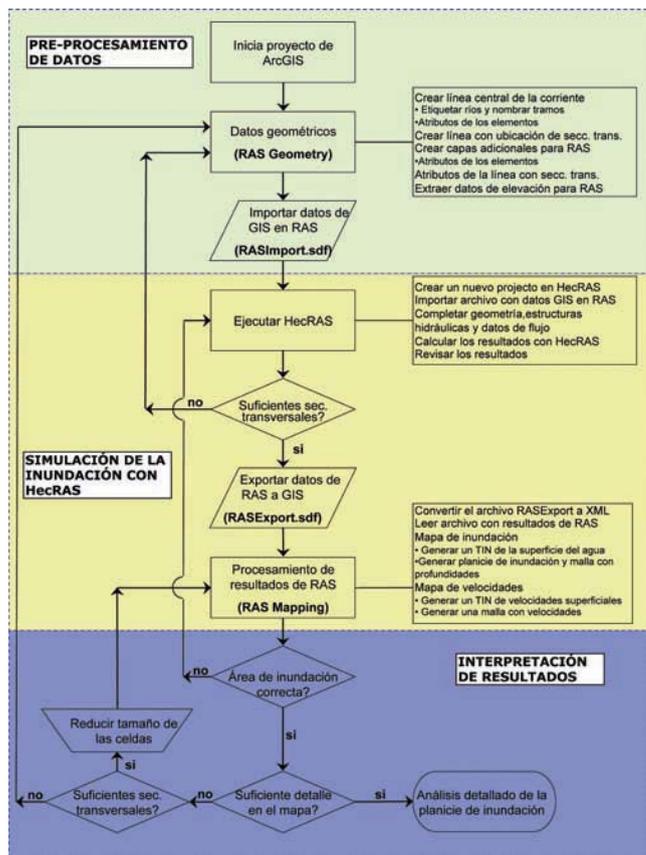


Figura 1.37 Diagrama de flujo del proceso para usar Hec GeoRAS (USACE, 2005)

NOTA: Parte de estas notas ha sido tomada del manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005)

1.3.2 Preparación de archivos en Arc GIS

Cuando se carga la extensión *Hec GeoRAS*, la barra de herramientas añadida a la interfase de *ArcGIS* es la que se muestra en la Figura 1.38.



Figura 1.38 Barra de herramienta de Hec GeoRAS

El preprocesamiento de los datos geométricos desde *ArcGIS*, para su posterior exportación hacia HecRAS, se realiza con el menú **RAS Geometry**.

Paso 1. Crear las capas que se usarán para guardar la información exportada (Figura 1.39). Para ello existen dos caminos:

- Seleccionar, una por una, las capas que se usarán.
- Seleccionar la opción All, con la que se generarán las 14 capas que aparecen en el menú.

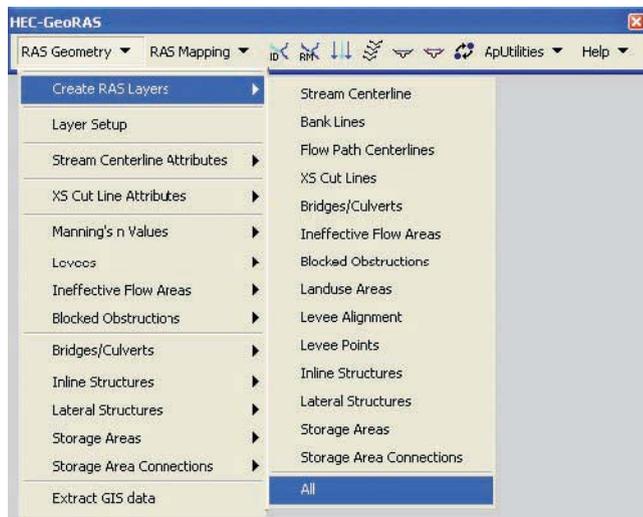


Figura 1.39 Barra de herramienta de Hec GeoRAS

La información mínima necesaria para usar HecRAS requiere que desde *ArcGIS* se exporten los archivos siguientes:

- Archivo con la trayectoria del río (**Stream Centerline**)
- Archivo con la ubicación y geometría de las secciones transversales (**XS Cut Lines**)

Dependiendo de la información disponible, o de la precisión de los resultados requeridos, se usan más capas de información; sin embargo, en esta guía sólo se plantea lo básico y, en caso de requerir detalles más específicos (importar capas con información ya existente, por ejemplo, estructuras hidráulicas etc.) deberá recurrirse al manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

Paso 2. Dado que se cuenta con la red de drenaje de la cuenca en estudio (inciso 1.1.7), la primera capa que se creará es **Stream Centerline** (Figura 1.40).



Figura 1.40 Opción para crear la capa que define la corriente principal

Añadida la capa anterior, el trayecto de la corriente se define digitalizando esa información. Para ello se selecciona **Editor | Start Editing**, enseguida la herramienta **Sketch Tool** (Figura 1.41) y comienzan a dibujarse los tramos del río, uno por uno (tratando de seguir el contorno de la corriente, como se muestra en la figura siguiente).

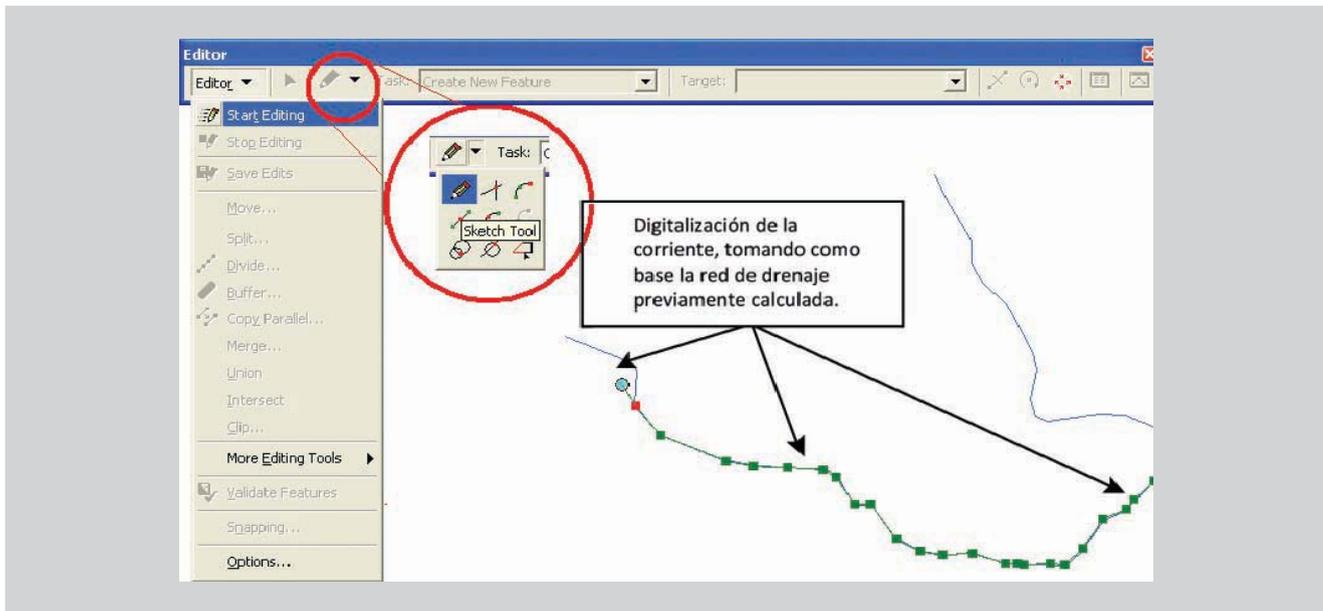


Figura 1.41 Opción para crear la capa que define la corriente principal

Para finalizar, se salva el dibujo (**Save Edits**) y se detiene la edición (**Stop Editing**).

La capa *Stream Centerline* no está completa hasta que se asigne un nombre a cada río y cada tramo del mismo. Para ello, en la barra de *Hec GeoRAS* se activa la herramienta **Reach and River ID** y con el ratón se elige el río o cada uno de los tramos que existan en la red de drenaje que se esté trabajando, para asignarles un nombre (Figura 1.42).



Figura 1.42 Identificación de ríos y tramos

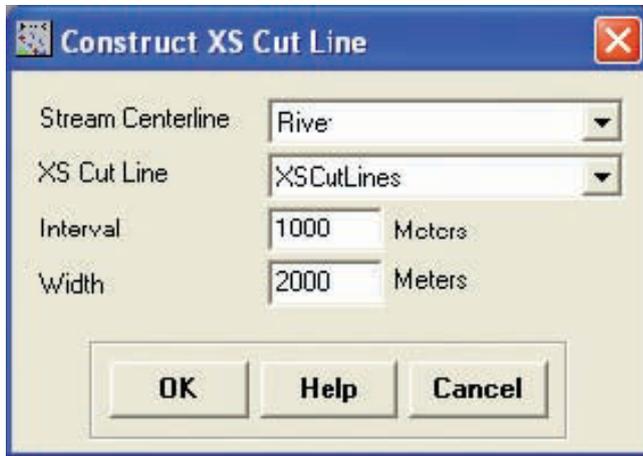
Paso 3. La ubicación, origen y final de las secciones transversales se indican en un archivo que se crea desde la barra de menú de *Hec GeoRAS*, eligiendo **RAS Geometry | Create RAS Layers | XS Cut Lines**. Enseguida aparece la ventana de la Figura 1.43, en la que se define el nombre del archivo y se da **OK**.



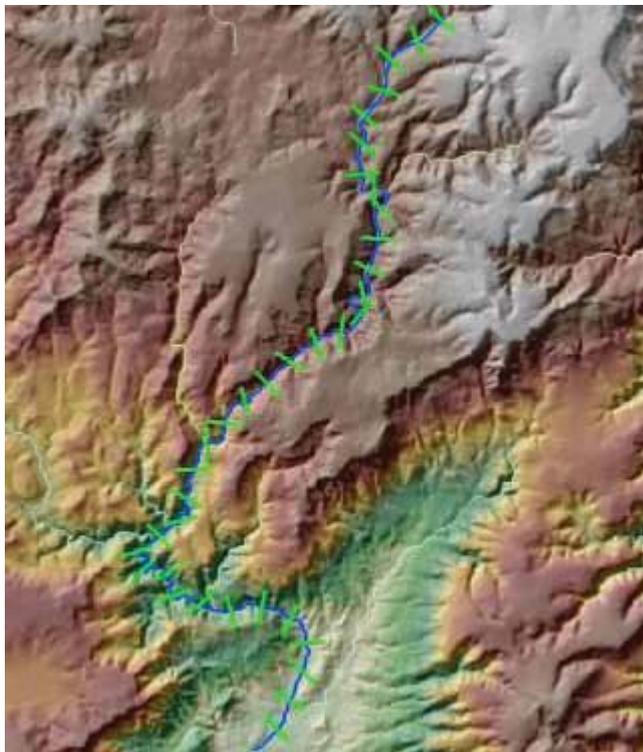
Figura 1.43 Capa con las secciones transversales del río

Para trazar las secciones se edita el archivo **XS CutLines** y se dibuja la ubicación de cada sección transversal. Para ello se tienen dos modalidades:

- Digitalizar las secciones
- Seleccionar la opción **Construct XS Cutlines**. Con esta opción se generan automáticamente secciones transversales a una cierta distancia que es especificada en un cuadro de diálogo (Figura 1.44a). El resultado puede verse en la Figura 1.44b.



a) Aquí se especifican las secciones deseadas



b) Generación automática de secciones

Figura 1.44 Construcción automática de secciones transversales

Paso 4. Una vez creados los archivos que van a ser utilizados en HecRAS, la identificación de cada uno de ellos se realiza con la opción **RAS Geometry | Layer Setup**, con la que se desplegarán las ventanas mostradas en la Figura 1.45. Éstas permiten seleccionar los archivos usados durante los procesos y la extracción de

la información, dado que usualmente se emplearán MDT del INEGI, deberá seleccionarse la opción Grid.

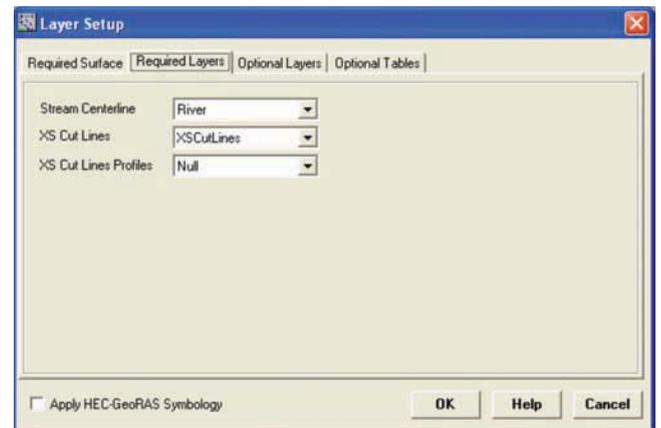
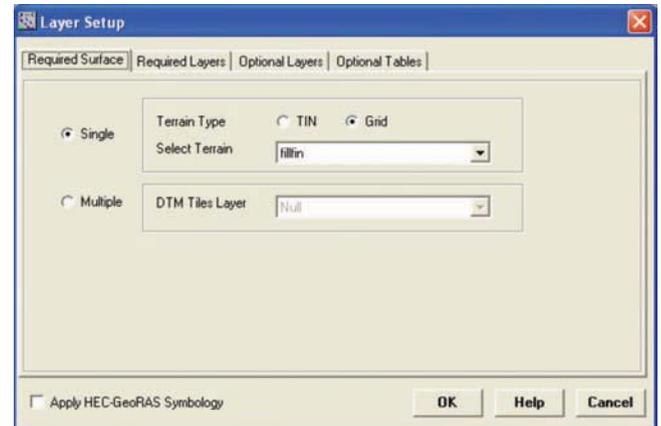


Figura 1.45 Identificación de los archivos que contienen la información

Una manera de corroborar que las secciones han sido definidas de manera adecuada, es mediante la herramienta **Plot Cross Section**. Con ella es posible observar su forma (Figura 1.46) y, en caso de ser necesario, modificarla.

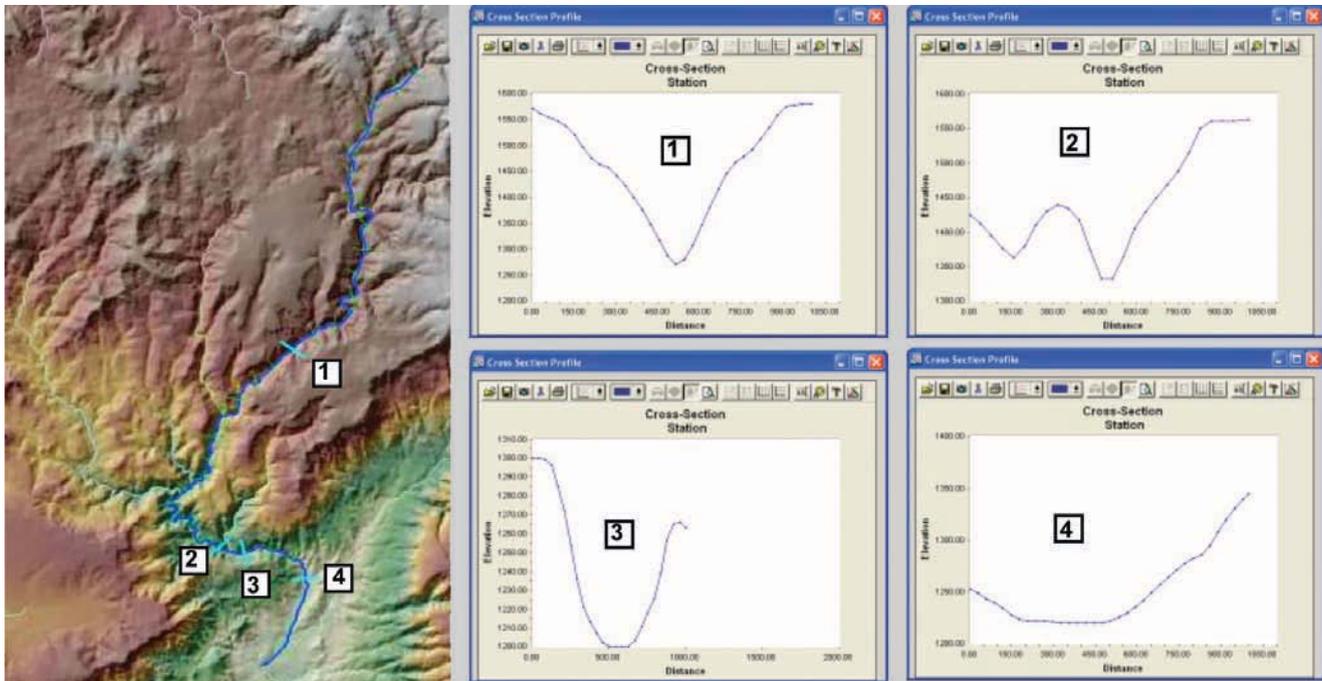


Figura 1.46 Verificación de que las secciones transversales son adecuadas

Si la forma y la ubicación de las secciones son las adecuadas, éstas se salvan (**Save Edits**) y se detiene la edición (**Stop Editing**).

Para este momento, los archivos requeridos para simular en *HecRAS* ya han sido creados y completados con información parcial. Lo que resta hacer es armar la topología del modelo.

Paso 5. Para terminar de llenar la tabla de atributos del archivo *Stream Centerline*, se debe seleccionar **RAS Geometry | Stream Centerline Attributes** y una por una, las opciones **Topology**, **Lengths/Stations** y **Elevations** que aparecen en el menú (Figura 1.47), con lo que se incorpora toda la información requerida.

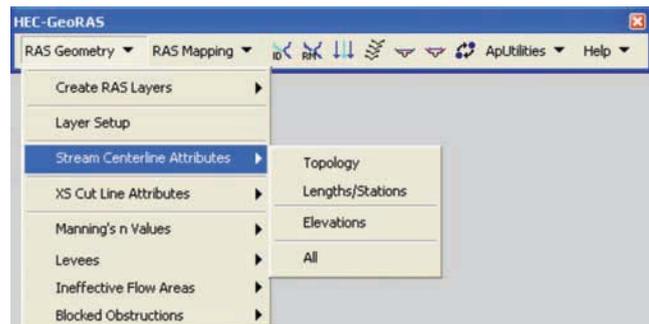


Figura 1.47 Completado de los atributos del archivo centerline

Paso 6. De igual manera, para completar el llenado de la tabla de atributos del archivo *XS Cut Line*, se debe seleccionar **RAS Geometry | XS Cut Line Attributes** y, seleccionar una por una las opciones **River/Reach Names**, **Stationing**, **Bank Stations**, **Downstream Reach Lengths** y **Elevations** que aparecen en el menú (Figura 1.48). Con ello, se completa el llenado de la tabla de atributos y se crea una tabla con las coordenadas x, y y z, que será usada más adelante, durante el proceso de exportación de los datos.

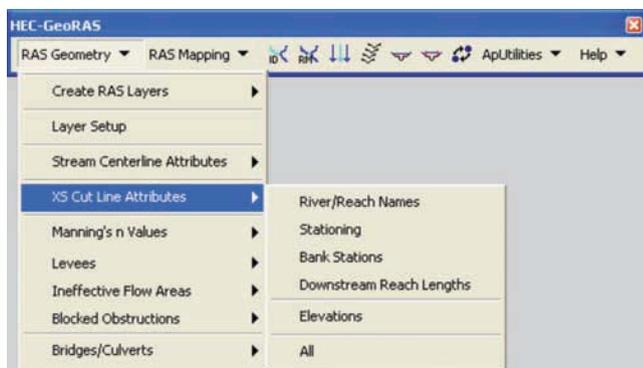


Figura 1.48 Completado de los atributos del archivo de secciones transversales

Paso 7. Finalmente, para exportar los datos desde ArcGIS hacia HecRAS, se debe seleccionar **RAS Geometry | Extract GIS Data** (Figura 1.49), con lo que aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 1.50; en ella deberá indicarse la ruta y el nombre con el que se desea guardar el archivo que contiene la información generada en ArcGIS.

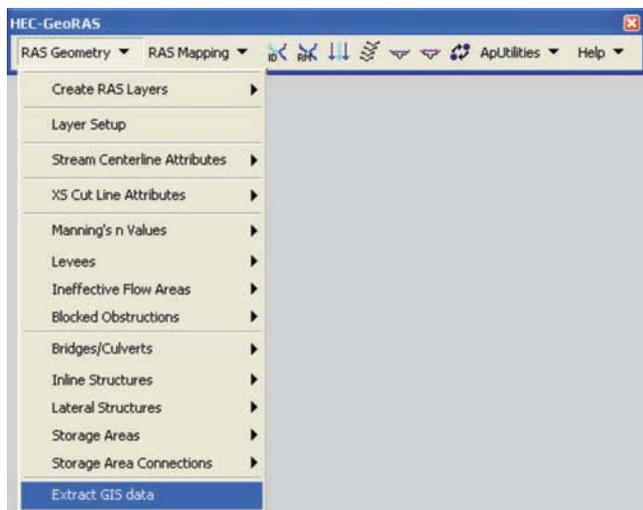


Figura 1.49 Extracción de datos desde ArGIS hacia HecRAS

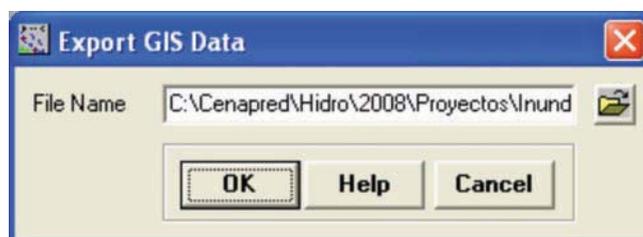


Figura 1.50 Direccionamiento de los datos exportados

Hasta aquí el resultado será un par de archivos: uno en formato **SDF** y el otro en formato **XML**, los cuales serán usados a continuación para elaborar el proyecto en HecRAS.

1.3.3 Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)

La simulación del paso de las avenidas a lo largo del río, también conocido como tránsito de avenidas, y la exportación de los resultados hacia ArcGIS, se lleva a cabo en seis etapas:

- Importación de los datos geométricos en HecRAS
- Completado de la información geométrica
- Información de los caudales que serán simulados
- Condiciones de frontera en el río o tramo que será simulado
- Ejecución del programa e interpretación de resultados
- Verificación y exportación de los resultados hacia ArcGIS

1.3.3.1 Importación de datos

En esta etapa se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto, generado en ArcGIS.

Paso 1. Crear un proyecto nuevo en HecRAS (Figura 1.51). Seleccionar el directorio de trabajo y salvarlo (en el ejemplo, el proyecto creado se llama Mezquital.prj, como se muestra en la Figura 1.52).

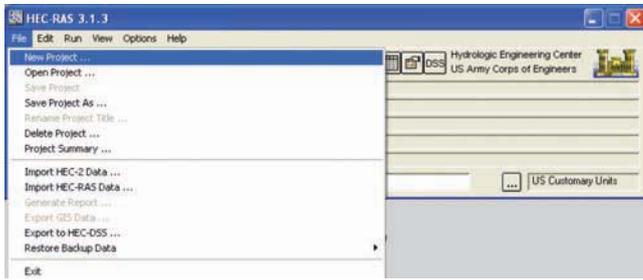


Figura 1.51 Creación de un nuevo proyecto en HecRAS



Figura 1.52 Definición del directorio de trabajo

Paso 2. Seleccionar la opción **Options | Unit system (US Customary/SI...)** y escoger **System Internacional (Metric System)**, como se muestra en la Figura 1.53.

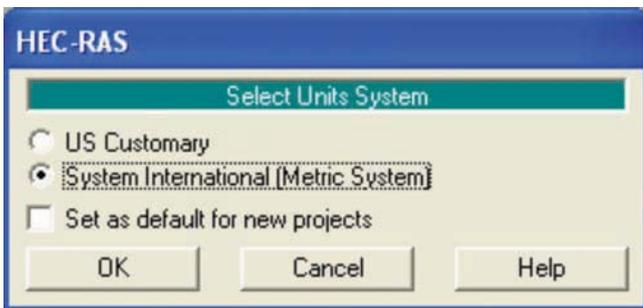


Figura 1.53 Selección del sistema de unidades que se usará

Paso 3. Para importar los datos extraídos desde ArcGIS, seleccionar la opción **Edit | Geometric Data ...** y, en la ventana que se despliega se elige **File | Import Geometry Data | GIS Format**. A continuación aparece una ventana como la mostrada en la Figura 1.54 con la que se buscará el archivo que se exportó desde ArcGIS, en el directorio de trabajo previamente especificado.

NOTA: Se debe recordar que los archivos creados en ArcGIS, con Hec GeoRAS, tienen extensiones **sdf** y **xml**. HecRAS identifica el primero de ellos.

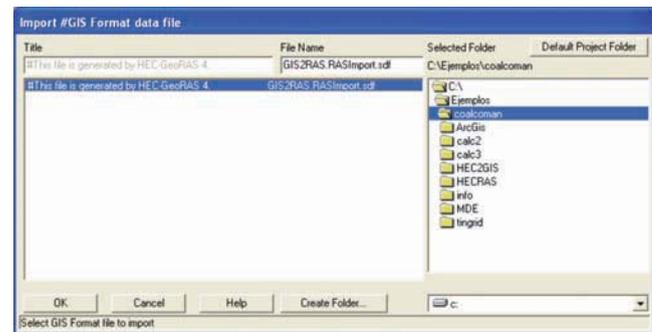


Figura 1.54 Identificación del archivo con los datos geométricos exportado desde ArcGIS

Una vez localizado el archivo con la información geométrica, se selecciona y se oprime el botón **OK**.

Paso 4. En ese momento los datos habrán sido leídos en un archivo temporal y pueden ser incorporados al archivo geométrico del proyecto.

En la pestaña **Intro**, de la ventana **Import Options**, se debe seleccionar la opción **SI (metric) units** (Figura 1.55).

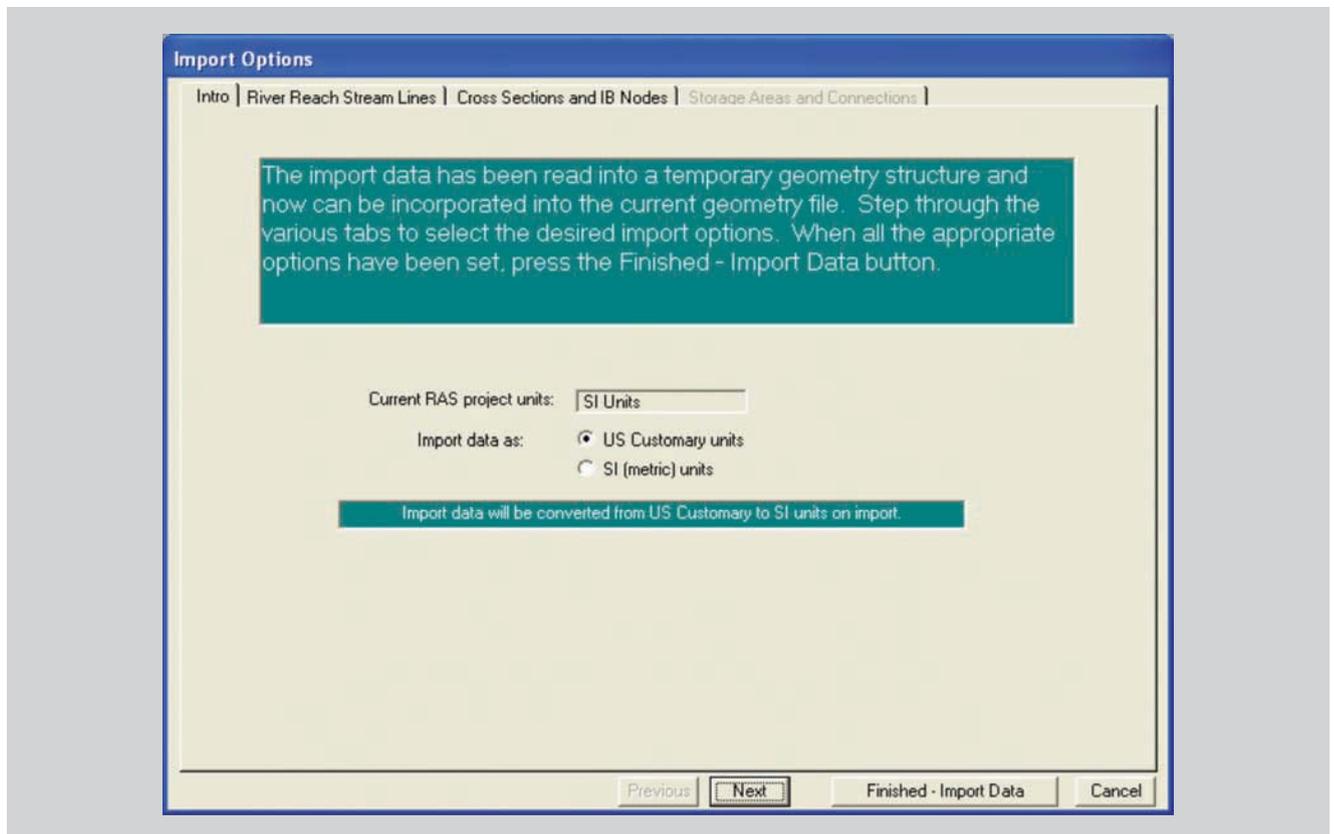


Figura 1.55 Verificación de la información importada. Sistema de unidades

Paso 5. En la pestaña **River Reach Stream Lines**, se verifica que el o los ríos y los tramos que fueron importados sean correctos (Figura 1.56).

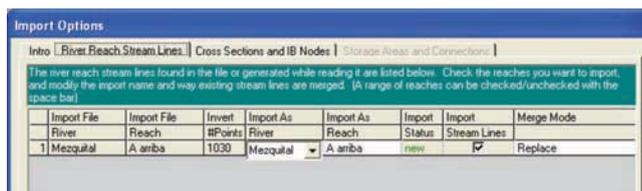


Figura 1.56 Verificación de la información importada. Ríos y tramos

Paso 6. En la pestaña **Cross Sections and IB nodes** se confirma la información que tiene que ver con las secciones transversales (Figura 1.57).

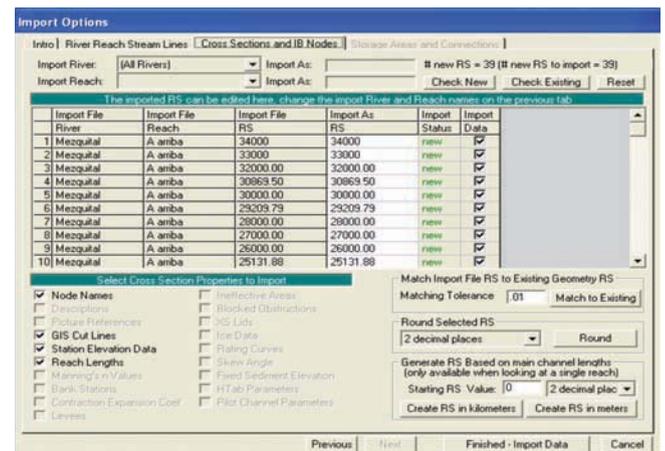


Figura 1.57 Verificación de la información importada. Secciones transversales

Después de confirmar que toda la información que se está importando es correcta, se presiona el botón **Finished - Import Data**. En ese momento se desplegará el modelo que será simulado en HecRAS (Figura 1.58).

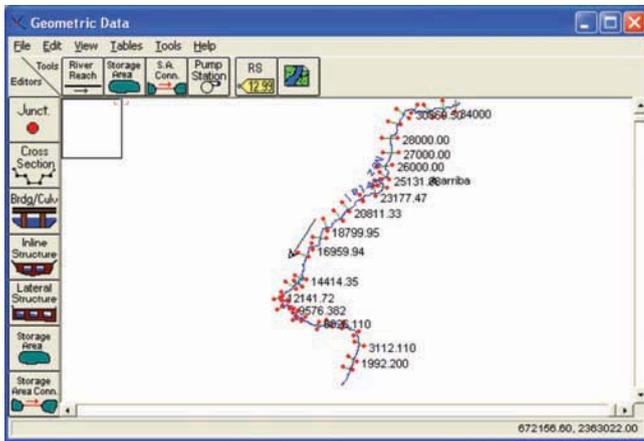


Figura 1.58 Geometría del cauce que será simulado

1.3.3.2 Completado de la información

El siguiente paso consiste en completar la información mínima requerida por HecRAS para realizar la simulación.

Paso 7. Para definir el coeficiente de rugosidad “n” de Manning en cada sección, desde la pantalla principal de HecRAS se elige el ícono **Edit/Enter geometric data**  y en la ventana que se despliega se debe escoger **Tables | Manning’s n or k values**. Seleccionando **River** y **Reach** se despliega una tabla (Figura 1.59) que permite definir el valor del coeficiente, incluso por zonas, en cada sección.

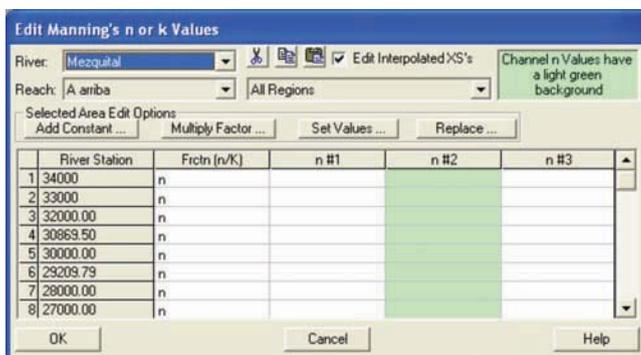
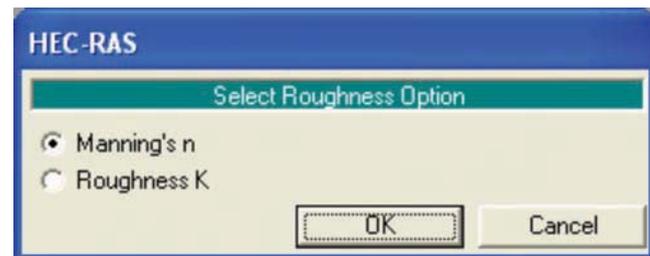


Figura 1.59 Ventana para definir el coeficiente de rugosidad

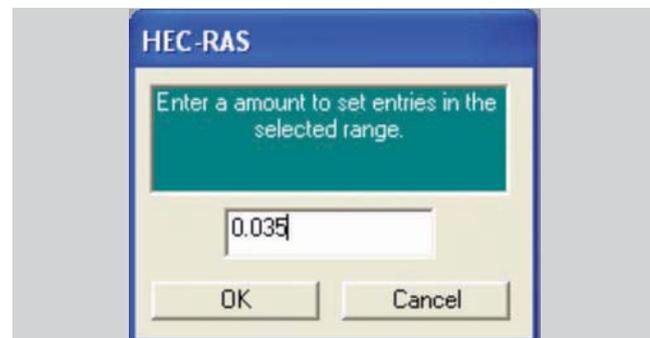
NOTA: El valor de la “n” de Manning puede variar y ser diferente para cada margen, para el centro del cauce o en cada sección, de acuerdo con los requerimientos del modelo, por lo que definirlo manualmente puede ser laborioso.

En este ejemplo se usará un mismo valor para las márgenes y otro para el centro del cauce.

Para definir el coeficiente de rugosidad, en la ventana Edit Manning’s n or k Values se presiona el botón **Set Values**, con lo que se despliega una caja de texto (Figura 1.60a) en la que se elige **Manning’s n**. Luego, para seleccionar una columna completa, se da un clic en la celda gris con encabezado (**n #1, n #2 ó n #3**) y, finalmente, se elige **Set Values** para que en la caja de texto que aparece (Figura 1.60b) se teclee el valor de la “n” de Manning que corresponde a la zona del cauce en cuestión.



a) Selección del coeficiente de rugosidad



b) Definición del valor del coeficiente

Figura 1.60 Selección y definición del coeficiente de rugosidad

El resultado de la operación anterior se muestra en la Figura 1.61. De la misma manera se introducen los valores correspondientes para las otras columnas.

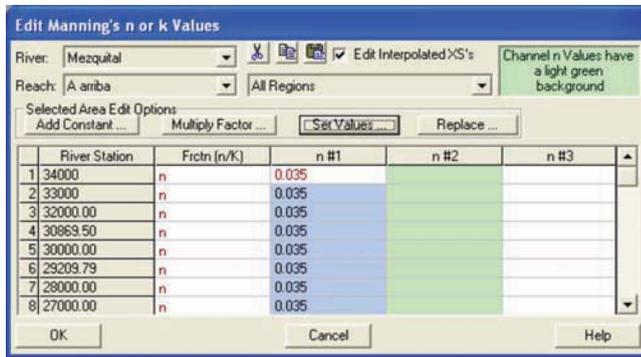


Figura 1.61 Selección y definición del coeficiente de rugosidad

NOTA: En el supuesto caso en el que existieran estructuras (canales laterales, alcantarillas, puentes, etc.) que no se extrajeron desde ArcGIS y se desea introducir directamente en HecRAS, se debe consultar el inciso Importing RAS Layers del Capítulo 3 del manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

1.3.3.3 Gastos

Previamente se realizó el cálculo de los gastos asociados con diferentes periodos de retorno (inciso 1.2 Gasto de Diseño). Dependiendo del tipo de simulación que se pretenda realizar, la información de los caudales puede darse de dos maneras:

- Como un gasto constante (simulación en flujo permanente)
- Como un hidrograma (simulación en flujo no permanente)

Para este ejemplo sólo se mostrará el primer caso, para el segundo, se deberá consultar el manual de usuario de *HecRAS* (USACE, 2002).

En los pasos anteriores se obtuvo una tabla como la mostrada a continuación:

Tabla 1.5 Resultados obtenidos en el inciso 1.2

Tr (años)	hp (mm)	i (mm/h)	Q (m ³ /s)
2			
5			
...			
1000			
2000			

Los datos de la última columna de la Tabla 1.5 son los que se usarán para modelar en las avenidas en *HecRAS*.

Paso 1. La información referente a caudales se define a través del menú *Steady Flow Data*, que se activa seleccionando el ícono **Edit/Enter steady flow data**, desde la pantalla principal de *HecRAS*. Con lo anterior se despliega la ventana siguiente:

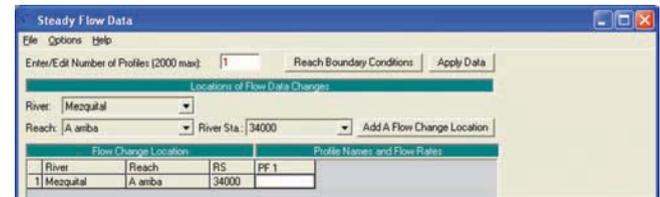


Figura 1.62 Ventana principal para introducir la información de gastos

Paso 2. El número de perfiles que se simularán corresponde a los gastos que se ingresarán a través de la opción **Enter/Edit Number of Profiles**. En esta metodología se obtienen 10 valores, correspondientes a 10 periodos de retorno, sección 1.3.3.3.

Después de teclear 10, seguido de un *enter*, en la parte baja de la ventana se genera una tabla con las 10 columnas en las que se introducirá el valor de los caudales, uno por columna, como se muestra en la Figura 1.63.

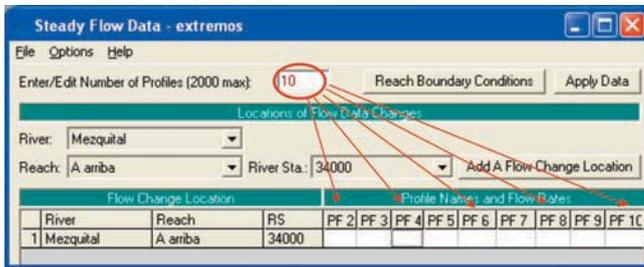


Figura 1.63 Definición del número de perfiles que serán simulados

Paso 3. Los caudales que se usarán para simular el comportamiento del río se especifican en cada una de las celdas blancas, colocando el cursor en ellas y escribiendo el valor deseado (Figura 1.64).

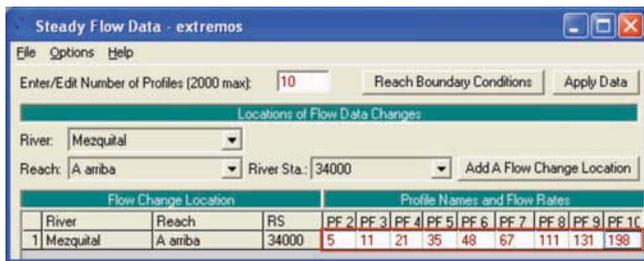


Figura 1.64 Definición del número de perfiles que serán simulados

Paso 4. Para identificar el periodo de retorno de cada gasto, se edita el encabezado de las columnas, seleccionando **Options | Edit Profile Names ...** (Figura 1.65)

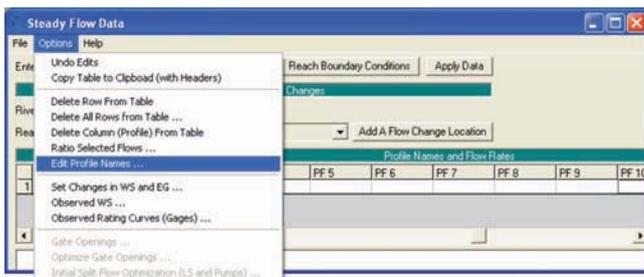
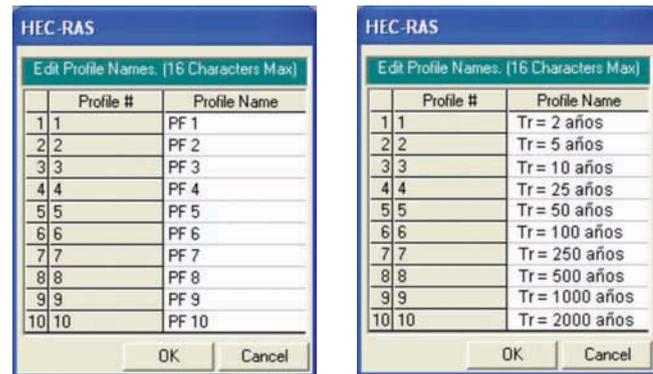


Figura 1.65 Opción para editar el nombre de cada perfil

Los encabezados de las columna se muestran en la Figura 1.66a. Para cambiar el contenido de las celdas blancas, se da doble clic sobre ellas y se re-escribe la información adecuada. Después de especificar el periodo de retorno de cada gasto, la tabla queda como se muestra en la Figura 1.66b, y con ello se termina de cargar la información de los caudales.



a) Encabezados por default

b) Encabezados editados

Figura 1.66 Edición del nombre de cada perfil

1.3.3.4 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera deben establecerse en todos los extremos de la red de drenaje.

Paso 1. En el menú **Steady Flow Data**, se da clic en el botón **Reach Boundary Conditions** y aparece la ventana de la Figura 1.67. En la tabla **Select Boundary Condition, Locations and Types**, por cada tramo de río habrá un renglón.

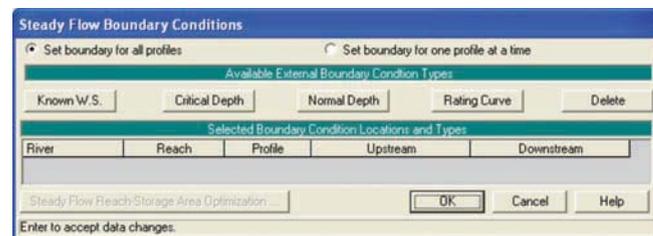
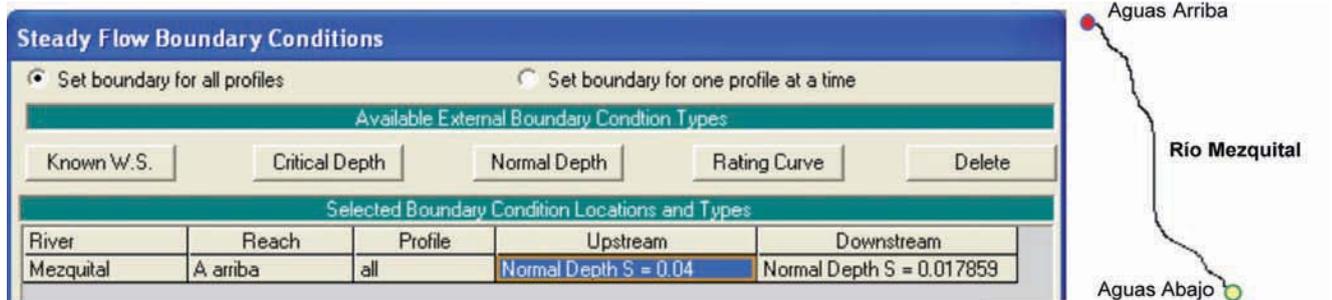
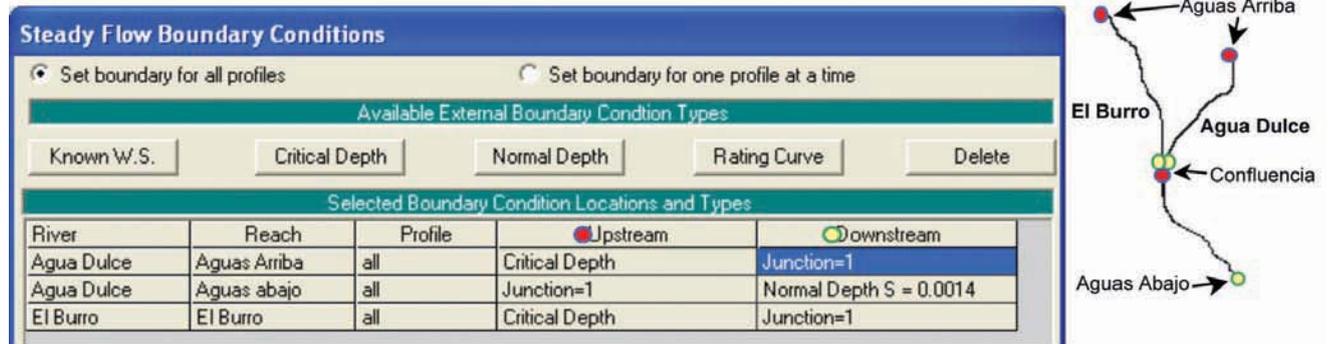


Figura 1.67 Pantalla para definir las condiciones de frontera

Un río puede tener varios tributarios y en cada uno de ellos se debe definir la condición de frontera de sus extremos. Así, si se trabaja con un río, sólo habrá un renglón (Figura 1.68a), pero a medida que aumenten los tributarios también lo harán los renglones de la tabla (Figura 1.68b).



a) Condiciones de frontera para un solo río



b) Condiciones de frontera para un río y un tributario

Figura 1.68 Muestra de la selección de las condiciones de frontera para diferentes arreglos

Paso 2. En el menú *Steady Flow Data* se da clic en la celda correspondiente al extremo en el que se va a definir la condición de frontera (el fondo de la celda cambiará a azul) y entonces podrá seleccionarse cualquiera de las opciones disponibles, dependiendo de las condiciones hidráulicas que imperen en cada caso:

- Nivel de agua Conocido (*Known W.S.*)
- Tirante crítico (*Critical Depth*)
- Tirante normal (*Normal Depth*)
- Curva elevaciones – gastos (*Rating Curve*)

En los extremos donde se junten dos o más tributarios, el programa lo identifica automáticamente y en esa unión coloca **Junction = n**, donde "n" es el número de la confluencia.

NOTA: Para cualquier tipo de frontera, excepto *Critical Depth*, se requieren algunos datos adicionales. Para más detalle, consultar el manual de usuario de HecRAS (USACE, 2002).

1.3.3.5 Ejecución del programa e interpretación de resultados

Hasta este momento se ha completado el llenado de datos para ejecutar el programa HecRAS. Ahora, para ejecutarlo, se elige el ícono de la simulación seleccionada:

- Flujo permanente (Perform a steady flow simulation) 
- Flujo no permanente (Perform an unsteady flow simulation) 

Para este ejemplo se explica el primero. Para la segunda opción se recomienda consultar el manual de usuario de HecRAS (USACE, 2002).

Paso 1. Al seleccionar la opción de flujo permanente se despliega una ventana como la de la Figura 1.69.

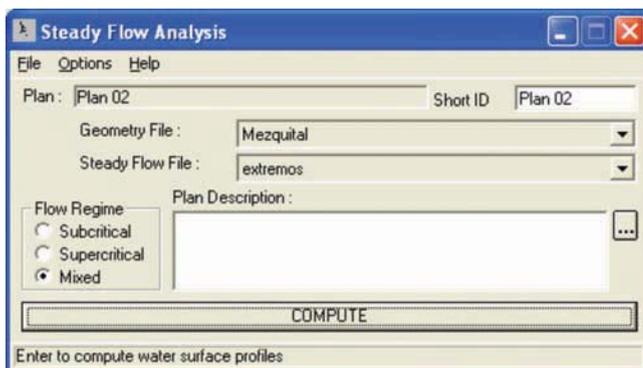


Figura 1.69 Ventana principal de la simulación en flujo permanente

Paso 2. En esta pantalla se debe asegurar que en la sección Flow Regime esté seleccionada la opción **Mixed**, para que el programa calcule libremente las condiciones en las que se encuentra el río y no sea forzado a un solo régimen. Hecho lo anterior, se oprime el botón **COMPUTE**.

Paso 3. El tiempo que demora el programa en realizar los cálculos, está en función del modelo que se trabaja (número de ríos, tramos, secciones transversales, puntos de las secciones, número de

gastos, estructuras hidráulicas incluidas, etc.). Después de presionar el botón **COMPUTE**, aparece una ventana que indica el avance de la simulación (Figura 1.70).

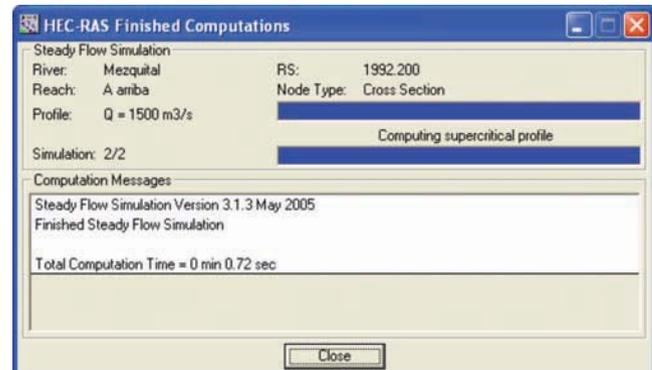


Figura 1.70 Ventana que indica el avance de la simulación

En caso de existir errores durante la incorporación de la información, en la ventana anterior se mostrará una serie de comentarios referentes a dichos errores. Si no fuera el caso, entonces aparecerá la figura anterior y esto será indicativo de que los cálculos han finalizado.

1.3.3.6 Verificación y exportación de resultados

Después de simular el paso de las avenidas y para verificar los resultados obtenidos, es posible usar las herramientas gráficas y tablas disponibles en HecRAS.

Antes de exportar el nivel que alcanza el agua con cada gasto, se debe revisar el polígono que delimita el área de inundación.

La información del mencionado polígono, para cada perfil, puede ser revisada en el editor de datos geométricos (Geometric Data Editor). Seleccionando el menú **Tools | Plot GIS Reach Profile Bounds**, es factible indicar el gasto y el tramo de río para los cuales se desean los resultados gráficos. Para el ejemplo se tiene un tramo único, por lo que en la Figura 1.71 en la opción **River**: se lee (All Rivers), mientras que en **Selected Locations** aparece Mezquital A. arriba.

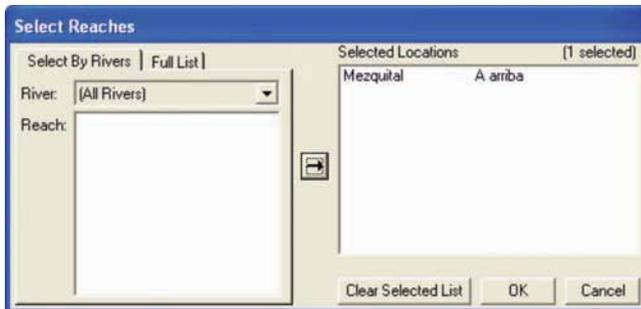


Figura 1.71 Selección del tramo y gasto para mostrar gráficamente

Después de seleccionar los tramos analizados, cuyos resultados interesa revisar, se oprime el botón **OK** y el resultado se muestra en una ventana como la de la Figura 1.72.

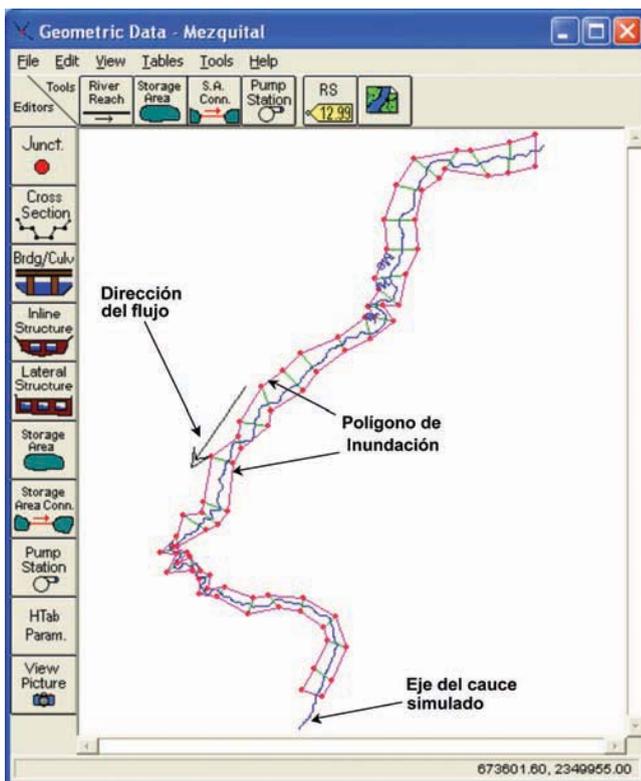


Figura 1.72 Resultado gráfico de la simulación

Esto es importante cuando el sistema de ríos cuenta con bordos que pueden ser rebasados al simular algunos gastos. Si alguno de los bordos ubicados en la parte de aguas arriba es rebasado, será necesario verificar que no ocurra lo mismo con aquéllos ubicados en la parte de aguas abajo.

Finalmente, los resultados de la simulación pueden ser exportados para procesarlos en ArcGIS, a través de la extensión *Hec GeoRAS*. Seleccionando el menú **File | Export GIS Data** se activa una ventana (Figura 1.73) en la que se puede escoger la ubicación del archivo en el que se escribirá la información para ArcGIS, así como las opciones de salida.

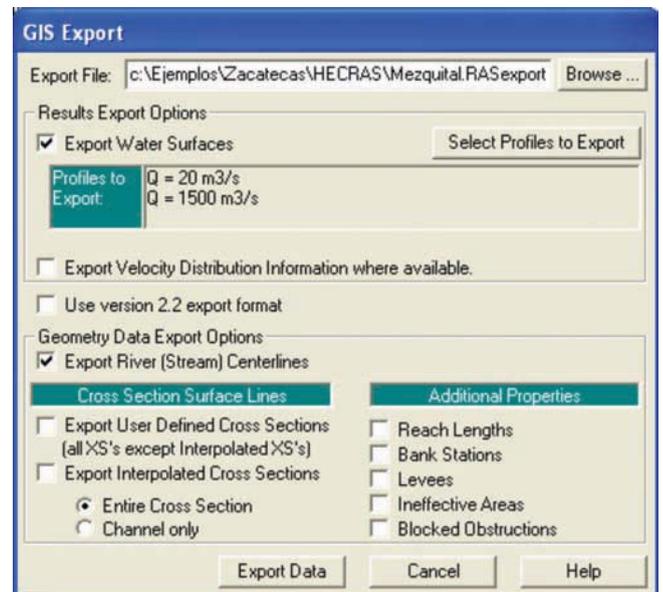


Figura 1.73 Ventana con las opciones para exportar los resultados de la simulación

NOTA: Es importante asegurarse que se hayan seleccionado los perfiles de interés, para ser exportados.

La información del archivo exportado de HecRAS hacia ArcGIS, será escrita en un archivo ***.RASExport.sdf**.

1.3.4 Mapas de inundación

Hec GeoRAS facilita la elaboración de mapas de inundación que muestran los límites de la zona de inundación y los tirantes de la misma, creados con los resultados de la simulación que se exporta desde *HecRAS*.

NOTA: Dado que *HecRAS* es un modelo de simulación unidimensional, los mapas de velocidades del flujo no pueden ser generados. Para ello se requiere el uso de modelos bidimensionales, como el *Mike Flood* (DHI, 2008), *Flo-2D* (Flo-2D, 2007) o el modelo *Flujo – áreas*, del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Fuentes, 1997).

Los comandos del submenú **RAS Mapping** traducen los archivos de resultados generados en *Hec RAS* y ayudan para que *ArcGIS* los reinterprete (Figura 1.74).

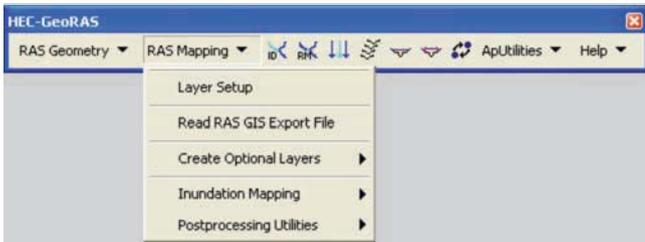


Figura 1.74 Opciones del submenú RAS Mapping

La elaboración de los mapas con los que se delimitan las zonas de inundación se lleva a cabo en cuatro etapas:

- Importación del resultado de la simulación
- Mapa de la zona de influencia
- Modelo tridimensional de la inundación
- Mapa de inundación

1.3.4.1 Importación del resultado de la simulación

El primer paso consiste en convertir el archivo ***.RASExport.sdf** (archivo de resultados de *HecRAS*) a formato **XML**.

Paso 1. En la barra de herramientas de *Hec GeoRAS* se selecciona el botón **Import RAS SDF File**. En seguida aparecerá la ventana mostrada en la Figura 1.75, donde se define el nombre y la ubicación del archivo convertido.

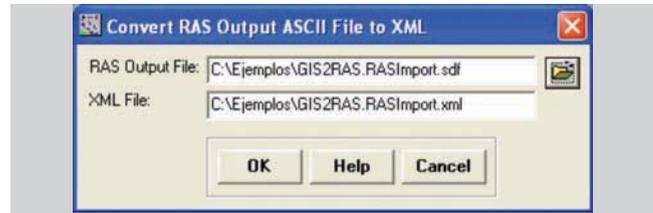


Figura 1.75 Ventana para convertir archivos SDF (de *HecRAS*) a formato XML

En la casilla **RAS output File** se especifica el archivo que contiene la información en formato *SDF* (el archivo exportado desde *HecRAS*), mientras que en la casilla **XML File**, se define automáticamente el nombre del archivo que resulte de la conversión (será el mismo y solamente cambiará su extensión, como se aprecia en la figura anterior). Después de ello, se presiona el botón **OK**.

Paso 2. Antes de procesar la información es necesario especificar el análisis que se va a realizar (un nuevo análisis, o bien, continuar con un análisis ya existente) a través de la opción **RAS Mapping | Layer Setup** (Figura 1.76).

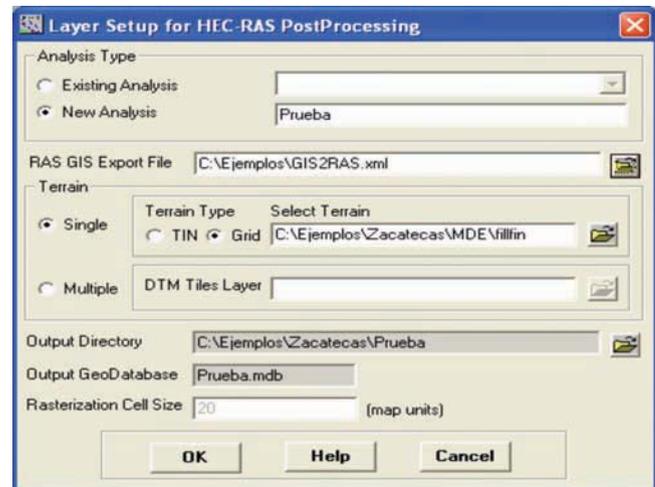


Figura 1.76 Ventana para especificar características del mapa de inundación

Analysis Type.

Define si es un proyecto ya existente, en cuyo caso selecciona el análisis indicado o, si se trata de uno nuevo, se especifica un nombre para identificarlo.

RAS GIS Export File. Especifica el archivo XML que contiene la información con la que se va a trabajar.

Terrain. Define el modelo digital con el que se trabajará para delimitar la zona de inundación.

Output Directory. Toma el nombre del proyecto, especificado arriba, y añade la ruta donde se guardará.

Output GeoDatabase. Se refiere al nombre de la base de datos en la que se guardarán todos los resultados del análisis. Toma el nombre especificado al inicio.

Rasterization Cell Size. Muestra el tamaño mínimo de las celdas usadas en los mapas.

Después de ingresar todos los datos requeridos, se oprime **OK**.

Adicionalmente, para una explicación detallada de cada una de las opciones que se muestran en la Figura 1.76 es recomendable consultar el manual de usuario de *Hec GeoRAS* (USACE, 2005).

Como resultado de lo anterior, el *Data Frame* (espacio de trabajo) en *ArcGIS* se minimiza y se crea uno nuevo con el nombre del análisis que se realiza y donde sólo se copia el *MDE* (Figura 1.77).

Paso 3. Después de crear el nuevo espacio de trabajo, lo siguiente es ingresar los resultados del análisis realizado en *HecRAS*. Para ello se usa la opción **RAS Mapping | Read RAS GIS Export File** (Figura 1.78). Las capas que se agregan son:

- La traza del río (o la red de drenaje). Con ella, se añade la información de los atributos de los ríos y los tramos.

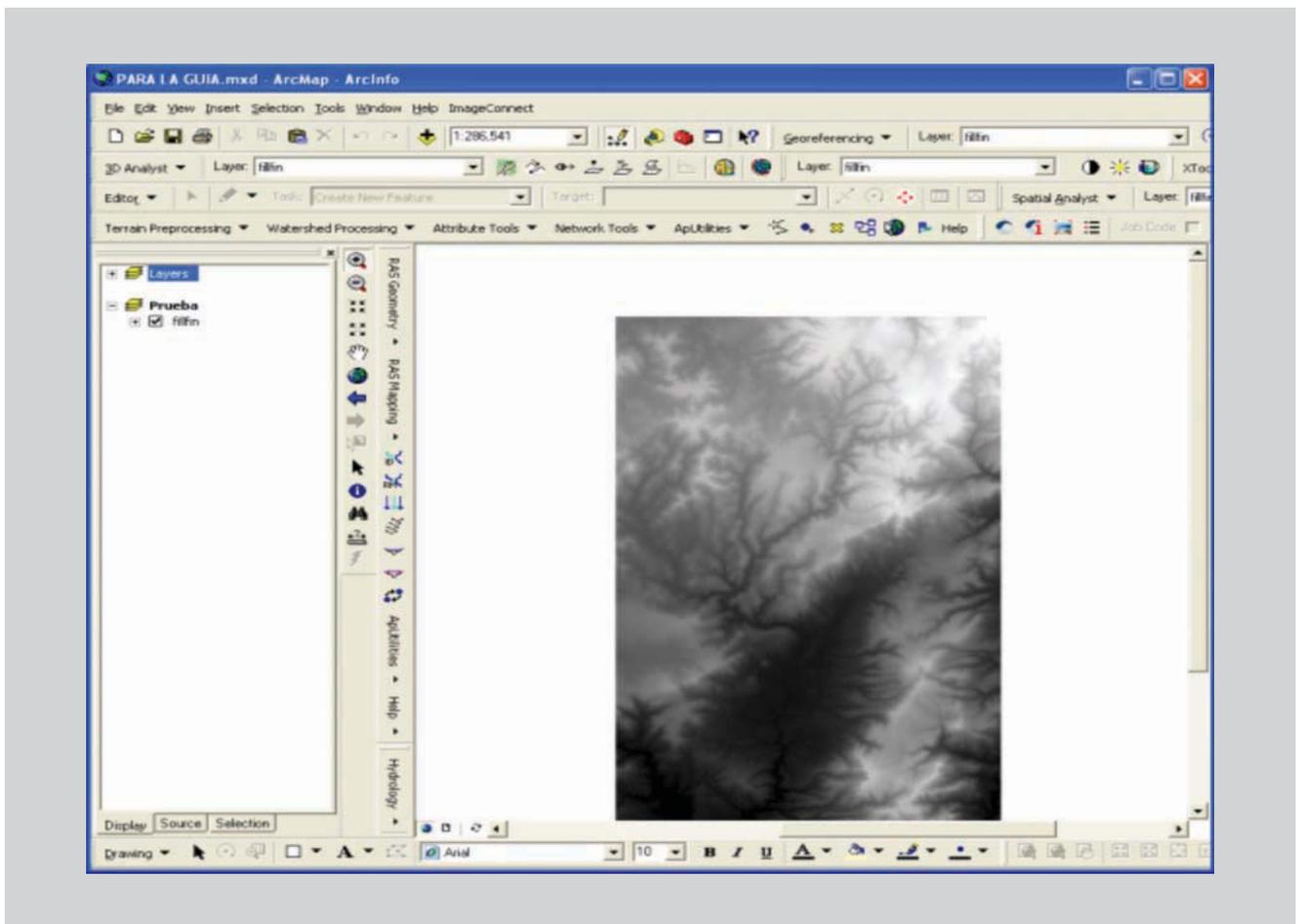


Figura 1.77 Nuevo Data Frame creado en ArcGIS

- Las secciones transversales. En esta capa se incluye, además de la localización de las secciones, la elevación que alcanza el agua en cada una de ellas, para cada gasto simulado.
- El polígono de la zona de inundación. En este caso, se incluye un polígono que representa la zona inundada para cada gasto simulado.

1.3.4.2 Mapas de inundación

Los mapas de inundación se elaboran tomando como base las elevaciones de la superficie del agua reportadas en la capa de secciones transversales y se delimitan con el polígono de la zona de inundación (ambas capas deben ser creadas antes de generar el mapa de inundación). Además, se requiere la topografía de la zona, ya que al usar el método de intersección de mallas se requiere que el *MDE* esté cargado en el proyecto.

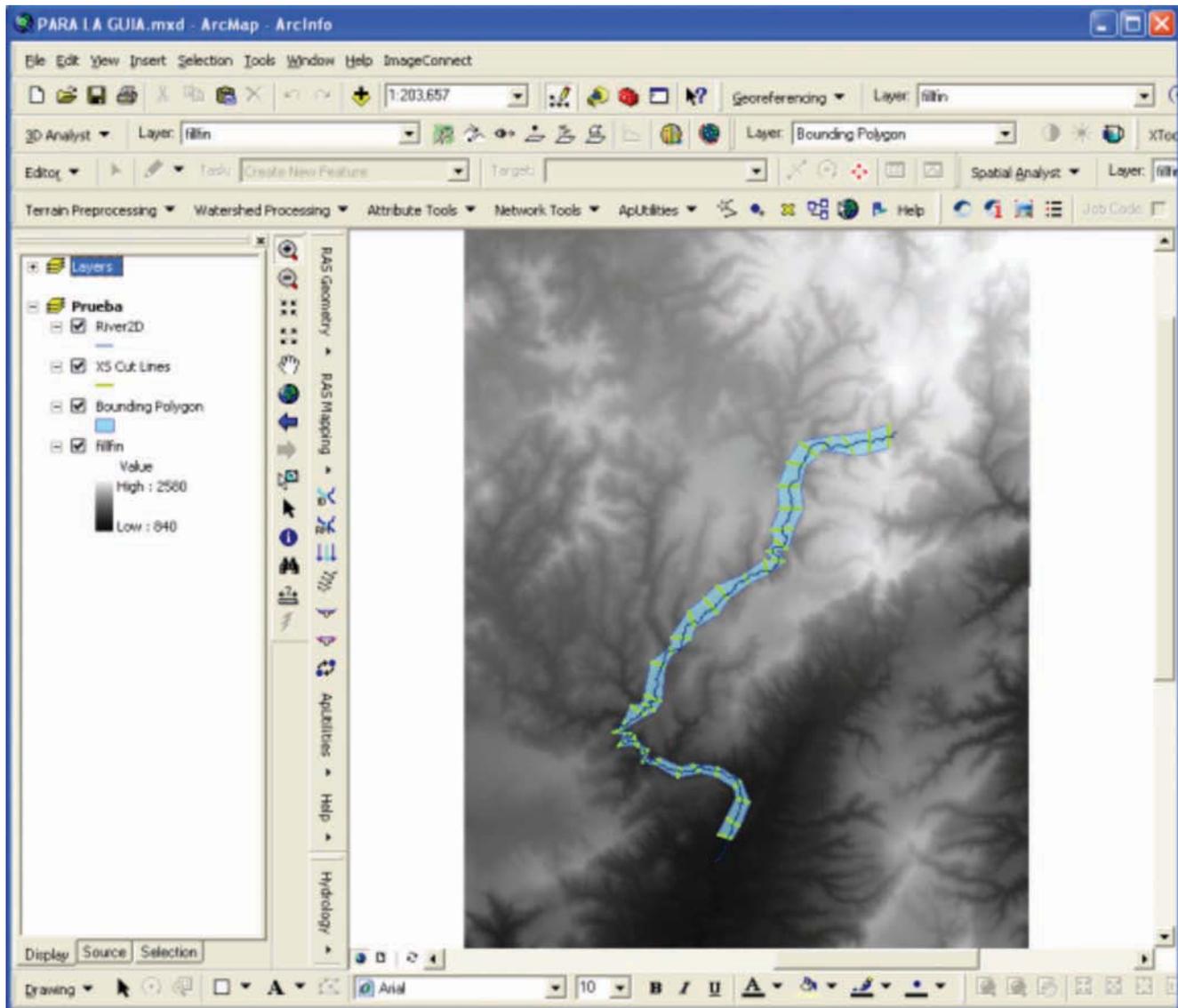


Figura 1.78 Lectura de los resultados exportados desde Hec RAS

A continuación se describen los pasos para crear un mapa de inundación.

Paso 1. Lo primero es crear un *TIN* de la elevación de la superficie del agua; esta información se extrae de la tabla de atributos de la capa de secciones transversales. Para ello se elige **RAS Mapping | Inundation Mapping | Water Surface Generation**, la ventana que se muestra en la Figura 1.79 permite seleccionar el gasto de interés.



Figura 1.79 Elección del gasto de interés para procesar

NOTA: TIN (del inglés Triangulated Irregular Network), es una malla de triángulos que describe la superficie del terreno.

De esa manera se creará un TIN de la superficie del agua para cada gasto, sin tomar en cuenta el MDT (Figura 1.80).

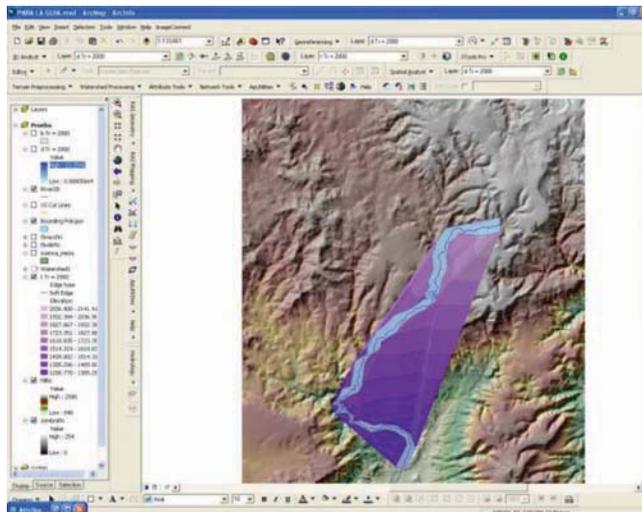


Figura 1.80 TIN de la superficie del agua

Paso 2. La delimitación de la planicie de inundación se realiza con la opción **RAS Mapping | Inundation Mapping | Floodplain Delineation | Gris Intersection**. Para delimitar la inundación, así como las profundidades de la misma, este comando usa la superficie del agua calculada y el MDT de la zona en estudio.

Después de seleccionar el comando anterior, se muestra una ventana en la que se elige el gasto para el cual se definirá la planicie de inundación (Figura 1.81).

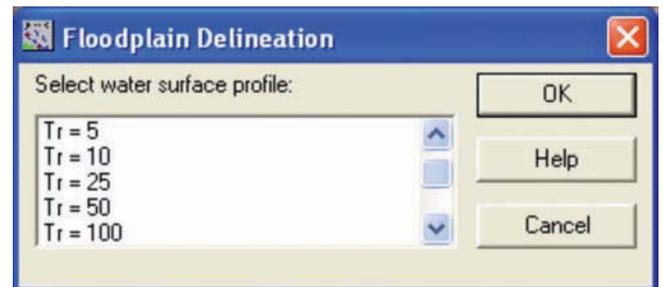


Figura 1.81 Elección del gasto para el que se delimita la planicie de inundación

Después de seleccionar el gasto, el programa genera un par de capas:

- La zona inundada. Es un archivo con polígonos que delimita las zonas afectadas por el gasto analizado (Figura 1.82). El programa lo nombra automáticamente $b Q = X m^3/s$, donde X es el valor del caudal correspondiente para esa simulación.

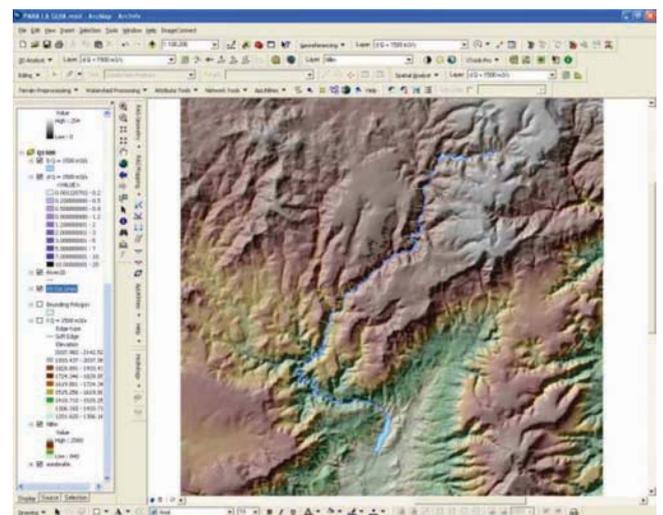


Figura 1.82 Delimitación de la planicie de inundación

- TIN de la inundación. Contiene la profundidad de la inundación en toda la zona afectada (Figura 1.83). El programa lo nombra automáticamente $dQ = X m^3/s$, donde X es el valor del caudal correspondiente para esa simulación.

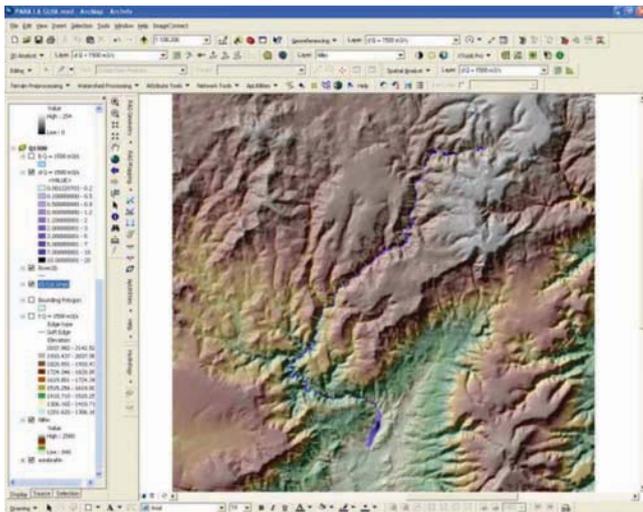


Figura 1.83 TIN con las profundidades del agua en toda la planicie de inundación

Paso 3. Finalmente, para tener un marco de referencia de la magnitud de la inundación conviene integrar en el mapa toda la información del lugar que esté disponible (Figuras 1.84 y 1.85).

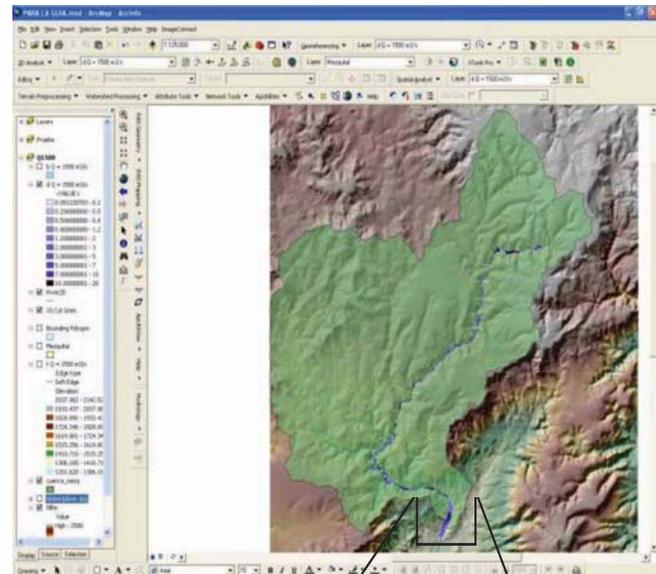


Figura 1.84 Mapa que muestra la planicie de inundación del río Mezquital, Zacatecas

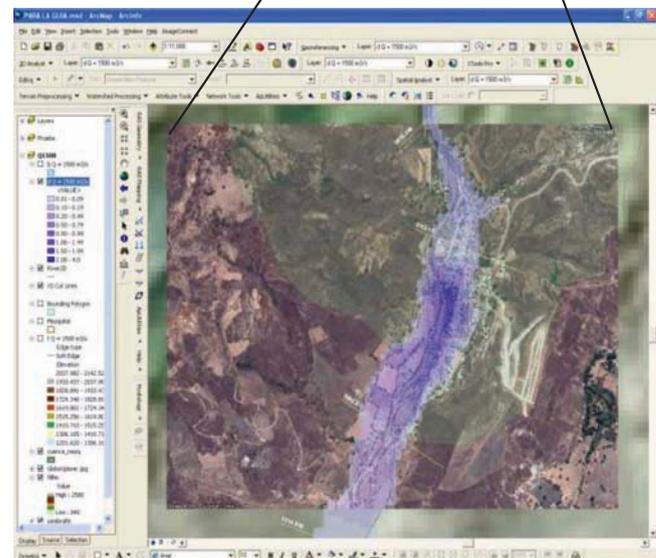


Figura 1.85 Detalle de la planicie de inundación en la comunidad de Mezquital del Oro, Zacatecas

Hasta aquí se termina la delimitación de la planicie de inundación para un escenario determinado. El mismo procedimiento se realiza para cada gasto que se desee analizar, con lo cual se estarán analizando diferentes escenarios de inundación.

El siguiente paso es definir la vulnerabilidad de la localidad en cuestión, ante inundaciones.