



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela De Caminos, Canales y Puertos**

**Ingeniero Técnico De Obras Públicas S.P Hidrología**



UNIDAD DEPARTAMENTAL DE INGENIERIA CIVIL  
PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANALISIS Y EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CUENCAS  
MEDITERRANEAS**

**APLICACIÓN A LA RAMBLA DEL ALBUJÓN (CARTAGENA)**

ANALIZE AND EVALUATIÓN OF SEDIMENTS TRANSPORT IN MEDITERRANEANS BASHIS.

APLICATION ALBUJÓN GULLI (CARTAGENA)

Realizado por: **Don Raúl García García**

Dirigido por:

**D. LUÍS G. CASTILLO ELSITDIÉ**  
Doctor Ingeniero de Caminos, C.y P.

**D. MANUEL ALCARAZ APARICIO**  
Ingeniero de Minas

---

***“Las ramblas nos hacen soñar por unos instantes, como serian nuestras tierras murcianas abrazadas por cientos de ríos”***

***(Raúl García García)***

***“Al rio que todo lo arranca lo llaman violento, pero nadie llama violento al cauce que lo oprime”***

***(Bertolt Brecht)***

---

---

## Agradecimientos

A mis padres, por su constante ayuda e incasable apoyo.

A mis hermanos, José Mariano, Pedro Germán y Lucia, porque hoy no sería lo que soy sin cada uno de ellos, sin su aliento y sabios consejos.

A mi sobrina Jimena, por ser un nuevo sol en mi vida.

A mi profesor Don Luis G. Castillo, por saber guiarme con maestría en la elaboración de este proyecto fin de carrera, y por alentarme durante mi paso por esta escuela a buscarla única verdad de las cosas.

A mis amigos, en especial a José Manuel Giraldez, José Moreno y Jerónimo Vivancos, por apoyarme y compartir los malos momentos, saber estar a la par en los buenos, y entender cuando tienen que quitarme escombros y cuando arrimarme material.

---

---

# Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos .....	3
3. Resumen .....	4
3.1. Balance de sedimentaciones y socavaciones.....	7
3.2. Transporte de sedimentos acumulados.....	8
3.3. Variaciones del Talweg original.....	9
3.4. Caudal líquido Vs caudal sólido.....	14
4. Fundamentos básicos.....	15
4.1. HEC-RAS.....	15
4.1.1. Descripción.....	15
4.1.2. Limitaciones de Hec-Ras.....	15
4.1.3. Conceptos teóricos.....	16
4.1.3.1. Ley de conservación de la energía.....	16
4.1.3.2. Ecuación del Momento.....	18
4.1.4. Métodos de cálculo para el transporte de sedimentos.....	23
4.1.4.1. Ecuaciones para el cálculo básico de secciones.....	23
4.1.4.2. Flujo Quasi-no permanente.....	25
4.1.4.3. Continuidad de sedimento.....	26
4.1.5. Procesos de erosión, transporte y sedimentación .....	28
4.1.6. Métodos de cálculo. Funciones de transporte de sedimentos.....	29
4.1.6.1. Función de transporte Ackers & White.....	30
4.1.6.2. Función de transporte England & Hansen.....	33
4.1.6.3. Función de transporte Laursen .....	34
4.1.6.4. Función de transporte Meyer – Peter & Müller.....	38
4.1.6.5. Función de transporte Toffaleti.....	40
4.1.6.6. Función de transporte Yang.....	41
4.1.6.7. Función de transporte Wilcock.....	44
4.1.7. Métodos de cálculo. Funciones de velocidad de caída.....	45
4.1.7.1. Van Rijn.....	46
4.1.7.2. Toffaleti.....	46
4.1.7.3. Rubey.....	48
4.1.8. Definición de variables transporte de sedimentos Hec-Ras.....	49
4.2. Hec-GeoRas.....	53
4.2.1. Descripción.....	53
4.3. Sistemas de información geográfica (SIG).....	53
4.3.1. Definición de un SIG.....	53
4.3.2. Funciones de un SIG.....	54
4.3.3. Elementos de un SIG, ArcGis.....	55
4.4. Modelo digital del terreno (MDT).....	57

---

4.4.1. Concepto y origen de los MDT.....	58
4.4.2. Estructura de los datos en los MDT.....	59
4.4.3. Obtención de datos en la edición de un MDT.....	60
4.4.3.1. Comparativa de un MDT.....	61
5. Metodología de estudio.....	63
5.1. Introducción.....	63
5.2. Sistemas de información geográfica.....	64
5.2.1. Extensión Hec-GeoRas.....	64
5.2.1.1. Creación de un archivo ArcMap.....	65
5.2.1.2. Añadir ó crear un MDT.....	67
5.2.1.3. Crear capas de información.....	70
5.2.1.3.1. Delimitación del Talweg.....	71
5.2.1.3.2. Orillas del cauce principal.....	73
5.2.1.3.3. Trayectorias de flujo.....	73
5.2.1.3.4. Líneas de corte transversal.....	75
5.2.1.3.5. Puentes/Alcantarillas.....	78
5.2.1.3.6. Usos del suelo.....	80
5.2.2. Generar archivo Ras.....	83
5.3. Ras.....	84
5.3.1. Interfaz.....	84
5.3.2. Archivo geométrico.....	85
5.3.2.1. Secciones transversales.....	85
5.3.2.1.1. Interpolación de secciones transversales.....	87
5.3.2.2. Puentes y alcantarillas.....	88
5.3.2.2.1. Tablero.....	89
5.3.2.2.2. Pilares.....	90
5.3.2.2.3. Áreas de flujo ineficaz.....	90
5.3.2.3. Importar datos geométricos.....	91
5.3.3. Análisis transporte de sedimentos.....	94
5.3.3.1. Archivo de sedimentos.....	94
5.3.3.1.1. Condiciones iniciales y parámetros de transporte.....	95
5.3.3.1.2. Condiciones de contorno.....	98
5.3.4. Flujo Quasi-no permanente.....	103
5.3.5. Plan de análisis de sedimentos.....	108
5.4. Exportar resultados.....	111
5.5. Post-Ras.....	112
5.5.1. Pos procesamiento.....	112
5.5.2. Nuevas capas de información para los resultados Ras.....	113
6. Análisis.....	115
6.1. Antecedentes.....	115
6.2. Justificación del estudio.....	116
6.2.1. Descripción general de la rambla.....	116
6.2.2. Granulometría.....	121
6.2.2.1. Visita de campo.....	122
6.2.3. Delimitación de la zona de estudio.....	123

---

6.2.3.1. La desembocadura.....	124
6.3. Análisis de resultados.....	129
6.3.1. Análisis de la evolución del Talweg.....	130
6.3.1.1. Análisis de resultados.....	131
6.3.1.1.1. Balance de socavaciones y sedimentaciones. Variación absoluta del Talweg.....	131
6.3.1.1.1.1. Comparación del balance de socavaciones y sedimentaciones.....	145
6.3.2. Análisis del transporte de sedimentos.....	148
6.3.3. Caudal líquido Vs Caudal sólido.....	154
7. Conclusiones.....	156
8. Bibliografía.....	159
9. Anejos	

# 1

## Introducción

Las primeras civilizaciones sedentarias, por la imposibilidad de transportar a grandes distancias el agua necesaria para sobrevivir, emplazaron sus asentamientos junto a grandes ríos, cuyas crecidas y carestías ocasionaban gran impacto en la supervivencia de aquellos asentamientos. El ser humano fascinado por la multitud y magnitud de los fenómenos ocasionados por el río, comenzó su andadura en la búsqueda del conocimiento que de una forma racional explicara aquellos fenómenos, con el fin de poder anticiparse y controlarlos en su beneficio. Se inicia así una nueva disciplina científica, la ingeniería fluvial, y que comprende no solo el estudio del propio río, sino también las interacciones de este con los seres vivos que comparten el hábitat fluvial y con el hombre.

La ingeniería fluvial, comienza su expansión en el siglo XVI, de la mano de grandes pensadores como Galileo Galilei (1564-1642) ó su discípulo Castelli (1577-1644), pero la gran revolución de esta disciplina no comenzará hasta la contribución de Antoine de Chézy (1718-1798), con su conocida formula que relaciona la velocidad en el cauce, con la pendiente y el radio hidráulico, Y Dubuat (1734-1809), quien con la publicación en 1786 del libro “Principios de hidráulica” inicia la hidráulica fluvial como disciplina moderna.

Es ya a finales del siglo XIX, y primer tercio del siglo XX, donde científicos como Manning, Reynolds, Strickler, etc., avanzan en las técnicas experimentales que arrojan un mayor conocimiento en la hidráulica fluvial, pero no es hasta el segundo tercio del siglo XX, donde autores como Meyer-Peter, Shields, Einstein, etc., junto con ordenadores más potentes y programas más elaborados, los que nos han permitido obtener un mayor conocimiento, sobre los fenómenos y efectos producidos, entre el fluido y el cauce que lo contiene.

Dichos conocimientos también son aplicables a las ramblas, que aunque su diferencia esencial con un río, es la ausencia de agua durante gran parte del año, la realidad puede simplificarse a un determinado caudal que logra interaccionar con el cauce que lo contiene. Los problemas derivados del cambio climático, han centrado en los últimos tiempos la mirada sobre este tipo de cauce estacional, que ahora tiene que gestionar un menor número de avenidas, pero en contra de una mayor intensidad en

caudales y velocidades, ocasionando nuevos problemas que van desde un mayor arrastre de sedimentos en el propio cauce, hasta la interacción mas violenta con las poblaciones colindantes, ocasionado cuantiosas pérdidas materiales y humanas.

En la actualidad, una de las herramientas más utilizadas en la gestión de ríos y ramblas, es el programa Hec-Ras, y su reciente extensión transporte de sedimentos, permitiendo de una forma sencilla y rápida, el poder modelizar nuestro río ó rambla de estudio, logrando aportar información valiosa en los procesos de toma de decisiones, en el ámbito de la planeación y administración del territorio.

En la misma dinámica resolutive, los Sistemas de Información Geográfica (Geographic Information System), los programas y procedimientos diseñados para soportar la captura, almacenaje, manipulación, análisis y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente, han demostrado ser una herramienta muy útil, facilitando la labor científica y la consecución de conclusiones más próximas a la realidad.

En los próximos capítulos se describe la realización de un estudio hidráulico, y como los sistemas de información geográfica han ayudado a lograr un mejor conocimiento geográfico de la zona de estudio, permitiendo una modelización de la rambla real, que ha influido en la bondad de los datos logrados, así como la utilización del programa Hec-Ras y su reciente extensión arrastre de sedimentos, ampliando nuestro conocimiento sobre los procesos de socavación, transporte y sedimentación, en la Rambla del Albuñón.

# 2

## Objetivos

Los objetivos del presente proyecto son:

1. Indicar los conocimientos básicos necesarios en la ejecución de un estudio hidráulico, desde la aplicación de las virtudes que se derivan en el empleo de los sistemas de información geográfica, hasta el uso del programa Hec-Ras, incidiendo de manera notoria en la incorporación de su extensión transporte de sedimentos.
2. Analizar los procesos de erosión, transporte y sedimentación, que se producen en el entorno de la Rambla del Albuñón, emplazada entre los límites de los términos municipales de Cartagena, Fuente Álamo, Torre Pacheco, Los Alcázares y Murcia, en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, en función de su granulometría, geometría de lecho e hidrogramas, en nuestra zona de estudio, para cada uno de los periodos de retorno (1,4 años, 10 años, 100 años y 500 años).

Para lograr satisfactoriamente dichos objetivos, será preciso establecer una metodología efectiva, capaz de describir con éxito los diferentes procesos en el manejo de los distintos programas utilizados, así como sus peculiaridades, y analizar la respuesta de la solera (erosión y sedimentación) ante diferentes avenidas.

# 3

## Resumen

Este Proyecto Fin de Carrera (PFC) es una continuación del proyecto fin de carrera *“El estudio hidráulico de cuencas mediterráneas mediante sistemas de información geográfica y modelos de flujo unidimensional” Salvador (2010) Universidad Politécnica de Cartagena*, aplicada a la Rambla del Albuñón, del cual se extraen diferentes formas de respuesta aproximada de cuál es el comportamiento de la rambla y de sus llanuras colindantes ante la presencia de diferentes caudales.

Este Proyecto Fin de Carrera, amplía la información de los procesos que tienen lugar durante el movimiento del flujo en el seno de un cauce natural, como son los procesos de erosión, transporte y sedimentación, para lo que se debe definir una adecuada morfología de cauce, una correcta granulometría, en cada avenida en los distintos periodos de retorno, esto permitirá obtener unos valores, próximos a una realidad que se sabe tridimensional, donde la aplicación de programas unidimensionales como Hec-Ras, ya empiezan a suponer una desventaja en la modelación de los fenómenos que intervienen en el movimiento de un fluido.

La Rambla del Albuñón, sirve como escenario para la realización de la simulación de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, concretamente en sus últimos 11 km, desde la línea de ferrocarril correspondiente al ramal del levante, hasta la desembocadura en el Mar Menor, junto al municipio de Los Alcázares, como indica la figura 3.1, por ser esta una zona conflictiva donde los intereses humanos están enfrentados con la voluntad imparable, de un flujo que sin desearlo ya nace turbulento, logrando en ocasiones sobrepasar los límites de su cauce, e interactuar negativamente con los municipios colindantes.



Figura 3.1. Zona de estudio. Orto imagen NATMUR-08 (Agosto 2008)

En la Figura 3.2 se muestra el resultado obtenido para el caudal interanual de 5168 m<sup>3</sup>/s y periodo de retorno 500 años, obtenido para la ecuación de Meyer-Peter & Müller.

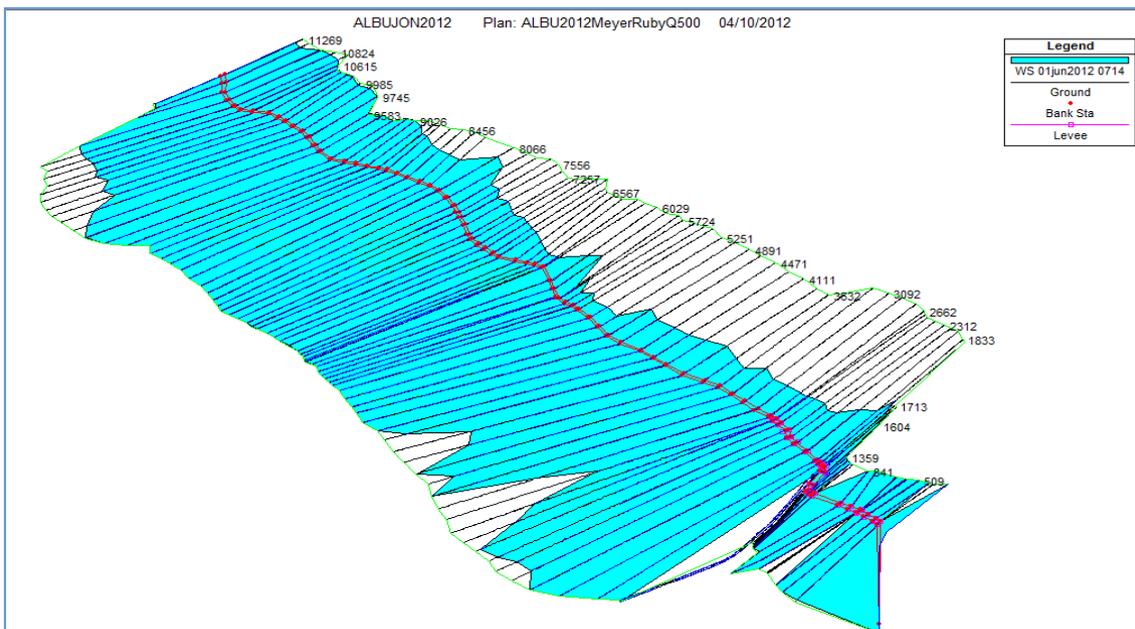


Figura 3.2 Representación Tridimensional de la zona estudiada. Periodo de retorno 500 años

El objetivo de este proyecto fin de carrera, es el de analizar para diferentes formulaciones de arrastre de sedimentos, la evolución de la solera del cauce, en los últimos 11 km, teniendo en cuenta las progresiones de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, que para diferentes periodos de retorno, la avenida de diseño es capaz de ocasionar; y posteriormente elegir entre las siguientes ecuaciones, la que mejor se adapte a las peculiaridades de la Rambla del Albuñón:

- Ackers & White (1973)
- Engelund & Hansen (1967)
- Laursen (1968,1989)
- Meyer, Peter & Müller (1948)
- Toffaleti (1968)
- Yang (1973,1984)
- Wilcock (2001)

***(Información consultada en el manual: U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2010)).***

El análisis tiene lugar para la situación actual, realizándose en tramo único, como consecuencia de la conclusión extraída del proyecto fin de carrera realizado por Salvador (2010), que entre sus conclusiones cita, que las diferencias obtenidas al realizar el análisis por tramos o realizarlo en un tramo único, se encuentra en el entorno del 1%.

El presente análisis, evalúa el comportamiento de los procesos de socavación, transporte y sedimentación, en los últimos 11 km en la Rambla del Albuñón, sin considerar en la última sección aguas arriba de la zona de estudio, la incorporación de material procedente de la interacción de los diferentes caudales con el resto de la cuenca.

Realizado el análisis comparativo de cada una de las ecuaciones, se puede observar que la ecuación de Meyer Peter & Müller, es la formulación que produce resultados más próximos a los valores medios, en el transporte de sedimentos, comparada con el resto de formulaciones, para cada uno de los periodo de retorno seleccionados. Hay que destacar que la ecuación de Meyer Peter & Müller, es una ecuación de carga de fondo, pero no obstante, en la mayoría de ocasiones es capaz de superar los resultados obtenidos con otras formulaciones de carga total.

A continuación se muestra el balance de socavaciones y sedimentaciones, la variación de altura del Talweg, el transporte acumulado de sedimentos, y la curva de caudales, en los distintos periodos de retorno, para la formulación de Meyer Peter & Müller, y cuya información será más extendida en el capítulo 6 Análisis.

## Meyer Peter & Müller:

### 3.1. Balance de socavaciones y sedimentaciones

Respecto al Balance de socavaciones y sedimentaciones, hay que destacar que el programa Hec-Ras, asigna para las variaciones de la solera del canal, el signo positivo a las sedimentaciones, y negativo a las socavaciones. Para detectar cual es el carácter de la rambla, es decir, si predominan las socavaciones o por el contrario las sedimentaciones, basta enfrentar todos los movimientos verticales acumulados de las masas de sedimento, producidos en la solera durante los 4 días de duración del hidrograma, para cada una de las secciones, obteniendo al final un valor positivo ó negativo, que destaca el predominio en el tramo, de sedimentaciones o socavaciones respectivamente, y así su carácter sedimentario ó erosivo.

Para la formulación de Meyer Peter & Müller, se destaca su progresivo carácter erosivo en cada uno de los periodos de retorno, cuyos incrementos son cuantificados a continuación:

El incremento entre el periodo de retorno de 1.4 y 10 años se cuantifica en un 35.67%, el incremento entre el periodo de 10 y 100 años se cuantifica en 51.97%, y el incremento entre el periodo de 100 y 500 años se cuantifica en 12.36%, obteniendo un incremento medio de 37.99%.

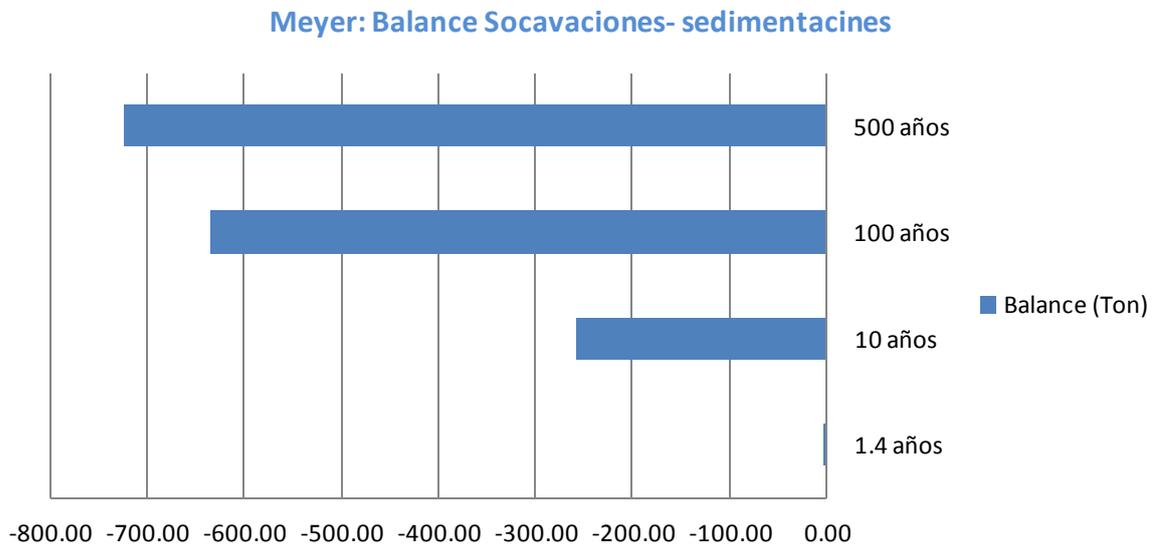


Figura 3.3. Meyer Peter & Müller: Balance de socavaciones y sedimentaciones

### 3.2. Transporte de sedimentos acumulados

Respecto al transporte de sedimentos acumulados, Hec-Ras determina para cada sección, que masa o volumen de sedimento acumulado durante la duración del hidrograma, es transportado a la salida en cada una de las secciones, siendo este el aporte de material para la sección inmediata aguas abajo, así, si analizamos el transporte acumulado, durante los días de duración de cada uno de los hidrogramas en la última sección, es decir, en la desembocadura, donde el sedimento es transportado hasta el mar, podemos obtener la masa o volumen de sedimentos que son aportados por la Rambla del Albuñón al Mar Menor.

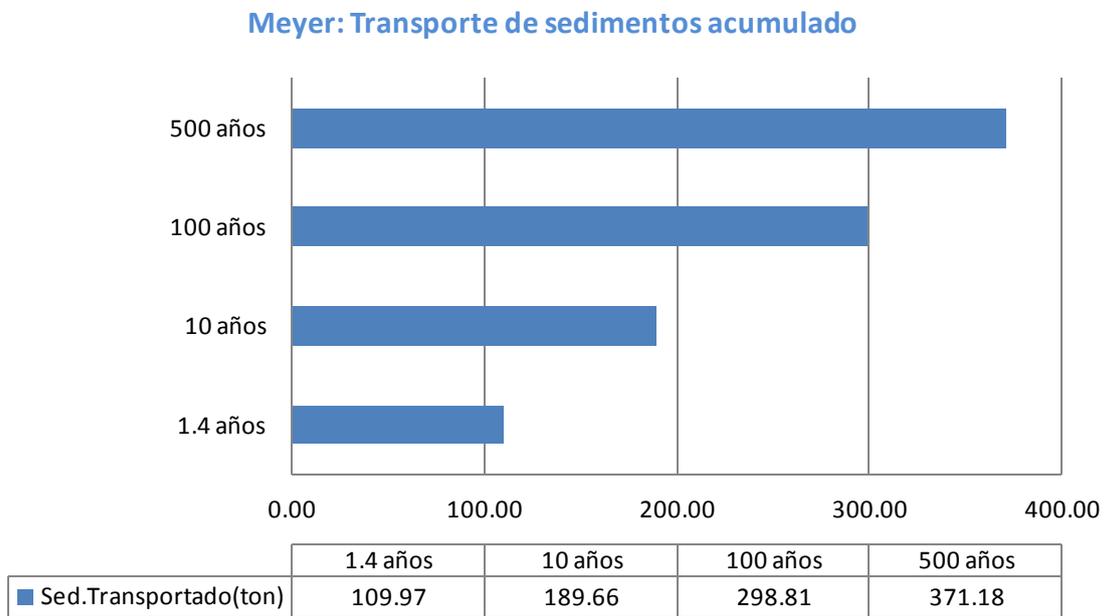


Figura 3.4. Meyer Peter & Müller: Transporte de sedimentos

### 3.3. Variaciones del Talweg original

Respecto a la variación del Talweg, los datos representados corresponden a las variaciones en altura, sufridas tras la finalización del hidrograma correspondiente a cada periodo. En cuanto a la representación en términos absolutos, de la variación del Talweg original, la cota 0 representa la solera original; también hay que tener en cuenta como son obtenidas las representaciones de los procesos de socavación y sedimentación:

- $A - C = \text{Valor } (+)$  → Sedimentación
- $B - C = \text{Valor } (-)$  → Socavación

Donde A, C y B representan valores de cota.  $A > C > B$

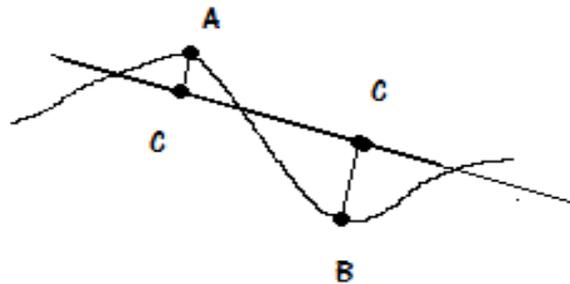


Figura 3.5. Erosión - Sedimentación

Respecto a la graficación de la variación del Talweg original, todas las variaciones se encuentran mayoradas, para que de una forma sencilla y rápida puedan ser localizadas, dentro del tramo correspondiente a la zona de estudio, en cada una de las secciones.

A continuación se representan las variaciones producidas en el talweg, ocasionadas por la formulación de Meyer Peter & Müller, para cada uno de los periodos de retorno.

## PERIODO 1.4 AÑOS

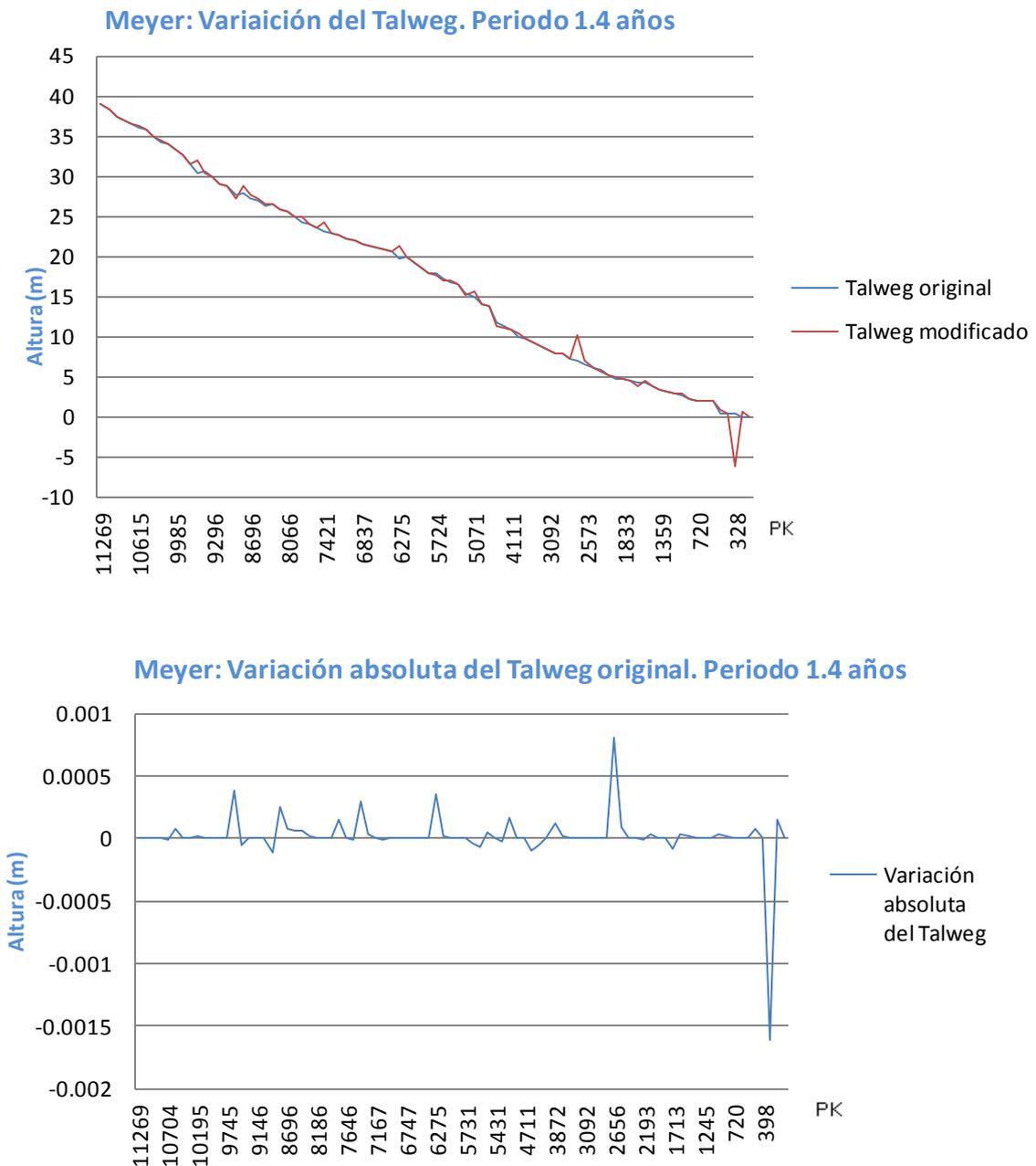


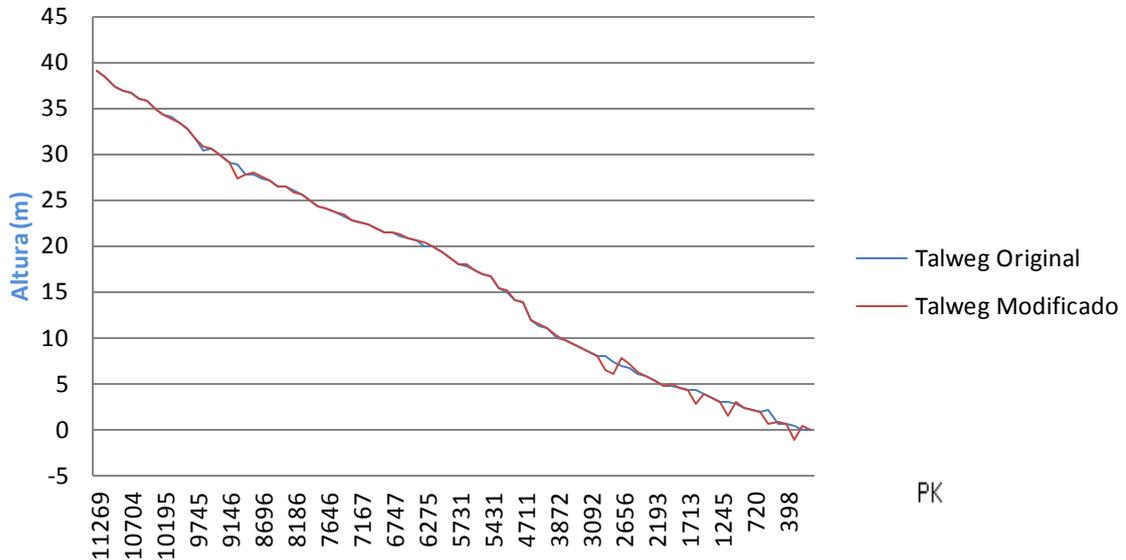
Figura 3.6. Resultados obtenidos para Meyer Peter & Müller. Periodo 1.4 años

### COMENTARIO:

Se destacan para este periodo, que si su carácter es erosivo, es claramente ocasionado por las últimas y más potentes erosiones, pues en todo el tramo de estudio, se producen un mayor número de sedimentaciones. Se destaca una actividad más extrema en las últimas secciones.

## PERIODO 10 AÑOS

**Variación del Talweg. Periodo 10 años**



**Meyer: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años**

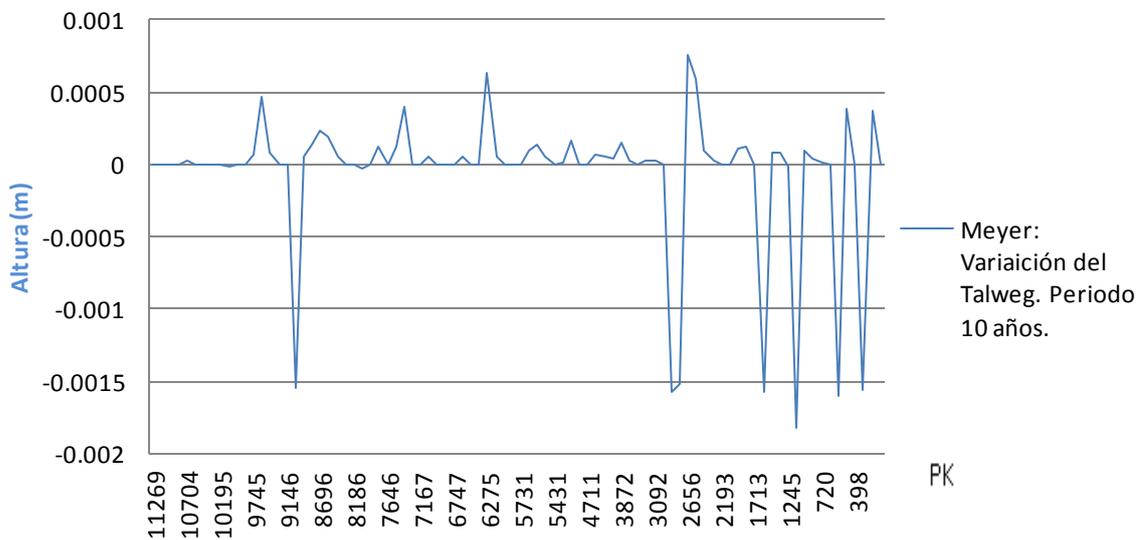


Figura 3.7. Resultados obtenidos para Meyer Peter & Müller. Periodo 10 años

**COMENTARIO:**

Coincidiendo con el balance de socavaciones y sedimentaciones, se observa una mayor actividad erosiva, sobre todo concentrada en los últimos 4 km, cuyo mayor valor es alcanzado en la sección PK 1200, con un valor de  $-0.0018$  m, mientras la mayor de las sedimentaciones es obtenida en el PK 2573, con una elevación de  $0.00059$  m.

## PERIODO 100 AÑOS

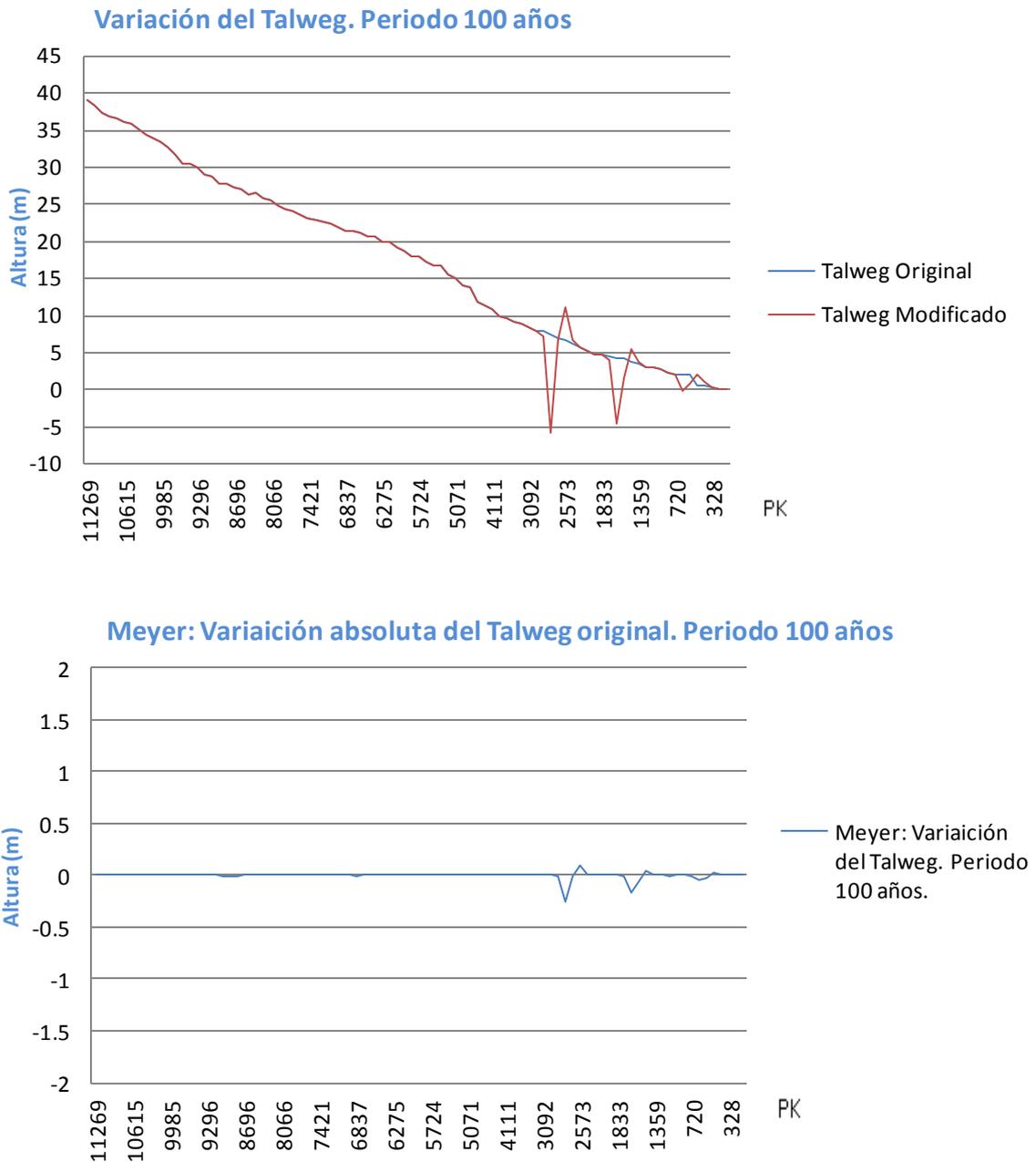


Figura 3.8. Resultados obtenidos para Meyer Peter & Müller. Periodo 100 años

### COMENTARIO:

Incluso estando mayoradas, son de tan escasa magnitud las variaciones sufridas en la parte alta, que no llegan a ser representadas. Observamos sedimentaciones y erosiones que son mantenidas a lo largo de varias secciones, para el tramo más bajo de la rambla.

## PERIODO 500 AÑOS

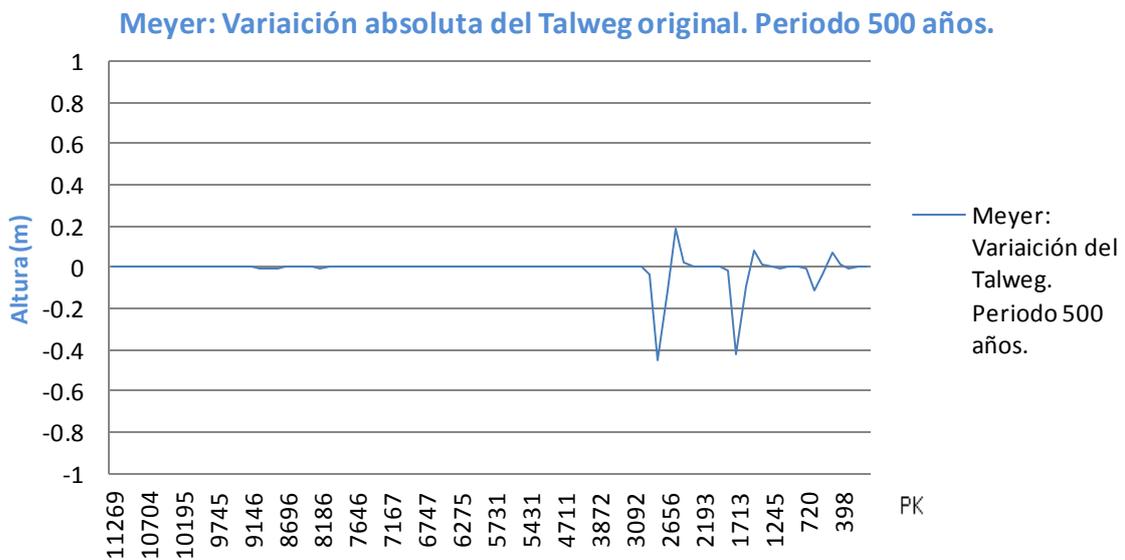
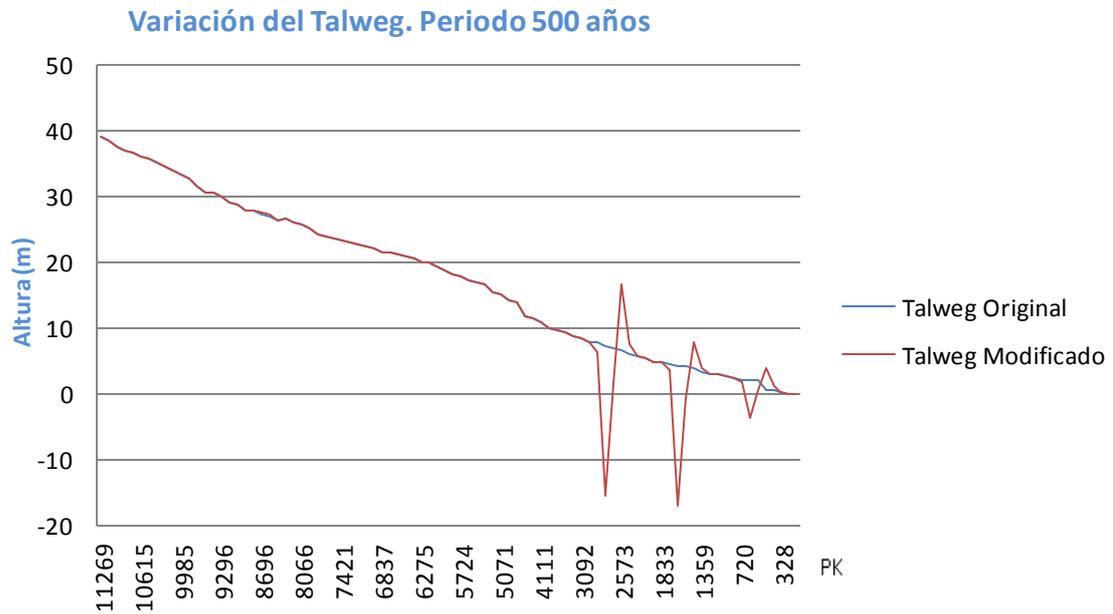


Figura 3.9. Resultados obtenidos para Meyer Peter & Müller. Periodo 500 años

**COMENTARIO:**

Al igual que para el anterior periodo, Continúa la tendencia erosiva aproximadamente en las mismas secciones, alcanzando la mayor erosión en el PK 2662, con una profundidad de -0,44 m, y la mayor sedimentación en el PK 2573, con una elevación de 0.19m.

### 3.4. Caudal líquido VS Caudal solido

En cuanto a la curva de caudales, observamos que la formulación de Meyer Peter & Müller, describe valores muy próximos a los valores medios, lo que significa que aun siendo una formulación de carga de fondo, los volúmenes por unidad de tiempo se aproximan mejor a los valores medios, que el resto de ecuaciones de carga total con las que se compara.

Destacar que en la siguiente figura 3.10, las formulaciones de Engelund, Yang y Toffaleti no son representadas, debido a que Engelund es una formulación propia de sistemas arenosos, y Yang y Toffaleti, describen progresiones muy subestimadas en la curva de caudales, y cuya información será ampliada en el capítulo 6 Análisis.

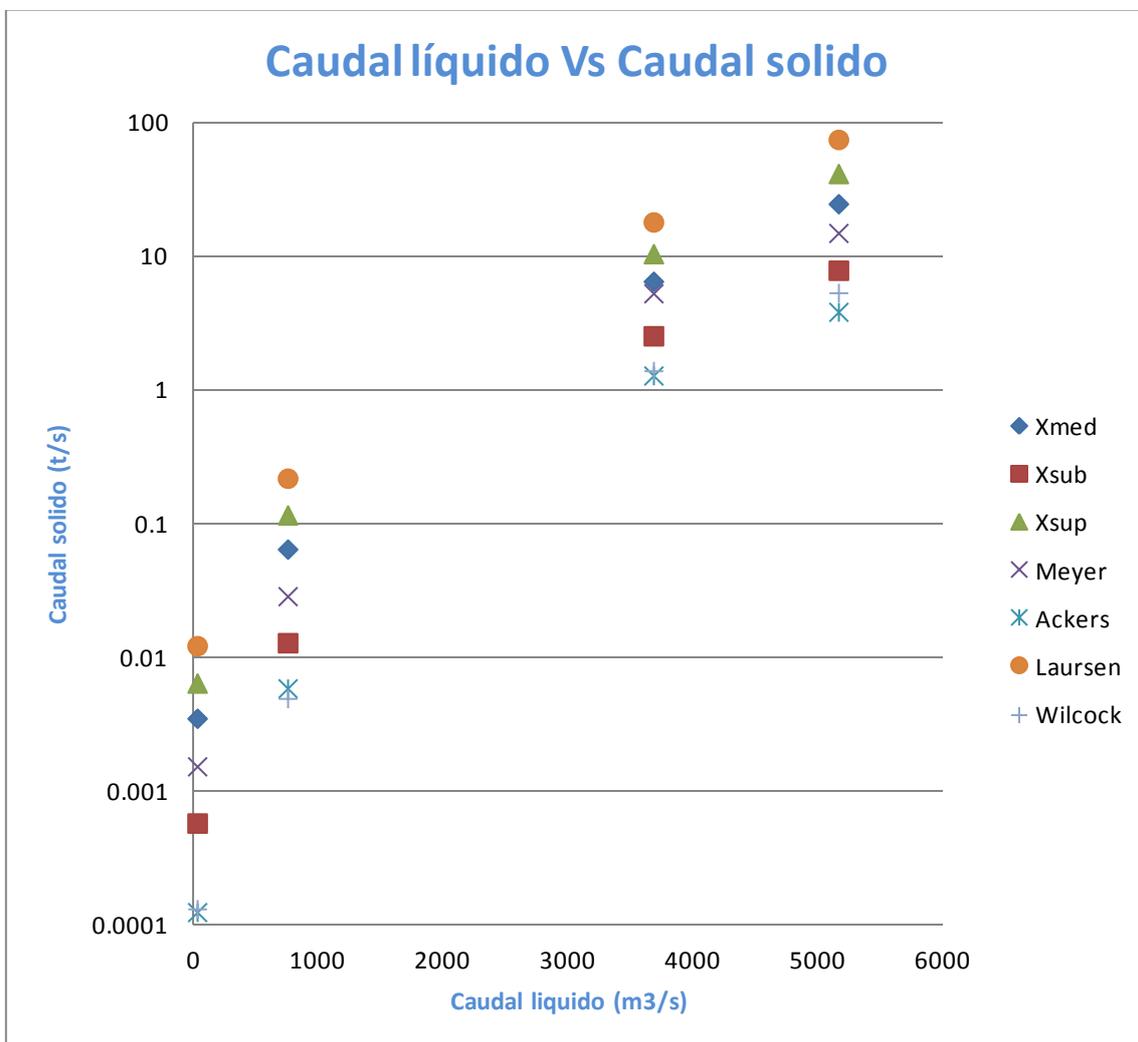


Figura 3.10. Curva de caudales: Caudal líquido Vs causal solido.

# 4

## Fundamentos Básicos

A lo largo de este capítulo, se mostrarán los principios físicos básicos fundamentales más relevantes, en los que se basa el funcionamiento interno de los diferentes programas empleados, (ArcGis, modelos digitales del terreno (MDT), Hec-GeoRAS y Hec-Ras), en la gestión de los datos y modelización de los diferentes escenarios.

### 4.1 HEC-RAS

#### 4.1.1. Descripción

HEC-RAS (Hidrológica Engineering Center's River Analysis System), es un programa de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido HEC-2, con varias mejoras respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con los Sistemas de Información Geográfica mediante la extensión HEC-GeoRAS.

El principal objetivo del programa HEC-RAS, es el de calcular la elevación de la superficie de la lámina de agua para un caudal y condiciones de flujo dadas, (flujo permanente o estacionario), aunque HEC-RAS también puede ser empleado para movimientos transitorios, (no permanentes) unidimensionales, y recientemente para el cálculo del transporte de sedimentos, cuyo estudio nos ocupa.

#### 4.1.2. Limitaciones de Hec-Ras

El empleo de Hec-Ras, para la resolución de problemas hidráulicos, conlleva la responsabilidad de conocer las limitaciones en el marco de su aplicación. Hay que entender que una solución calculada a través de Hec-Ras no es una única solución real, sino muestra un posible resultado. En este instante intervienen con fuerza los conocimientos hidráulicos del usuario para lograr una correcta interpretación de los resultados.

En la aplicación de Hec-Ras podemos encontrar las siguientes limitaciones más relevantes:

- La ecuación de la energía, supone siempre distribución hidrostática de presiones. Entonces la solución es una simplificación, y será adecuada cuando la distribución de presiones se aleje mucho de la hidrostática.
- Hec-Ras no es un modelo 3D ni 2D, si no que es un modelo unidimensional, por lo que la posible solución es una aproximación a la real.
- Solo se pueden modelar cauces con pendientes menores de  $10^\circ$  ( $S_0 < 0.18$ ), al no tener en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua ( $\cos\alpha$ ) en las ecuaciones.
- Dificultades en la elección del calado crítico en secciones complejas, (terrazas fluviales). Por defecto es seleccionado el calado menor.
- Siempre ofrece una solución, por lo que se debe ser crítico ante el resultado obtenido.

### 4.1.3. Conceptos teóricos

HEC-RAS ha sido desarrollado para simular flujos, tanto en canales artificiales como naturales. El cálculo se define unidimensional, al reducir la formulación general del movimiento tridimensional a un movimiento unidimensional. Para este proyecto y continuando con la labor de Don Antonio Jesús Salvador Pascual, se analizará el uso del modelo, ya no para movimientos estacionarios, si no para movimientos Quasi-No permanentes.

Las leyes físicas que gobiernan el flujo de agua en un río son: El principio de conservación de la masa (continuidad), el principio de conservación del momentum, y el proceso de transporte de sedimentos. Hec-Ras implementa estos principios, permitiendo el cálculo simplificado de flujos, desde resaltos hidráulicos hasta el comportamiento del flujo en alcantarillas.

#### 4.1.3.1. Ley de conservación de la energía

Considerando el volumen de control elemental que se muestra en la figura 4.1. La distancia  $x$  se mide a lo largo del cauce. En el punto medio del volumen de control se indican el caudal de flujo y el área,  $Q(x,i)$  y  $A_r$  respectivamente. El área total del flujo es la sumatoria del área activa  $A$  y del área  $S$  del almacenamiento fuera del cauce.

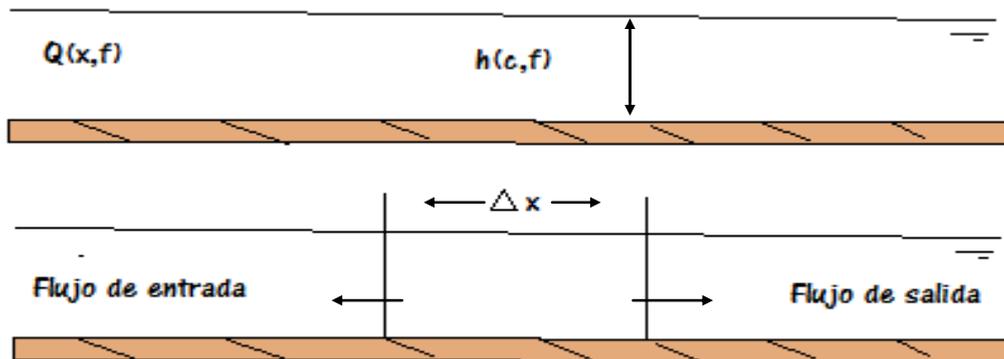


Figura 4.1 Volumen de Control Elemental

La conservación de la masa en función del volumen de control, plantea que el gasto neto en el volumen será igual a la rapidez del cambio de almacenamiento dentro del volumen. El caudal de ingreso al volumen de control puede expresarse como:

$$Q - (\delta Q / \Delta x) * (\Delta x / 2) \quad (4.1)$$

Y el caudal de salida como:

$$Q + (\delta Q / \Delta x) * (\Delta x / 2) \quad (4.2)$$

La rapidez de cambio del almacenamiento:

$$(\Delta A_t / \delta t) * \Delta x \quad (4.3)$$

Asumiendo que  $\Delta x$  es pequeño, la variación de la masa en el volumen de control será:

$$\rho * (\Delta A_t / \delta t) * \Delta x = \rho * [(Q - (\delta Q / \Delta x) * (\Delta x / 2)) - (Q + (\delta Q / \Delta x) * (\Delta x / 2)) + Q_1] \quad (4.4)$$

Donde  $Q_1$  es el flujo lateral que entra al volumen de control y  $\rho$  la densidad del líquido. La simplificación y la división por  $(\rho \Delta x)$  nos otorga la formula final de la ecuación de continuidad para régimen no permanente:

$$(\delta A_t / \delta t) + (\delta Q / \delta x) - q_i = 0 \quad (4.5)$$

En el cual  $q_i$  constituye el caudal de aporte lateral por unidad de longitud.

#### 4.1.3.2. Ecuación del Momentum

La segunda ley de Newton expresa la conservación del momentum como:

$$\Sigma F_x = \delta M / \delta t \quad (4.6)$$

La conservación del momentum para el volumen de control, plantea que el régimen neto de momento que entra al volumen, (flujo de momento), mas la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen, será igual a la rapidez de variación del momento. Esta es una ecuación vectorial aplicada en la dirección  $x$ . El flujo de momento  $F$ , es la masa del líquido por el vector velocidad en la dirección del flujo. Existen tres fuerzas a considerar: Presión, gravedad y fuerza de fricción.

- **Fuerzas de presión:** La figura 4.2 ilustra el caso general de una sección transversal irregular. Se asume que la distribución de presión es hidrostática, (la presión varía linealmente con la profundidad) y la fuerza de presión total es la integral del producto presión-área sobre la sección transversal. A partir de Shames (1962), la fuerza de presión en cualquier punto puede expresarse como:

$$F_p = \text{Integral } (0, h): [\rho * g * (h - y) * T(y) * \delta y \quad (4.7)$$

Donde **(h)** es la profundidad, y la distancia media desde el fondo del cauce y **T(y)** una función del ancho que relaciona el ancho de la sección transversal con la distancia sobre el fondo del cauce.

Si **(Fp)** es la fuerza de presión ejercida en la dirección  $x$  del punto del volumen de control, entonces la fuerza en el extremo aguas arriba del volumen de control podría expresarse como:

$$F_p - (\delta F_p / \delta x) * (\Delta x / 2) \tag{4.8}$$

Y en el extremo aguas abajo como:

$$F_p + (\delta F_p / \delta x) * (\Delta x / 2) \tag{4.9}$$

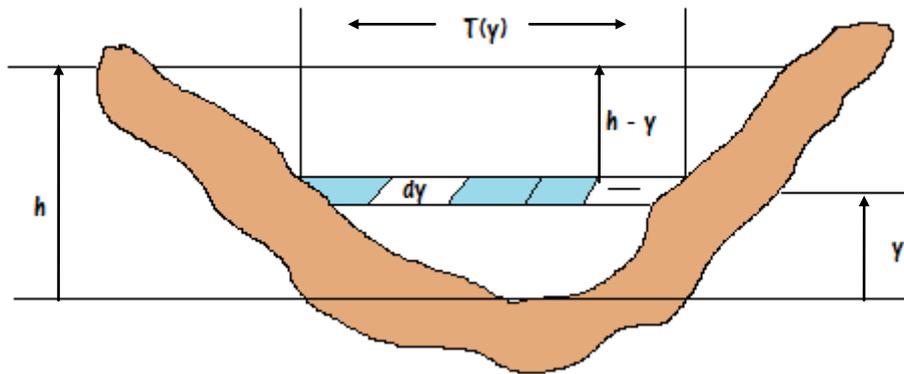


Figura 4.2 Fuerza de Presión

Por tanto, la suma de las fuerzas de presión para el volumen de control se expresa como:

$$F_{pn} = | F_p - (\delta F_p / \delta x) * (\Delta x / 2) | - | F_p + (\delta F_p / \delta x) * (\Delta x / 2) | + F_B \tag{4.10}$$

Donde **(Fpn)** es la fuerza de presión neta para el control de volumen, y **FB** es la fuerza que ejercen las riberas sobre el líquido en la dirección **X**. Podría simplificarse de la siguiente forma:

$$F_{pn} = - (\delta F_p / \delta x) + F_B \tag{4.11}$$

Al diferenciar la ecuación 4.7 mediante el empleo de la Regla de Liebnitz y posteriormente realizar las sustituciones en la ecuación (4.11) se obtiene

$$F_{pn} = -\rho * g * \Delta x * [(\delta h / \delta x) * (\text{Integral}(0, h) : T(y) \delta y) + (\text{Integral}(0, h) : (h - y) * (\delta T(y) / \delta x) * \delta y)] + F_B \quad (4.12)$$

La primera integral en la ecuación 4.12 es el área de la sección transversal: **A**, la segunda integral es la fuerza de presión ejercida por el líquido sobre las riberas, que es exactamente igual en magnitud, pero opuesta en dirección a **(F<sub>B</sub>)**. De aquí que la fuerza de presión neta pueda expresarse como:

$$F_{pn} = -\rho * g * A * (\delta h / \delta x) * \Delta x \quad (4.13)$$

- **Fuerza Gravitacional:** La fuerza de la gravedad, ejercida sobre el líquido en el volumen de control y en la dirección x es:

$$F_g = -\rho * g * A * (\sin \theta) * \Delta x \quad (4.14)$$

En este caso  $\theta$  es el ángulo que forma el fondo del cauce con la horizontal. Cuando se trata de ríos naturales  $\theta$  es pequeña y  $\sin \theta = \tan \theta = \partial Z_0 / \partial x$ , donde ( $Z_0$ ) es la elevación del fondo. Por tanto la fuerza gravitacional es expresada como:

$$F_g = -\rho * g * A * (\delta z_0 / \delta x) * \Delta x \quad (4.15)$$

Esta fuerza será positiva para pendientes de lecho negativos.

- **Fuerzas de Fricción:** Las fuerzas de fricción entre el cauce y el líquido pueden expresarse como:

$$F_f = - \tau_0 * P * \Delta x \quad (4.16)$$

Donde ( $\tau_0$ ) es el esfuerzo cortante medio del contorno (fuerza/área unitaria), que actúa sobre el perímetro, y  $P$  es perímetro anegado. El signo negativo indica que, con el flujo en la dirección  $x$  positiva, la fuerza actúa en la dirección  $x$  negativa. De acuerdo con el análisis dimensional  $\tau_0$  puede expresarse en términos de coeficiente de arrastre,  $C_d$ , de la siguiente forma:

$$\tau_0 = \rho * C_d * V^2 \quad (4.17)$$

El coeficiente de arrastre se relaciona con el coeficiente Chezy  $C$  de la forma siguiente:

$$C_d = (g/C^2) \quad (4.18)$$

La ecuación de Chezy puede expresarse de la siguiente forma:

$$V = C * (R * S_f)^{1/2} \quad (4.19)$$

Al sustituir las ecuaciones (4.17, 4.18 y 4.19), por la ecuación (4.16) y llevar a cabo la simplificación, se obtiene la siguiente expresión para la fuerza de arrastre límite:

$$F_f = - \rho * g * A * S_f * \Delta x \quad (4.20)$$

Donde ( $S_f$ ) es la pendiente de fricción, que resulta positivo el flujo en la dirección  $x$  positiva. La pendiente de fricción debe relacionarse con el flujo y la altura.

Tradicionalmente se han empleado las ecuaciones de fricción de Manning y Chezy. Como la ecuación de Manning es la más usada, su uso también se extiende a Hec-Ras. La ecuación de Manning se plantea de la siguiente manera:

$$S_f = (Q * |Q| * n^2) / (2.208 * A^2 * R^{4/3}) \quad (4.21)$$

Donde **R** es el radio hidráulico y **n** es el coeficiente de fricción de Manning.

Una vez definidos los tres términos anteriores, solo quedaría definir el flujo de momento que entra al volumen de control y que puede expresarse como:

$$P * [Q * V - (\delta Q V / \Delta x) * (\Delta x / 2)] \quad (4.22)$$

El flujo de salida será expresado como:

$$P * [Q * V + (\delta Q V / \Delta x) * (\Delta x / 2)] \quad (4.23)$$

Por tanto, la variación neta de momento (flujo de momento) que entra al volumen de control es:

$$- \rho * (\delta Q V / \delta x) * \Delta x \quad (4.24)$$

Ya que el impulso del líquido en el volumen de control es **(ρQΔx)**, la rapidez de cambio de momento se expresa como:

$$(\delta / \delta t) * (\rho * Q * \Delta x) = \rho * (\delta Q / \delta t) * \Delta x \quad (4.25)$$

Replanteando el principio de conservación del momento:

El régimen neto de momento que entra al volumen (4.24) más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen [(4.13) + (4.15) + (4.20)] es igual régimen de acumulación de momento (4.25). De aquí:

$$P * \Delta x * (\delta Q / \delta t) = - \rho * (\delta Q V / \delta x) * \Delta x - \rho * g * A * (\delta h / \delta x) * \Delta x - \rho * g * A * (\Delta Z_0 / \delta x) * \Delta x - \rho * g * A * (S_f) * \Delta x \quad (4.26)$$

La evaluación de la superficie del agua (**Z**) es igual a (**Z<sub>0</sub>+h**).

Por lo tanto:

$$(\delta Z/\delta x) = (\delta h/\delta x)+(\delta Z_0/\delta x) \tag{4.27}$$

Donde (**dh/ax**) es la pendiente de la superficie del agua. Al sustituir (4.27) por (4.26), y dividir para ( $\rho\Delta x$ ) y pasar todos los términos a la izquierda se obtiene la forma definitiva de la ecuación de momento:

$$(\delta Q/\delta t)+(\delta QV/\delta x)+g*A*((\Delta z/\delta x)+S_f) = 0 \tag{4.28}$$

#### 4.1.4. Métodos de cálculo para el transporte de sedimentos

##### 4.1.4.1. Ecuaciones para el cálculo básico de secciones

Los perfiles de agua superficial, se calculan a partir de la sección (**y**), hasta la sección (**y+1**), resolviendo la ecuación de la energía, utilizando el procedimiento iterativo denominado método de paso a nivel.

$$Z_1+Y_1+\alpha_1*(V_1^2/2*g) = Z_2+Y_2+\alpha_2*(V_2^2/2*g)+h_e \tag{4.29}$$

Donde **Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>**: Elevaciones de las secciones 1 y 2 medidas desde plano de referencia.

**Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>**: Profundidad del agua en las secciones transversales.

**V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>**: Velocidad media (Descarga total/Sección de flujo total).

**α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>**: Coeficiente de ponderación de la velocidad.

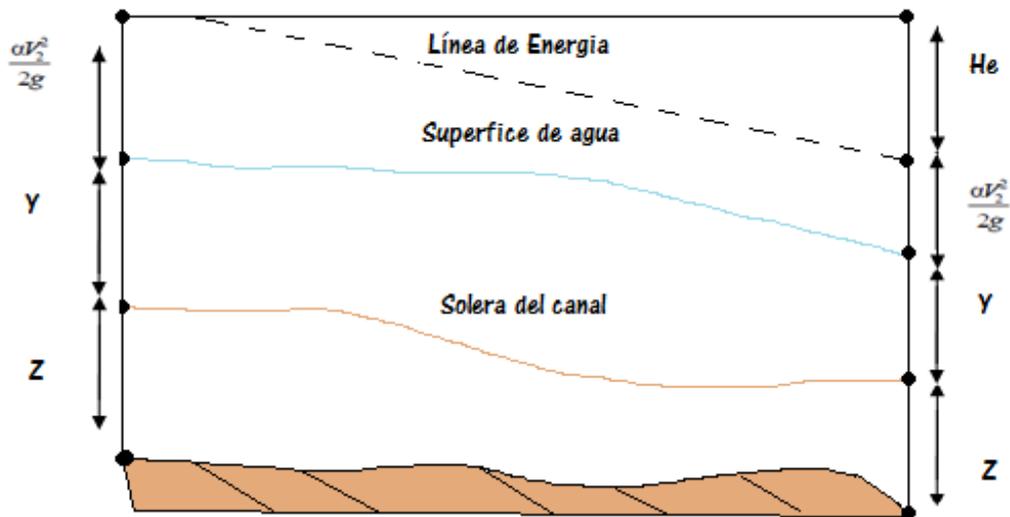


Figura 4.3 Representación de términos de la Ec. De la Energía.

Las pérdidas de energía (**he**) entre dos secciones transversales se componen de las pérdidas por fricción y las pérdidas de contracción o expansión. La ecuación para las pérdidas de carga es la siguiente:

$$h_e = L * S_f + C * \left| \alpha_1 * \left( \frac{V_1^2}{2 * g} \right) - \alpha_2 * \left( \frac{V_2^2}{2 * g} \right) \right|$$

(4.30)

Donde: **L**: Longitud ponderada de descarga.

**Sf**: Pendiente de fricción representativa entre dos secciones.

**C**: Coeficiente de pérdidas en expansión ó contracción.

La longitud ponderada de descarga, es calculada de la siguiente forma:

$$L = \left( L_{lob} * Q_{lob} + L_{ch} * Q_{ch} + L_{rob} * Q_{rob} \right) / \left( Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob} \right)$$

(4.31)

Donde:

**L<sub>lob</sub>**, **L<sub>ch</sub>**, **L<sub>rob</sub>**: Longitudes del tramo correspondientes a la zona de inundación izquierda, cauce principal y zona de inundación derecha.

**Q<sub>lob</sub>**, **Q<sub>ch</sub>**, **Q<sub>rob</sub>**: Caudales medios del tramo, correspondientes a la zona de inundación izquierda, cauce principal y zona de inundación.

#### 4.1.4.2. Flujo Quasi-no permanente

Antes de comenzar los cálculos pertinentes al transporte de sedimentos, se debe determinar la hidráulica del río, Hec-Ras utiliza la simplificación hidrodinámica en el cálculo del transporte de sedimentos. La superposición del flujo Quasi-no permanente, se aproxima a un hidrograma continuo con una serie discreta de perfiles de flujo constante. Para cada registro de flujo, este se mantiene constante durante un determinado periodo de tiempo, cada periodo es dividido, y posteriormente subdividido en tiempos más pequeños, no obstante, Hec-Ras utiliza tres tipos de subdivisiones diferentes, siendo cada una, subdivisión de la anterior. Los tres pasos de tiempo son: Duración del Flujo, Incrementos de Cálculo y Paso de Tiempo de Mezclado.

##### Duración del Flujo

La duración de flujo, es el paso que requiere de mayor tiempo, y representa el intervalo de tiempo en el cual el flujo, sus características, temperatura o carga de sedimentos, se suponen constantes. Por ejemplo, si el caudal es aforado diariamente, la duración del flujo sería de 24h, a menos que un tiempo más corto sea interpolado.

##### Incremento de cálculo

La duración del flujo, es subdividida a su vez en un incremento de cálculo. Aunque el caudal siga siendo el mismo durante la duración del flujo, la geometría del lecho y la hidrodinámica del río, son actualizadas después de cada incremento de cálculo. La estabilidad del modelo puede ser muy sensible a esta subdivisión de tiempo. Cuando el incremento de cálculo es demasiado largo, la geometría del lecho no se actualiza correctamente y los resultados pueden variar sensiblemente.

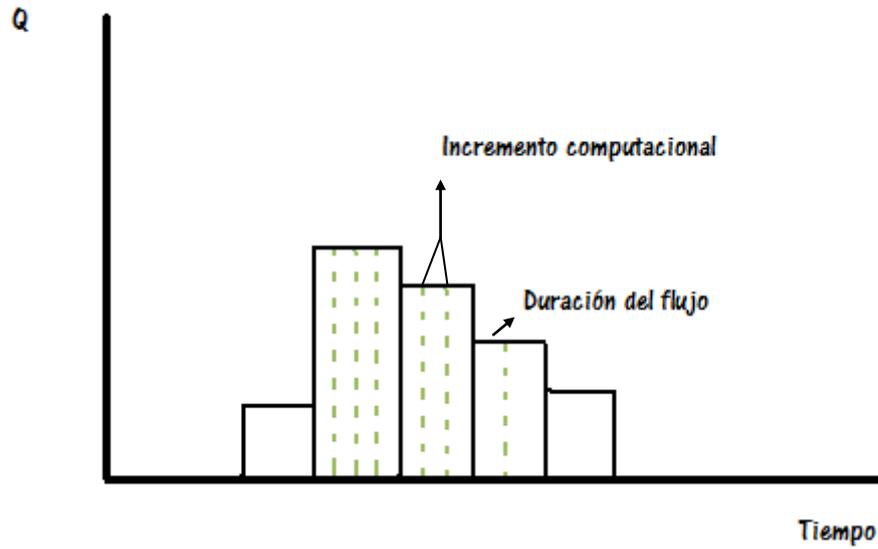


Figura 4.4 Incrementos de las Series de Flujo

### Tiempo de mezcla

Finalmente el incremento de cálculo es subdividido en el tiempo de mezclado del lecho. Durante cada tiempo de mezclado en un incremento de cálculo la batimetría, los parámetros hidráulicos y potencial de transporte para cada tamaño de partícula permanecen constantes. Sin embargo los cálculos de erosión y sedimentación ocurren en este periodo de tiempo y pueden causar cambios en la composición de las capas de mezclado en el lecho.

#### 4.1.4.3. Continuidad de sedimento

Hec-Ras resuelve la ecuación de Continuidad de sedimentos conocida como ecuación de Exner:

$$(1-\lambda_p) * B * (\delta\eta / \delta t) = - (\delta Q_i / \delta x)$$

(4.32)



#### 4.1.5. Procesos de erosión, transporte y sedimentación

Cuando un fluido en movimiento entra en contacto con el cauce que lo contiene, existe una relación mutua, cuyo resultado depende, de las características del movimiento del propio fluido, que ocasionan diferentes pérdidas de carga por rozamiento con el contorno, y del tipo de granulometría, pendiente y geometría del cauce, apareciendo entonces siempre para cada uno de los casos, un abanico de fuerzas, ya sean desestabilizadoras y de arrastre, ó estabilizantes y de deposición de las partículas solidas.

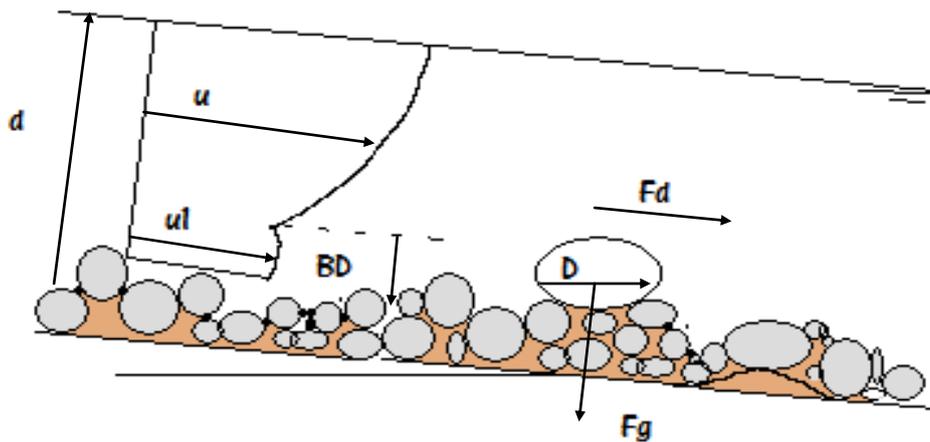


Figura 4.6 Acción del flujo sobre una partícula.

Para que una partícula en lecho del río sea arrastrada, es necesario que el cortante en el fondo, ó tensión de fondo, supere un determinado valor característico ó fuerza resistiva, ( $\tau_0 - \tau_c > 0$ ), que dependen en general del tamaño del sedimento, su forma, su confinamiento en el lecho, y la cohesión para el caso de sedimentos cohesivos. La tasa de transporte de dichas partículas se denomina gasto solido y su cálculo varía dependiendo del autor ó teoría. Actualmente la mayoría de las relaciones de gasto solido, se muestran proporcionales al exceso de esfuerzo de corte, con respecto al esfuerzo de corte crítico, como por ejemplo la ecuación Meyer-Peter & Müller.

Una vez iniciado el movimiento, las partículas pueden estar en **suspensión**, ó ser arrastras en las proximidades de la solera, existe una posibilidad intermedia en la que la partícula inicialmente situada en el fondo, es elevada por el flujo y transportada temporalmente, hasta que las fuerzas que actúan sobre ella decrezcan, y entonces sea depositada nuevamente en el fondo. Las partículas más finas y susceptibles al más mínimo movimiento, permanecerán siempre en suspensión originando la llamada **carga de lavado**.

En cuanto a las partículas de mayor diámetro y peso específico, si no logran alcanzar el seno del fluido, se ven abocadas al transporte de fondo, en forma de rodadura ó pequeños saltos.

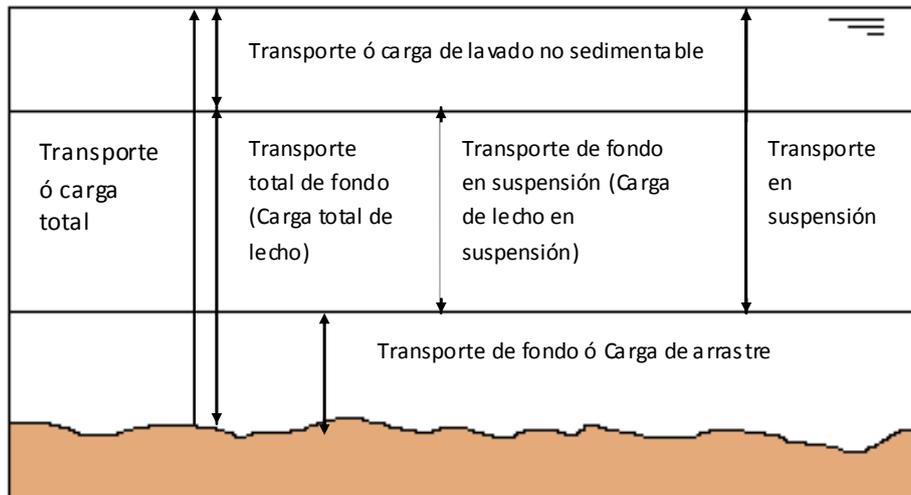


Figura 4.7 Formas de transporte.

#### 4.1.6. Métodos de cálculo. Funciones de transporte de sedimentos

Podemos clasificar los sedimentos, respecto a su origen ó respecto al modo en el que se desplazan, respecto a su origen, los sedimentos pueden provenir, bien como aporte del propio cauce, conocido como descarga de lecho, ó bien ser aportados al cauce como una fuente externa, ya sea como un aporte continuado ó temporal de material, denominado carga de lavado. En el segundo tipo, las partículas más gruesas son desplazadas, bien arrastradas por la corriente generada por el propio flujo, o por pequeños saltos muy cerca del lecho del río, conocido como arrastre de fondo, por el contrario, si partículas más finas se sostienen por efectos ascendentes provocados por la propia turbulencia, es denominado transporte suspendido.

A continuación, se muestran las ecuaciones empíricas, que describen el movimiento de las partículas en el seno de un fluido, y que son empleadas por Hec-Ras en la modelización de cauces:

- Ackers & White (1973)
- Engelund & Hansen (1967)
- Copeland's from Laursen (1968,1989)
- Meyer, Peter & Müller (1948)
- Toffaletti (1968)
- Yang (1973,1984)
- Wilcock (2001)

#### 4.1.6.1 Función de transporte ACKER & WHITE

Ackers and White (1973) es una función de carga total que fue desarrollada con datos de un aforador para gradaciones que van desde arenas a gravas finas. La hidrodinámica fue seleccionada para cubrir un rango de configuraciones del lecho que incluyen ondas, dunas y condiciones de lechos planos. El sedimento suspendido es función de la velocidad de corte mientras que la carga del lecho es función del esfuerzo cortante.

##### Datos Requeridos

<b>Temperatura</b>	<b>T</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>v</b>
<b>Calado</b>	<b>D</b>
<b>Pendiente</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro medio de la partícula</b>	<b>d<sub>si</sub></b>
<b>Diámetro máximo de la partícula</b>	<b>d<sub>50</sub></b>
<b>Velocidad media</b>	<b>V</b>
<b>Caudal</b>	<b>Q</b>
<b>Densidad del agua</b>	<b>Y<sub>w</sub></b>
<b>Ancho del canal</b>	<b>B</b>
<b>Gravedad específica del sedimento</b>	<b>S</b>

##### Constantes

Gravedad:  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

##### Solución

Diámetro a dimensional de la partícula:

$$D_{gr} = D_{si} \left[ \frac{g^*(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \tag{4.41}$$

Velocidad de corte:

$$U_{star} = (g^*D^*S)^{1/2} \tag{4.42}$$

Exponente relacionado con el tamaño de la partícula:

$$n = \begin{cases} 1 & \text{si } D_{gr} \leq 1 \\ 1 - 0.056 * \log(D_{gr}) & \text{si } 1 < D_{gr} \leq 60 \\ 0 & \text{si } D_{gr} > 60 \end{cases} \quad (4.43)$$

Parámetro inicio de movimiento:

$$A = \begin{cases} ((0.23/(D_{gr})^{(1/2)}) + 0.14 & \text{si } D_{gr} \leq 60 \\ 0.17 & \text{otros} \end{cases} \quad (4.44)$$

Número de movilidad de sedimento:

$$F_{gr} = [(U_{star}^n)/(g^*D_{si}*(s-1))] * [(v/(32^{(1/2)})) * \log(\alpha*(D/D_{si}))^{(1-n)}] \quad (4.45)$$

Factor de evasión de partículas finas – Parámetro de movilidad de shields:

$$\Theta = (U_{star}^2) / (g^*(s-1)d_{50}) \quad (4.46)$$

Ajuste del Número de Movilidad de sedimento por el Factor de Evasión:

$$F_{gr} = HF * F_{gr} \quad (4.47)$$

Chequeo de sedimentos muy finos basado en **Fgr** y **A**:

$$\text{Check} = F_{gr}/A \quad (4.48)$$

Exponente de la Función de Transporte de Sedimentos:

$$m = \begin{cases} (6.83/D_{gr})+1.67 & \text{si } D_{gr} \leq 60 \\ 1.78 & \text{Otro} \end{cases} \quad (4.49)$$

Chequeo de sedimentos muy finos basado en m:

$$\text{Check} = \begin{cases} 0 & \text{si } m > 6 \\ \text{Check} & \text{otros} \end{cases} \quad (4.50)$$

Coeficiente de la función de Transporte de Sedimentos:

$$C = \begin{cases} 10^{[(2.79 \cdot \log(D_{gr}) - 0.98 \cdot (\log(D_{gr}))^2) - 3.46]} & \text{si } D_{gr} \leq 60 \\ 0.025 & \text{otros} \end{cases} \quad (4.51)$$

Parámetro de Transporte:

$$G_{gr} = C \cdot ((F_{gr}/A) - 1)^m \quad (4.52)$$

Flujo de Sedimentos X, en partes por millón del peso de fluido:

$$X = ((G_{gr} \cdot S_{d_{si}}) / (D^* [(U \text{ star}/V)^n])) \quad (4.53)$$

Caudal sólido:

$$G = \gamma_w \cdot Q \cdot X \quad (4.54)$$

Caudal Sólido en ton/día:

$$GS = (86400/2000) \cdot G \quad (4.55)$$

Revisión para asegurar que las funciones de los diámetros y movilidad de las partículas no son muy lentas:

$$G_s = \begin{cases} G_s & \text{si Check} > 1 \\ 0 & \text{otros} \end{cases}$$

(4.56)

#### 4.1.6.2 Función de transporte ENGELUND & HANSEN

Engelund & Hansen (1967), es una ecuación de carga total de transporte que fue desarrollada a través de datos de aforador. Fueron usadas arenas de tamaño relativamente uniformes entre 0.19 mm y 0.03 mm. Aunque relativamente es función simple de la velocidad del canal, la fuerza cortante en el lecho y el material de graduación  $d_{50}$ . La aplicación de esta ecuación debería ser únicamente para sistemas arenosos.

##### Datos Requeridos

Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	v
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	$d_{50}$
Diámetro máximo de la partícula	$d_{84}$
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Gravedad específica del sedimento	S

##### Constantes

Gravedad:  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Solución

Esfuerzo cortante:

$$T_0 = \gamma_w * D * S \tag{4.57}$$

Elección de diámetro:

$$d_f = \begin{cases} (69.07 * d_{si}^2 + 1.0755 * d_{si} + 0.000007) & \text{Si } d_{si} \leq 0.00591 \\ (0.1086 * d_{si}^{0.6462}) & \text{otros} \end{cases} \tag{4.58}$$

Descarga de sedimento (lb/s):

$$g_s = 0.05 * s * (v^2) * [(d_f / g * (s-1))^{1/2}] * [T_0 / ((\gamma_w * s - \gamma_w) * d_f)]^{3/2} * [B]$$

$$g_s = 32.82 \tag{4.59}$$

Descarga de sedimento (ton/día):

$$G_s = g_s * (86400 / 2000) \quad G_s = 1418 \tag{4.60}$$

**4.1.6.3. Función de transporte LAURSEN & COPELAND**

Laursen (1968) es también una función de carga total que inicialmente se basó en ecuaciones de aforadores y posteriormente fue ampliada por Madden para incluir los datos del Río Arkansas. Es una función básica del exceso de esfuerzo cortante y la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída. Años después, Copeland (1989) generalizó la ecuación para el transporte de gravas, por lo que dotó a la ecuación la posibilidad de ser usada para lechos graduados.

Datos Requeridos

<b>Temperatura</b>	<b>T</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>v</b>
<b>Calado</b>	<b>D</b>
<b>Pendiente</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro medio de la partícula</b>	<b>dsi</b>
<b>Diámetro máximo de la partícula</b>	<b>d84</b>
<b>Velocidad media</b>	<b>V</b>
<b>Caudal</b>	<b>Q</b>
<b>Densidad del agua</b>	<b>Yw</b>
<b>Ancho del canal</b>	<b>B</b>
<b>Gravedad específica del sedimento</b>	<b>S</b>

Constantes

Gravedad  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Solución

Radio hidráulico según el tamaño de la partícula:

$$R' = ((0.0472*(V^{2/3})*(3.5*d_{84})^{1/4})/(g*s)^{3/4})$$

$$R' = 15.248$$

(4.61)

Velocidad de corte:

$$u^* = (g*R'*S)^{1/2}$$

$$FNRP = (V/u^*) - 3.28 - 7.75*\log(R'/d_{84})$$

$$FNRP = 5.195 \text{ EXP-4}$$

(4.62)

Entonces:

$$DFNRP = (V+5*u^*)/(2.0*(u^*)*R')$$

$$RPRI2 = R' + (FNRP/DFNRP)$$

$$\Delta R = |RPRI2 - R'|$$

$$R' = \begin{cases} R & \text{Si } \Delta R \leq 0.001 \\ \text{RPRI2} & \text{Otros} \end{cases} \quad (4.63)$$

Esfuerzo cortante relacionado con el tamaño de la partícula:

$$T'_b = R' * \gamma_w * S \quad (4.64)$$

$$T_b = D * \gamma_w * S \quad (4.65)$$

$$T'_b = \begin{cases} T'_b & \text{Si } T'_b < T_b \\ T_b & \text{Otros} \end{cases} \quad (4.66)$$

$$u^* = ((T'_b * g) / \gamma_w)^{(1/2)} \quad (4.67)$$

$$RRP = (d_{si}/R)^{1.16667} \quad (4.68)$$

Esfuerzo cortante a dimensional en el lecho:

$$T^*_b = T'_b / (\gamma_w * (s-1) * d_{si}) \quad (4.69)$$

$$T^*_b = 0.398$$

Parámetro de Shields para la trayectoria del grano:

$$\Theta^* = 0.647 * T^*_b + 0.0064 \quad (4.70)$$

$$\Theta^* = \begin{cases} 0.02 & \text{Si } \Theta^* < 0.02 \\ \Theta^* & \text{Otros} \end{cases} \quad (4.71)$$

Esfuerzo cortante crítico:

$$T_{cr} = \begin{cases} [(\Theta^*) * \gamma_w * (s-1) * d_{si}] & \text{Si } T^*_b \leq 0.05 \\ [0.039 * \gamma_w * (s-1) * d_{si}] & \text{Otros} \end{cases} \quad (4.72)$$

Parámetro de la movilidad del esfuerzo cortante.

$$TFP = (T^*_b / T_{cr}) - 1 \quad (4.73)$$

### Velocidad de Caída

Ecuación de Rubey:

$$F_1 = [((2/3) + ((36 * (v^2)) / (g * (d_{si}^3) * (s-1))))] - [36 * (v^2) / (g * (d_{si}^3) * (s-1))] \quad (4.74)$$

$$W = F_1 * ((s-1) * g * d_{si})^{1/2} \quad (4.75)$$

Relación de velocidad de la partícula:

$$SF = (u^* / W) \quad (4.76)$$

Parámetro de la relación de velocidad de la partícula:

$$\Psi = \begin{cases} [7.04 \text{ EXP}15 * (SF^{22.99})] & \text{Si } SF \leq 0.225 \\ (40.0 * SF) & \text{Si } 0.225 < SF \leq 1.0 \\ (40.0 * SF^{1.843}) & \text{Si } SF > 1.0 \end{cases} \quad (4.77)$$

Caudal sólido ton/día:

$$G_s = 0.432 * Y_w * Q * RRP * TFP * \Psi$$

(4.78)

#### 4.1.6.4 Función de transporte MEYER-PETER & MÜLLER

La ecuación de Meyer-Peter Muller (MPM1948) fue una de las primeras ecuaciones desarrolladas y es aún una de las más utilizadas en el cálculo de transporte de sedimentos. Es una simple relación de exceso de esfuerzo cortante. Es estrictamente una ecuación de carga del lecho desarrollada con experimentos de aforación para arena y grava bajo condiciones de lecho plano. La mayoría de los datos fueron desarrollados utilizando sustratos uniformes de grava. MPM es sobre toda una buena ecuación de aproximación para el cálculo con gravas ya que tiende a subestimar el transporte de materiales finos.

#### Datos Requeridos:

Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	V
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	d90
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	Yw
Ancho del canal	B
Gravedad específica del sedimento	S

#### Constantes

Gravedad:

$$g = 9.8m/s^2$$

(4.79)

Solución

Velocidad de corte

$$u = (g \cdot D \cdot S)^{1/2} \tag{4.80}$$

Número de Reynolds

$$R_s = (u \cdot d_{90})/V \tag{4.81}$$

Coeficiente de Schiliching:

$$BCoeff = \begin{cases} (5.5+2.5 \cdot \ln(R_s)) & \text{Si } R_s \leq 5 \\ |(0.297918+24.8666 \cdot \log(R_s) - 22.9885(\log(R_s))^2 \dots \\ | \dots +8.5199 \cdot (\log(R_s))^3 - 1.10752 \cdot (\log(R_s))^4| & \text{Si } 5 < R_s \leq 70 \\ 8.5 & \text{Otros} \end{cases} \tag{4.82}$$

Factor de fricción debido a las partículas.

$$f' = [(2.82843/(BCoeff-3.75+2.5 \ln(2 \cdot (D/d_{90})))^2 \tag{4.83}$$

Relación de Rugosidad de Nikaradse:

$$RKR = ((f'/8)^{1/2}) \cdot (V/(g \cdot D \cdot S)^{1/2}) \tag{4.84}$$

Caudal Sólido:

$$g_s = ( [ (((RKR)^{3/2}) \cdot \gamma_w \cdot D \cdot S - 0.047 \cdot (\gamma_w \cdot S - \gamma_w) \cdot d_{si}) / (0.25 \cdot ((\gamma_w/g)^{1/3}) \cdot ((\gamma_w \cdot S - \gamma_w) / (\gamma_w \cdot S))^{2/3}) ]^{3/2} ) \cdot B \tag{4.85}$$

Caudal Sólido ton/día:

$$G_s = g_s \cdot (86400/2000) \tag{4.86}$$

#### 4.1.6.5. Función de transporte TOFFALETI

Al igual que England-Hansen, Toffaleti (1968) es una función de carga total desarrollada principalmente para partículas del tamaño en el entorno de las arenas. Toffaleti es considerada generalmente una función para ríos largos. Esta función no es gravemente influenciada por la velocidad de corte ni el esfuerzo cortante en el lecho. En lugar de esto, la ecuación fue formulada en base a regresiones de temperatura y un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas.

##### Datos Requeridos:

<b>Temperatura</b>	<b>T</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>V</b>
<b>Calado</b>	<b>D</b>
<b>Pendiente</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro medio de la partícula</b>	<b>dsi</b>
<b>Diámetro máximo de la partícula</b>	<b>d65</b>
<b>Velocidad media</b>	<b>V</b>
<b>Caudal</b>	<b>Q</b>
<b>Densidad del agua</b>	<b>Yw</b>
<b>Ancho del canal</b>	<b>B</b>
<b>Gravedad específica del sedimento</b>	<b>S</b>

##### Constantes

Gravedad:  $g = (9.8\text{m/s}^2)$

(4.87)

##### Solución

El transporte total por unidad de ancho es:

$$g_{si} = g_{sbi} + g_{ssLi} + g_{ssMi} + g_{ssUi}$$

(4.88)

Donde el transporte de carga de la cama se defino como:

$$g_{sbi} = Mt^*(2*d_{st})^{(1+n_y-0.756*z_i)}$$

(4.89)

La capa inferior de transporte se define como:

$$g_{ssLi} = Mt * [(((R/11.24)^{(1+n_y-0.756*zi)}) - (2*d_{si})^{(1+n_y-0.756*zi)}) / (1+n_y-0.756*zi)] \quad (4.90)$$

La capa media de transporte se define como:

$$g_{ssMi} = Mi * [((R/11.24)^{(0.244*zi)}) * (((R/2.5)^{(1+n_v-zi)}) - ((R/11.24)^{(1+n_v-zi)})) / (1+n_v-zi)] \quad (4.91)$$

La capa superior de transporte se define como:

$$g_{ssUi} = Mi * [((R/11.24)^{(0.244*zi)}) * ((R/2.5)^{(0.5*zi)}) * (((R)^{(1+n_v-1.5*zi)}) - ((R/2.5)^{(1+n_v-1.5*zi)})) / (1+n_v-1.5*zi)] \quad (4.92)$$

Así el transporte total en (ton/día) es igual a:

$$G = g_{si} * B \quad (4.93)$$

#### 4.1.6.6 Función de transporte YANG

Yang (1973,1984) es una ecuación de carga total de transporte la cual basa el movimiento del lecho en el producto de la velocidad y el esfuerzo cortante. La función fue desarrollada sobre una gran variedad de aforadores y datos de campo.

La ecuación está compuesta por dos relaciones separadas de transporte de arenas y gravas. La transición entre arena y grava es suavizada con el fin de evitar grandes discontinuidades. Yang tiende a ser muy sensible a la velocidad de la corriente y es más sensible a la velocidad de caída que todas las demás ecuaciones.

Datos Requeridos:

<b>Temperatura</b>	<b>T</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>V</b>
<b>Calado</b>	<b>D</b>
<b>Pendiente</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro medio de la partícula</b>	<b>dsi</b>
<b>Diámetro máximo de la partícula</b>	<b>d50</b>
<b>Velocidad media</b>	<b>V</b>
<b>Caudal</b>	<b>Q</b>
<b>Densidad del agua</b>	<b>Yw</b>
<b>Ancho del canal</b>	<b>B</b>
<b>Gravedad específica del sedimento</b>	<b>S</b>

Constantes

Gravedad: 
$$g = (9.8\text{m/s}^2)$$
 (4.94)

Solución

Velocidad de corte

$$u = (g \cdot D \cdot S)^{(1/2)}$$
 (4.95)

Ecuación de Rubey:

$$F_1 = [((2/3) + ((36 \cdot (v^2)) / (g \cdot (dsi^3) \cdot (s-1))))] - [36 \cdot (v^2) / (g \cdot (dsi^3) \cdot (s-1))]$$

$$W = F_1 \cdot ((s-1) \cdot g \cdot dsi)^{(1/2)}$$
 (4.96)

El número de Reynold's:

$$Rs = ((u^*) \cdot dsi / V)$$
 (4.97)

Velocidad crítica:

$$V_{CR} = \begin{cases} W + [(2.5 / (\log(R_s) - 0.06)) + 0.66] & \text{Si } 0 < R_s < 70 \\ W * 2.05 & \text{Si } R_s \geq 70 \end{cases} \quad (4.98)$$

Concentración (ppm):

$$C_t = 10^{\log(ct)} \quad (4.99)$$

Log (Ct) suaviza la transición de arenas a gravas:

$$\text{Log } C_t = \begin{cases} 5.435 - 0.286 * \log(w * d_{si} / V) - 0.457 * \log(u^* / w) + \dots & \text{Si } d_{si} < 0.00656 \text{ Arenas} \\ \dots + [1.799 - 0.409 * \log(w * d_{si} / V) - 0.314 * \log(u^* / w)] * \log(s^* (v - V_{CR}) / w) \\ 6.681 - 0.633 * \log(w * d_{si} / V) - 0.4816 * \log(u^* / w) + \dots & \text{Si } d_{si} \geq 0.00656 \text{ Gravas} \\ \dots + [2.784 - 0.305 * \log(w * d_{si} / V) - 0.282 * \log(u^* / w)] * \log(s^* (v - V_{CR}) / w) \end{cases} \quad (4.100)$$

Así la descarga de sedimentos en (ton/día) es expresada como:

$$G_s = (86400 / 2000) * G \quad (4.100)$$

Donde G es la descarga de sedimento en Kg/s:

$$[G = (\gamma_w * Q * C_t * 0.4536) / (1000000)]$$

#### 4.1.6.7. Función de transporte WILCOCK

Wilcock (2001) es una ecuación de carga sobre el lecho diseñada para superficies graduadas que contengan tanto arena como grava. Este es un método de transporte superficial basado en la teoría que el movimiento de los sedimentos depende principalmente del material en contacto directo con el flujo. Wilcock, adicionalmente, posee una función oculta que reduce el potencial de transporte de partículas basado en la premisa que estas pueden ser depositadas entre grandes depósitos de grava y no experimentar completamente la fuerza del campo de flujo (en el límite de la capa turbulenta).

Finalmente la teoría central de la ecuación de Wilcock es que el potencial de transporte de la grava aumenta conforme aumenta en contenido de arena. Un esfuerzo cortante referencial adimensional es calculado para el sustrato el cual es una función del contenido de arena en la superficie del lecho.

$$\tau^*_{rm} = 0.021 + 0.015e^{-20F_s}$$

(4.101)

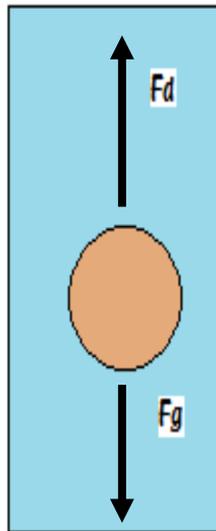
Donde:

<b>Esfuerzo Cortante Referencial</b>	<b>T*m</b>
<b>Contenido de arena en Porcentaje</b>	<b>Fs</b>

Conforme el contenido de arenas se incrementa, el esfuerzo cortante referencial disminuye, si el exceso de corte en el lecho se incrementa y el transporte total se incrementa. La ecuación de Wilcock es muy sensible al parámetro del contenido de arena. Esta tiende a ser mejor para sistemas bimodales y diverge de las otras ecuaciones unimodales.

### 4.1.7. Métodos de cálculo. Funciones de velocidad de caída

La mayoría de las teorías de velocidad de caída se derivan del balance de la fuerza gravitacional y la fuerza de arrastre en una partícula cayendo a través de una columna de agua.



$$F_d = (1/2) \cdot \pi \rho_c c_D \cdot v_s^2 \cdot (D/2)^2$$

$$F_g = (4/3) \cdot \pi \rho R_g \cdot (D/2)^3$$

Figura 4.8 Diagrama de Fuerzas de una Partícula en el seno de un Fluido

Aplicar ecuaciones que representen la velocidad de caída, resulta un proceso complejo. Cuando las partículas están en movimiento, la velocidad resulta ser función del coeficiente de arrastre "Cd", el cual a su vez es función del número de Reynolds "Re", por lo que una solución aproximada, se presenta tras un proceso de cálculo iterativo. (Parte de las partículas significativas en la sedimentación decantan en régimen laminar, es decir, para  $Re < 0.5$ )

$$C_d = (24/Re) = (24 \cdot u/V_s \cdot d_p \cdot \rho)$$

(4.102)

### 4.1.7.1. Van Rijn

Van Rijn (1993), aproxima las curvas de velocidad de caída del comité interinstitucional de Recursos de Agua de Estados Unidos, para partículas no esféricas, con un factor de forma de 0.7, y una temperatura del agua de 20 °C.

Tres ecuaciones son utilizadas dependiendo del tamaño de partícula:

$$W = ((s-1)*g*d)/18*v \quad 0.001 < d \leq 0.1\text{mm} \quad (4.103)$$

$$W = (10v/d)*[(1+((0.01*(s-1)*g*d^3)/v^2)^(0.5) - 1] \quad 0.1 < d \leq 1\text{mm} \quad (4.104)$$

$$W = 1.1*[(S-1)*G*D]^(0.5) \quad d \geq 1\text{mm} \quad (4.105)$$

Donde:

<b>Velocidad de Caída de la Partícula</b>	<b>W</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>v</b>
<b>Gravedad Específica de la Partícula</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro de la Partícula</b>	<b>d</b>

### 4.1.7.2. Toffaleti

Toffaleti (1968), presenta una tabla de velocidades de caída con un factor de forma de 0.9, y gravedad específica de 2.65. Diferentes velocidades de caída están asociadas para rangos de temperatura y tamaño de partícula, clasificados como arenas muy finas (VFS) y gravas medias (Mg). Las velocidades de caída de Toffaleti se muestran en la siguiente tabla.

Sand Grain Settling Velocity Versus Temperature, S.P.G. 2.65, Shape Factor 0.9																	
TEMP °F	SETTLING VELOCITY IN FT. SEC								TEMP °C	SETTLING VELOCITY IN FT/SEC							
	VT6	PS	MS	CS	VCS	VFG	YG	NG		VT6	PS	MS	CS	VCS	VFG	YG	NG
35	.013	.045	.130	.305	.590	1.00	1.41	1.95	65	.021	.065	.185	.354	.640	1.00	1.41	1.95
36	.013	.045	.131	.307	.592	1.00	1.41	1.95	66	.021	.066	.186	.356	.641	1.00	1.41	1.95
37	.013	.046	.132	.310	.594	1.00	1.41	1.95	67	.021	.067	.187	.357	.643	1.00	1.41	1.95
38	.014	.047	.133	.312	.596	1.00	1.41	1.95	68	.022	.067	.188	.358	.644	1.00	1.41	1.95
39	.014	.047	.135	.314	.598	1.00	1.41	1.95	69	.022	.068	.190	.360	.646	1.00	1.41	1.95
40	.014	.048	.136	.316	.600	1.00	1.41	1.95	70	.022	.069	.191	.361	.647	1.00	1.41	1.95
41	.015	.049	.137	.318	.602	1.00	1.41	1.95	71	.022	.070	.192	.362	.649	1.00	1.41	1.95
42	.015	.050	.138	.320	.604	1.00	1.41	1.95	72	.023	.071	.193	.363	.650	1.00	1.41	1.95
43	.015	.051	.140	.321	.606	1.00	1.41	1.95	73	.023	.071	.195	.364	.652	1.00	1.41	1.95
44	.016	.051	.141	.322	.608	1.00	1.41	1.95	74	.023	.072	.196	.365	.653	1.00	1.41	1.95
45	.016	.052	.142	.323	.609	1.00	1.41	1.95	75	.024	.072	.197	.366	.655	1.00	1.41	1.95
46	.016	.053	.143	.325	.610	1.00	1.41	1.95	76	.024	.073	.198	.367	.656	1.00	1.41	1.95
47	.016	.053	.144	.326	.612	1.00	1.41	1.95	77	.024	.073	.199	.368	.657	1.00	1.41	1.95
48	.017	.054	.145	.328	.614	1.00	1.41	1.95	78	.024	.074	.201	.370	.658	1.00	1.41	1.95
49	.017	.055	.146	.330	.615	1.00	1.41	1.95	79	.025	.074	.202	.371	.659	1.00	1.41	1.95
50	.017	.055	.147	.331	.618	1.00	1.41	1.95	80	.025	.075	.203	.373	.660	1.00	1.41	1.95
51	.018	.056	.148	.333	.620	1.00	1.41	1.95	81	.025	.075	.204	.375	.661	1.00	1.41	1.95
52	.018	.057	.150	.334	.621	1.00	1.41	1.95	82	.025	.076	.205	.376	.662	1.00	1.41	1.95
53	.018	.057	.151	.336	.623	1.00	1.41	1.95	83	.025	.077	.206	.378	.663	1.00	1.41	1.95
54	.018	.058	.152	.338	.624	1.00	1.41	1.95	84	.026	.077	.207	.380	.664	1.00	1.41	1.95
55	.018	.059	.153	.340	.626	1.00	1.41	1.95	85	.026	.078	.208	.381	.665	1.00	1.41	1.95
56	.019	.059	.154	.341	.627	1.00	1.41	1.95	86	.026	.078	.209	.383	.666	1.00	1.41	1.95
57	.019	.060	.155	.343	.629	1.00	1.41	1.95	87	.026	.079	.212	.385	.667	1.00	1.41	1.95
58	.019	.061	.156	.344	.630	1.00	1.41	1.95	88	.027	.079	.214	.386	.668	1.00	1.41	1.95
59	.019	.061	.157	.346	.632	1.00	1.41	1.95	89	.027	.080	.215	.388	.669	1.00	1.41	1.95
60	.020	.062	.158	.347	.633	1.00	1.41	1.95	90	.027	.080	.216	.390	.670	1.00	1.41	1.95
61	.020	.063	.160	.349	.635	1.00	1.41	1.95	91	.028	.081	.217	.391	.671	1.00	1.41	1.95
62	.020	.063	.161	.350	.636	1.00	1.41	1.95	92	.028	.081	.218	.392	.672	1.00	1.41	1.95
63	.020	.064	.162	.351	.638	1.00	1.41	1.95	93	.028	.082	.219	.393	.673	1.00	1.41	1.95
64	.021	.065	.163	.353	.639	1.00	1.41	1.95	94	.028	.082	.220	.394	.674	1.00	1.41	1.95

Figura 4.9 Toffaleti. Velocidades de Caída

### 4.1.7.3. Rubey

Rubey (1933), desarrolló una relación analítica entre el fluido, las propiedades del sedimento, y la velocidad de caída, basada en la combinación de la ley de Stokes (para partículas finas sujetas únicamente a la resistencia viscosa), y una formula de impacto (para partículas fuera de la región de Stokes). Esta ecuación ha sido modificada para ser aplicada para limos, arenas y gravas, aunque Rubey, señala que las partículas con gravedad específica aproximada a 2.65, son las más apropiadas para esta ecuación, ya que el resto de partículas con gravedad específica distinta, tienden a caer antes de lo que pudiera determinar los resultados mostrados en la ecuación.

$$W = F1*((s-1)*a*d_e)^{(1/2)} \tag{4.106}$$

Donde F1 es igual a:

$$F1 = [((2/3)+((36*(v^2))/(g*(d_s^3)*(s-1))))] - [36*(v^2)/(g*(d_s^3)*(s-1))] \tag{4.107}$$

<b>Velocidad de Caída de la Partícula</b>	<b>W</b>
<b>Viscosidad Cinemática</b>	<b>v</b>
<b>Gravedad Específica de la Partícula</b>	<b>S</b>
<b>Diámetro de la Partícula</b>	<b>d</b>

#### 4.1.8. Definición de variables transporte de sedimentos Hec-Ras

- **Variación del Talweg (Ch Invertir El) (m)** - Elevación mínima del canal principal en cada paso de tiempo de salida.
- **Altura de agua (Wsel) (m)** - La elevación de la superficie del agua en cada paso de tiempo de salida.
- **Datos observados (Observ Data)** - La elevación observada del lecho del canal principal, introducido por el usuario.
- **Incrementos del talweg (Invert Change) (m)** - El cambio en el la elevación mínima del canal principal.
- **Masa ó Volumen transportado (Mass Out) (toneladas)** - La masa total de sedimentos, para todas las clases de tamaño de grano, que salen del volumen de control de sedimentos, por cada paso de tiempo computacional.
- **Masa ó Volumen transportado: la clase 1-20 (Mass Out) (toneladas)** - Masa de sedimentos dejando el volumen de control de sedimentos por fracción de tamaño de grano, por paso de tiempo computacional.
- **Flujo (Flow) (m<sup>3</sup>/s)** - Flujo total en la sección transversal de cada paso de tiempo de salida.
- **Velocidad (velocity) (m/ s)** - Velocidad media de la parte móvil de la cama en cada paso de tiempo.
- **Esfuerzo de corte (Shear Stress) (Kg/m<sup>2</sup>)** - Esfuerzo cortante promedio de la parte móvil de la cama en cada paso de tiempo.
- **Pendiente de cizallamiento (EG Slope) (m /m)** - Pendiente de la rasante de la energía en cada paso de tiempo de salida. Esto puede ser un valor en puntos en la sección transversal o un valor medio entre las secciones transversales.

- Incrementos acumulados, en masa ó volumen, en el talweg (Mass Bed Change Cum) (toneladas) - Masa acumulativo del cambio en la elevación de la cama con el tiempo.
- Incrementos acumulados, en masa ó volumen, en el talweg (Mass Bed Change Cum) clase 10 a 20 (toneladas) - Masa acumulativo del cambio en la elevación de la cama con el tiempo, por fracción de tamaño de grano (bandejas de 1 a 20).Esto sólo muestra los contenedores de fracción del tamaño que se están utilizando.
- Cambio del Lecho (Mass Bed Change) (toneladas) - El cambio gradual de masa total en la cama para el paso de tiempo de cálculo actual.
- Cambio del lecho clase 1-20 (Mass Bed Change, class 1-20) (toneladas) - El cambio de masa incremental en la cama para el paso de tiempo actual, por la fracción de cada tamaño de grano.
- Capacidad de Transporte (Mass Capacity) (toneladas/día) - La capacidad de transporte de la masa total en el intervalo de tiempo de cálculo actual.
- Capacidad de Transporte (Mass Capacity) la clase 10-20 (toneladas/día) - La capacidad de transporte en masa, por la fracción de tamaño de grano, en el intervalo de tiempo de cálculo actual.
- d50 tapa (mm) - d50 de la capa de cobertura al final del incremento de cómputo. Utilizados en el Exner 5, blindaje de rutina.
- Subsuperficie d50 (mm) - d50 del material de la capa superficial en la final del paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5, cama clasificación y blindaje de rutina.
- d50 activa (mm) - d50 de la capa activa de la cama simple capa activa clasificación y blindaje de rutina.
- Inactiva d50 (mm) - d50 de la capa de inactivos al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5 y cama simple capa activa clasificación y blindaje de rutina.

- **Espesor de capa (Cover Thickness) (m)** - Espesor de la capa de cobertura al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5 cama clasificación y blindaje de rutina.
- **Espesor del subsuelo (Subsurface Thickness) (m)** - Espesor de la capa de la superficie al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5 y cama simple capa activa clasificación y blindaje de rutina.
- **Espesor activo (m)** - Espesor de la capa activa al comienzo de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en la cama simple capa activa clasificación y blindaje de rutina.
- **Material total en el espesor de capa: (Mass cover) (toneladas)** - toneladas totales de material en la capa de cobertura, al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5, cama clasificación y blindaje de rutina.
- **Masa inactiva (Mass Inactive) (toneladas)** - Total de toneladas de material en la capa de inactivos al final de cada incremento de tiempo de cómputo.
- **Masa inactiva (Mass Inactive) clase 10 a 20 (toneladas)** - Toneladas de material en la capa de inactivos al final de cada incremento de cómputo, por cada fracción de tamaño de grano.
- **Reducción de la armadura (Armor Reduction) (fracción)** - Fracción de la capacidad total de transporte de sedimentos se reduce a, basado en los conceptos de una computación capa de cobertura.
- **Reducción de la armadura (Armor Reduction) la clase 1-20 (fracción)** - Fracción para cada tamaño de los granos individuales, que la capacidad de transporte es reducir, basado en los conceptos de una computación capa de cobertura.
- **Descarga de sedimentos (Sediment Discharge) (t/día)** - Descarga total de sedimentos en toneladas/día que salen del volumen de control de sedimentos de una sección específica, por cada paso de tiempo computacional.

- **Concentración de sedimentos (Sediment Concentración) (mg/l)** - La concentración total de sedimentos en mg / litro de salir del volumen de control de sedimentos en el final del paso de tiempo computacional.
- **Ef profundidad (Eff Depth) (m)** - Profundidad efectiva del agua en la parte móvil de la sección transversal, en el final del paso de tiempo computacional.
- **Ef ancho (Eff Width) (m)** - Ancho efectivo del agua en la parte móvil de la sección transversal, en el final del paso de tiempo computacional.
- **Ch Manning n** -Número de Manning.  
**Número de Froude (Ch Froude Num)** - Número de Froude canal principal al final del paso de tiempo de cálculo actual.
- **Velocidad de corte (Shear Velocity) -  $u^*$  (m / s)** - Utilizados en el diagrama de Shields y varias ecuaciones de transporte de sedimentos potenciales.
- **Cubierta d90 (mm) – d90 Cover** - d90 de la capa de cobertura al final del incremento de cómputo. Utilizados en el Exner 5, cama clasificación y blindaje de rutina.
- **Subsuperficie d90 (mm)** - D90 del material de la capa superficial en la final del paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5 cama clasificación y blindaje de rutina.
- **inactiva d90 (mm)** - d90 de la capa de inactivos al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el Exner 5 y cama simple capa activa clasificación y blindaje de rutina.
- **Elevación media del canal (Ef Invertir) (m)** – Elevación media invertida del canal calculada restando la profundidad efectiva del canal principal de la elevación de la superficie del agua.
- **Cambio de masa (toneladas)** - El cambio total en la masa de la cama, acumulado en el espacio y el tiempo. Acumulación espacial es de la sección transversal actual al extremo aguas arriba del tramo del río en el que reside esta sección.

## 4.2 Hec-GeoRas

### 4.2.1 Descripción

Hec-GeoRas, es una extensión para Hec-Ras, diseñada con el fin de procesar datos georreferenciados, y en doble dirección, desde un software SIG a Hec-Ras, por la importancia que adquiere en los procesos de análisis una adecuada y precisa geometría, ó en los procesos de toma de decisiones en una correcta y ordenada disposición de los datos abstraídos.

El archivo creado con Hec-GeoRas, contiene un gran número de información, desde el trazado del rio, secciones transversales, limites entre cauce principal y llanuras de inundación, coeficientes de rozamiento, tanta información como capas de información se hayan introducido en nuestro archivo Sig.

Hec-GeoRas, requiere de un MDT en formato TIN ó GRID, que ha de ser continuo y no poseer zonas vacías de información, dado el caso se necesitara realizar un relleno de huecos.

## 4.3. Sistemas de Información Geográfica

### 4.3.1. Definición de un SIG

Un SIG (GIS en ingles) es un sistema de información especializado en el manejo y análisis de información geográfica, dicha información geográfica es una representación de la realidad estructurada en diferentes capas superpuestas conteniendo cada una de ellas información independiente respecto a topografía, hidrografía, formaciones geológicas, tipos de suelo, también puede contener información de carácter más humano como información sobre ciudades, edificaciones, vías de transporte, etc.

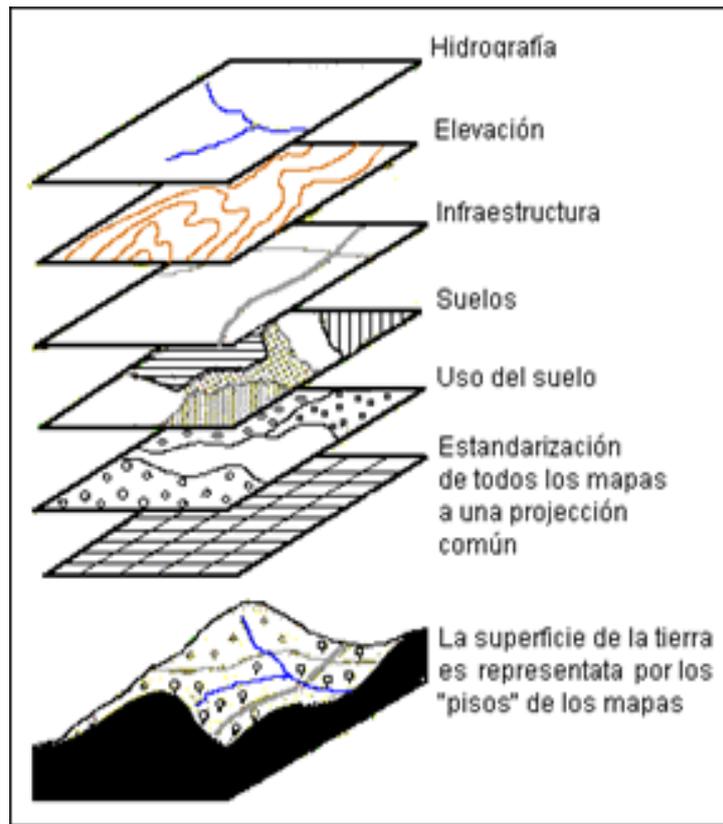


Figura 4.10 Capa de información (CLD Cádiz).

### 4.3.2. Funciones de un SIG

Un SIG tiene la capacidad de recibir información de diferentes maneras como:

- **Digitalización directa:** Mapas en papel en el cual el técnico usa una foto aérea o una reproducción escaneada de un plano y digitaliza los elementos que desee en ese plano o foto.
- **Entrada de coordenadas en archivos Digitales:** Se aplica en diversos casos donde existan bases de datos como en aparatos GPS o archivos a disposición en páginas web ministeriales.
- **Teledetección:** Técnica complementaria con los SIG en el completado de zonas sin información por medio de la adición de nuevas capas.
- **Salida de datos:** Representación grafica y cartográfica en papel y digital, aunque esta no es su principal función.

- **Manipulación de los datos:** proveer de herramientas para la edición de todas aquellas necesidades planteadas por el usuario.
- **Análisis:** El activo más importante de un SIG, producir nueva información de la información disponible inicialmente por medio de funciones como selección grafica, proximidad, sobreimposición cartográfica, rutas optimas

### 4.3.3. Elementos de un SIG. ArcGIS

Un SIG está compuesto por cinco elementos fundamentales:

- **Software:** Los programas informáticos.
- **Hardware:** Pc o estación de trabajo junto con los periféricos en la captura y procesado de la información.
- **Datos:** Representación simplificada del mundo real.
- **Personal cualificado:** El elemento más importante.
- **Procedimientos:** El análisis requiere de procedimientos bien detallados y consistentes en la producción de resultados precisos y reproducibles.



Figura 4.11 Elementos de un SIG.

## ArcGIS

Un software que reúne entre otras funciones la aplicación ArcMap, nombre utilizado para identificar la familia estandarte de los productos SIG de ESRI. ArcGIS se basa en una biblioteca común de componentes compartidos de software SIG, denominados ArcObjects. ArcGIS se compone de aplicaciones y un servidor independiente, cada aplicación puede crear, gestionar, analizar y servir datos almacenados en uno o más formatos.

- **ArcGIS Desktop:** Paquete integrado de aplicaciones SIG avanzadas y que consta de tres productos software: ArcView, ArcEditor y ArcInfo.
- **ArcReader:** Permite a los usuarios visualizar mapas publicados en alta calidad (.PMFs) creados en ArcMap.
- **Motor de ArcGIS:** Juego de herramientas para crear aplicaciones personalizadas independientes utilizando COM, C++, Java y .NET.
- **ArcPad:** Usado con PDAs para crear y gestionar datos mientras es utilizado.
- **Servidor de ArcGIS:** Una biblioteca compartida de objetos de software SIG utilizada para crear ó desarrollar aplicaciones SIG para servidor.
- **ArcIMS:** Editor de mapas, datos y metadatos por medio de protocolos de internet abiertos.
- **ArcSDE:** Gestiona y proporciona información espacial de SGBDR externos a clientes e ArcGIS.

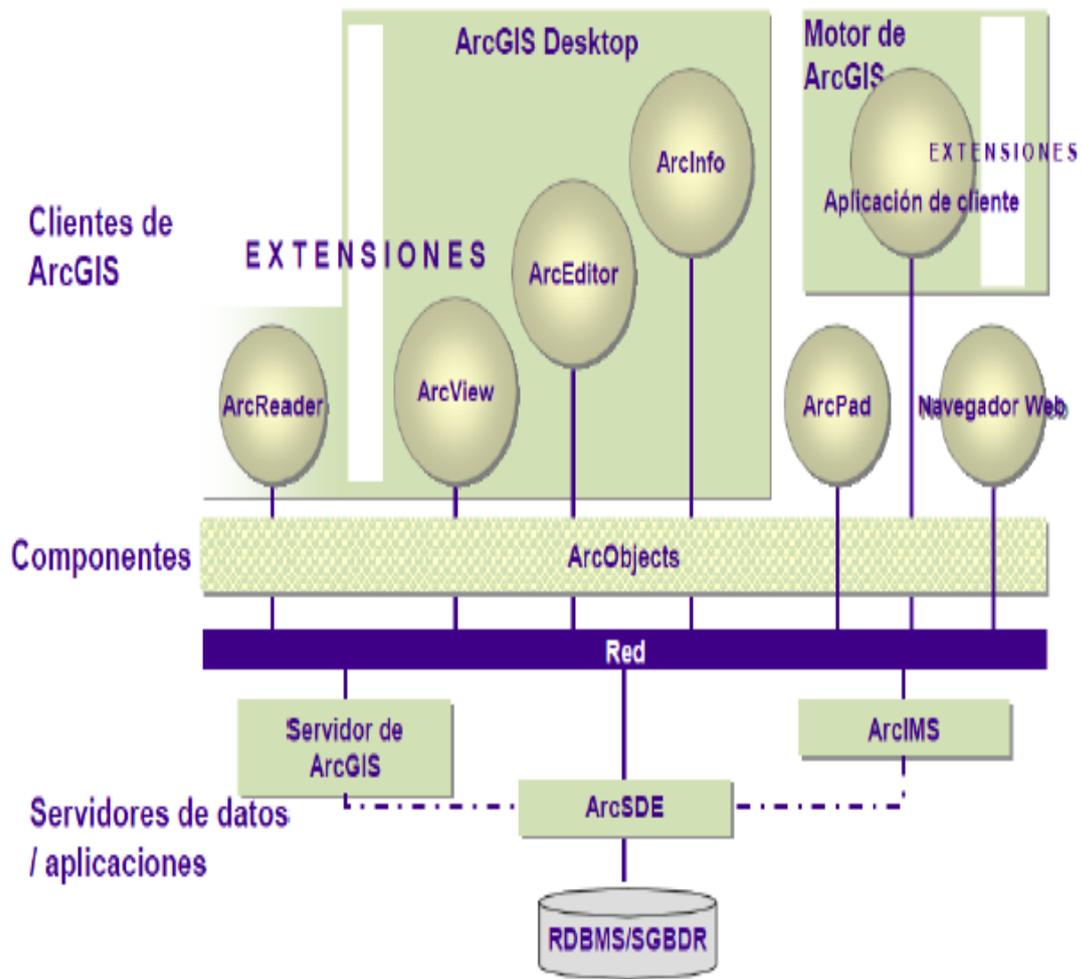


Figura 4.12 Familia ArcGIS (ESRI)

#### 4.4. Modelo Digital del Terreno (MDT)

El avance tecnológico no solo modifica los procedimientos de determinados trabajos, si no también la precisión de los mismo, en este sentido los Modelos Digitales del Terreno (MDT) logran que trabajar sobre un mapa a papel con líneas de nivel sirviéndonos únicamente de reglas y compas sea una imagen obsoleta y poco eficiente en el manejo de datos georreferenciados.

Los MDT han logrado transformar el concepto estricto de mapa, en la que cada variable era estudiada de forma diferente, a lograr un enfoque sintético, donde más de una variable logra integrarse en un sistema capaz de interrelacionarlas, logrando como resultado un modelo cualitativo como a la vez cuantitativo, este hecho forma parte de

una nueva técnica denominada Cartografía digital, actualmente inmersa en una agresiva expansión con cada progreso en el ámbito de la informática.

#### 4.4.1. Concepto y origen de los MDT

En el año 1988, ya el científico americano Joly, se aventuraba con bastante acierto a definir como modelo, una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades. Podemos clasificar los modelos en tres tipos básicos: modelos icónicos, donde la relación entre la realidad y el modelo se establece mediante propiedades morfológicas, modelos análogos, los cuales poseen alguna propiedad similar a la realidad que se desea representar, pero sin llegar a ser una réplica exacta de la realidad, y los modelos simbólicos, donde la realidad queda representada por una simbolización matemática, en este último son incluidos los modelos digitales del terreno, cuya naturaleza matemática, les permiten una no ambigüedad, una modelización con una deducción estricta, verificabilidad y repetitividad de los resultados.

Llegados a este punto podemos definir a los MDT, como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio (Doly, 1978).

Respecto a su origen, todo hace indicar que los científicos Miller y Laflamme (1958), en el laboratorio de fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sentaron las bases en la representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x,y,z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario, también conocido como modelo digital de elevación (MDE). Aunque su objetivo primario era el de lograr acelerar el diseño de carreteras, y el problema esencial era la escasa capacidad de almacenamiento de los ordenadores disponibles en aquella década, no eran conscientes del todo de la revolución que habían iniciado.

En el año 1967, de la mano del Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, se dio forma a través de un conjunto de programas denominados SYMAP, al precursor de los MDT actuales, y que ya entonces permitía el manejo de cartografía digital, ó generar mapas de isocotas a partir de puntos de altitud.

Posteriormente surgieron programas como el SYMVU, destinado a generar simulaciones 3D de los datos procedentes del SYMAP, o el GRID, que manejaba información en formato matricial.

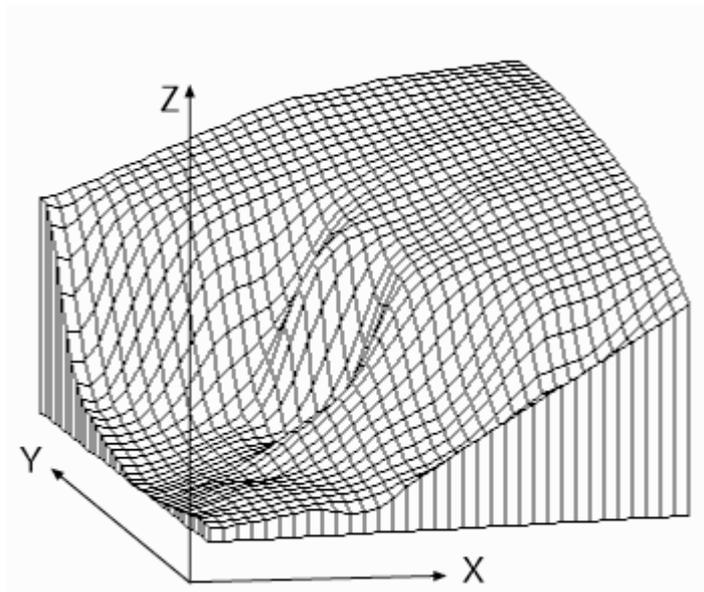


Figura 4.13 Modelo Digital del Terreno (MDT).

#### 4.4.2. Estructura de los datos en los MDT

Es cierto que la unidad básica de un MDT es un valor Z referente a la altitud acompañado de dos valores más, x e y, que logran configurar la base necesaria de la representación tridimensional, el problema radica en el diseño del sistema que sea capaz de acoger esta información, estructurarla y permitir su manipulación. En esta dirección, históricamente se a estructurado la información en dos posibles y diferentes formatos en función de su concepción básica:

- **El modelo Vectorial:** Basado en entidades o u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices. La representación de los objetos se realiza mediante puntos, líneas ó polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos se definen mediante un binomio de coordenadas, las líneas mediante vectores de puntos y los polígonos mediante una agrupación de líneas. El modelo vectorial se puede dividir en:
  - **Contornos:** Los contornos pueden ser secuenciales, donde las líneas se almacenan como cadenas de cotas, ó analíticos, donde las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinomios, etc.

- **Perfiles:** Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
- **Triángulos:** Red de triángulos irregulares (TIN).
- **El modelo raster:** Basado en localizaciones espaciales a las cuales se les asigna un valor para cada una de las variables para la unidad elemental de superficie. Los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que cubre el terreno con una distribución regular, estas unidades son denominadas Celdas. El modelo raster se puede dividir en:
  - **Matrices:** Las matrices pueden ser regulares, formadas por cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes, y escalables, formadas por cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.
  - **Polígonos:** Formadas por cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos ó hexágonos).

#### 4.4.3. Obtención de datos en la edición de un MDT

El modelo digital del terreno utilizado en la elaboración de este proyecto fue obtenido a través del método directo de altimetría por láser aerotransportado, pero este no es el único método disponible, existen una serie de métodos que pueden ser agrupados en dos grandes grupos: métodos directos y métodos indirectos.

- **Métodos directos:** Medida directa de la altitud sobre el terreno (fuente primaria). En este grupo podemos diferenciar tres métodos diferentes:
  - **Altimetría:** Altimetros radar ó laser transportados por plataformas aéreas o satélites.
  - **GPS (Global Positioning System):** Sistema de localización por triangulación.
  - **Levantamiento topográfico:** Estaciones topográficas con salida digital.

- **Métodos indirectos:** Medida estimada a partir de documentos previos (fuente secundaria).
  - **Restitución** a partir de pares de imágenes.
  - **Digitalización** de mapas topográficos.

#### 4.4.3.1. Comparativa de un MDT

Tres características permiten juzgar si un MDT es adecuado ante una necesidad particular del usuario que lo manipula:

- **Resolución:** Es la distancia entre dos puntos adyacentes.
- **Cobertura grafica:** Zona geográfica sobre la cual existe información disponible.
- **Calidad de los datos:** Depende de la aplicación ó no de tratamientos de corrección. Algunos métodos producen zonas distorsionadas, como por ejemplo las imágenes obtenidas sobre la línea de costa donde a causa de la espuma de mar puede ser distorsionados los ecos del radar, ó las nubes con la utilización de satélites, apareciendo una especie de agujeros por la intromisión de estas durante el proceso de toma de datos.

<b>DEM ASTER</b>	30 m	La Tierra entera (bajo demanda)	<u>NASA</u>	No
<b>DEM 1 grado</b>	90 m	Estados Unidos	<u>USGS</u>	Si
<b>DEM 7.5 minutos</b>	10 y 30 m	Estados Unidos	<u>USGS</u>	Si
<b>DEM CDED</b>	23 m y 90 m	Canadá	<u>CCOG</u>	Si
<b>GTOPO30</b>	30" de arco (~ 1 km)	La Tierra entera	<u>USGS/NASA</u>	Si
<b>DEM SDTS</b>	10 y 30 m	Estados Unidos	<u>USGS</u>	si
<b>NED</b>	10 y 30 m	Estados Unidos	<u>USGS</u>	si
<b>Visual DEM France *</b>	75 m	Francia	<u>IGN</u>	Si
<b>MNT BD Alti</b>	50 a 1.000 m	Francia	<u>IGN</u>	Si
<b>Litto3D</b>	1 m	Zonas litorales francesas entre - 10m y +10m	<u>IGN/SHOM</u>	Si
<b>Shuttle Radar Topography Mission  SRTM-3</b>	90 m	80% de las tierras emergidas	<u>NASA/NIMA</u>	No
<b>Huttle Radar Topography Mission  SRTM-1</b>	30 m	Estados unidos	<u>NASA/NIMA</u>	No
<b>MOLA MEGDR</b>	463 m	<u>Marte (excepto zonas polares)</u>	<u>NASA</u>	Si
<b>Reference3D</b>	30m	54 millones de km <sup>2</sup> , 80 millones en 2014	<u>IGN, Spot Image</u>	Si

Figura 4.14 Características de algunos formatos disponibles.

## Metodología de estudio

A continuación, se muestran cuales han sido las metodologías empleadas en la elaboración de este Proyecto Fin de Carrera, desde los sistemas de información geográfica y Modelos Digitales del Terreno, utilizados en la gestión de la información georeferenciada, así como el posterior análisis, centrado en el bloque transporte de sedimentos, con Hec-Ras y adecuación de los resultados.

### 5.1. Introducción

Para la consecución de un buen estudio hidráulico, se hace necesario conocer con cuidadoso detalle las distintas, y en ocasiones caprichosas configuraciones topográficas, que a lo largo del trazado del cauce se suceden en toda la extensión que abarca la zona de estudio, pero nuestro conocimiento no debe ceñirse únicamente a dicha zona, deberemos de trasladar nuestras miras, tanto aguas arriba como aguas abajo, a una distancia tal que la modificación, natural o antropogénica, del tramo de estudio no suponga una alteración de las condiciones a esa distancia, es decir, que el aumento o disminución en la lamina de agua, como resultado de una modificación del canal, coincida con el perfil de las condiciones existentes aguas arriba, y eludir que cualquier condición de contorno definida por el usuario, pueda afectar a los resultados dentro del alcance del estudio aguas abajo.

Un buen conocimiento de las configuraciones topográficas iniciales del cauce es esencial, y nos ayudará a lograr una buena modelización del mismo, en aquellos instantes en los que las limitaciones del programa Hec-Ras se hagan patentes, como por ejemplo, en la elección del calado crítico, ante la dificultad en secciones naturales complejas que contengan varios calados, (terrazas fluviales), por defecto el programa elegirá el calado más pequeño, nuestro conocimiento en este caso será determinante para lograr definir el cauce tal y como es.

Se deduce entonces, que una Visita en Campo bien planificada es de vital importancia, aún más, cuando existan dentro de la zona de estudio, algún tipo de estructura, ya sea de protección, de paso ó de regulación, que requieran de instrumentos de medida para determinar su geometría, que posteriormente será requerida en el proceso de análisis, y que deberá ser introducida manualmente en Hec-ras.



Figura 5.1 Puente camino de servicio en las proximidades del ferrocarril, Rambla del Albuñón.

## 5.2. Sistemas De información geográfica

Una vez se ha adquirido toda la información necesaria deducida tras la visita de campo, resulta necesario integrar, almacenar y editar la información geográficamente referenciada, por medio de un programa SIG, en nuestro caso utilizaremos ARCGIS y su extensión Hec-GeoRas, diseñada para procesar datos georeferenciados que posteriormente pueden ser implantados en Hec-Ras.

### 5.2.1. Extensión Hec-GeoRas

Los pasos a seguir para realizar una correcta modelización con Hec-GeoRas en ArcGis se detallan a continuación:

PROCESO:

1. Crear archivo Arcmap.
2. Añadir ó crear un Modelo digital del Terreno.
3. Crear capas de información:
  - 3.1 Strem centerline: Delimitación del Talweg.

- 3.2 Banks: Delimitación del cauce principal.
- 3.3 Flowpaths centerline: Zonas por donde prevemos que circulará el flujo preferentemente tanto por el cauce principal como por las llanuras de inundación.
- 3.4 Cross- Sectional Cut Lines.
- 3.5 Bridged/Culverts.
- 3.6 Lan Use.

A continuación se desarrollan todos los puntos anteriores.

### 5.2.1.1. Creación de un archivo ArcMap

En primer lugar, se debe ejecutar el programa ArcMap de ArcGis, aparece la siguiente ventana (figura 5.2), donde podemos elegir entre crear un nuevo archivo, utilizar una plantilla ejemplo, ó abrir un archivo ya existente, elegimos opción crear nuevo archivo.

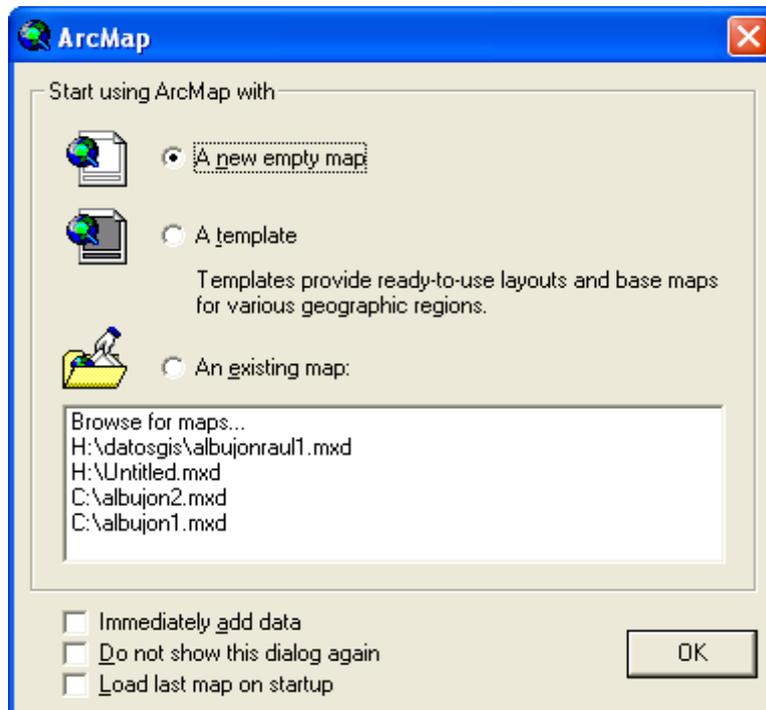


Figura 5.2 Creación archivo ArcMap

Una vez hemos iniciado nuestro nuevo archivo, debemos asegurarnos que las extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst están activadas, podremos comprobarlo en **Tools/ Extensions**.

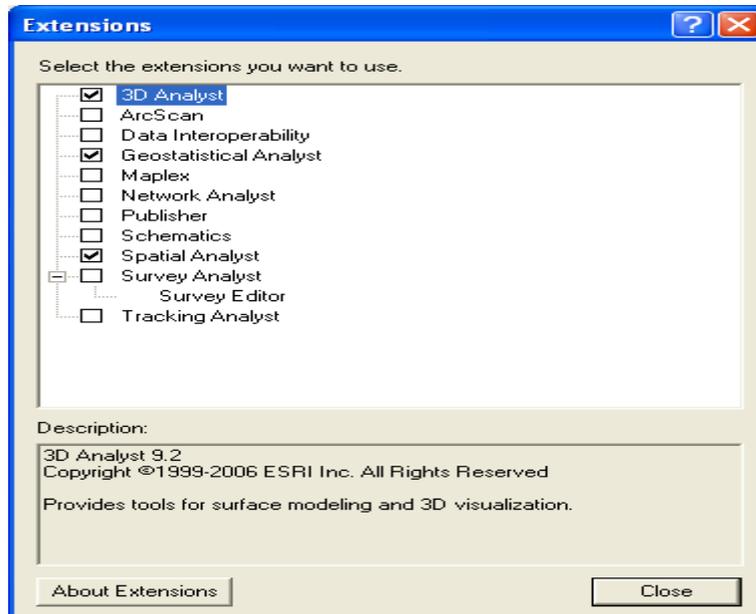


Figura 5.3 Extensiones cargadas para uso con Hec-Ras

Si es la primera vez que vamos a utilizar Hec-GeoRas, y no se encuentra en la barra de herramientas, ésta podemos personalizarla, para ello seleccionaremos **Tools/Customize**, y en la nueva ventana marcaremos la casilla correspondiente a Hec-GeoRas.

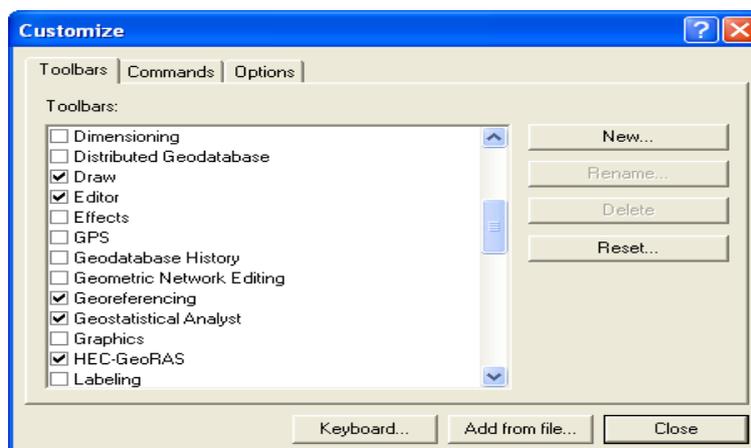


Figura 5.3 Añadir Hec-GeoRas en la barra de herramientas

El programa ya está listo para comenzar a trabajar, antes de iniciar la modelización es muy importante definir la estructura organizativa de la información que vamos a generar, se aconseja una única carpeta en disco duro y en su interior subcarpetas para cada uno de los escenarios contemplados, una vez creado el directorio procedemos a salvar el proyecto en ArcMap, para ello seleccionamos en la barra menú **File/Save**, elegimos nuestra carpeta de trabajo anteriormente creada y guardamos, se aconseja un nombre tal que rápidamente relacione su lugar dentro del proyecto, por ejemplo: ramalbutrauno, **rambla**, **albuji3n**, **tramo**, **uno**. La extensi3n utilizada para salvar los proyectos en ArcMap es *.mxd*.

Por defecto ya existe un marco de datos denominado *LAYERS*, no obstante trabajar con este marco puede ocasionarnos problemas de inestabilidad del proyecto en el futuro, para evitar esta situaci3n crearemos un nuevo marco de trabajo a trav3s de la extensi3n Hec-GeoRas, pulsando sobre **ApUtilites/ Add New Map** (Figura5.4), ser3 necesario definir un nuevo nombre para el marco creado, se sugiere " *geometr3a*" (Figura5.5) a correlaci3n del archivo que ser3 representado.



Figura 5.4 Barra de herramientas Hec-GeoRas.

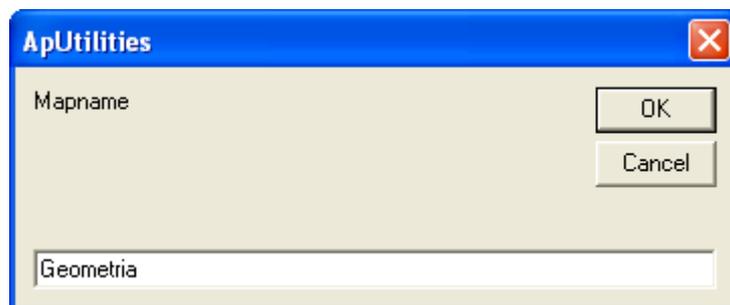


Figura 5.5 Asignaci3n de nuevo nombre para el marco creado.

### 5.2.1.2. Añadir 3 Crear un Modelo Digital del Terreno.

Hec-GeoRas permite el manejo de archivos GRID o TIN, por otra parte la utilizaci3n de estos tipos de archivos requieren de un conocimiento m3s profundo de los distintos formatos de datos espaciales, por lo que un Modelo Digital del Terreno (MDT) procedente de un vuelo por ejemplo, facilita el tratamiento de la informaci3n espacial al usuario, que solamente debe asegurarse de que el archivo se encuentra en el interior del directorio y añadirlo al marco de trabajo.

En el caso de trabajar con archivos TIN o GRID, se ha de tener presente que GeoRas no añade dichos archivos autom3ticamente, por lo que ser3 necesario añadirlo por medio de **Ras Geometry/ Layer Setup** (Figura 5.6), donde se tendr3 que indicar el tipo de

terreno y una vez seleccionado, en la pestaña inmediatamente inferior seleccionar el terreno.

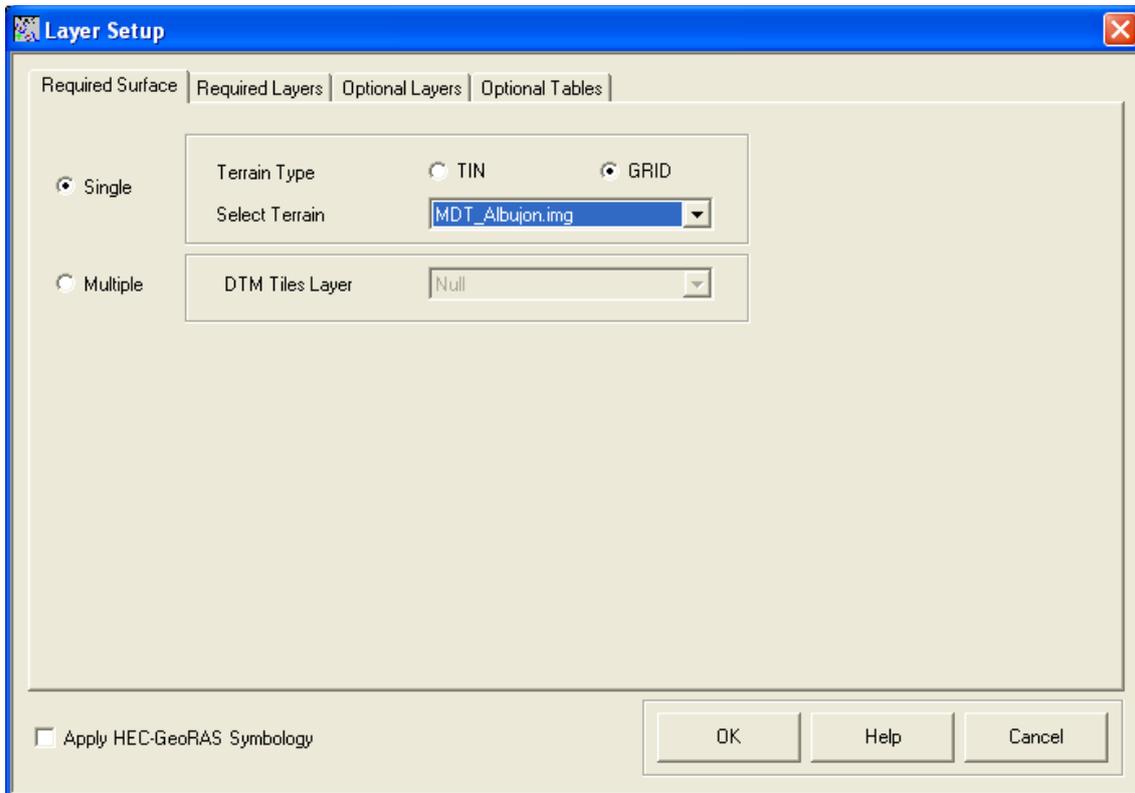


Figura 5.6 Cuadro de dialogo Layer Setup

En el caso de no contar con un MDT, podremos generarlo a partir de información vectorial formada por puntos y/o curvas de nivel. Un MDT puede obtenerse a partir de una serie de puntos distribuidos irregularmente. El problema de utilizar únicamente puntos, es que el algoritmo interpolará entre puntos demasiado lejanos, por lo que la precisión del MDT podría resultar muy baja.

Por otro lado, un MDT también puede obtenerse solamente a partir de curvas de nivel, el problema en este caso reside en que en zonas llanas, donde la distancia entre curvas es demasiado grande, el proceso de interpolación no será correcto, ya que al aumentar la distancia entre los datos a interpolar, la precisión se reduce. Además en zonas urbanas existe el problema de que las curvas de nivel no están definidas cuando se cortan con los edificios, por lo que en este caso no se dispondrá de información.

Por lo tanto la mejor opción es combinar los puntos y las curvas de nivel, de este modo los puntos actuarán como relleno en zonas llanas o urbanas y las curvas de nivel actuarán como líneas de rotura evitando la interpolación entre puntos lejanos. Así se obtendrá un mayor nivel de precisión en el MDT resultante.

Esta información podrá ser incorporada en uno o varios archivos de AutoCAD dependiendo de la extensión de la zona de estudio y de la escala en la que se encuentre la información. Será necesario unificar toda la información en un solo archivo, y este convertirlo en archivo tipo "shapefile" para trabajar en ArcGis. Se han de crear dos capas, una con curvas de nivel y otra con puntos. Posteriormente tendremos que realizar un completado de datos y eliminación de errores sobre sendas capas de información con el fin de evitar errores con el algoritmo de interpolación.

Una vez que la información cartográfica está en formato shapefile, y que además los errores y omisiones han sido corregidos, estaremos en condiciones preferentes para poder crear un Modelo Digital del Terreno. El proceso será el siguiente:

1. Con el archivo *shapfile* de curvas de nivel se genera un archivo TIN: En la barra de herramientas **3D Analyst / Create/Modify TIN From features**, indicando el campo donde está la información de altitud.
2. Al archivo TIN creado se han de añadir la información vectorial: Se ha de seleccionar una vez más **3D Analyst / Create/Modify TIN / Add Features to TIN**, indicando nuevamente donde están los valores de elevación.
3. Con el TIN creado en el paso número 2 ya sí se puede obtener el MDT en formato raster: Habrá que seleccionar **3D Analyst / Convert / TIN to Raster**, indicando el tamaño del celda, que deberá ser igual a dos veces la equidistancia de las curvas de nivel.

**NOTA:** *El proceso de interpolación consiste en definir las localizaciones de los puntos problema (en las intersecciones de filas y columnas) y después estimar la altitud de cada uno de estos puntos en función de los datos del entorno existentes en el modelo vectorial.*

Debido a que la velocidad de refresco de los GRID o TIN puede ser lenta, en algunos casos debido al tamaño del modelo y en otros al hardware utilizado, podremos crear *CONTORNOS* como recurso para ayudar a crear las capas de información, ayudando también a definir mejor la geometría de los cauces, por ejemplo si el modelo no es de suficiente resolución espacial.

Se podrá generar atendiendo en **Spatial Analyst/ Surface Analysis/ Contour**. Tendremos que especificar el modelo del cual se van a crear, intervalo de cota y el archivo de salida si los queremos conservar al acabar la sesión con ArcMap.

**NOTA:** *La capa de contornos no interviene en el proceso de extracción de datos, solo se utiliza como apoyo a la visualización.*

### 5.2.1.3. Crear Capas de información

Una vez dispongamos de un archivo TIN o GRID, podremos sobre él trabajar, creando, siempre con criterio, capas de información, que son el nivel básico de información que representa una determinada fracción de la realidad. Se entiende como una colección de elementos geográficos, como ríos, carreteras, límites administrativos,..., así como los atributos de estos elementos. La superposición de capas genera una representación simplificada de la realidad.

El orden de representación de las capas dentro de un marco de datos es ascendente, de abajo a arriba, por tanto, las capas superiores aparecerán dibujadas encima de las que están por debajo. Las capas puntuales y lineales deben representarse encima de la de los polígonos e imágenes. El orden puede cambiarse pinchando sobre la capa en cuestión y sin soltar, arrastrándola a la nueva situación deseada dentro de la tabla de contenidos.

Pinchando en la tabla herramientas de Hec-GeoRAS en **Ras Geometry/ Create Ras Layer** se puede visualizar un listado de todos los posibles atributos que puede contener el archivo geometría creado anteriormente.

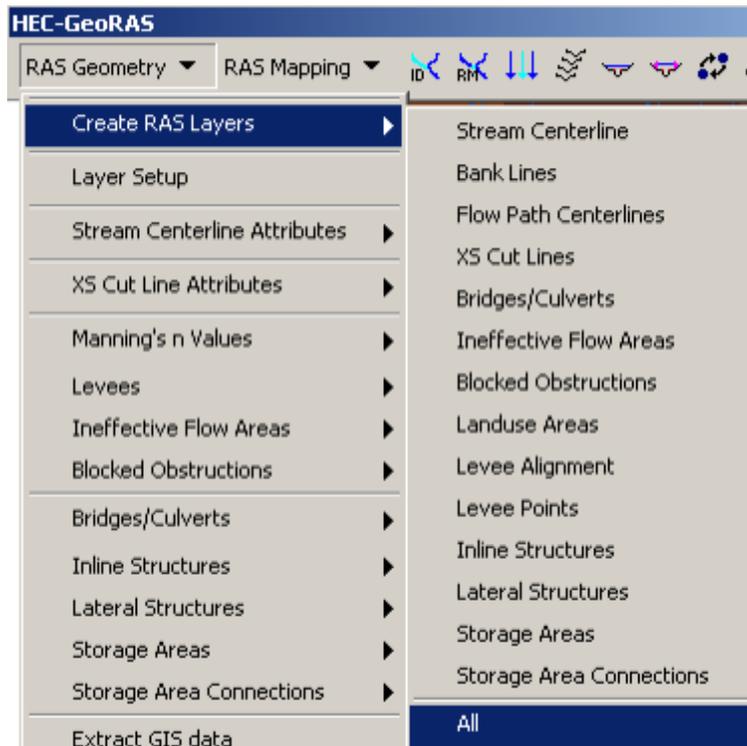


Figura 5.7 Menú Ras Layers

**NOTA:** No es aconsejable el uso de de mayúsculas, acentos, caracteres especiales ni espacios y no podrá sobrepasar ocho caracteres en su denominación.

### 5.2.1.3.1. Delimitación del Talweg (Stream Center line)

Stream Centerline es la capa representante de la línea central ó Talweg del río. Para editar esta capa de información se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Stream Centerline ha de ser creado en el sentido del flujo, desde aguas arriba hacia aguas abajo.

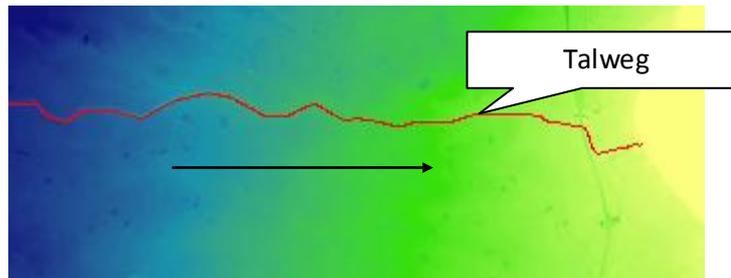


Figura 5.8 Centro de la línea de corriente

- Al crear con el Editor él, ó los tramos de río sobre el modelo, asignaremos a cada tramo el binomio nombre de tramo y nombre del río, cuya denominación ha de ser única. Para ello usaremos la herramienta



Figura 5.9 Asignación de nombre en río y tramo

- Todos los tramos estarán conectados mediante Junctions (Confluencias). Para crear las Junctions (confluencia de tres o más tramos) si existiesen, habrá que seguir los siguientes pasos:

1. Editaremos las capas Stream Centerline utilizando la herramienta **Modify Feature**.
2. Abriremos Editor/Snapping y seleccionaremos realizar seguimiento al punto final.



3. Seleccionamos **Editor/ Options** y modificaremos **Snapping Tolerance** de la pestaña General, a aproximadamente unas 10 unidades del mapa. Esto nos permitirá tener mayor precisión a la hora de unir perfectamente los tramos en un mismo punto.

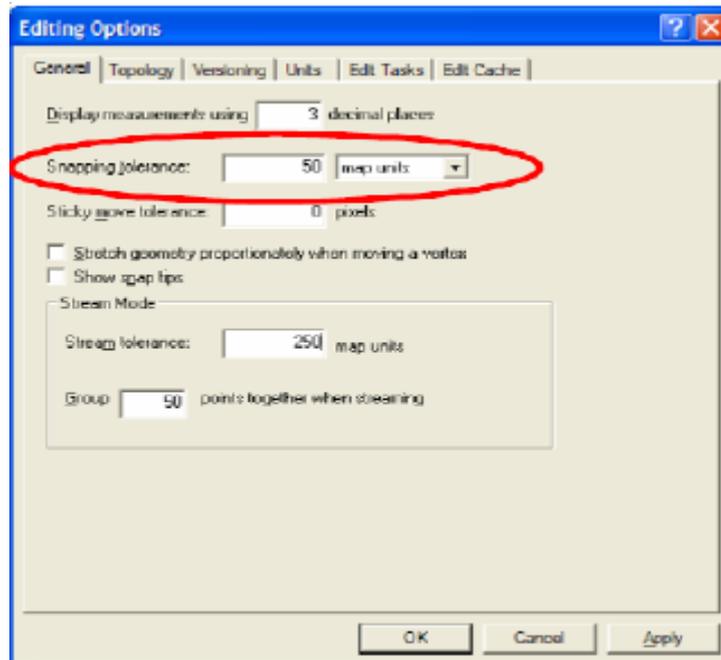


Figura 5.10 Editor de opciones

4. Activaremos el puntero del editor y uniremos los tramos.

Para verificar la conectividad, seleccionaremos **Ras Geometry/Stream Centerline Attributes/Topology**. Los campos de la tabla de atributos correspondientes a *Fromnode* y *Tonode* deben estar rellenos con los números de tramo. Una vez que estemos seguros del trazado, completaremos el resto de datos de capa, con **Ras Geometry/Stream CenterLine Attributes/Lengths|Stations**.

En esta versión de Hec-GeoRas no es necesario ejecutar **Elevatións**, aplicación encargada de extraer los datos de elevación del MDT y crear una capa 3D, pero si es recomendable en cualquier caso.

- Las Stream Centerline nunca se pueden cortar entre sí excepto las confluencias.

### 5.2.1.3.2. Orillas del Cauce Principal (Banks Lines)

La capa Banks Lines define los límites del cauce principal con la zona correspondiente a la ribera de inundación. El uso de diferentes coeficientes de rugosidad para cada una de las zonas en cada sección nos permite asignar mayores valores de rugosidad  $n$  de Manning en las riberas de inundación para dar cuenta de una rugosidad mayor a causa de la vegetación.

Para su edición se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los Banks lines pueden ser discontinuos.
- La orientación de los Banks Lines no importa, su digitalización puede hacerse en la misma dirección del flujo, en contra de la dirección del flujo, puede ser realizado en un único trazado o de forma discontinua.
- Su incorporación como capa de información puede ser opcional, en el caso de no crearla, habrá de ser implementada en Hec-Ras.

Para Editar los Banks Lines, al igual que la Stream centerline, pulsar sobre **Start editing**, y activar Task en la opción **Create New Feature**, y Target en la opción **Banks**.



Figura 5.11 Editor.

### 5.2.1.3.3. Trayectorias de flujo (FlowPaths Centerlines)

La capa de información FlowPatch Centerlines, es utilizada para identificar los centros de masas de las llanuras de inundación y del cauce principal, además de las direcciones principales de flujo. Si ya se ha creado la capa Stream Centerline, nos dará la opción de poder copiar la información referente al canal, teniendo solo que digitalizar dos líneas más que harán referencia a la llanura izquierda y derecha del canal principal.

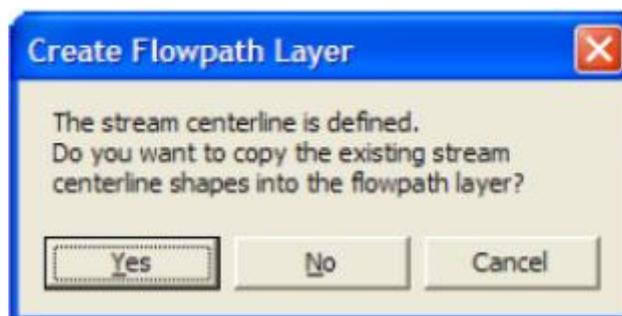


Figura 5.12 Trayectorias de flujo

Al crear esta capa de información **Ras Geometry/ Create Ras Layer/ FlowPatch Centerline**, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Flowpatch a de digitalizarse en el sentido del flujo.
- La digitalización de las líneas ha de ser continua para cada uno de los tramos creados.
- Las líneas Flowpath nunca podrán cortarse entre sí.
- La capa de información Flowpath puede ser opcional.

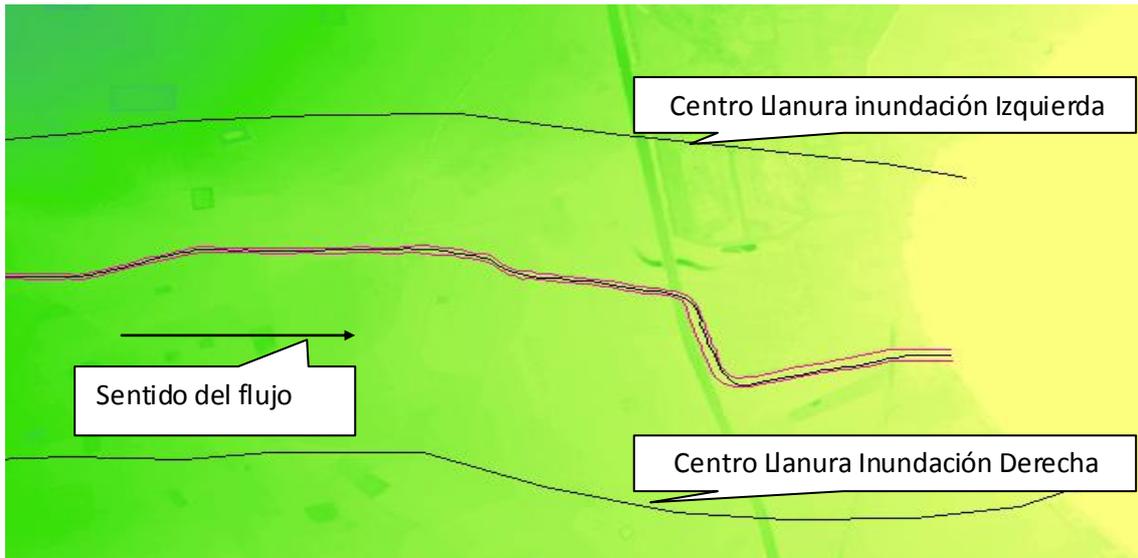


Figura 5.12 Líneas centrales de la trayectoria del flujo

Una vez han sido digitalizados los Flowpatch tendremos que identificar cada línea dentro de la capa de información, para ello en el menú Hec-GeoRas pulsaremos sobre el botón  **Assing Line Type**. Activaremos la herramienta y situaremos el puntero del ratón sobre una de las líneas Flowpatch, tras clicar sobre la línea aparecerá la ventana LineType donde se habrá de indicar si la línea representa el canal ("Chanel"), llanura izquierda ("Left Overbank") ó llanura derecha ("Right Overbank").



Figura 5.13 Tipo de línea

Una forma de verificar que la asignación de nombre a cada una de las líneas Flowpatch se ha realizado de forma correcta, será observando en la tabla de Atributos el campo *Line Type*.

Shape*	OID*	Shape_Len	LineType
Polyline	13	6597.803887	Channel
Polyline	15	4133.125661	Channel
Polyline	17	3035.035827	Left
Polyline	19	3125.638464	Right
Polyline	20	3587.071912	Channel
Polyline	22	10101.15804	Left
Polyline	24	10040.21802	Right

Record: 7 Show: All Selected

Figura 5.14 Atributos de la trayectoria de flujo

#### 5.2.1.3.4. Líneas de Corte transversal (Cross-Sectional Cut Lines)

Cross- Sections ó secciones transversales es uno de los principales insumos para Hec-ras. Las secciones transversales son representadas mediante líneas de corte, que son utilizadas para extraer los datos de elevación del terreno creando un número finito de perfiles del terreno a lo largo de todo el canal. La intersección de las líneas de corte con otras capas de información de Ras como Stream Centerlines, Banks Lines ó Flowpatht son utilizadas para calcular en Hec-Ras atributos tales como los Banks Stations (lugar geométrico de todos los puntos que separan las llanuras de inundación del canal), downstreams reach lengths (distancia entre secciones transversales) y n. Mannings. Por lo tanto la creación de un número adecuado de cortes transversales a de producir una buena representación del lecho del cauce y llanura aluvial.

En la digitalización de las secciones transversales se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las líneas que representan las secciones transversales, han de ser en la medida de lo posible perpendiculares al flujo.
- Se digitalizaran las líneas de izquierda a derecha, en el sentido natural del flujo, de aguas arriba hacia aguas abajo, además, si existiese en el cauce un estructura, por ejemplo de tipo puente o alcantarilla, será una buena práctica asegurarse de definir una sección transversal aguas arriba y otra aguas abajo de dicha estructura .
- Las secciones transversales nunca podrán cortarse entre ellas.

- Las secciones transversales de forma individual solo podrán cortar con Stream Centerline una sola vez, al igual que el resto de capas creadas con anterioridad.
- Las secciones transversales nunca podrán exceder los límites del MDT.

Para crear líneas de corte, en primer lugar generaremos la capa de información XS cut lines clicando en **Ras Geometry/ Create Ras Layer/ XS Cut Lines**, y posteriormente crearemos las secciones transversales utilizando la herramienta **Sketch**  del editor, asegurándonos que en Task esté señalada la opción **Create New Feature** y en Target la opción **XSCutLines**.



Figura 5.15 Editor

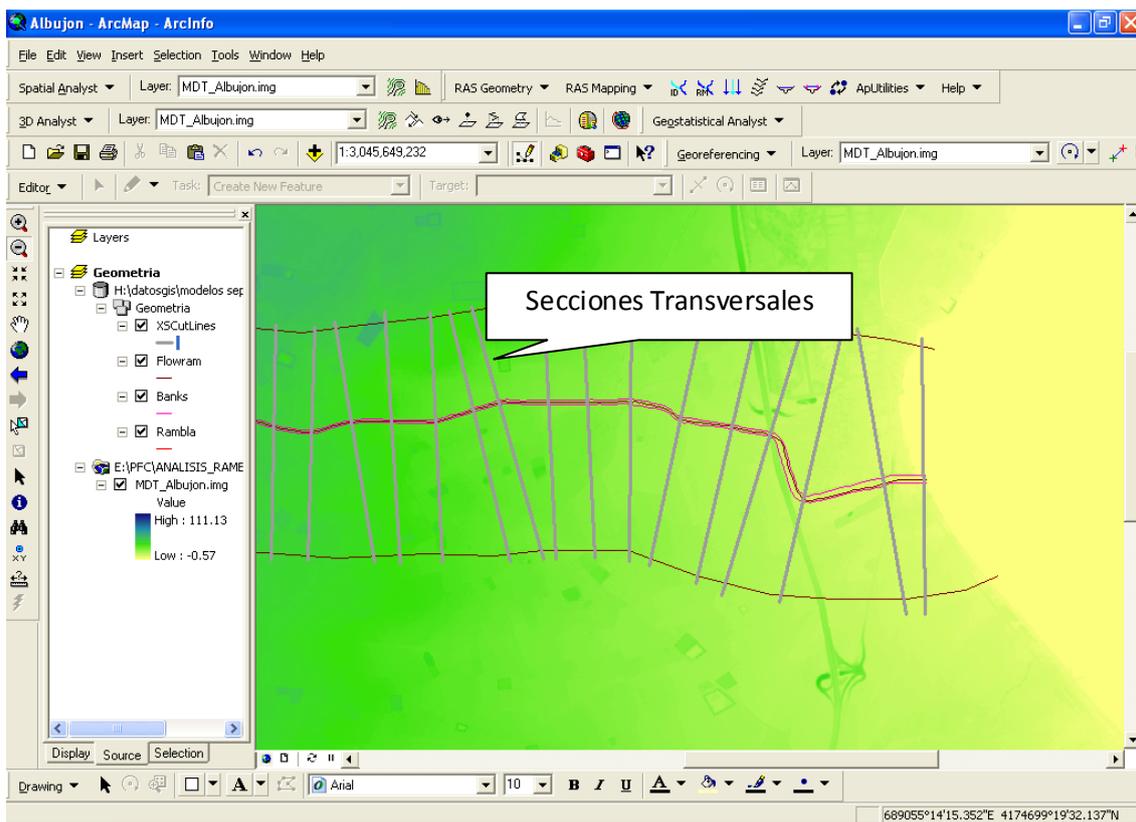


Figura 5.16 Líneas de corte transversal

Existe la posibilidad de previsualizar las secciones creadas con la herramienta **XS Plot**  y posteriormente pinchando sobre la sección deseada e indicando la capa correspondiente a las secciones y el MDT, bastaran para poder visualizar la sección en dos dimensiones como muestra la siguiente figura.

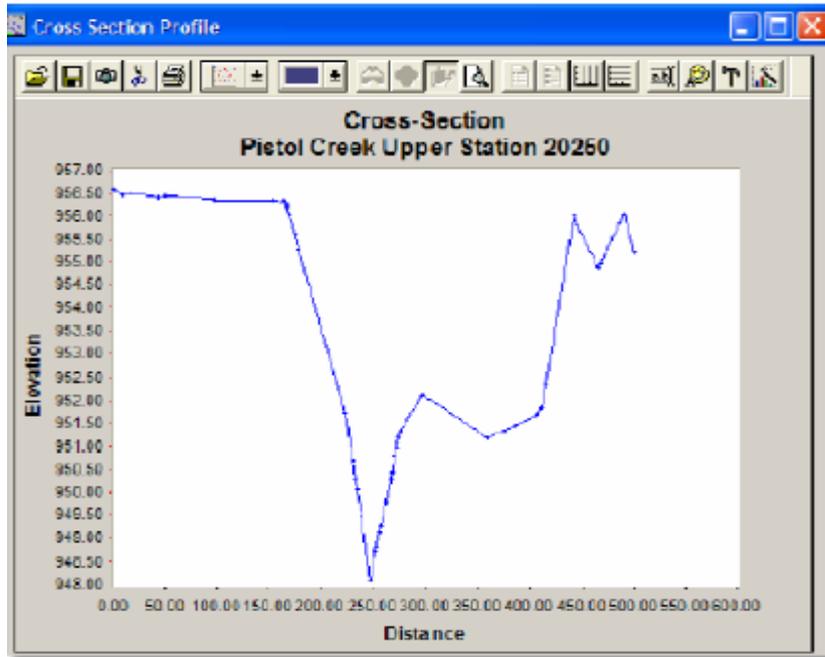


Figura 5.17 Perfil de las secciones transversales

Una vez estamos seguros de tener todas las secciones necesarias tanto en el cauce como en las zonas más singulares, hemos de generar los atributos, **Ras Geometry/ XS Cut Line Attributes/ All**. De esta forma generamos todos los atributos de forma conjunta.

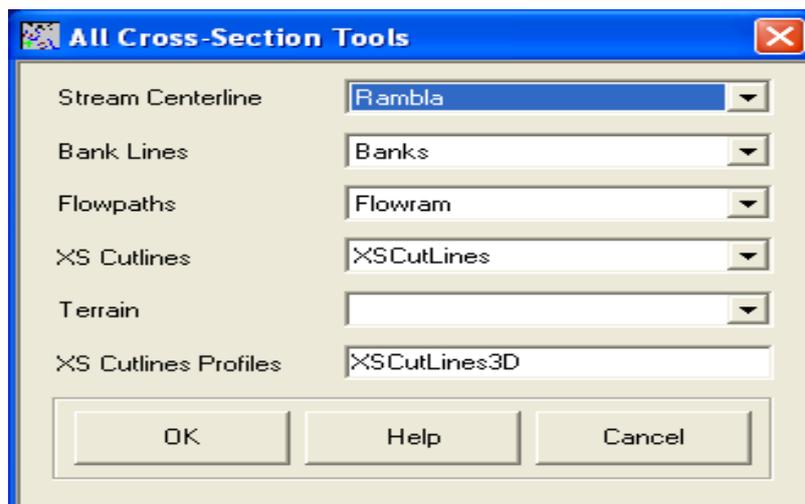


Figura 5.18 Atributos de las secciones de corte

### 5.2.1.3.5. Puentes/Alcantarillas (Bridged/Culverts)

Una vez definidas la capa de información referente a las secciones transversales, el siguiente paso será definir puentes, alcantarillas y demás estructuras que se encuentren en el ámbito del río.

Los pasos a seguir en esta capa no difiere al resto de capas ya creadas, así como el proceso de digitalización a través de las herramientas disponibles en el Editor.

Las reglas a tener en cuenta serán idénticas a las empleadas en la construcción de las secciones transversales, siendo:

- Debe digitalizarse en el mismo sentido del flujo.
- Han de cortar la Stream Centerlines una única vez.
- No pueden salir del entorno del MDT.

Se ha de tener presente que un puente o una alcantarilla son tratadas de forma similar a un corte transversal. Utilizando la herramienta de dibujo en la barra de herramientas del editor, podremos digitalizar el puente o alcantarilla. Tras digitalizar el elemento constructivo, guardar los cambios y detener la edición, es necesario asignar el nombre del río, alcance y número de estaciones, haga clic en **RAS Geometry/ Bridge|Culverts / River/Reach Names to assign river/Reach names**, luego haga Clic en **Ras Geometry/ Bridge|Culverts/ Stationing to assign station Numbers**. Además de estos atributos se debe introducir información adicional sobre el puente como el nombre y el ancho.

Shape*	Shape_Len	HydroID	River	Reach	Station	USDistance	TopWidth	NodeName
Polyline	3693.825215	378	Baxter River	Lower Reach	10507.6	40	20	Railroad

Record: 1 Show: All Selected Records: [0 out of 1 Selected.] Options

Figura 5.19 Atributos de puentes

**NOTA:** No se aconseja su uso, ésta opción no está muy depurada y puede dar lugar a errores en la importación de datos geométricos a HEC-RAS.

## Áreas Ineficaces, Obstrucciones de Bloqueo y Alineaciones De Diques.

- *Áreas Ineficaces (Ineffective Flow Areas)*: Las áreas ineficaces son utilizadas para identificar aquellas zonas que aun existiendo agua la velocidad del flujo es cero, por ejemplo aguas arriba y abajo de los estribos de un puente.

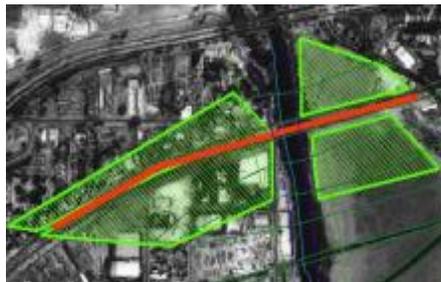


Figura 5.20 Áreas Inefectivas

- *Obstrucciones de Bloqueo (Blocked Obstructions)*: Ésta capa de información nos ayuda a identificar aquellas área donde por la existencia de un edificio, Dique de grandes dimensiones, carreteras, presas ó azudes, el flujo se ve bloqueado (zonas sin agua y sin flujo). Para definir las Obstrucciones de Bloqueo utilizaremos la herramienta **Editor**, elegiremos la opción **BlockedObjs** en **Target** y la opción **Create New Feature** en **Task**.

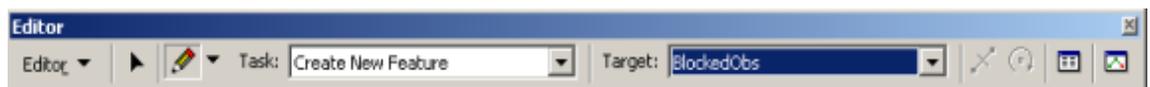


Figura 5.21 Editor de obstrucciones

Utilice la herramienta **SKETCH** para definir la obstrucción de bloqueo, salve los cambios y detenga la edición. Al igual que en las áreas de flujo ineficaz, las posiciones y las elevaciones de la intersección de las obstrucciones con las secciones necesita ser almacenada en una tabla de atributos. Haga clic en **Geometry/ Blocked Obstructions/ Positions**. No modifique los valores predeterminados que aparezcan en las casillas correspondientes a las obstrucciones de bloqueo y haga clic en aceptar.



Figura 5.22 Obstrucciones bloqueadas

- **Alineaciones de Diques (Levee Alignments):** Esta capa de información es utilizada para definir el lugar geométrico de todos los puntos que conforman una línea, a partir de la cual automáticamente Hec-Ras comenzara el proceso de llenado desde la parte posterior de dicha línea. Esta aplicación soluciona en parte, que Hec-Ras comience el proceso de llenado de las llanuras de inundación desde el mismo nivel del cauce principal. Toda la información será reflejada en las secciones transversales, cuando se ejecuten los distintos atributos de cada capa, al realizar la intersección con las Cross Sections.

#### 5.2.1.3.6. Usos del suelo (Land Use)

Llegó el momento de definir los coeficientes de rozamiento (Manning's) para cada una de las secciones. En Hec-GeoRas se logra mediante la capa Land Use, dicha información se puede gestionar de dos maneras diferentes.

1. Será creada la capa de información como de costumbre y editada para generar tantos polígonos como manning's diferentes se pretenda considerar. Debemos completar los atributos para cada uno de ellos. Es un proceso largo y de cierta dificultad en el que si no se es cuidadoso, corremos el riesgo de poder dejar zonas estériles de información y dar lugar a conflictos en Hec-Ras.
2. La segunda opción necesita de información complementaria, es decir, de una base de datos referente a usos del suelo de la zona de estudio, que se deberá de incorporar al marco de trabajo que estemos manipulando.

Si el mecanismo, ya sea por una vía u otra, ha sido realizado de forma satisfactoria, lograremos tener una red de polígonos asociados a unos atributos usos del suelo.

Si la zona de estudio es pequeña, puede que no nos resulte complicado añadir columna nueva a la tabla de atributos y complementarla con los números de Manning's que corresponda, pero si por el contrario se trata de una zona más extensa ó con mucha variedad de tipos de suelo, este procedimiento puede resultar interminable.

Para solventar este problema Hec-GeoRas dispone de una herramienta capaz de generar una tabla resumen con una muestra de los tipos de suelo. Seleccionaremos **Ras Geometry/ Manning's n Value/ Create LU-Mannung Table** y aparecerá la siguiente ventana.



Figura 5.23 Creador lu-tabla Manning

En la pestaña **Land Use** deberemos de seleccionar la capa contenedora de nuestros polígonos referenciados al uso, automáticamente en la siguiente pestaña, **Select Landuse Field**, aparecerán los encabezamientos de las columnas de atributos de dicha capa. Seleccionaremos aquella que contenga el código o nombre único para cada tipo. **Summary Manning Table** sirve para dar nombre a la tabla resumen.

Una vez creada dicha tabla, deberemos editarla y completar la columna correspondiente al valor de Manning para cada uno de los tipos obtenidos.

OBJECTID	LUCode	N_Value
15	Nearstream	0.035000
16	Urban	0.050000
17	Farming	0.060000
18	Urban	0.060000
19	HDResidential	0.080000
20	Industrial	0.100000
21	Orchards	0.055000
22	OpenSpace	0.400000
23	Crop/Pasture	0.050000
24	Commercial	0.120000
25	School	0.055000
26	Floodplain	0.040000
27	OpenWater	0.035000
28	GolfCourse	0.040000
29	WWTP	0.045000
30	Park	0.045000
31	Airport	0.040000

Figura 5.24 Atributos

El siguiente paso es extraer los valores de Manning’s correspondientes para cada sección transversal.

Seleccionaremos **Ras Geometry/ Manning’s n Value/ Extract N Values**. En la siguiente ventana deberemos indicar la capa de usos así como la extensión donde podemos encontrar dentro del directorio los valores de Manning para cada uno de los polígonos, ya sea bien de la tabla resumen ó bien directamente de la columna correspondiente en la capa de usos.

Land Use: LandUse

Manning Option:

- Manning Field: N\_Value
- Summary Manning Table: LUManning

XS Cut Lines: XSCutLines

XS Manning Table: Manning

Buttons: OK, Help, Cancel

Figura 5.25 Extractor de los valores de N

Podemos comprobar que se han creado correctamente abriendo la tabla que se ha generado.

OBJECTID*	XS2DID	Fraction	N_Value
1777	202	0	0.060000
1778	202	0.275840	0.035000
1779	203	0	0.060000
1780	203	0.259681	0.035000
1781	204	0	0.060000
1782	204	0.236644	0.035000
1783	204	0.654236	0.050000
1784	205	0	0.060000
1785	205	0.179186	0.035000
1786	205	0.749720	0.060000
1787	206	0	0.060000
1788	206	0.238721	0.035000
1789	206	0.721169	0.050000
1790	207	0	0.060000

Figura 5.26 Atributos de Manning

Llegados a este punto, concluye la primera parte relacionada con la adquisición y edición de datos geométricos georeferenciados, el siguiente paso será transformar nuestro archivo con extensión gis en otro archivo capaz de ser manipulado en Hec-Ras.

### 5.2.2. Generar archivo Ras

Después de haber verificado que todas las capas y tablas generadas en los pasos anteriores están seleccionadas, (ya que si no se ha trabajado en una única sesión, al cerrar ArcMap y volver a abrirlo, encontraremos el menú vacío), se hará clic en **Ras Geometry/ Layer Setup**. Una vez realizada esta operación seleccionaremos **Ras Geometry/ Extrac Gis Data**, en donde será obligatorio introducir la ruta y nombre del archivo a exportar.



Figura 5.27 Exportar Gis Data

**Nota:** Se aconseja el uso de una única carpeta contenedora del archivo generado dentro del directorio en el que estemos trabajando, que será utilizada para agrupar todos los datos referentes al proyecto de análisis con Hec-Ras.

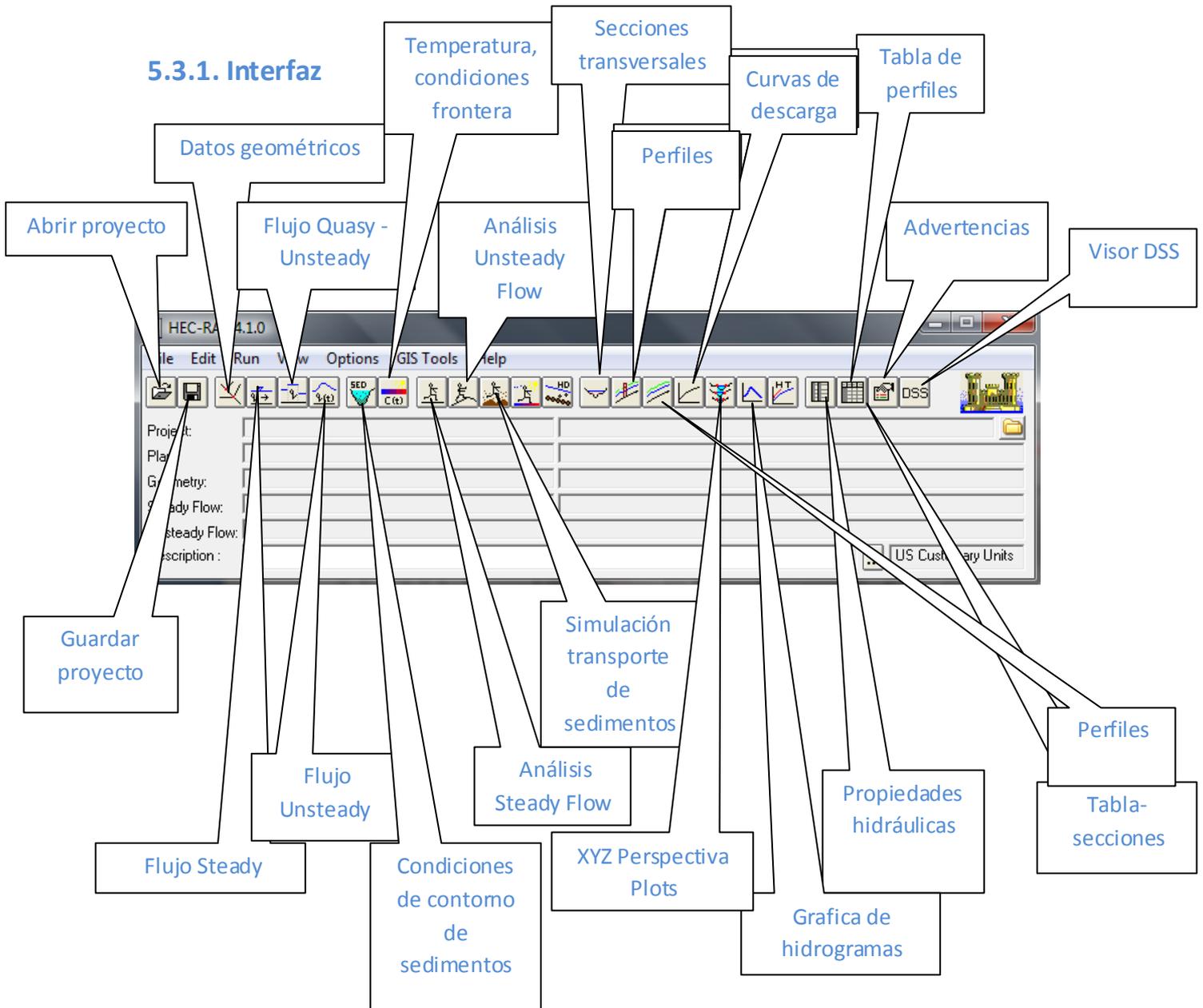


HEC-RAS 4.1.0

### 5.3. RAS

Se inicia ahora la fase de estudio hidráulico, utilizando para este proyecto el software Hec-Ras 4.1, elegido por ser capaz de realizar cálculos de perfiles de superficies de flujos de agua estables e inestables, y en su última versión cálculos relacionados con el transporte de sedimentos, esta ultima cualidad, (transporte de sedimentos), y sus peculiaridades serán analizada al detalle en los próximos epígrafes.

#### 5.3.1. Interfaz



### 5.3.2. Archivo geométrico

En primer lugar, deberemos crear un nuevo proyecto, **File/ New Project**, seguidamente accederemos al menú geométrico haciendo clic en , **Geometric Data**, en el menú principal. El archivo geométrico establece la conectividad en el sistema de un río ó rambla en nuestro caso, y es representado por un esquema en el que se han dibujado los cauces siguiendo el sentido positivo del flujo.

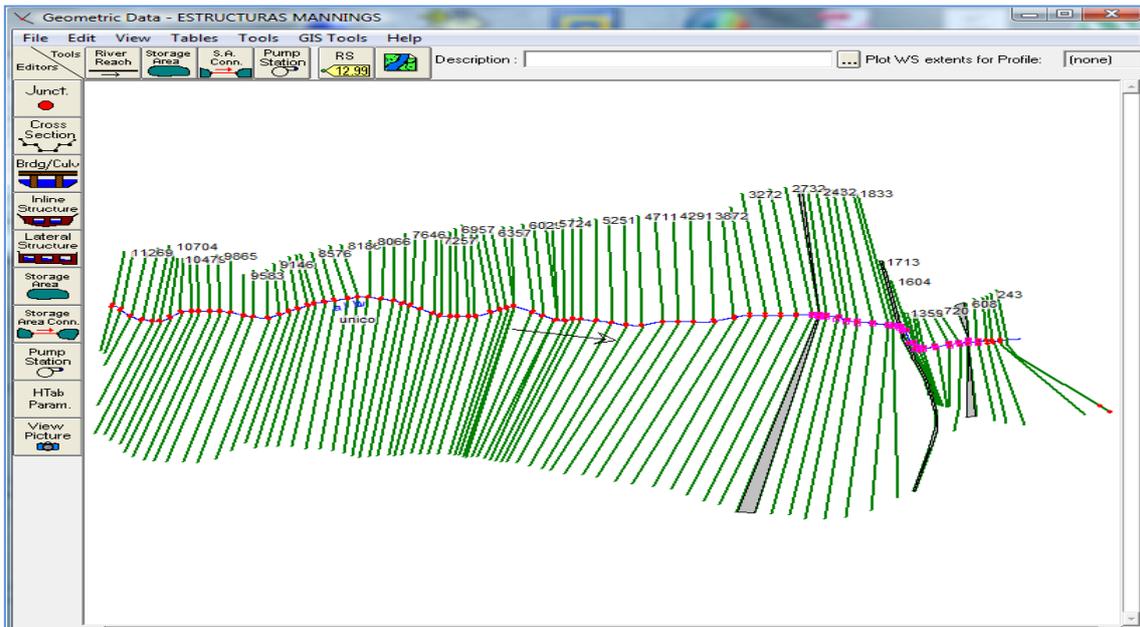


Figura 5.28 Archivo geométrico.

En el menú geométrico se podrá definir todas aquellas características referentes al contorno y estructuras del río como por ejemplo junctions, cross sections, inline structure, lateral structure,..., de una forma sencilla.



#### 5.3.2.1. Secciones transversales

Una vez completado la configuración espacial del cauce, se deben introducir las secciones transversales que definen las condiciones de borde del cauce. Para crear una nueva sección transversal se hará clic en **Option** eligiendo la opción **Add a new Cross Section**, a continuación se desplegará automáticamente una nueva ventana en la que será obligado dar nombre de referencia para la nueva sección que vamos a crear. Solo se podrá escribir números y punto o coma.

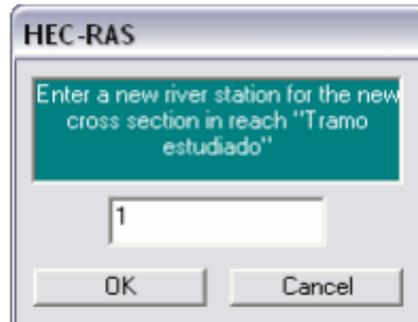


Figura 5.29 Nueva sección transversal.

**NOTA:** *Habrá que tener en cuenta que en HEC-RAS la numeración irá aumentando desde aguas abajo hacia aguas arriba.*

En la ventana referente a las características de la sección, primero nos encontramos con dos columnas, la primera columna, **Station**, mide la distancia desde la margen izquierda, en la segunda columna, **Elevation**, la cota del fondo del cauce en ese punto. En la misma ventana encontramos el apartado **Downstream Reach Lengths**, donde indicaremos las distancias desde esta sección a la inmediata siguiente aguas abajo, tanto desde **LOB**, distancia entre márgenes izquierdas, **ROB**, distancias entre márgenes derechas, y **Channel**, distancia a lo largo del centro del canal. Podemos encontrar también otro apartado referente a la acotación del canal principal, **Main Channel Banks Stations**, estos puntos definen la parte de la sección que puede considerarse como canal principal, considerando el resto de la sección como llanura de inundación. A si mismo podremos asignar coeficientes de rugosidad de Manning a las paredes y centro del cauce, como también insertar los coeficientes de contracción y expansión según HEC-RAS en los apartados **Manning's n Values** y **Cont/Exp Coefficient (steady Flow)** respectivamente, como muestra la siguiente figura.

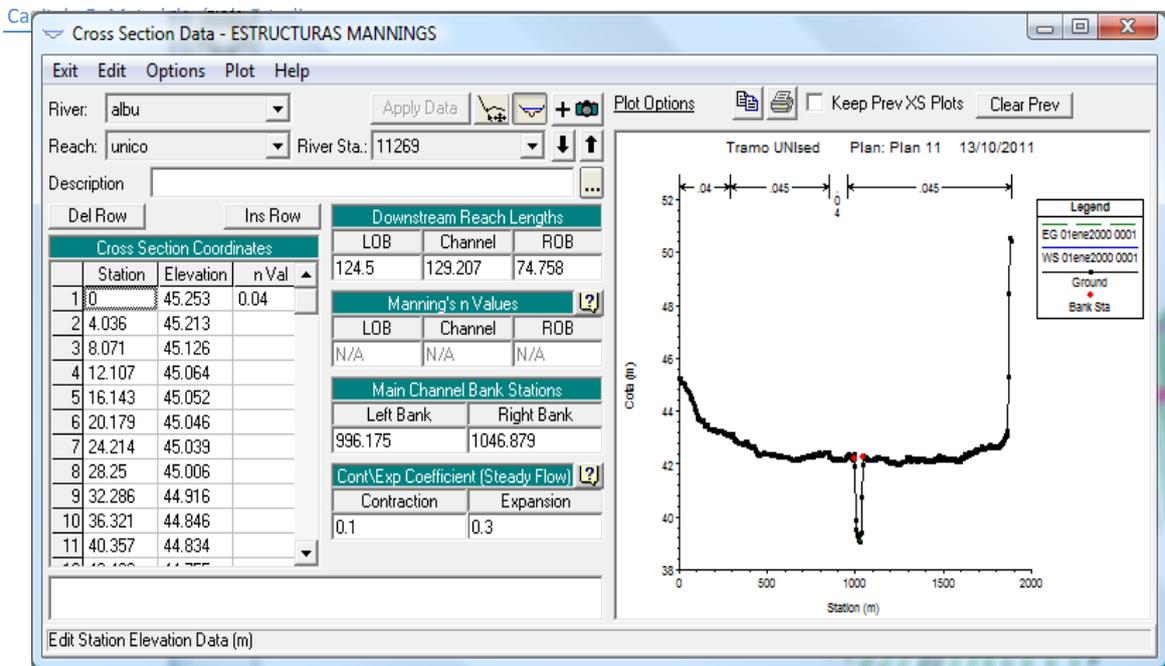


Figura 5.30 Editor de secciones transversales.

	Contracción	Expansión
Sin pérdidas por Transición	0.0	0.0
Transiciones Graduales	0.1	0.3
Secciones Típicas de Puentes	0.3	0.5
Transiciones Abruptas	0.6	0.8

Figura 5.31 Coeficientes de contracción y Expansión

### 5.3.2.1.1. Interpolación de secciones transversales

Si reducimos la distancia entre cada una de las secciones de referencia, podremos mejorar la bondad de los resultados, para ello podremos hacer uso de la herramienta de interpolación existente en **Geometric Data** si hacemos clic en **Tools/XS interpolation**, pudiendo elegir entre la opción **Within a Reach** (dentro de un tramo) ó **Between 2 XS** (entre dos secciones transversales).

Cada sección interpolada es representada junto con un asterisco (\*) seguido del número de identificación. La interpolación también afecta a todas las características de las secciones que se interpolan, incluido los coeficientes de Manning. Es importante saber que la interpolación se puede modificar en cualquier momento, siempre y cuando la interpolación anterior sea borrada.



### 5.3.2.2. Puentes y alcantarillas

Una de las estructuras que deberemos introducir manualmente, independientemente de que se haya trabajado con ArcGis, debido a que esta aplicación en Hec-GeoRas no se encuentra del todo bien depurada y puede ocasionar inestabilidad del sistema, será la de puentes y alcantarillas. En la ventana desplegable podremos encontrar todas las directrices necesarias para caracterizar de una forma fácil tanto el tablero del puente (Deck/Roadway), los pilares (Pier), los taludes ó pilares inclinados (sloping abutment) y alcantarillas (culverts), también deberemos definir las áreas de flujo ineficaz así como las pérdidas de contracción y expansión en la zona de influencia del puente.

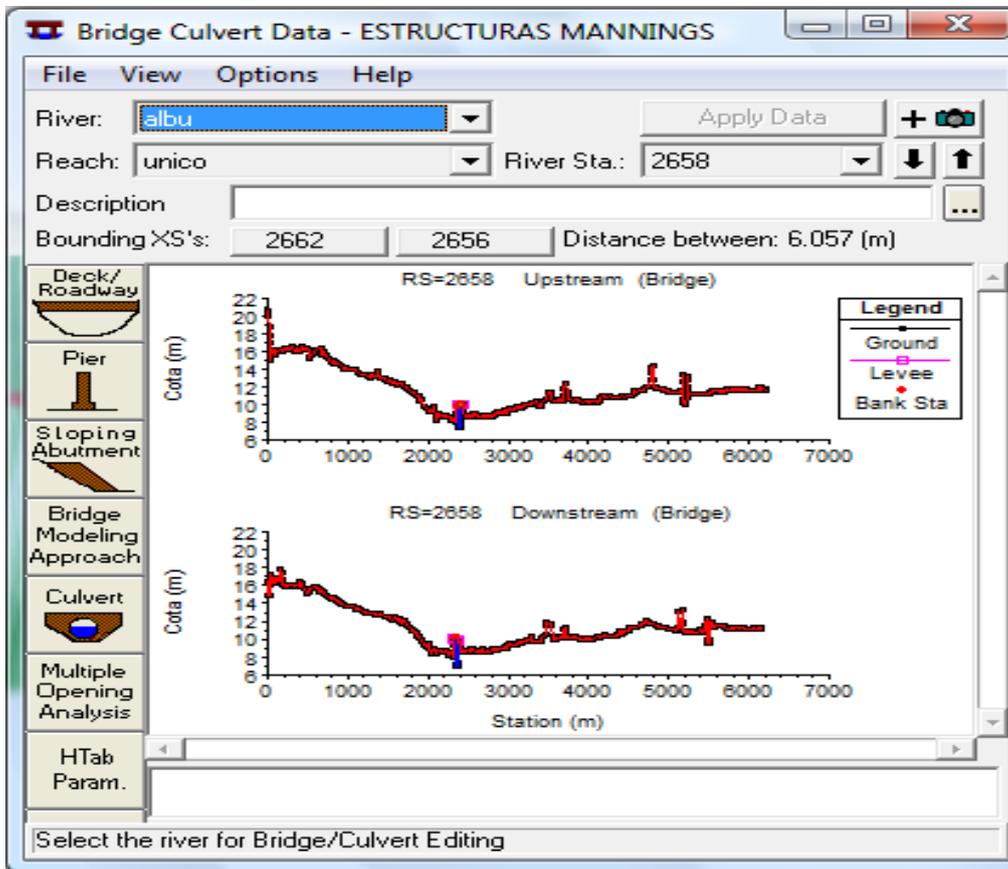


Figura 5.32 Editor de puentes y alcantarillas



### 5.3.2.2.1. Tablero (Deck Roadway)

Una vez abierto el editor Deck Roadway, observamos que la primera entrada en la zona superior hace referencia a **Distance**, que es la distancia entre la cubierta del puente y la sección transversal inmediata aguas arriba, el siguiente campo hace referencia al ancho de tablero denominado **Width**, y por último también podemos encontrar **Weir Coef**, coeficiente de flujo de vertedero, del que hablaremos de forma más extendida en los próximos epígrafes. En la sección central de la ventana podemos editar la cubierta a través de tres columnas en la que podremos definir la estación (**Station**), la elevación superior (**High Chord**), y la elevación inferior (**Low chord**), todo ello para las secciones aguas arriba (**Upstream**) y aguas abajo (**Downstream**) del tablero. Si tanto los datos de la sección anterior y posterior del puente son idénticos, el usuario solo deberá editar los datos para una de las secciones y clicar sobre la opción **copy us**. En la parte inferior de la ventana encontramos **U.S Embankment SS** y **D.S Embankment SS**, que corresponden a la pendiente del talud aguas arriba y aguas abajo respectivamente. En la parte inferior del editor del tablero encontramos tres campos adicionales, el primero es la inmersión admisible máxima, esta variable es una relación de la profundidad del agua aguas abajo a aguas arriba de la pendiente de energía. Cuando la relación se excede Hec-Ras ya no considera el tablero como una presa, cambiando el método de cálculo de la energía. Para concluir en zona más baja del editor encontramos el último campo que hace referencia a la mínima elevación del flujo, determinando cuando el flujo de vertedero comenzará a ocurrir en el puente. Si esta campo se deja sin rellenar, Hec-Ras utilizará el valor más bajo de High Chord en el lado aguas arriba del puente.

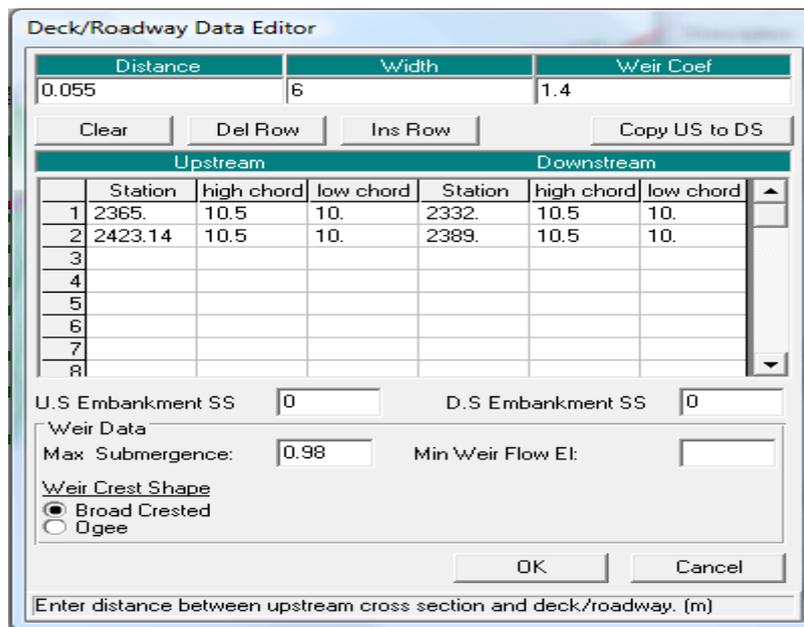


Figura 5.33 Editor de tablero.



### 5.3.2.2.2. Pilares (Pier)

Seleccionado el icono Pier y antes de empezar a editar, el usuario debe saber que nunca deberá incluir los pilares como parte de la tierra o del tablero, puesto que la ecuaciones utilizadas en los cálculos ya contemplan dichos elementos por separado. El editor establece el primer pilar como pilar nº1, en la parte inferior podemos fijar las estaciones, que hacen referencia a la geometría de la sección transversal del pilar aguas arriba y aguas abajo, donde el usuario deberá actuar con el máximo cuidado al valorar que la sección transversal del pilar puede ser diferente aguas arriba respecto aguas abajo y viceversa.

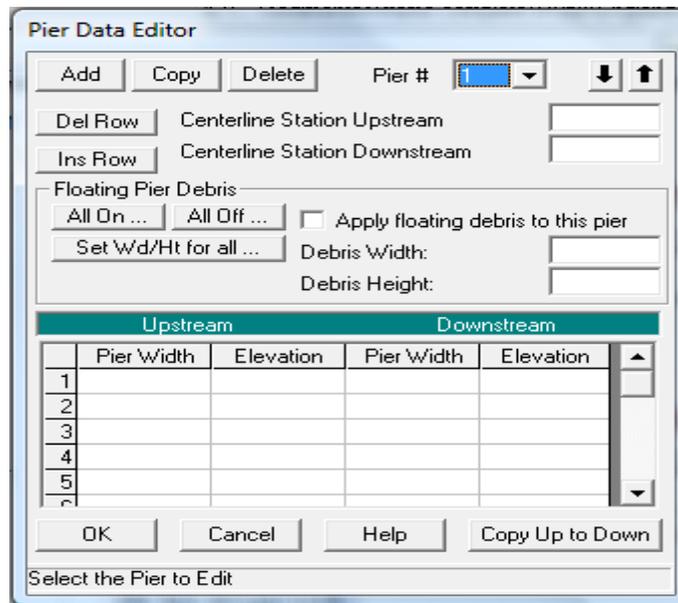


Figura 5.34 Editor de pilares.

### 5.3.2.2.3. Áreas de flujo ineficaz (Ineffective Flow Areas)

Una vez que se han introducido los pilares y taludes laterales, queda por determinar las áreas de flujo inefectivo debidas al puente. El concepto de flujo inefectivo representa al área de la sección transversal en la que el agua es acumulada, este fenómeno se produce lejos de la apertura del puente. El editor de áreas de flujo inefectivo podemos encontrarlo en **Geometric Data/ Tools/ Ineffective Areas**.

### 5.3.2.3. Importar datos geométricos

Podremos evitar introducir todos los datos geométricos mostrados hasta ahora de forma manual, facilitando la labor del modelador, gracias al trabajo previo desarrollado mediante el software ArcGis y su extensión para Hec-Ras, Hec-GeoRas.

Hay que prestar atención que la precisión de las imágenes geográficamente referenciadas utilizadas en la creación del modelo utilizado y de la pericia del modelador, podrán influir sobremanera en la misma proporción en las conclusiones que podamos vislumbrar una vez se haya ejecutado Hec-Ras.

Será necesario en primer lugar importar el archivo geométrico creado con Hec-GeoRas, dicho archivo podremos obtenerlo si hacemos clic en la interfaz Hec-Ras en geometri data sobre **File/ Import Geometry Data/ Gis format**. Seleccionando el archivo a importar, se despliega la ventana **Import Geometry Data**, compuesta por varias pestañas, la primera **Intro**, donde debemos seleccionar el sistema de unidades en el que vamos a trabajar, la segunda **River Reach Stream**, mostrará los tramos creados existiendo la posibilidad de seleccionar los tramos a nuestro antojo, la tercera pestaña **Cross Sections and IB Nodes** incluye toda la información existente en las secciones y que deberemos de comprobar que todos sus elementos se encuentren seleccionados, de lo contrario habrá que regresar a Arcmap y generar un archivo nuevo.

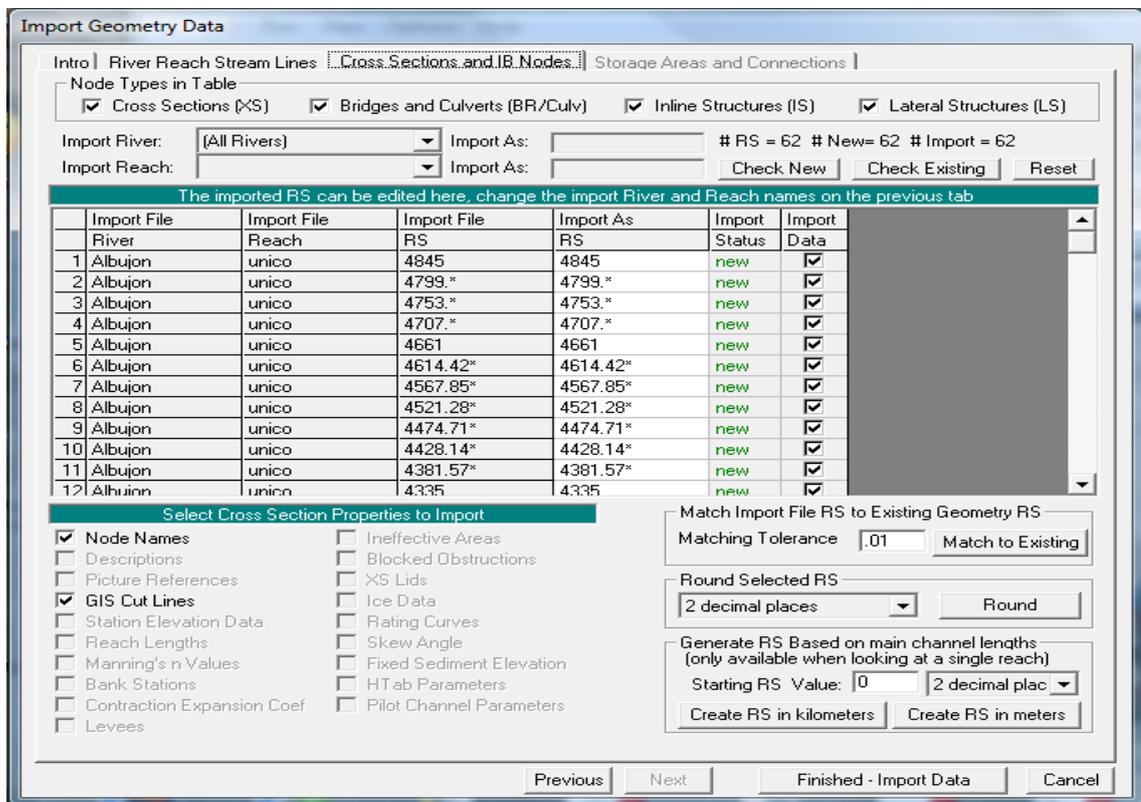


Figura 5.35 Editor para la importación de datos geométricos.

Una vez nos hemos cerciorado que todo las pestañas están debidamente señaladas pulsaremos sobre **Finished-Import Data**, y ya tendremos a disposición en Hec-Ras nuestro archivo geométrico debidamente editado, a falta de cumplimentar el editor de puentes, que como ya dijimos con anterioridad se hacía necesario editarlo desde Hec-Ras al ocasionar desde Hec-GeoRas problemas de inestabilidad.

Es necesario sobre las secciones creadas realizar un filtrado de puntos, ya que Hec-Ras tolera un máximo de 500 puntos por sección, cifra muy superior la obtenida con el modelo digital que logra extraer un punto por celda. Esta disminución selectiva de puntos se logra haciendo clic dentro del editor de geometría en **Tools/ Cross Section Point Filter**, y dentro de la ventana deberemos añadir todas las secciones, indicando el número de puntos por sección a conservar.

Al pulsar sobre **Filter Point Son Selected XS** pondremos en marcha el algoritmo encargado de realizar el filtrado de puntos, que en ocasiones indicará un mayor número de puntos eliminados respecto de los conservados, no será motivo de peligro ó alarma puesto que el mismo algoritmo evitará que se produzca cualquier tipo de deformación en la sección.

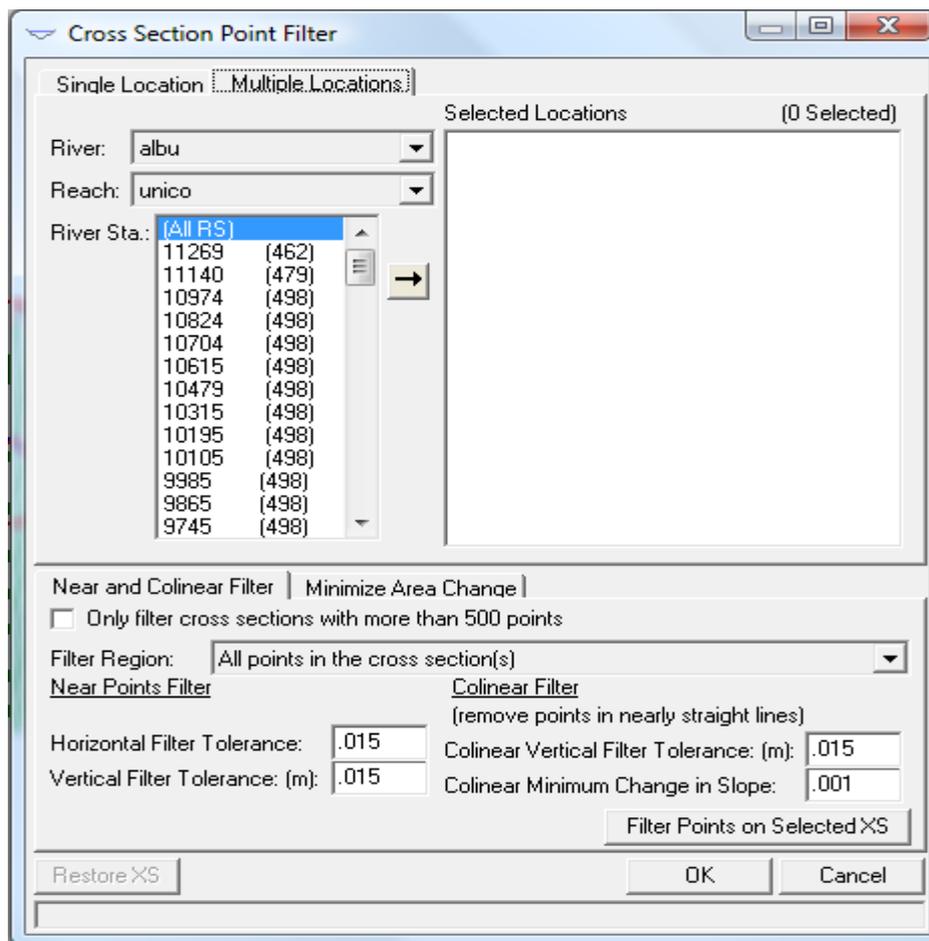


Figura 5.36 Filtrado de puntos en secciones transversales.

También deberemos introducir los valores de Manning, es recomendable por una mayor operatividad de los datos, introducir estos de forma masiva en una única tabla, para ello en el menú gemetric data pulsaremos sobre **Tables/ Manning's n or k Values**.

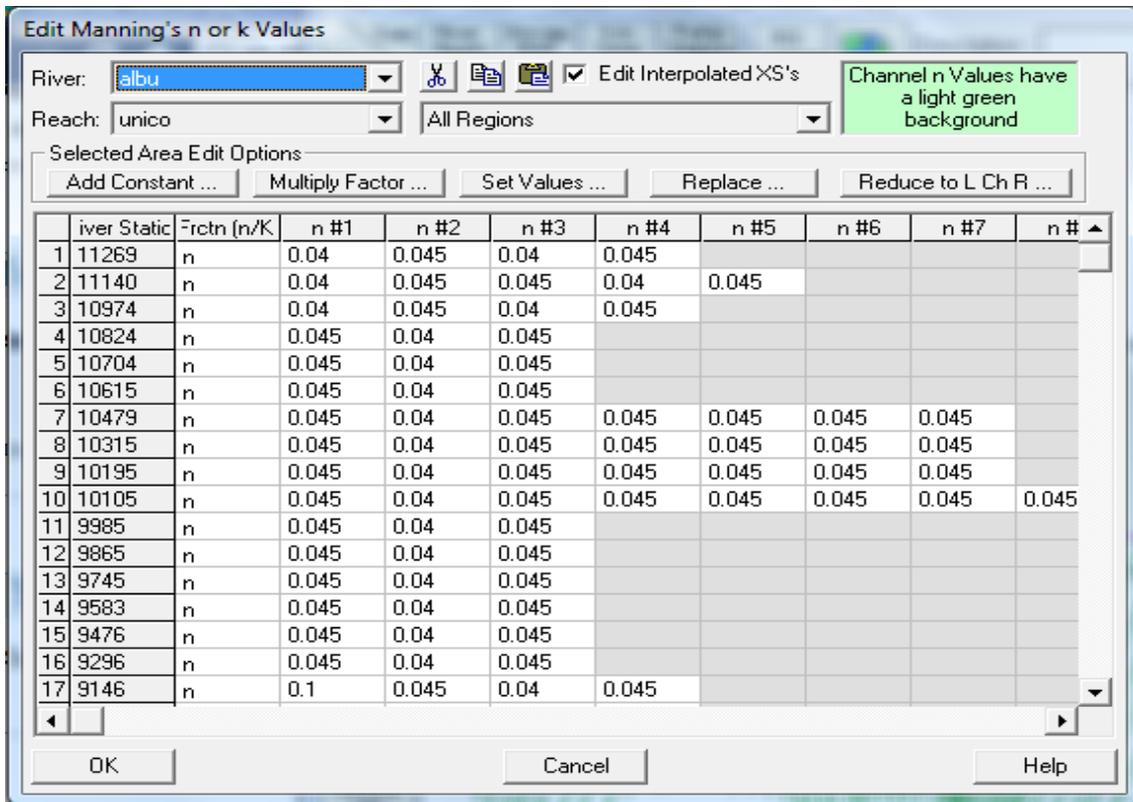


Figura 5.37 Editor de valores de Manning's n o k

Solo quedará visualizar las secciones y comprobar que todos los campos del editor geométrico están bien complementados.

Una vez finalizado el aspecto geométrico de Hec-Ras, solo quedará definir las condiciones de flujo, las características del sedimento y temperatura, aplicar la simulación y analizar los datos obtenidos.

### 5.3.3. Análisis transporte de sedimentos

Si observamos el cuadro de dialogo que aparece a continuación, observamos que los elementos necesarios para realizar con Hec-Ras un correcto análisis de sedimentos son cuatro: Un plan de análisis de sedimentos, archivo geométrico, archivo de flujo Quasi no permanente y archivo de sedimentos.

A continuación se detallan las peculiaridades en la creación de cada uno de estos archivos.

Antes de realizar el análisis de transporte de sedimentos, se recomienda primero realizar algunas modelaciones en flujo permanente como forma de calibrar el comportamiento hidráulico del río ó rambla, resolviendo de esta forma cualquier problema que pudiera presentar el flujo, adquiriendo así un modelo hidráulico consistente antes de introducir la variable sedimentos en el mismo.

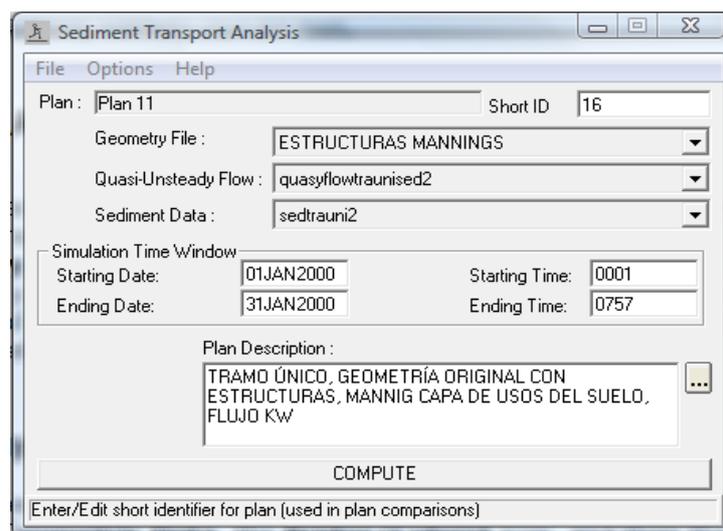


Figura 5.38 Análisis de transporte de sedimentos.

#### 5.3.3.1 Archivo de sedimentos



El editor del archivo de sedimentos está compuesto por dos elementos principales, condiciones iniciales y parámetros de transporte por un lado y condiciones de contorno por otro. Dentro de las condiciones iniciales y parámetros de transporte podemos encontrar dos zonas bien diferenciadas, en la zona superior podemos encontrar hasta seis campos diferenciados en nombre, tramo, función de transporte, método de clasificación, método de velocidad de caída y volumen de control de sedimentos. Mientras en la zona inferior podemos encontrar la granulometría definida para cada sección.

### 5.3.3.1.1. Condiciones iniciales y parámetros de transporte

#### Función de transporte

Podemos seleccionar según característica de sedimento la función más apropiada para la modelización entre las siguientes:

- Ackers & White (1973)
- Engelund & Hansen (1967)
- Copeland's from Laursen (1968,1989)
- Meyer, Peter & Müller (1948)
- Toffaleti (1968)
- Yang (1973,1984)
- Wilcock (2001)

#### Método de clasificación

Se ha de seleccionar un método de clasificación, que hace referencia al espesor del lecho móvil y su seguimiento vertical. Hec-Ras nos deja elegir entre:

- **Exner 5:** Modelo con tres capas, que incluye la capacidad de formar un estrato que limite la erosión del material, en aquellas profundidades que por la existencia de material más resistente se produzca un armado de lecho natural.
- **Active Layer:** Representa la simplificación de un lecho con dos capas, con esta opción el espesor de la capa activa es igual al diámetro  $d_{90}$  de la capa, siendo entonces un método válido solo para lechos de grava y destinado en particular para el uso con el método de transporte Wilcock.

#### Método de velocidad de caída

Existen varios métodos para calcular la velocidad de caída de los sedimentos, el usuario debe seleccionar el algoritmo más apropiado. Las opciones que Hec-Ras incluye son:

- Ruby
- Toffaleti
- Van Rijn
- Informe 12

## Granulometría del lecho

Se ha de tener en cuenta que cada sección debe tener una graduación asociada. Hec-Ras requiere la creación de la curva granulométrica del lecho y que podrá asociarse a las funciones de arrastre. La Curva Granulométrica corresponde a muestras tomadas del lecho del río dentro del proceso de toma de datos. La curva se crea y edita pulsando el botón **Define/Edit Bed Gradation**, que pone en marcha una nueva ventana, deberemos pulsar sobre **New Bed Gradation Sample** y asignar un nombre a la curva granulométrica. La curva granulométrica puede ser representada mediante dos formas:

- **%Finos:** Curva de graduación acumulada del lecho con más finos por ciento asociadas a la media geométrica de cada clase de grano. El listado de diámetros puede ser modificado en **Sediment Data/ Options/ User Defined Grain Classes**.
- **Clase de grano Fracción/peso:** La fracción de cada especie respecto del peso especifica la clase.

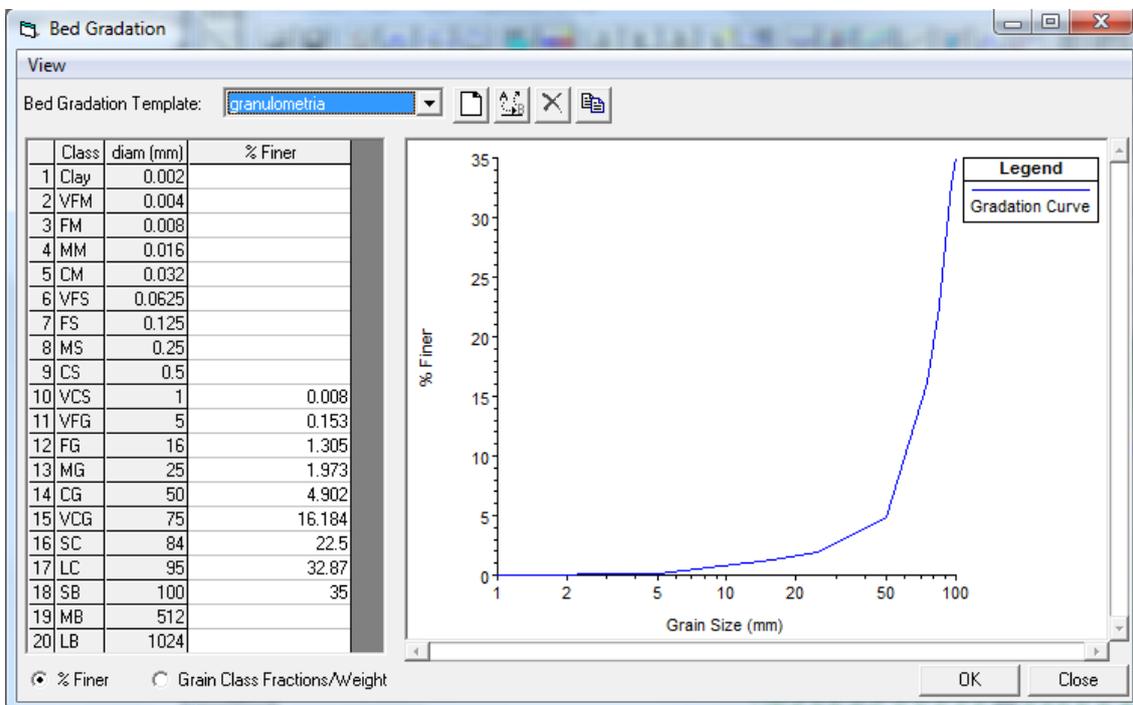


Figura 5.39 Granulometría.

## Profundidad Máxima o Elevación Mínima

En la zona inferior del editor del archivo de sedimentos encontramos una serie de columnas que hacen referencia a ciertas características de cada una de las secciones dispuestas en filas. Las características dispuestas en columnas son:

- Profundidad Máxima: La columna **Max Depth** hace referencia al espesor máximo vertical del volumen de control, es decir, la distancia inferior al fondo del cauce. Cuando esta opción es seleccionada Hec-Ras calcula la cota mínima de erosión como la del fondo del canal menos la profundidad máxima.
- Profundidad Mínima: La columna **Min Elev** hace referencia a la mínima elevación vertical del volumen de control, es decir, permite al usuario definir una cota bajo la cual el cauce no puede ser erosionado, generalmente usada para definir armado del lecho.

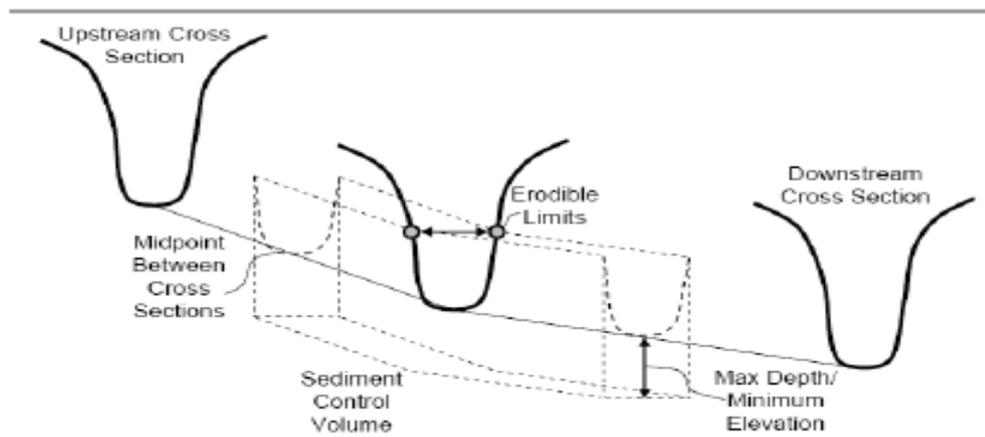


Figura 5.40 Profundidad máxima / Mínima elevación

- Station Left / Station Right: Son los puntos que hacen referencia a la delimitación del cauce principal respecto de la llanura de inundación y que pueden ser incorporados automáticamente haciendo clic sobre el botón inferior **Use Banks for Extents**.

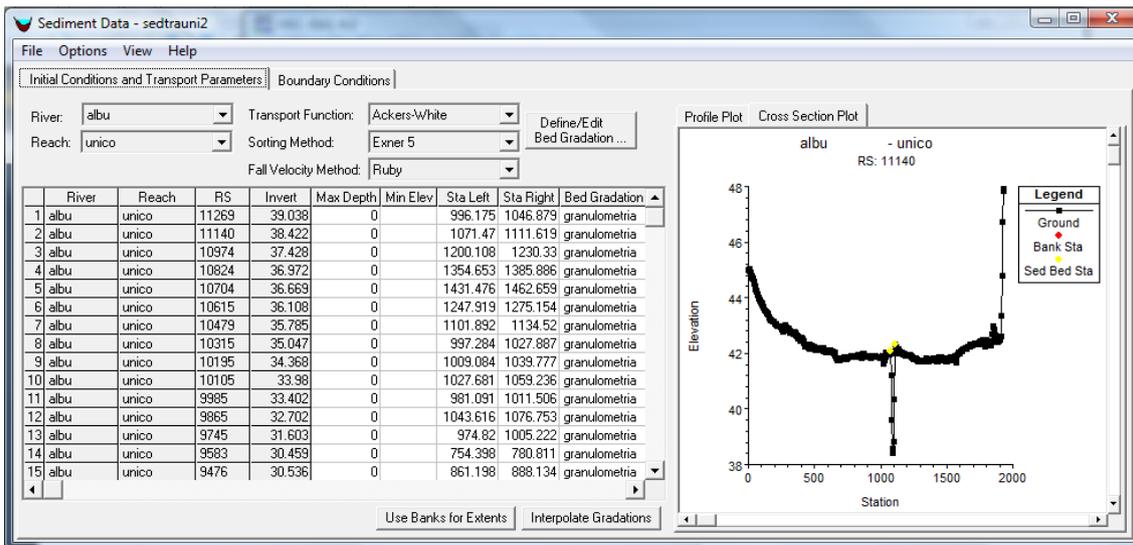


Figura 5.41 Editor de Sedimentos / Condiciones iniciales y Parámetros de Transporte

### 5.3.3.1.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno dan la posibilidad al usuario de poder especificar la carga de sedimentos en diferentes ubicaciones y formatos que serán automáticamente adicionados al modelo. En esta ventana podemos incidir sobre que secciones se van a producir las distintas condiciones de contorno si hacemos clic en **Add Sediment boundary locations**.

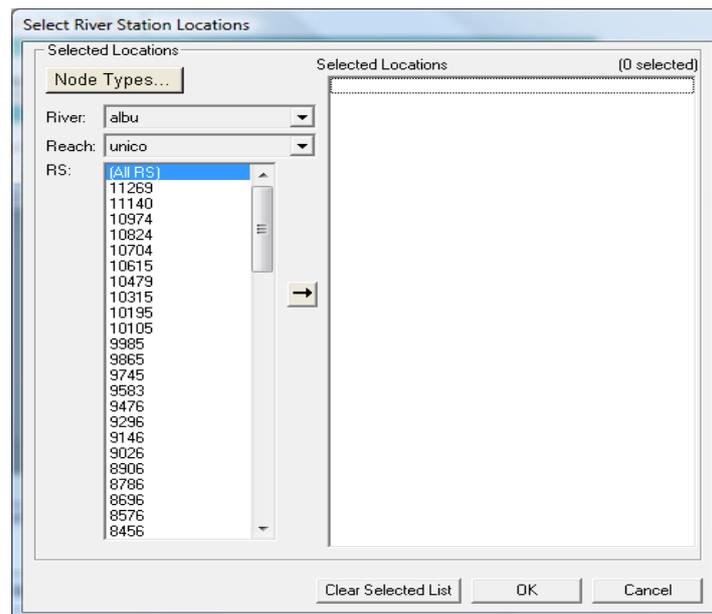


Figura 5.42 Selección de ubicaciones

Hec-Ras da la opción de elegir entre tres condiciones de contorno:

- Rating curve.
- Sediment Load Series.
- Equilibrium Load.

### Curva de descarga (Rating Curve)

La curva de descarga determina el ingreso de sedimentos basándose en el incremento del caudal de agua. El incremento del caudal se puede dar por incrementos en la sección transversal límite aguas arriba, por incrementos laterales ó por incrementos laterales uniformes.

En la ventana referente a la curva de descarga, cada columna tiene un valor de caudal y una carga total de sedimentos ingresada como masa por tiempo (ton/día). La carga de sedimentos de cada tipo de partícula debe ser especificada mediante una fracción de porcentajes ó fracciones decimales no acumulativas. Estos porcentajes o fracciones deben ser introducidos para cada tamaño de partícula, si el total no suma 100 o 1.0 Hec-Ras ajustará los valores durante el cálculo.

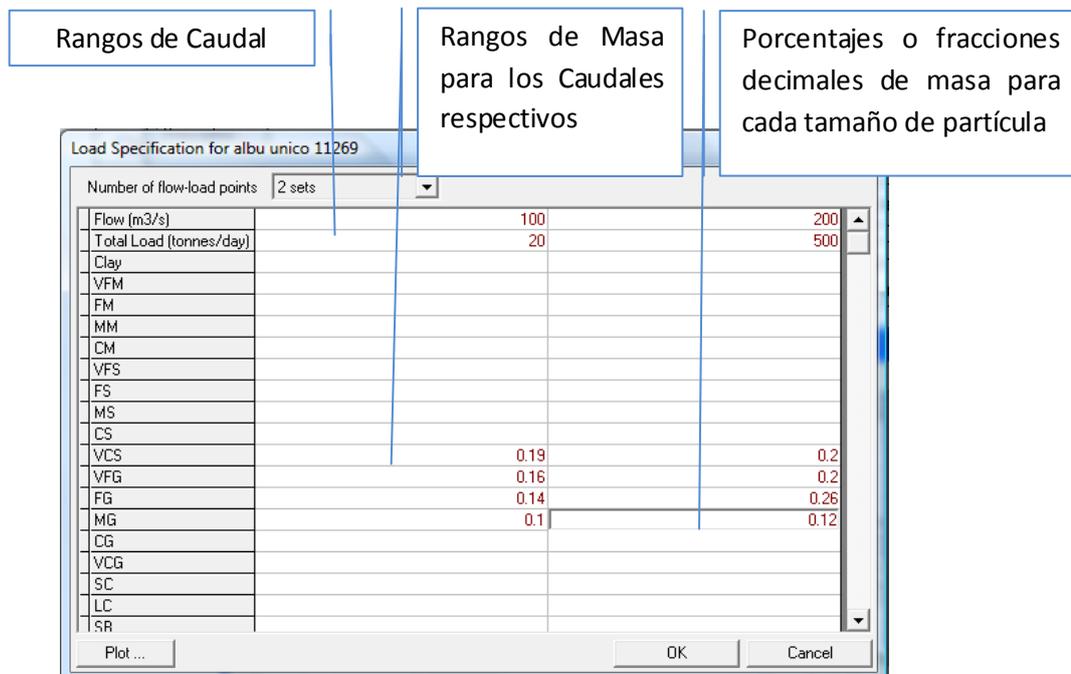


Figura 5.43 Curva de descarga

## Series de carga de sedimentos (Sediment Load Series)

Si existen incrementos de sedimentos que no estén asociados a incrementos de flujo, estos pueden asociarse a cualquier sección, salvo la sección límite aguas abajo, como una carga total durante un intervalo de tiempo. No obstante, una curva de distribución, en porcentajes o fracciones decimales, al requerir información para cada tamaño de partícula dentro de un rango de cargas, debe ser ingresada.

Duración del Incremento

Incremento de Masa en toneladas

Rangos totales de carga

Porcentajes ó fracciones decimales de masa para cada tamaño de partícula

Sediment Series				Gradation Rating Curve	
No. Ordinales	Interpolate Values	Import Dur	Del Row	Ins Row	Number of flow-load points
					2 sets
Simulation	Elapsed Time	Duration	Sediment Load	Total Load (tonnes)	
Time	(hours)	(hours)	(tonnes)		
1	01ene2000 00	5	1000	Clay	
2	01ene2000 05	5.000	2200	VFM	
3	01ene2000 10	5.000	3000	FM	
4	01ene2000 15	5.000	2200	MM	
5	01ene2000 20	5.000	600.000	CM	
6	02ene2000 01	5.000	600.000	VFS	
7	02ene2000 06	5.000	600.000	FS	0.11
8	02ene2000 11	5.000	600.000	MS	0.13
9	02ene2000 16	5.000	600.000	CS	0.26
10	02ene2000 21			VCS	
11	02ene2000 21			VFG	
12	02ene2000 21			FG	
13	02ene2000 21			MG	
14	02ene2000 21			CG	
15	02ene2000 21			VCG	
16	02ene2000 21			SC	
17	02ene2000 21			LC	
18	02ene2000 21			SB	
19	02ene2000 21			MB	

Figura 5.44 Sedimentos de la serie de descarga

## Carga de equilibrio (Equilibrium Load)

La carga de equilibrio, disponible solo para secciones transversales externas aguas arriba, es determinada por la capacidad de transporte. Hec-Ras calcula la capacidad de transporte para cada división de tiempo en la sección especificada y este valor será utilizado como la magnitud de flujo de sedimentos. Una vez que la carga iguale la capacidad de transporte no habrá sedimentación ni erosión en esta sección.

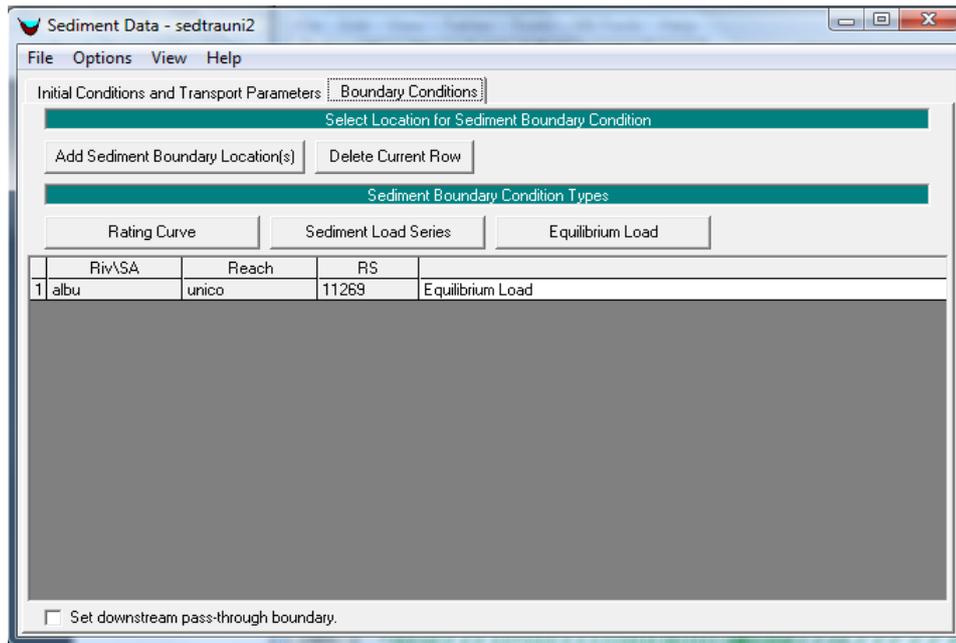


Figura 5.45 Condiciones frontera.

### Propiedad del los sedimentos

Las clases de grano por defecto en Hec-Ras están dispuestas siguiendo la escala de  $\Psi$  (Parker y Andrews, 1985) para los que los límites de grano se definen por  $D=2\Psi$ , donde  $\Psi$  es el conjunto de los enteros entre -8 y 11, y son:

Grain Classes		Lower Bound	Upper Bound	Mean Diameter	Geometric Mean
Clay	Clay	0.002	0.004	0.003	0.00283
Very Fine Silt	VFM	0.004	0.008	0.006	0.00566
Fine Silt	FM	0.008	0.016	0.011	0.0113
Medium Silt	MM	0.016	0.032	0.023	0.0226
Coarse Silt	CM	0.032	0.0625	0.045	0.0447
Very Fine Sand	VFS	0.0625	0.125	0.088	0.0884
Fine Sand	FS	0.125	0.25	0.177	0.177
Medium Sand	MS	0.25	0.5	0.354	0.354
Course Sand	CS	0.5	1	0.707	0.707
Very Course Sand	VCS	1	2	1.41	1.41
Very Fine Gravel	VFG	2	4	2.83	2.83
Fine Gravel	FG	4	8	5.66	5.66
Medium Gravel	MG	8	16	11.3	11.3
Coarse Gravel	CG	16	32	22.6	22.6
Very Coarse Gravel	VCG	32	64	45.3	45.3
Small Cobbles	SC	64	128	90.5	90.5
Large Cobbles	LC	128	256	181	181
Small Boulders	SB	256	512	362	362
Medium Boulders	MB	512	1024	724	724
Large Boulders	LB	1024	2048	1448	1450

Figura 5.46 Clases por defecto de grano.

La gravedad específica de los sedimentos está determinada por defecto en Hec-Ras con un valor de 2.65.

El factor de forma (shape factor) es la relación entre el eje más corto de la partícula y el eje más largo de la misma. Una partícula esférica tendrá un factor de forma igual a 1, mientras que una partícula alargada tendrá un factor de forma igual a 0.5. El Factor de Forma solo es utilizado por Hec-Ras con el método de velocidad de caída Informe 12.

Las unidades peso/densidad son valores de peso o densidad para convertir masa de depósito o erosión en volúmenes que se trasladan dentro del espesor del lecho móvil. Sus unidades son en (Kg/m<sup>3</sup>).

Estas características del sedimento pueden ser modificadas según criterio del usuario al hacer clic en **Sediment Data/ Boundary Conditions/ Options/ Set Sediment Properties**.

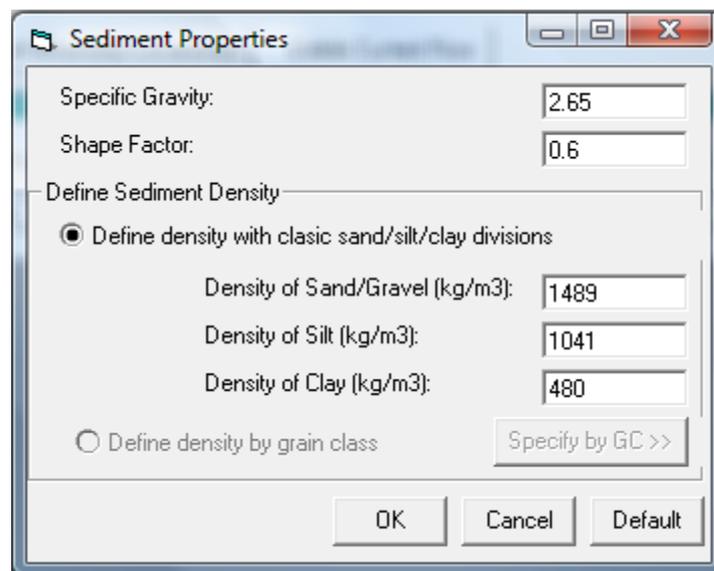


Figura 5.47 Propiedades de los sedimentos

Las opciones de cohesión y sus parámetros se pueden especificar mediante la selección de la opción **Set Cohesive Options** en el menú **Options** en **Boundary Conditions**. Hay que saber que el método seleccionado solo se aplicará a limos y arcillas. El transporte de partículas finas puede ser contemplado desde dos puntos de vista, uno desde la capacidad estándar de transporte, que permite calcular un potencial de transporte para las clases de grano de limos y arcillas, y una segunda alternativa referente a las ecuaciones de Krone y Parthenadies para las clases de grano fino, donde habrá que definir tanto el umbral de erosión, la tasa de erosión, la masa umbral de la erosión y la tasa de erosión en masa.

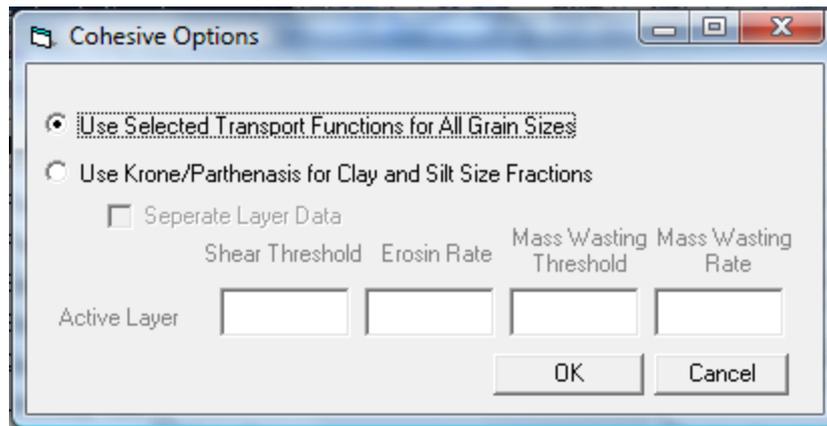


Figura 5.48 Opciones de cohesión.

### 5.3.4. Flujo Quasi – no permanente



En el cálculo de transporte de sedimentos en Hec-Ras interviene el flujo basado en el flujo Quasi – No Permanente, el cual se aproxima a un hidrograma para series de flujo constante asociado con su correspondiente duración. Podemos acceder al editor de flujo Quasi – estacionario pulsando en **Edit/ Enter quasi unsteady flow data**, donde nos aparecerá el siguiente cuadro de dialogo.

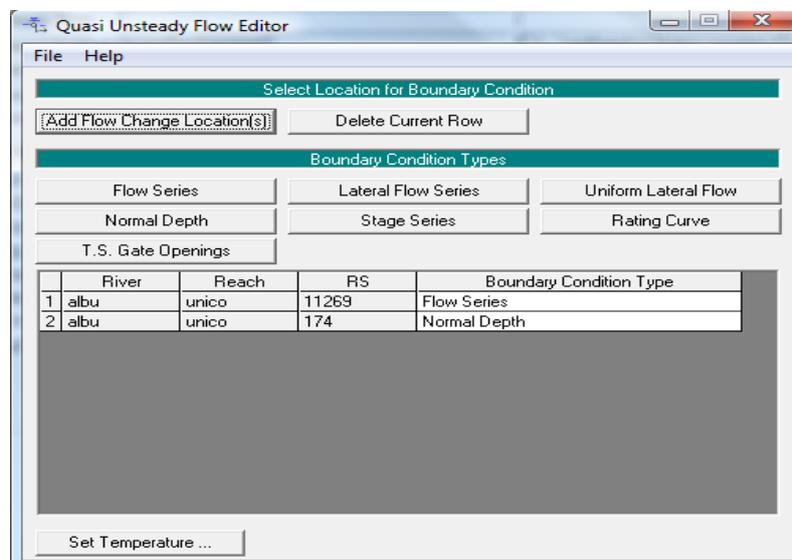


Figura 5.49 Editor de flujo Quasi-no permanente

En esta ventana podemos encontrar un abanico de posibilidades en cuanto a condiciones de borde, Hec-Ras seleccionará automáticamente la condición de borde que le corresponda a cada sección añadida, por el contrario el usuario debe tener

presente que la primera sección aguas arriba tendrá que tener asociada la condición series de flujo (Flow series).

## Series de flujo (Flow Series)

Como se ha indicado con anterioridad, si hacemos clic dentro del editor de flujo en la última sección aguas arriba Hec-Ras solo permite introducir las series de flujo.

Una vez abierto el editor de las series de flujo, dentro del apartado datos del hidrograma (Hydrograph Data) encontramos tres apartados que deben ser introducidos manualmente:

- **Duración de Flujo (Hours):** Para aproximar un hidrograma de flujo cuasi-permanente en series de flujo constante, cada serie debe poseer una duración determinada, que representa el tiempo para el cual el caudal es constante.

- **Incrementos de Cálculo (Hours):** Hec-Ras realiza la simulación bajo la premisa de que los cambios en la geometría del lecho durante las series de flujo no son suficientes para alterar la hidrodinámica del cauce, es decir, que la hidrodinámica no necesita ser calculada tan frecuentemente como el transporte de sedimentos. No obstante la capacidad de transporte depende de cuánto cambia la geometría del lecho, por lo que su actualización tendrá que ser con más frecuencia, evitando con ello que una cantidad ingente de material sea depositada o erosionada del lecho, ocasionado con este hecho una más que segura inestabilidad en el modelo.

Por todo lo anterior la duración del flujo esta a su vez dividida en incrementos de cálculo, pero estos tiempos podrían no ser suficientes para actualizar adecuadamente los datos del lecho, es por ello que Hec-Ras deliberadamente actualiza los datos automáticamente cuando se ha producido un cambio en la profundidad del lecho igual a 3.04 cm (0.1 pies), dicho valor puede ser modificado en el Plan de Análisis de Sedimentos.

Se deduce entonces que para flujos elevados asociados con un transporte importante de sedimento, más actualizaciones del lecho serán requeridas y por eso los incrementos seleccionados deberán de ser más pequeños (cuanto más pequeños son los incrementos mayor es el tiempo de ejecución).

- **Flujo ( $m^3/s$ ):** Representa el caudal medido para cada uno de los intervalos de tiempo.

**Nota:** Para culminar con éxito la simulación es muy importante entender cómo funcionan los tiempos de simulación y por ello hay que recordar que estamos trabajando con un programa de origen militar, donde las horas son expresadas de forma diferente, así las 12:00 AM es expresada en hora militar como 2400, y las 12:00 PM es expresada en hora militar como 1200 (12:01 AM corresponde en hora militar a 0001).

Hora Usual	Hora Militar	Hora Usual	Hora Militar
<b>12:00 AM</b>	2400 horas	12:30 AM	0030 horas
<b>1:00 AM</b>	0100 horas	1:30 AM	0130 horas
<b>2:00 AM</b>	0200 horas	2:30 AM	0230 horas
<b>3:00 AM</b>	0300 horas	3:30 AM	0330 horas
<b>4:00 AM</b>	0400 horas	4:30 AM	0430 horas
<b>5:00 AM</b>	0500 horas	5:30 AM	0530 horas
<b>6:00 AM</b>	0600 horas	6:30 AM	0630 horas
<b>7:00 AM</b>	0700 horas	7:30 AM	0730 horas
<b>8:00 AM</b>	0800 horas	8:30 AM	0830 horas
<b>9:00 AM</b>	0900 horas	9:30 AM	0930 horas
<b>10:00 AM</b>	1000 horas	10:30 AM	1030 horas
<b>11:00 AM</b>	1100 horas	11:30 AM	1130 horas
<b>12:00 PM</b>	1200 horas	12:30 PM	1230 horas
<b>1:00 PM</b>	1300 horas	1:30 PM	1330 horas
<b>2:00 PM</b>	1400 horas	2:30 PM	1430 horas
<b>3:00 PM</b>	1500 horas	3:30 PM	1530 horas
<b>4:00 PM</b>	1600 horas	4:30 PM	1630 horas
<b>5:00 PM</b>	1700 horas	5:30 PM	1730 horas
<b>6:00 PM</b>	1800 horas	6:30 PM	1830 horas
<b>7:00 PM</b>	1900 horas	7:30 PM	1930 horas
<b>8:00 PM</b>	2000 horas	8:30 PM	2030 horas
<b>9:00 PM</b>	2100 horas	9:30 PM	2130 horas
<b>10:00 PM</b>	2200 horas	10:30 PM	2230 horas
<b>11:00 PM</b>	2300 horas	11:30 PM	2330 horas

Figura 5.50 Tabla Horas Civil-Militar (USACE)

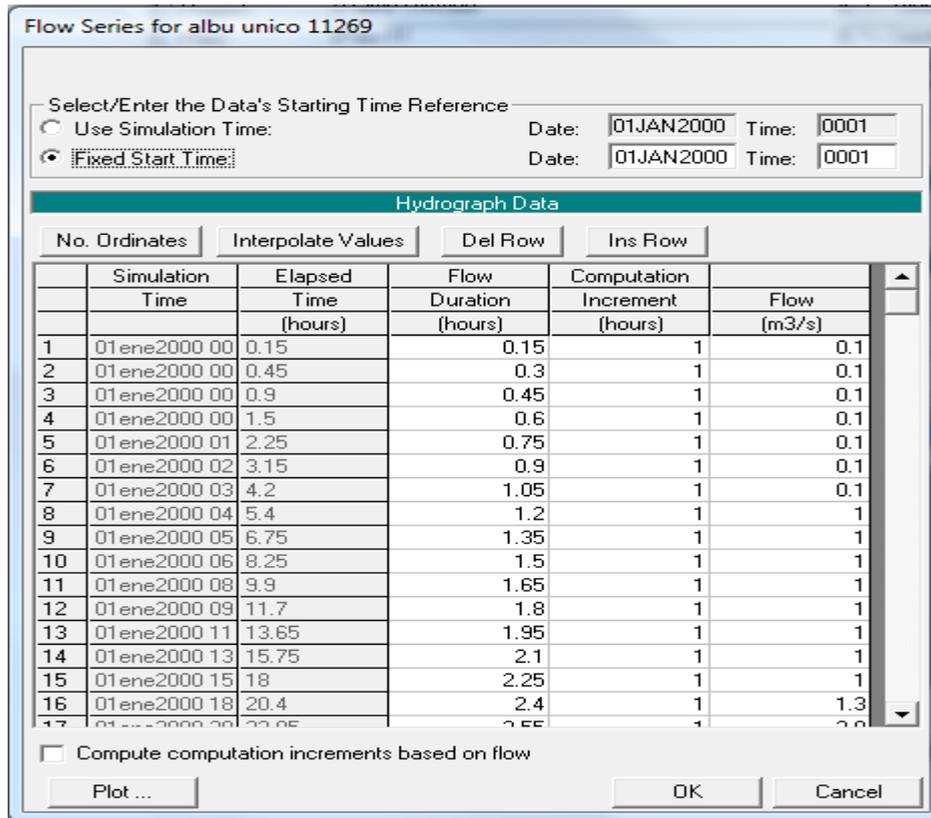


Figura 5.50 Series de flujo

### Profundidad Normal (Normal Depth)

Al pulsar sobre el botón **Normal Depth** se abrirá una ventana simple que permitirá al usuario introducir una pendiente de fricción (pendiente de la línea de energía), con esta pendiente Hec-Ras determina las profundidades aguas abajo para cada una de las series de flujo por medio del método Área-Pendiente. Hay que tener presente que la profundidad es calculada con la hipótesis de que la pendiente es inmutable y que los procesos de erosión y deposito se producen a una velocidad constante. Por lo tanto, aunque conveniente, la profundidad normal en ocasiones es una frontera mal plantada, a menos que el límite aguas abajo se encuentre en un lugar donde la corriente se encuentre en equilibrio.

## Series de calado (Stage Series)

Permite ingresar tiempos para series de cotas del nivel de agua. No se requieren en este caso incrementos de tiempo.

Ingresar la duración del aforo.

Ingresar la cota del aforo

**Stage Series for albu unico 174**

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time:      Date: 01JAN2000      Time: 0001

Fixed Start Time:              Date:                      Time:                     

---

Hydrograph Data

No.	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Stage Duration (hours)	Stage (m)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				

Figura 5.51 Series de calado

## Curva de descarga (Rating Curve)

Permite introducir el caudal y la profundidad del flujo en la sección.

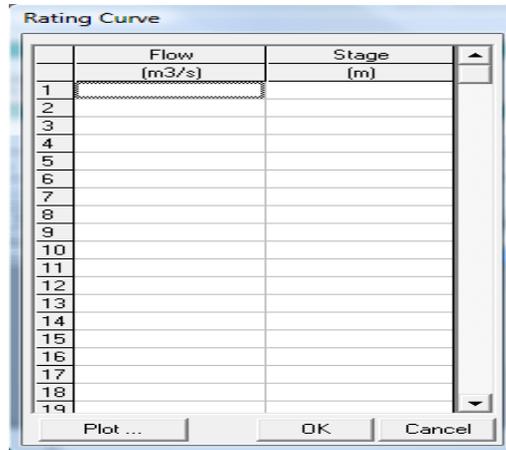


Figura 5.52 Curva de descarga

### 5.3.5. Plan de análisis de sedimentos



Para acceder al editor del plan de sedimentos será suficiente hacer clic en **Perform a Sediment Transport Simulation**. Antes de cargar los archivos necesarios, el plan de análisis requiere que se editen las opciones de salida de resultados y las opciones de cálculo de sedimentos. Las opciones de salida de resultados para sedimentos podemos encontrarla dentro del editor de análisis en **Sediment Output Options** donde podremos seleccionar:

- **Nivel de salida:** Nivel de resultados que necesitamos. Podemos distinguir entre seis niveles, cada uno de ellos con un tipo diferente de información asociada como muestra la siguiente figura.

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
Bed Elevation	Bed Elevation WSE Observed Δ Bed	Bed Elevation WSE Observed Δ Bed Velocity Flow Shear XS Mass Out Tot	Bed Elevation WSE Observed Flow Velocity Δ Bed Shear XS Mass Out Tot XS Weight Out Cum XS Weight Residue Slope XS Mass Bed Delta Tot XS Mass Bed Data Culm Tot XS Mass Capacity tot	Bed Elevation WSE Observed Flow Velocity Δ Bed Shear XS Mass Out Tot d50 Cover d50 Surface d50 Inactive Mass Cover (All) Mass Surface (All) Mass Inactive (All) Armor (All)	All From Level 4 and 5 and... Slope Cumulative XS Mass Out (All) Time Step XS Mass Out (All) Cumulative Δ Bed (All) Time Step Δ Bed (All) Transport Capacity (All) Sediment Discharge (T/d) Tot Channel Manning's n Channel Froude # U Star d90 Effective Depth Effective Width

(All) = This variable is output as a total for all materials and separately for each of the 20 grain classes  
 Tot = Only total for all grain sizes combined  
 WSE = Water Surface Elevation  
 Delta Bed = Change of bed elevation

Figura 5.53 Tipos de nivel (Hec Ras. Reference manual)

- **Masa o Volumen:** Selección entre el volumen o la masa de sedimento transportado.
- **Incremento de salida:** Intervalo de tiempo para el cual el programa actualizará y presentará los resultados.
- **Numero de incrementos entre las series de salida perfil/hora:** Número de incrementos entre los resultados del perfil y las series de tiempo.
- **Número de salida en los perfiles XS:** Número de perfiles obtenidos para cada resultado en una sección transversal.

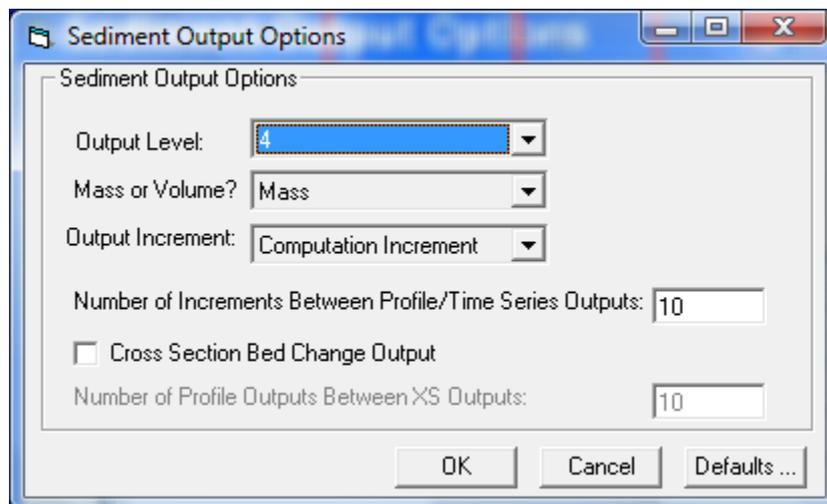


Figura 5.54 Opciones de salida de sedimentos.

Las opciones de cálculo de sedimentos podemos encontrarlas en **Options/ Sediment Computation Options and Tolerances**, donde podremos modificar según criterio hasta catorce elementos.

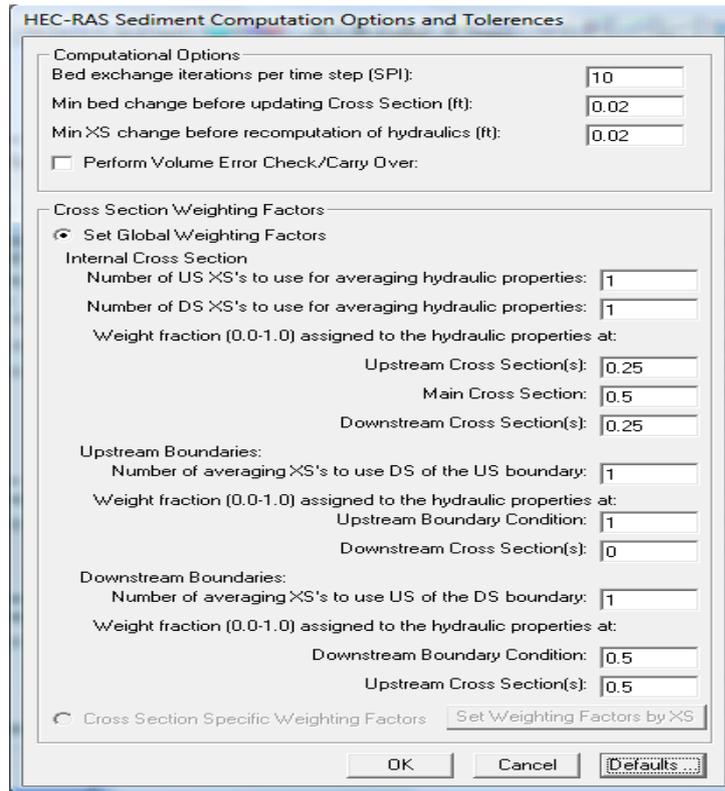


Figura 5.55 Opciones de sedimentos.

Una vez configuradas todas las opciones y seleccionados tanto el archivo geométrico, archivo de flujo cuasi-no permanente, archivo de sedimentos y correcta delimitación en fecha y hora para el principio y final del cálculo de sedimentos, estamos en la mejor de las condiciones para proceder con el inicio del Análisis de Sedimentos.

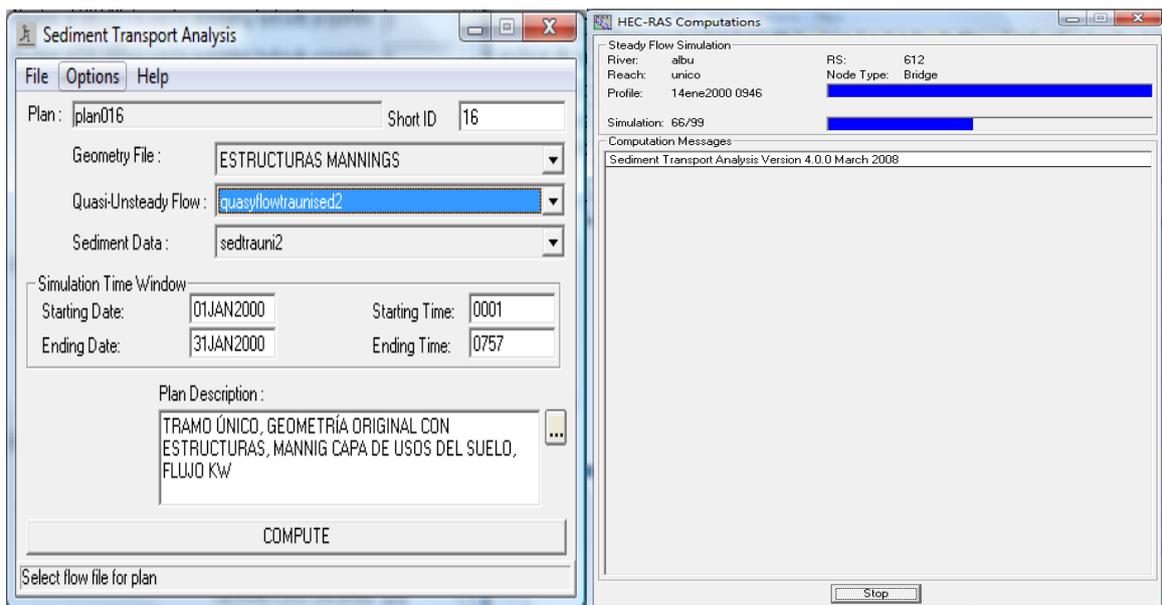


Figura 5.56 Análisis del transporte de sedimentos

## 5.4. Exportar resultados

Seleccionando en el menú principal de Hec-Ras en **File/ Export GIS Data** podremos definir la dirección del archivo de salida y los perfiles de flujo a exportar. El usuario debe estar prevenido de que podrá variar la ruta, pero bajo ningún concepto alterar el nombre completo del archivo, pues hasta su más leve variación puede dar lugar a errores posteriores de lectura en ArcMap.

Se generará el nuevo archivo pulsando en **Export Data**.

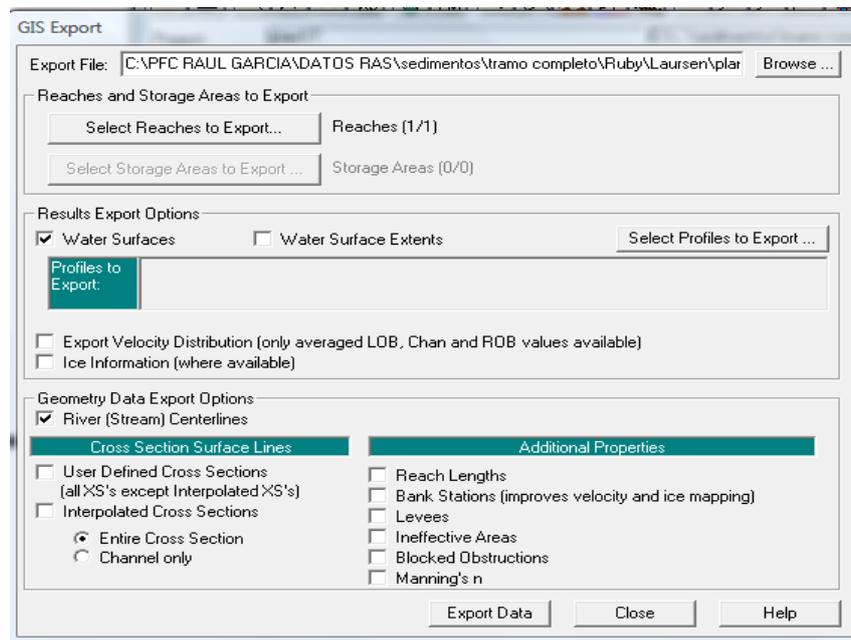


Figura 5.57 Exportar datos Gis

## 5.5. Post-Ras

Queda concluida la fase de Análisis en Hec-Ras, el formato visual de los resultados obtenidos podremos modificarlo de forma más atractiva por medio de las herramientas disponibles en la extensión Hec-GeoRas de ArcGis. A continuación se describe la correcta secuencia para la correcta importación y visualización del archivo generado.

### 5.5.1. Pos procesamiento

Podremos añadir al archivo inicial exportado desde ArcGis la nueva información generada en Hec-Ras, con la finalidad de agrupar toda la información en un mismo archivo. El primer paso será adecuar los formatos de Hec-Ras (extensión .sdf) para trabajar en ArcGis (extensión .xml).

Desde Hec-GeoRas encontramos la herramienta  que hace referencia al **Convertor de Formato**, al hacer clic sobre él, en el primer campo, **Ras Output File**, deberemos introducir la ruta del archivo original, y por defecto la ruta del archivo de salida, **XML File**, aparecerá como la misma a excepción de la extensión. A continuación deberemos seleccionar en la barra de herramientas Hec-GeoRas **RAS Mapping/ Layer Setup** y completar la información requerida para crear un nuevo marco de post proceso.

Indicaremos el nombre del análisis, la ruta donde se encuentre el archivo de exportación ya en formato .xml, seleccionaremos el terreno y la ruta de salida donde será almacenada la nueva base de datos generada.

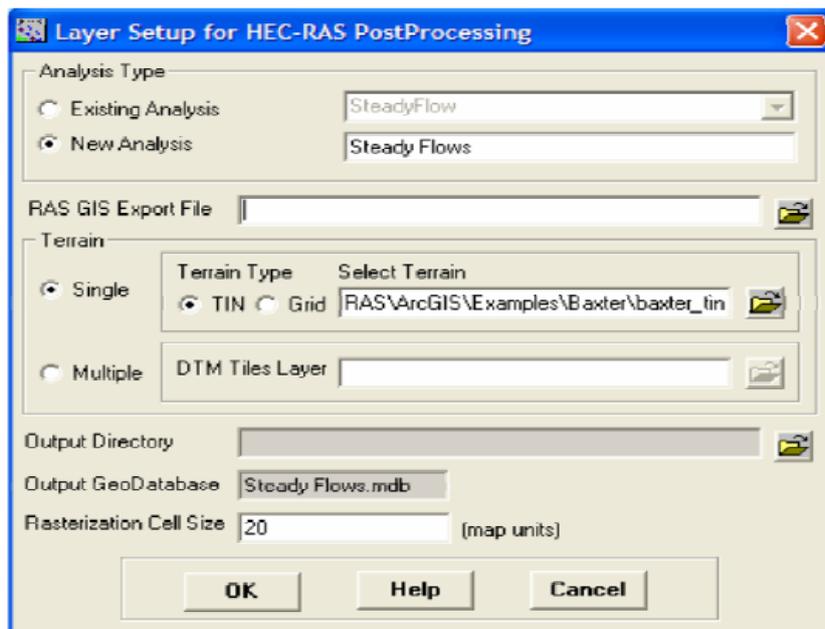


Figura 5.58 Capa de instalación Hec-Ras pos procesamiento

Para utilizar el Nuevo archivo bastará con seleccionar **RAS Mapping/ Read RAS GIS Import File**. Podremos observar que un nuevo marco de datos es abierto, con la misma denominación que la utilizada en el análisis y al que habrá que añadir las secciones transversales, el centro del cauce principal y el polígono de inundación.

### 5.5.2. Nuevas capas de información para los resultados Ras

Para lograr tanto el polígono de inundación real como el archivo Grid de profundidades, en primer lugar hemos de generar el archivo Tin de inundación, para ello seleccionamos **RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Water Surface Generation**. Aparecerá una nueva ventana en la que habrá que señalar que perfiles de flujo queremos crear su superficie.

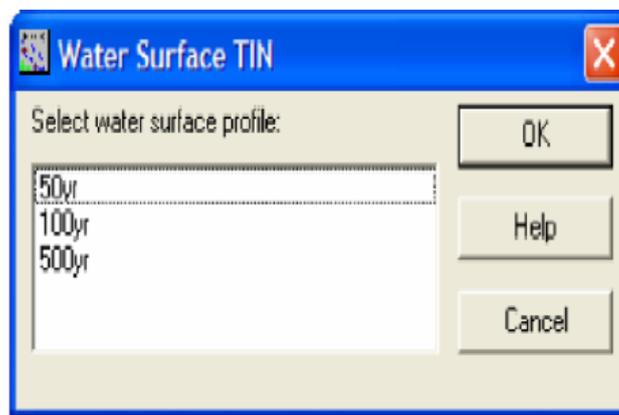


Figura 5.59 Agua superficial Tin

Se observa que se han creado tantos modelos de inundación como perfiles se ha seleccionado anteriormente. El siguiente paso es realizar la intersección entre el modelo digital del terreno y el modelo de inundación generado con anterioridad. Para ello hemos de seleccionar **RAS Mapping/ Flood Plain Delineation/ GRID Intersectio**.

Una nueva ventana similar a la anterior donde deberemos señalar el modelo o modelos con los que queremos realizar dicha intersección.

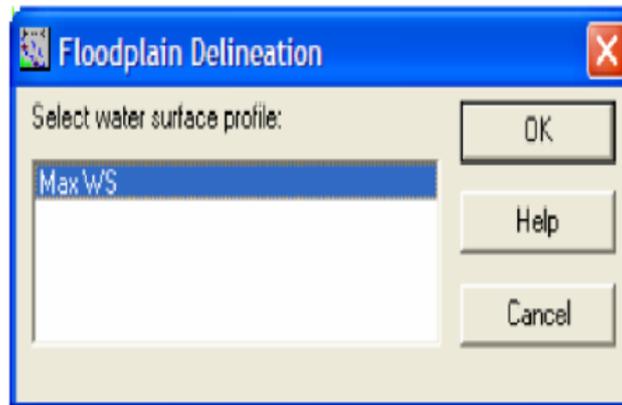


Figura 5.60 Delimitación de las llanuras de inundación

El resultado serán dos capas por perfil, una consistente en un polígono que delimita la inundación, comenzará por la letra "b"(Boundary) seguida del nombre del perfil y la otra es un modelo de profundidades respecto al terreno, la cual comenzará por la letra "d"(Depth) seguida del nombre del perfil correspondiente.

Los resultados obtenidos han de ser estudiados con detalle, ya que con toda seguridad habrá zonas inundadas que no deban estarlo. Para obtener un resultado lo más fiable posible será necesario realizar un proceso iterativo entre Ras – ArcGIS.

### 6.1. Antecedentes

La Rambla del Albuñón forma parte de la cuenca hidrográfrica del Segura y es la más importante del Campo de Cartagena, siendo límite natural del campo de Cartagena en su margen derecha, con los municipios de Fuente Álamo, Torre Pacheco, Los Alcázares en su desembocadura al Mar menor, y un pequeño tramo con Murcia en su margen izquierda.

El cauce, seco durante gran parte del año, solo entra en funcionamiento en la canalización de las aguas procedentes de grandes tormentas de carácter esporádico, de gran magnitud y escasa duración.

Desde que se tiene constancia, La Rambla del Albuñón ha sufrido ya varios desbordamientos durante parte del siglo XX y principios del siglo XXI, en especial con mayor relevancia en cuanto a daños materiales y personales se refiere, en el ámbito de su desembocadura.

En la mejora de la canalización de las aguas pluviales recogidas por esta rambla, en el pasado se construyeron muros formados de piedra y argamasa, que demostraron ser insuficientes para avenidas extremas.

Fue entonces en los años 70, con la construcción del trasvase Tajo-Segura, cuando se aprovisionaron infraestructuras de regadío, a si como una red de caminos de servicio y red de drenajes, haciéndose lo dispuesto en el Decreto 693/72 de 9 de marzo para el Plan General de Transformación, que dividió el territorio en 21 sectores con independencia hidráulica. Una vez incluida la Rambla del Albuñón en la red de drenajes del campo de Cartagena, se le doto de encauzamientos a la altura del municipio del Albuñón y el propio canal del trasvase.

Pero no fue hasta los años 90, cuando se realizó el encauzamiento en sección trapecial, en el ámbito de la desembocadura junto con la variante de Los Alcázares (N-332), poniendo fin a años de grandes inundaciones, pero el problema no se elimino por completo, solamente se redujo la posibilidad de inundación al adecuar las alturas las motas a periodos de retorno más grandes.

En la actualidad, podemos identificar la segunda fase de actuación en la Rambla del Albuñón en fase de información pública, previa aprobación definitiva, destaca la ampliación de la capacidad de desagüe, desde el término de Cuevas de Reylo hasta la desembocadura en el Mar Menor, donde se realizara una mejora de trazado para favorecer la hidráulica general de la rambla.

## 6.2. Justificación del estudio

El presente proyecto continua la labor emprendida por Salvador (2010), con la elaboración del proyecto fin de carrera, en el cual delimita las llanuras de inundación que rodean la rambla del Albuñón, pero sin considerar como es ahora el caso, los efectos producidos por los procesos de socavación, transporte y sedimentación en la solera del canal.

### 6.2.1. Descripción general de la rambla

La rambla del Albuñón, pose una cuenca de 773 Km<sup>2</sup> y se extiende 42 Km de longitud, desde Fuente Álamo, atravesando los municipios de Murcia, Torre Pacheco, Cartagena y Los Alcázares, hasta llegar al Mar Menor, en las proximidades de Los Urrutias. La Cuenca de La Rambla del Albuñón es una extensa llanura sensiblemente inclinada en dirección este, con una pendiente media en los últimos 11 km de 1.4%, (ver figura 6.1).

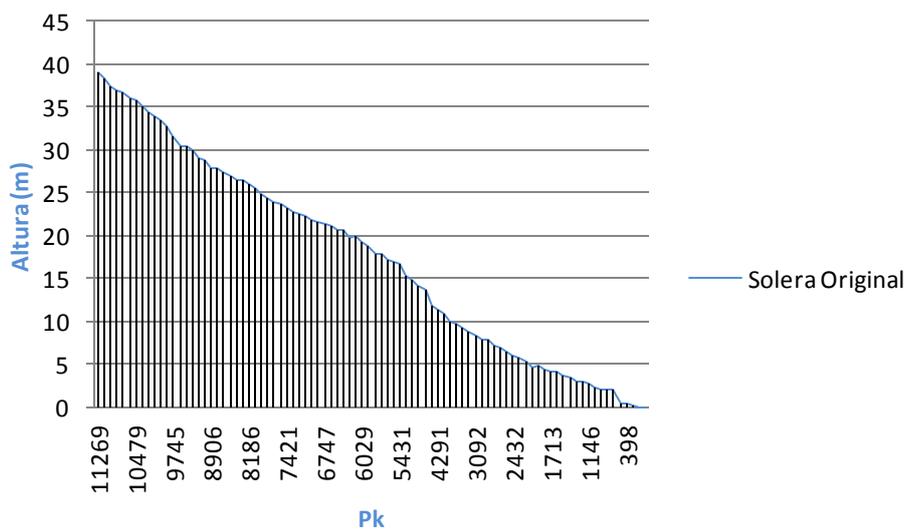


Figura 6.1 Perfil Longitudinal últimos 11km, Rambla del Albuñón

Su régimen fluvial es irregular, propio de un clima semiárido con temperaturas suaves durante el invierno y muy calurosas durante el verano, la temperatura media ronda los 17°C. Las precipitaciones son escasas, generalmente por debajo de 250 mm, como muestra la siguiente figura 6.2.

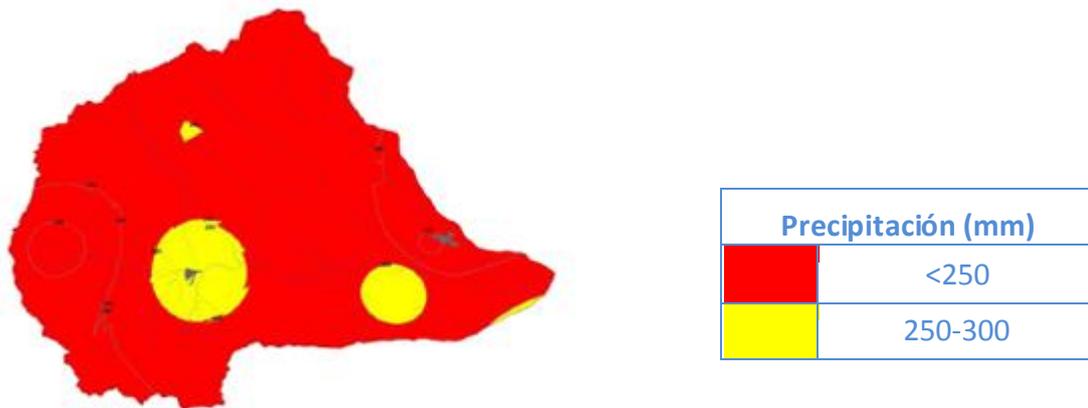
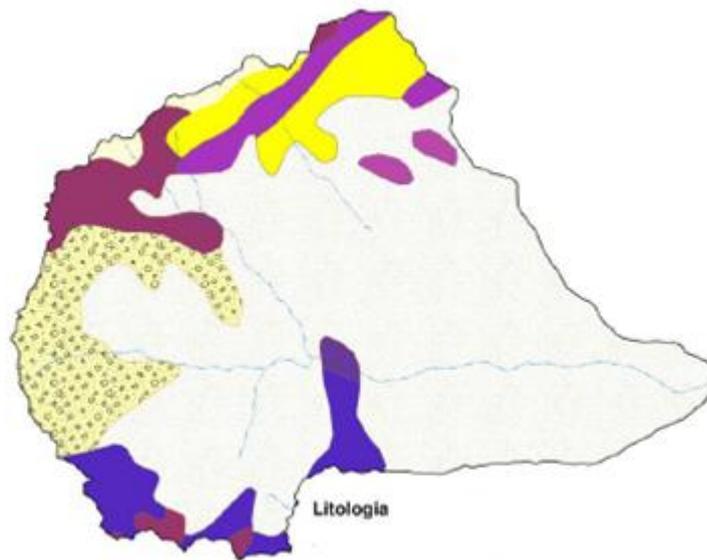


Figura 6.2 Modelo Digital de Precipitación Anual (CHS)

Los valores máximos de evapotranspiración potencial de la cuenca del Albuñón, se detectan en Fuente Álamo, siendo su mayor valor de 960 mm/año, y el menor valor en la Sierra de Carrascoy, con 800 mm/año.

Respecto a la litología, la zona de estudio está cubierta por materiales terciarios y cuaternarios de características muy dispares, en las zonas más superficiales se hallan calizas y calcarenitas, además de arcillas, limos y arenas de forma casi monótona, mientras que en zonas más profundas fueron depositadas margas (ver figura 6.3).



	Arcillas, limos y arenas (marismas y fangos de albufera)
	Arenas, areniscas, arcillas (F. utrillas)
	Arenas, areniscas, arcillas, gravas, conglomerados/arenas, conglomerados, calizas, margas, limos y yesos
	Calcarenitas, areniscas, arenas, gravas, conglomerados
	Calizas, margocalizas con intercalaciones detríticas
	Calizas y dolomias
	Gravas, arenas, limos y arcillas, travertinos, turbas, glacia
	Margas continentales o marinas con yesos masivos en las primeras
	Margas y arcillas con alternancia de arenas y conglomerados o calizas y yesos
	Margocalizas, calizas, margas, arcillas, arenas

Figura 6.3 Mapa de Litología cuenca Rambla del Albuji3n (CHS)

Ya en zonas más someras, los materiales que se encuentran en mayor proporción son en su mayoría los que han sido transportados por las ramblas (materiales detríticos, arcillas, limos y arenas), los que aparecen al pie de la sierra de la cabecera de la cuenca (calcarenitas, areniscas, arenas, gravas y conglomerados) y al pie de la sierra del valle (margo-caliza, calizas, magas, arcillas y arenas). Todo ello salpicado de pequeños relieves de origen volcánico y una suave memoria geomorfológica, ocasionada por la fuerza del agua a través de las ramblas en tiempos de mayor precipitación.

En cuanto a lo que se puede observar de la hidrología superficial, la Rambla del Albuji3n es el gran colector central, cuya misión es la de gestionar los caudales vertientes de la sierra de Carrascoy sirviéndose de la rambla de la Murta, y de las sierras costeras, sirviéndose la rambla subsidiaria de Fuente Álamo. En los 42 Km de longitud de la Rambla del Albuji3n, es en el tramo correspondiente al municipio de Torre Pacheco, donde se presentan los mayores problemas para dilucidar cuál es el tramo de cauce correspondiente a la rambla, además hay que destacar que a partir del municipio de Torre Pacheco hasta alcanzar el Mar Menor, no se destacan afluentes, por lo que las corrientes esporádicas se pierden en la llanura.

A continuación se muestra en la tabla 6.1, los hidrogramas de avenida para diferentes periodos de retorno, destacándose los caudales máximos para cada periodo.

PERIODOS DE RETORNO			
1.4	10	100	500
Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)
0	0	0	0
0	0	0.1	0.2
0	0	0.4	0.7
0	0	1.3	1.8
0	0.5	8.1	16.7
0	7.7	224.8	418
0.1	90.4	2991.2	5168.7
0.5	581.8	3687.6	3836.3
1.3	758.4	2090.9	2329.1
2.9	642.3	1280	1466.3
7.6	470.6	790.8	863.9
27.5	341.9	521.8	560.2
34.3	252.9	366.2	395.8
34.5	190.3	284.3	315.4
33.9	152.2	244.5	278.2

Tabla 6.1 Caudales máximos para cada periodo de retorno. (Catillo y Marín, 2011)

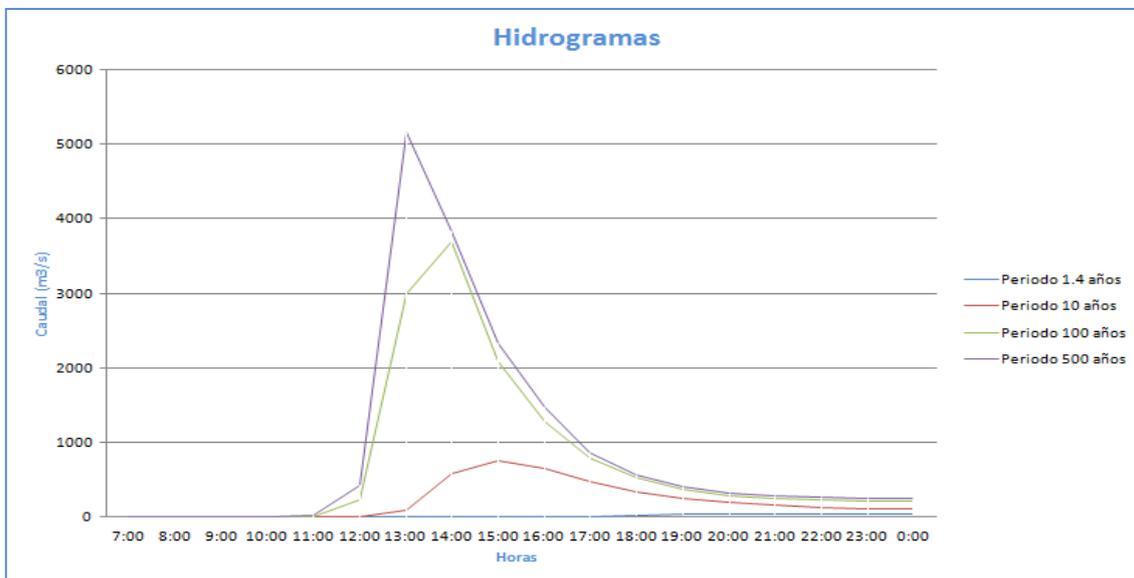


Figura 6.4 Hidrogramas de avenida Cuenca del Albuji3n (Catillo y Marín, 2011)

## Hidrogramas

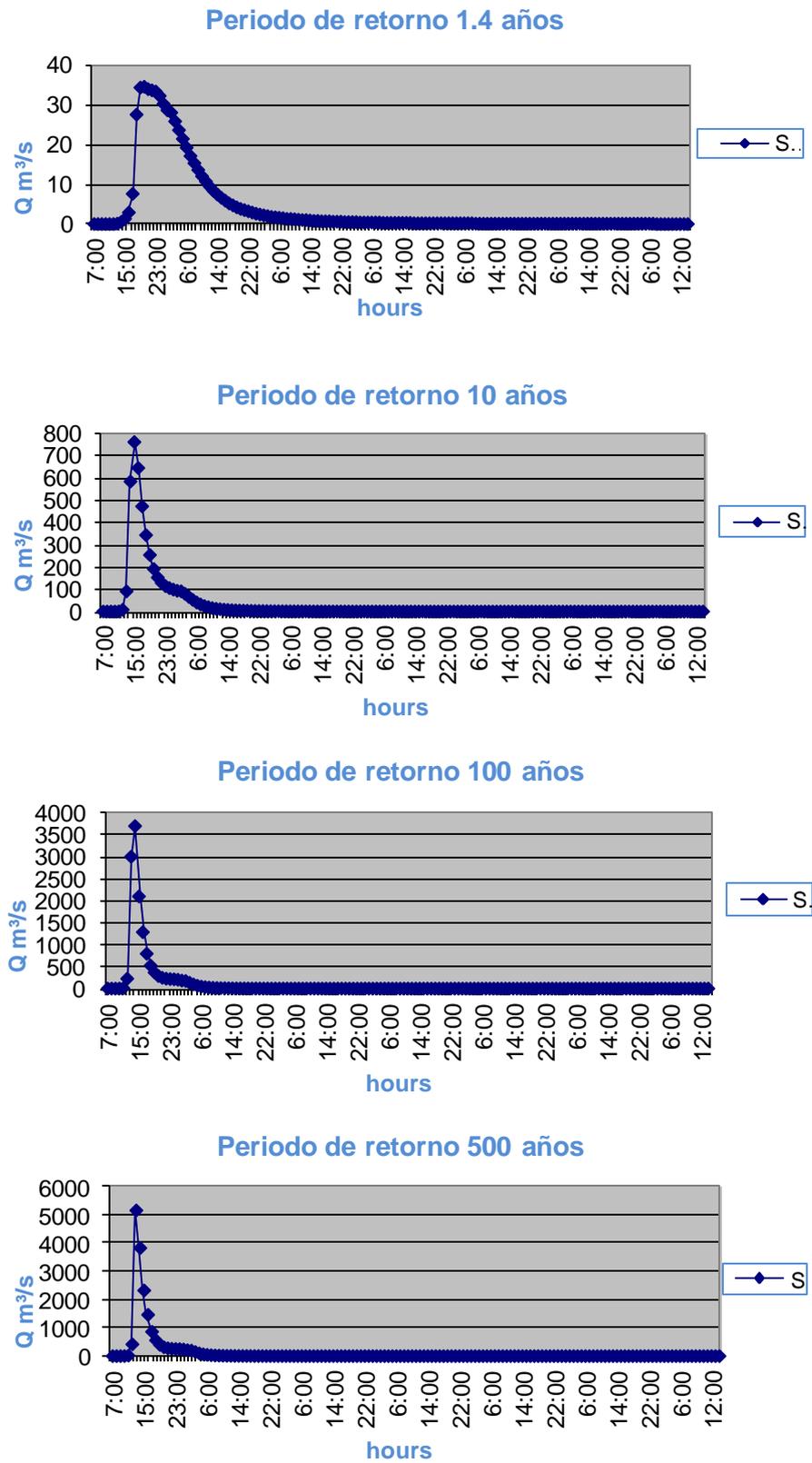


Figura 6.4 Hidrogramas de avenida Cuenca del Albuñón (Catillo y Marín, 2011)

### 6.2.2. Granulometría

La caracterización granulométrica de la zona de estudio, es de vital importancia en el conjunto de los procesos empíricos, que definen el movimiento de la partícula longitudinalmente en su viaje a lo largo del cauce, como verticalmente en su velocidad de caída, influyendo además en la personalidad rugosa del propio cauce y como consecuencia en el régimen de velocidades del fluido.

Para la determinación de la granulometría de la zona de estudio, se debe seguir la técnica de muestreo: para la cual debemos extraer al menos de tres puntos distintos del cauce, un cierto volumen de material subsuperficial, discriminado en primer lugar un diferencial de espesor comparable al tamaño de la mayor partícula observada en la superficie, y que el flujo fuese capaz de transportar. Como el volumen muestreado debe ser representativo del material granular del cauce, la mayor partícula extraída no representa más del 1% en peso de toda la muestra. Para cada muestra se ejecutó el método del cuarteo.

Para entender mejor cuales son las condiciones de contorno en el cauce, se determinó que no existía fenómeno de acorazamiento en el mismo, al obtener una desviación típica granulométrica ( $\sigma_g$ ) de 2.79, donde  $\sigma_g = (D_{80}/D_{16})$ , si  $\sigma_g < 3$ .

La granulometría de una mezcla de partículas, es en definitiva la clasificación de las partículas que la forman por tamaños, a través de mallas normalizadas, obtenemos así para el tramo bajo de la Rambla del Albuji3n la siguiente curva granulométrica.

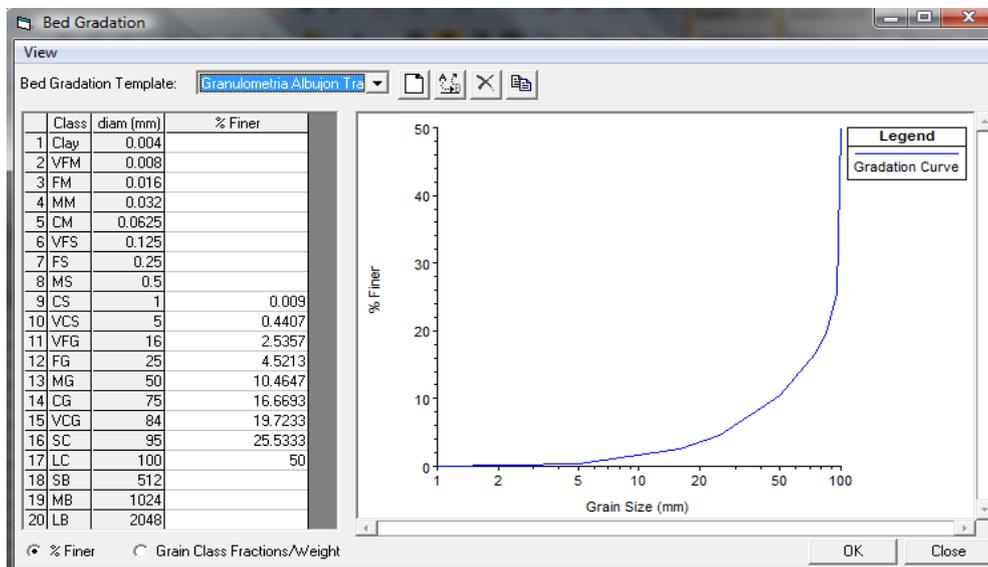


Figura 6.5 Curva Granulométrica Rambla del Albuji3n (Catillo y Marín, 2011)



Figura 6.6 Granulometría Rambla del Albuji3n

### 6.2.2.1. Visita de campo

Se realiz3 un par de visitas de campo y se pudo observar la existencia de movimientos secundarios a lo largo del cauce, con tendencia sedimentaria suave, alcanzando una altura media de un 1 metro en una de las m3rgenes, en la margen contraria observamos signos de erosi3n, pero no signos de acorazamiento. Dicho movimiento es originado por una mayor aceleraci3n del fluido en una de las m3rgenes, debido en parte a la curvatura de los tramos de la propia rambla, debido en parte a la menor existencia de obst3culos orogr3ficos que proporcionan un caudal m3s fluido respecto a la margen fuertemente vegetada.



Figura 6.7 Rambla del Albuji3n – Tramo bajo.

### 6.2.3. Delimitación de la zona de estudio

La zona de estudio queda delimitada desde la desembocadura de la Rambla del Albuñón, hasta la línea de ferrocarril correspondiente al corredor mediterráneo. La longitud de la zona de estudio es de 11 kilómetros, por ser esta zona de mayor incidencia en cuanto a problemas de inundación se refiere, como la acaecida el 27 de septiembre de 2009 en la que según datos de la CHS, llegó a registrarse 158 litros por metro cuadrado en 24 horas, ocasionando el desalojo de más de 60 personas e innumerables daños materiales.



Figura 6.8. Zona de estudio. Orto imagen NATMUR-08 (Agosto 2008)

### 6.2.3.1 La Desembocadura

Para determinar cuáles son las condiciones de contorno aguas abajo, es necesario conocer que pleamar y bajamar puede encontrar el flujo cuando llega a interactuar con el Mar Menor, en este sentido son utilizados los datos obtenidos de forma independiente por el Puerto Deportivo Ángel Villacieros, en Los Urrutias, concluyendo de sus registros una amplitud máxima de 0.4 m entre bajamar y pleamar, sin incorporar los efectos producidos por el oleaje, tanto en la pleamar como en la bajamar.

- Bajamar: -0.2 m
- Nivel medio del mar: 0 m
- Pleamar: 0.2 m

Datos de pleamar y bajamar de tan escasa magnitud pueden ser despreciados.

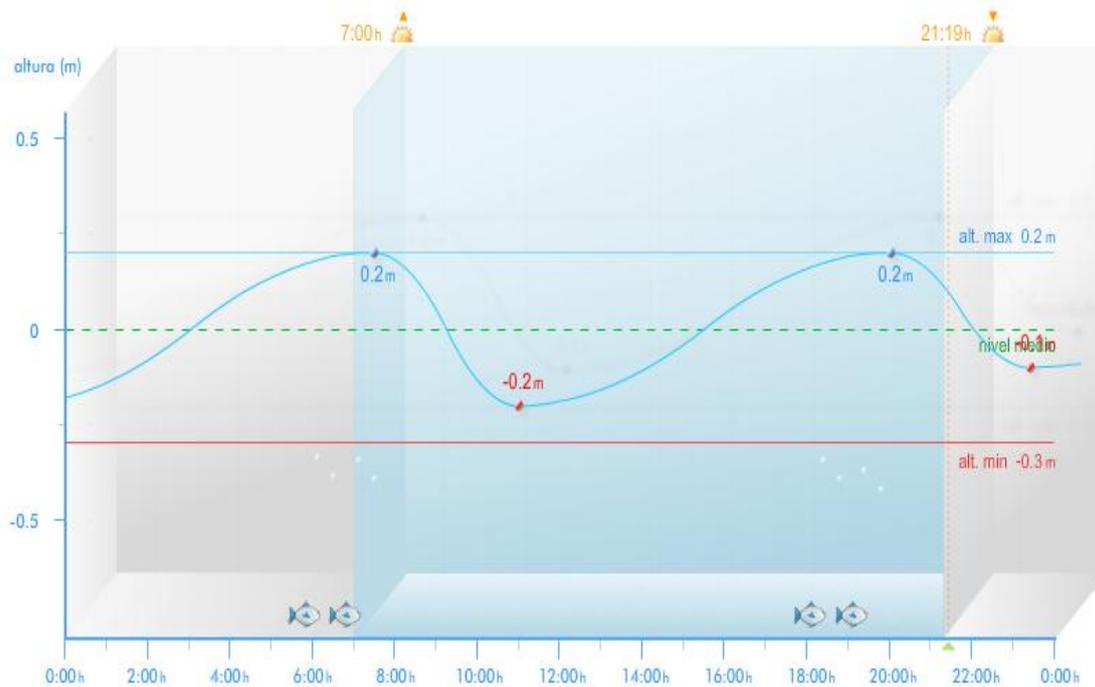


Figura 6.9. Pleamar y Bajamar. Mar Menor (Puerto Deportivo Ángel Villacieros)

- **Canal en sección trapecial:**

La transición entre la rambla y el mar, queda configurada en una desembocadura en sección aproximadamente trapecial, cuyas características morfológicas quedan definidas de la siguiente manera:

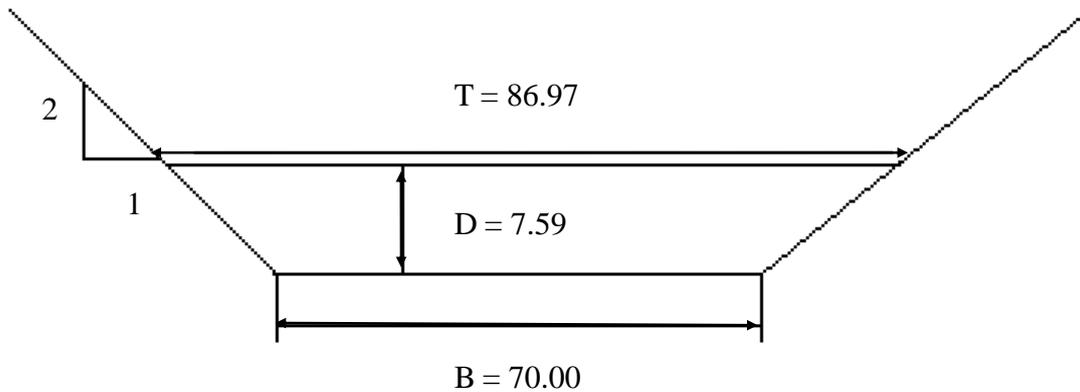


Figura 6.10. Sección Trapecial ( $S_i$ ) en la desembocadura.

- **Características de la Sección Trapecial  $S_i$ :**

Las características geométricas de la sección trapecial en la desembocadura de la Rambla del albuñón, son las que se muestran a continuación, (datos obtenidos del Boletín Oficial de la Región de Murcia (BORM)).

$$A = B \cdot D + Z \cdot D^2 = 588.9 \text{ m}^2$$

$$S = 0.0045$$

A: Área de la sección transversal  $S_i$ .

S: Pendiente del talud

- **Características Hidráulicas en la sección  $S_i$  para el caudal más desfavorable:**

Respecto a qué condiciones llega el flujo al mar, a saber si subcrítico, crítico ó supercrítico, se determina para el caudal más desfavorable un número de Froude de 2.55, ( $Fr = V / (g \cdot Rh)^{1/2}$ ), por lo que el flujo llega al mar en régimen supercrítico ( $Fr > 1$ ).

$$T = B + 2D \cdot (Z^2 + 1)^{1/2} = 87.97 \text{ m}$$

$$R_h = A/T = 6.77$$

$$V = (1/R_h) * S^{0.5} * R_h^{0.66} = 20.80 \text{ m/s}$$

$$F_r = V / (g * R_h)^{0.5} = 2.55$$

T: Espejo de agua.

$R_h$ : Radio Hidráulico.

V: Velocidad.

$F_r$ : Número de Froude.

En la figura 6.11, podemos observar como la línea de la superficie de agua (línea azul), se encuentra por debajo de la línea de energía (línea discontinua verde), indicando un flujo en régimen supercrítico en la desembocadura para el caudal más desfavorable.

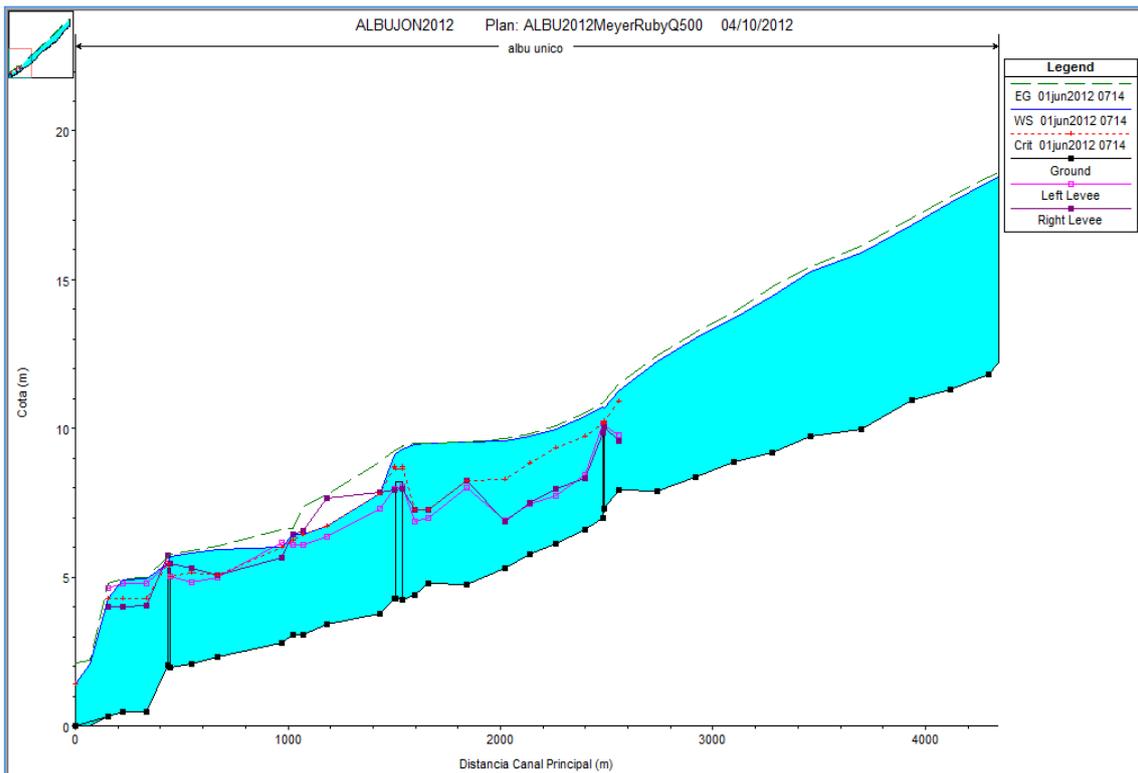


Figura 6.11. Perfil Longitudinal desembocadura Rambla del Albujaón, ( $Q_{max} = 5168.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )

### Avenida 27 de Septiembre 2009:

De la avenida ocasionada por las precipitaciones del 27 de septiembre de 2009, podemos observar el aspecto que ofrecía la desembocadura, los días 27 y 29 de septiembre de 2009 y 13 de Marzo de 2010, como muestran las siguientes imágenes obtenidas desde el mismo punto geográfico, en la carretera N-332, carretera que une Los Urrutias con el municipio de Los Alcázares, atravesando la Rambla del Albujón, a la altura de su desembocadura.



Figura 6.12. Desembocadura Rambla del Albujón: 27 de Septiembre de 2009



Figura 6.13. Desembocadura Rambla del Albujón: 29 de Septiembre de 2009



Figura 6.14. Desembocadura Rambla del Albuñón: 13 de Marzo de 2010

Cabe destacar que en el último tramo de la Rambla del Albuñón, la zona que corresponde a Los Alcázares y la Reserva Espacios Abiertos del Mar Menor, se encuentran inundados mucho antes de que se produzca el desbordamiento de la propia rambla, debido a que ambos espacios se encuentran a una cota menor que el propio lecho de la rambla, unido a la imposibilidad de encauzar los flujos laterales hacia el mar desde Torre Pacheco.



Figura 6.15 Vista Aérea. Desembocadura Rambla del Albuñón (Periódico digital LaVerdad.es)

### 6.3. Análisis de resultados

El análisis de este proyecto se va a circunscribir únicamente a la simulación de los procesos de socavación, transporte y sedimentación en la solera de la Rambla del Albuñón, en sus últimos 11 km, evaluados a través de las diferentes metodologías de distintos autores para el escenario actual, realizando una única comparativa de la socavación, transporte y sedimentación, producida para cada uno de los periodos de retorno seleccionados, por entender que no tiene sentido de aplicación en la mejora del bienestar de las poblaciones colindantes, el analizar escenarios pasados, que ya nada tienen que ver con la provisión de nuevas infraestructuras y encauzamientos, que dispone un territorio muy cambiado con una respuesta diferente ante una avenida.

#### Escenario Actual:



Figura 6.16 Orto imagen NATMUR-08 (Agosto 2008)

Hay que destacar que el presente análisis, no contempla en la última sección aguas arriba de la zona de estudio, el transporte de sedimentos que debería ser ingresado por los diferentes hidrogramas, como consecuencia de interactuar con toda la cuenca restante, no obstante esta simulación muestra una aproximación de cuál sería el comportamiento hidráulico de la rambla, para cada uno de los periodos de retorno descritos.

Con las condiciones de contorno discutidas anteriormente en la Rambla del Albuñón, considerando además, que la mejor ecuación de las posibles que podemos asignar para la modelización de la velocidad de caída de sedimentos, en el rango de tamaños comprendidos entre arenas muy finas y gravas medias en nuestra zona de estudio, es la ecuación de Rubey, se inicia el análisis de resultados.

### 6.3.1. Análisis de la evolución del Talweg

Respecto al Balance de las socavaciones y sedimentaciones, hay que destacar que el programa Hec-Ras, asigna para las variaciones de la solera del canal, el signo positivo a las sedimentaciones, y negativo a las socavaciones. Para detectar cual es el carácter de la rambla, es decir, si predominan las socavaciones o por el contrario las sedimentaciones, basta enfrentar todos los movimientos verticales acumulados de las masas de sedimento, producidos en la solera durante los días de duración del hidrograma, para cada una de las secciones, obteniendo al final un valor positivo ó negativo, cuyo signo destaca el predominio en el tramo de sedimentaciones o socavaciones respectivamente, y así su carácter sedimentario ó erosivo.

Respecto a la variación absoluta del Talweg, la cota 0 representa la solera original; también hay que tener en cuenta como son obtenidas las representaciones de los procesos de erosión y sedimentación:

- $A - C = \text{Valor (+)} \longrightarrow \text{Sedimentación}$
  - $B - C = \text{Valor (-)} \longrightarrow \text{Erosión}$
- Donde A, C y B representan valores de cota.  $A > C > B$

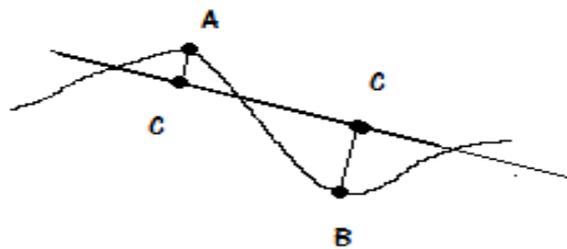


Figura 6.17. Erosión - Sedimentación

Las ecuaciones para las cuales se analizan los datos obtenidos son:

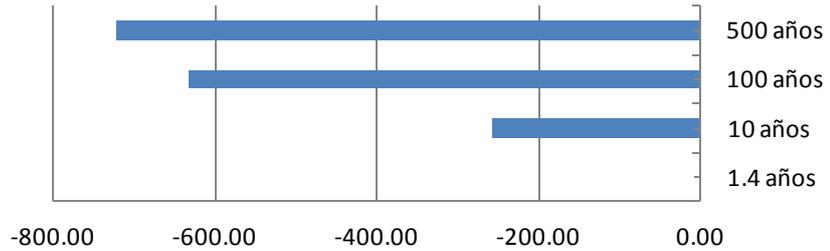
- Ackers & White (1973)
- Engelund & Hansen (1967)
- Laursen (1968,1989)
- Meyer, Peter & Müller (1948)
- Toffaletti (1968)
- Yang (1973,1984)
- Wilcock (2001)

### 6.3.1.1 Análisis de resultados:

#### 6.3.1.1.1 Balance de socavaciones y sedimentaciones. Variación absoluta del Talweg.

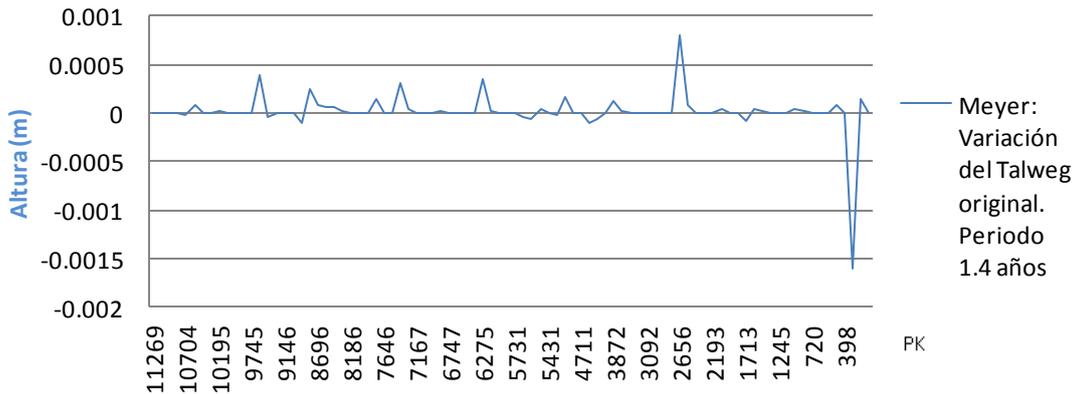
## MEYER PETER & MÜLLER

Meyer: Balance de Socavaciones y sedimentaciones

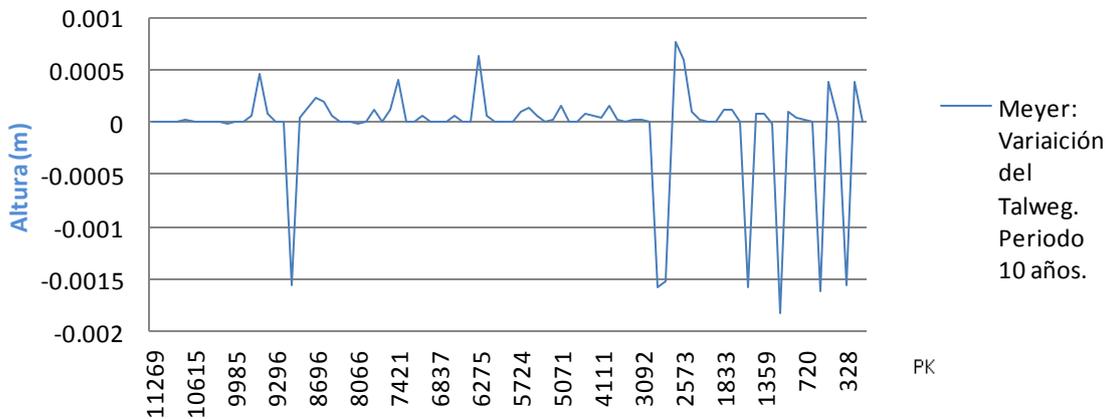


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
Balance Sedimentos (Ton)	0.00	-258.27	-633.90	-723.28

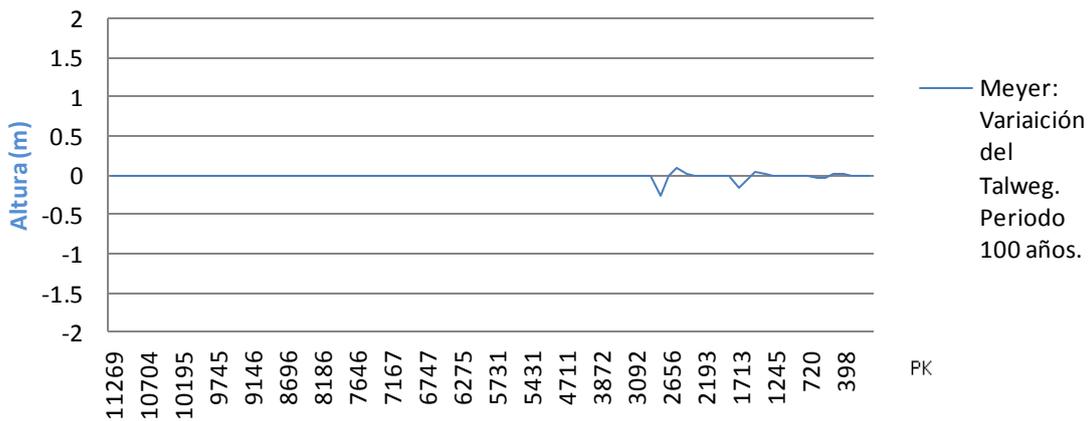
Meyer: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años



Meyer: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años



**Meyer: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 100 años**



**Meyer: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 500 años**

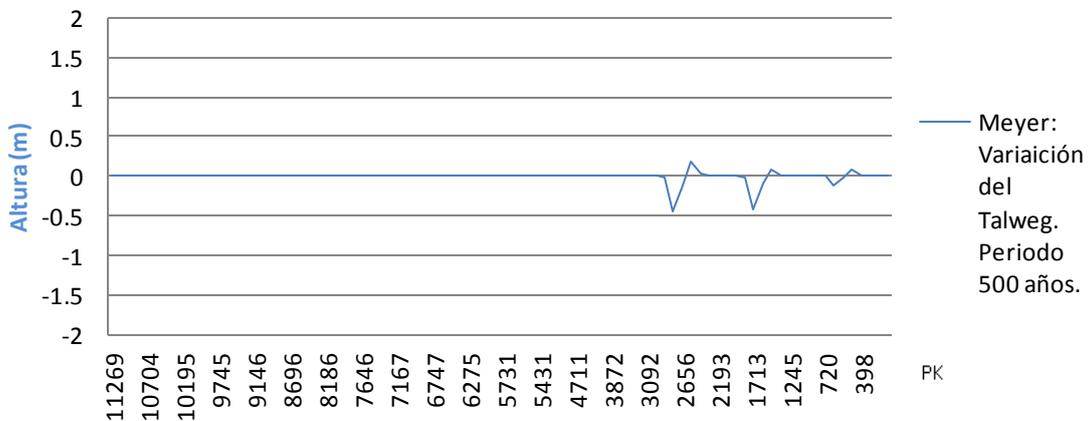


Figura 6.18 Meyer: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

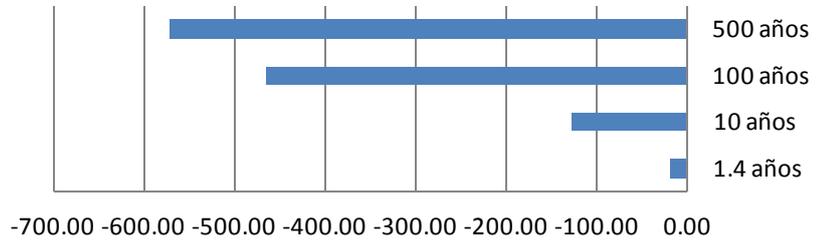
**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos que para todos los periodos, el carácter de la rambla es erosivo, no obstante, los incrementos son muy acusados, así el incremento entre el periodo de retorno de 1.4 y 10 años se cuantifica en un 35.67%, el incremento entre el periodo de 10 y 100 años se cuantifica en 51.97%, y el incremento entre el periodo de 100 y 500 años se cuantifica en 12.36%, obteniendo un incremento medio de 37.99%.

Respecto a la variación absoluta del talweg original, observamos que para los periodos de 1.4 y 10 años, las variaciones registradas en el Talweg se encuentran entre el binomio (-0.0018m, 0.0016m), además para estos periodos las variaciones registradas se encuentran en el mismo rango para toda la extensión de la zona de estudio; no ocurre lo mismo para los periodos de 100 y 500 años, donde las variaciones más gruesas son registradas en el tramo bajo, con variaciones que van desde -0.44m a 0.25m, mientras en el tramo más alto, las variaciones se encuentran en las mismas fronteras que para los periodos de 1.4 y 10 años.

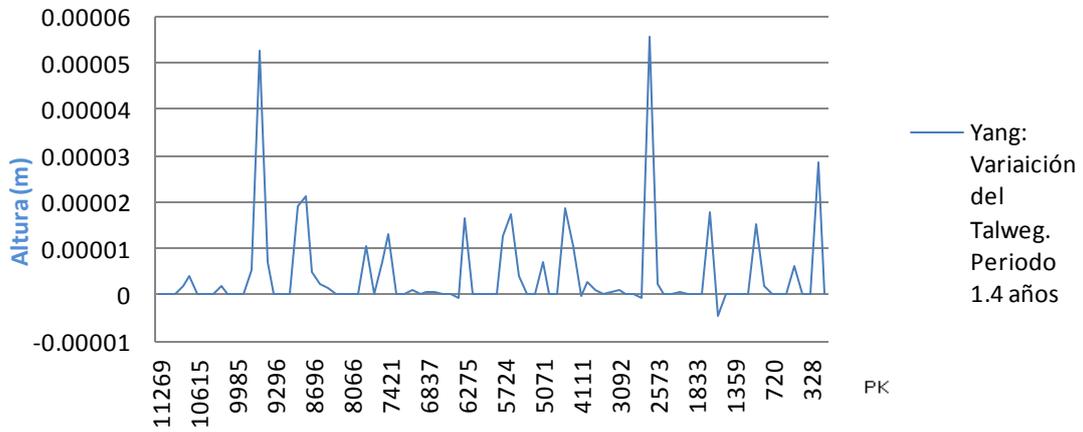
# Yang

## Yang: Balance Socavaciones y sedimentaciones

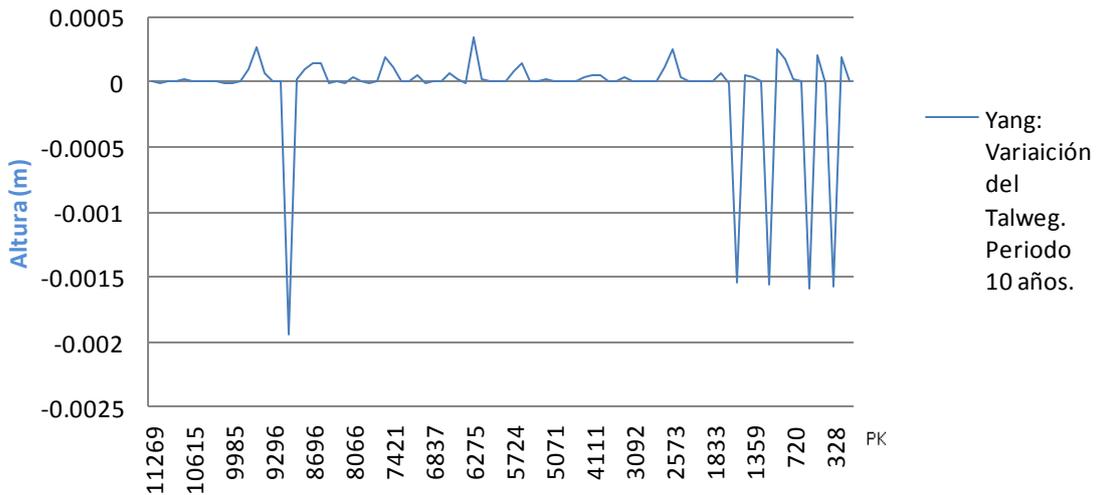


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
■ Yang: Balance Sedimentos (Ton)	-19.25	-127.94	-465.26	-571.78

### Yang: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años



### Yang: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años



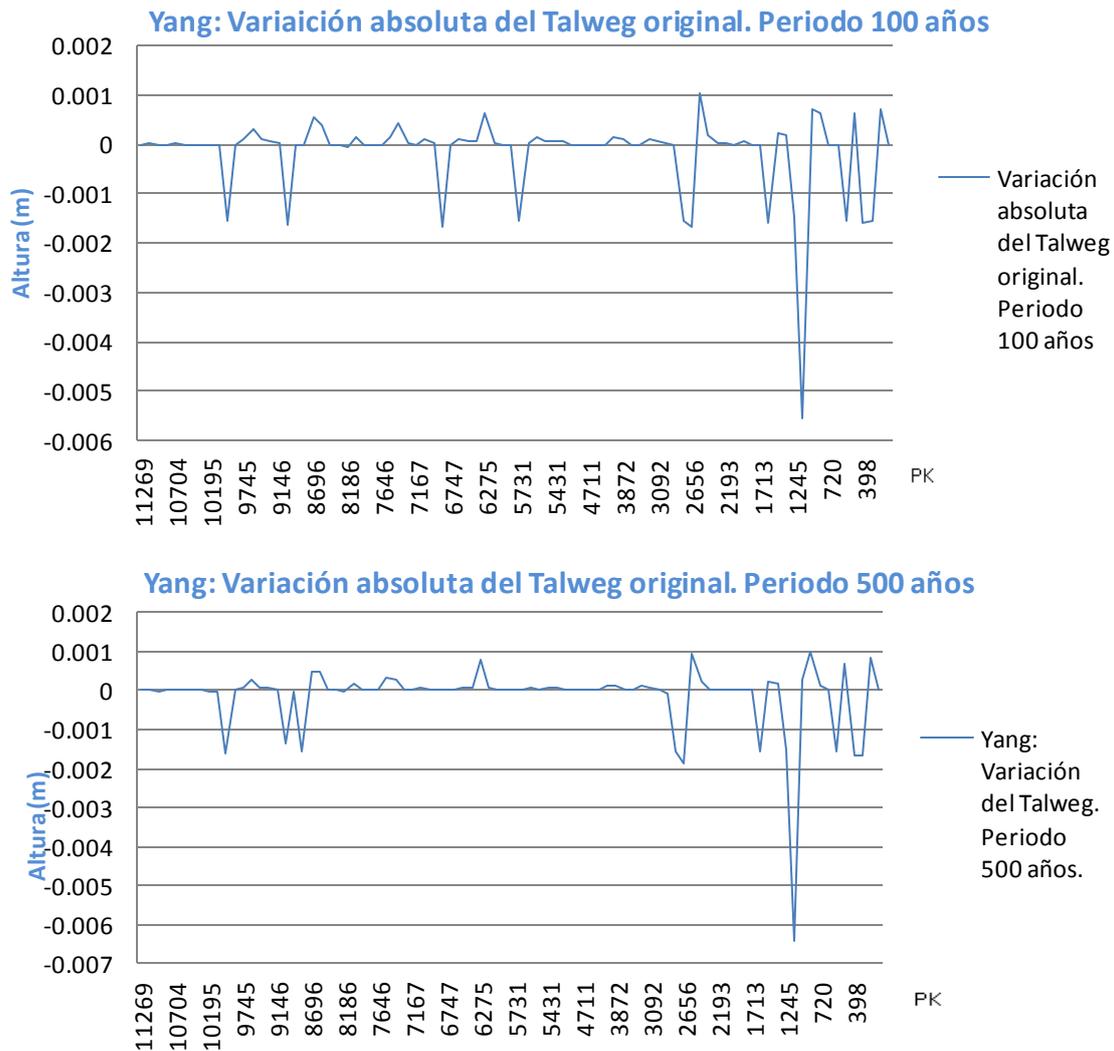


Figura 6.19 Yang: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

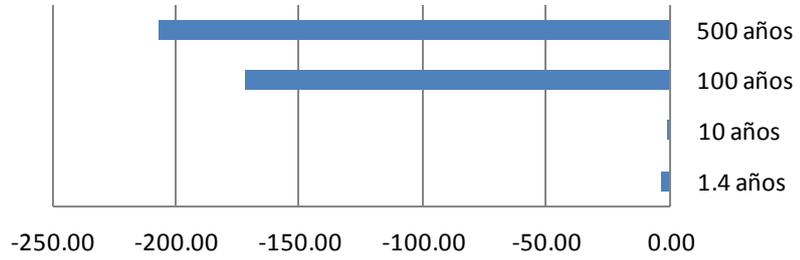
**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos que, para todos los periodos el carácter de la rambla es progresivamente erosivo, destacando que los incrementos se cuantifican en: para los periodo 1.4 y 10 años en 19.1%, para los periodos de 10 y 100 años en 58.99%, y para los periodos 100 y 500 años 18.63%, obteniendo un incremento medio de 38.9%.

Respecto a la variación absoluta del Talweg original, observamos que para el periodo de 1.4 años, la variaciones sufridas en el talweg son en su mayoría sedimentaciones de muy poca magnitud, por lo que las erosiones se estarán produciendo en la solera, en puntos distintos al talweg. Para el periodo de 10 años se produce una sedimentación media del entorno de 0.00011m, mientras que para las erosiones hay que destacar los eventos producidos próximos a la desembocadura con una profundidad de 0.0016m. Para los periodos de 100 y 500 años las sedimentaciones y socavaciones son muy parecidas, tanto en su disposición dentro del tramo de cauce como en magnitud, como así muestran la figura (6.19).

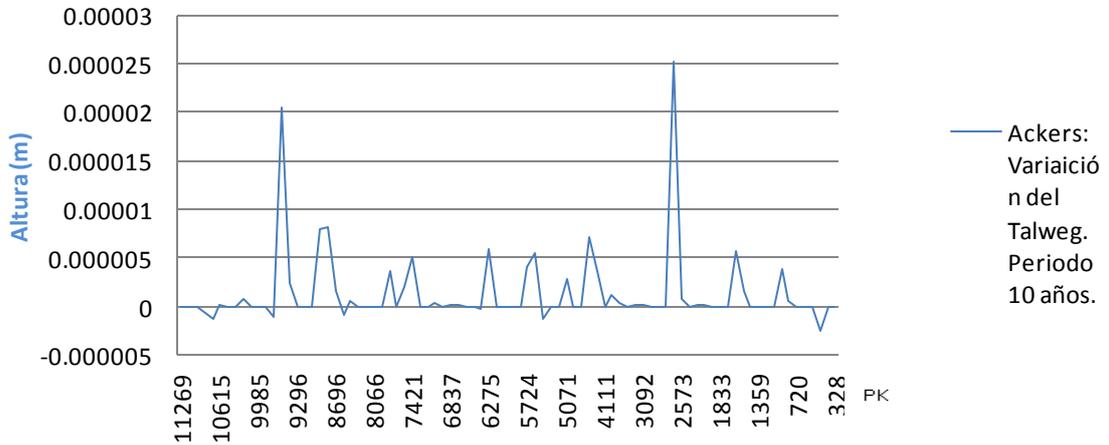
# Ackers

**Ackers: Balance Socavaciones y sedimentaciones**

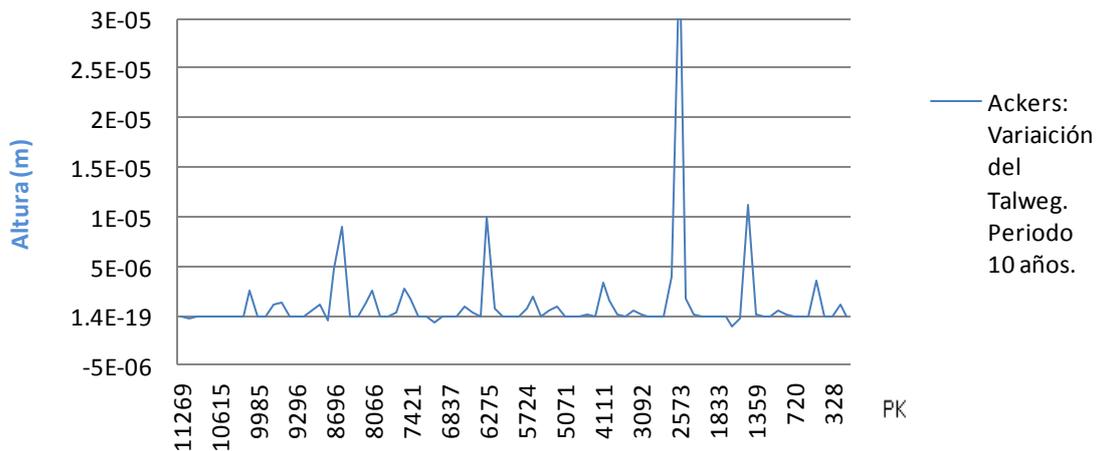


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
■ Ackers: Balance Sedimentos (Ton)	-3.66	-1.30	-171.74	-207.13

**Ackers: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años**



**Ackers: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años**



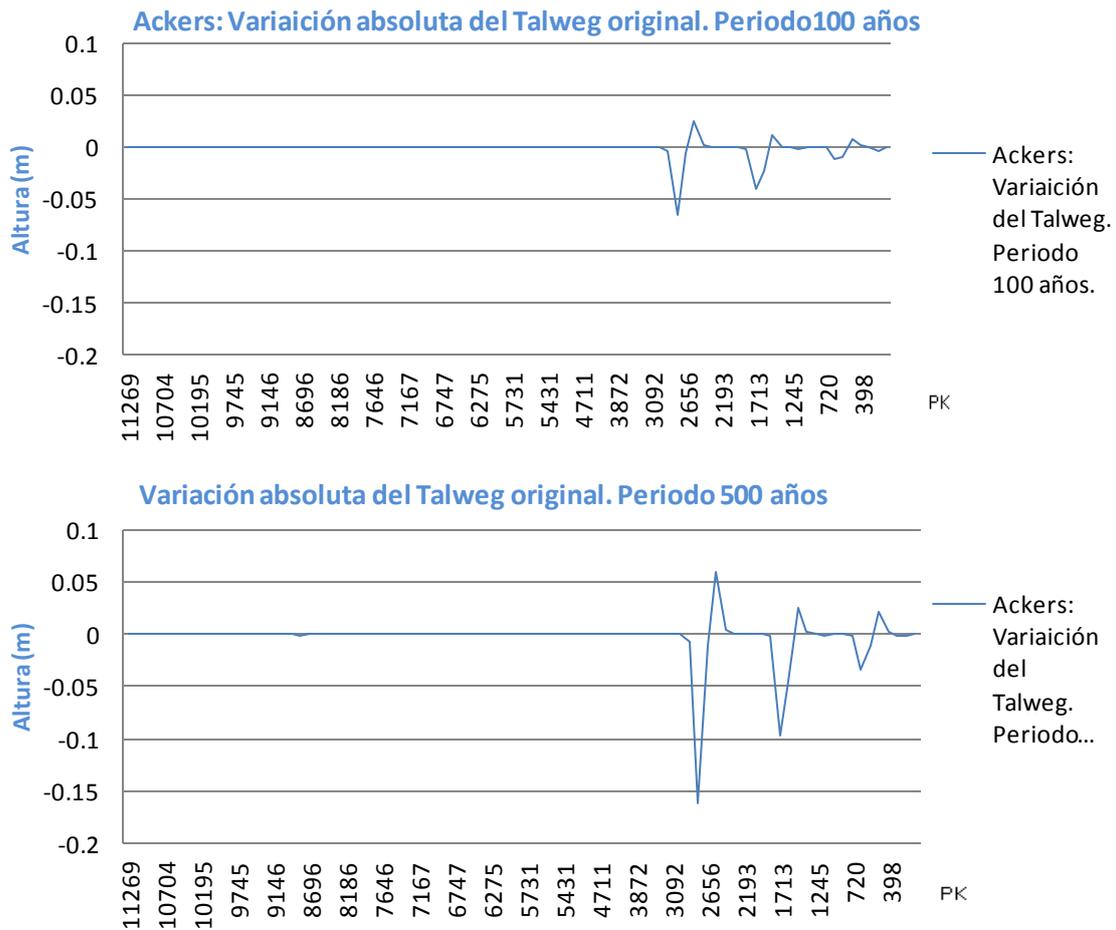


Figura 6.20 Ackers: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

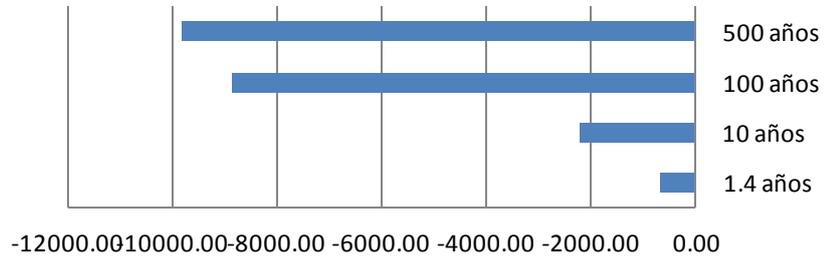
**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos que, para todos los periodos el carácter de la rambla es erosivo, destacando que para los periodos de 1.4 y 10 años, los eventos de socavación y sedimentación se encuentran más compensados, respecto a los periodos más potentes de 100 y 500 años. Los incrementos para los distintos periodos de retorno se cuantifican en: para los periodo de 1.4 y 10 años un retroceso de -1.1%, para los periodos de 10 y 100 años en 82.29%, y para los periodos de 100 y 500 años en 17.09% años, obteniendo un incremento medio de 45.69%.

Respecto a la variación absoluta del talweg original, observamos que las sedimentaciones predominan respecto a las erosiones, para los periodos de 1.4 y 10 años, destacando que para el tramo alto, los eventos de sedimentación y erosión son más potentes para el primer periodo, lo contrario ocurre en el tramo más bajo donde el periodo de 10 años destaca con respecto al anterior. Para los periodos de 100 y 500 años, se observa que las variaciones en el tramo alto de la zona de estudio, se encuentra en el mismo rango de valores que los periodos de 1.4 y 10 años, destacando entonces el tramo bajo con variaciones similares pero de mayor magnitud para el último periodo.

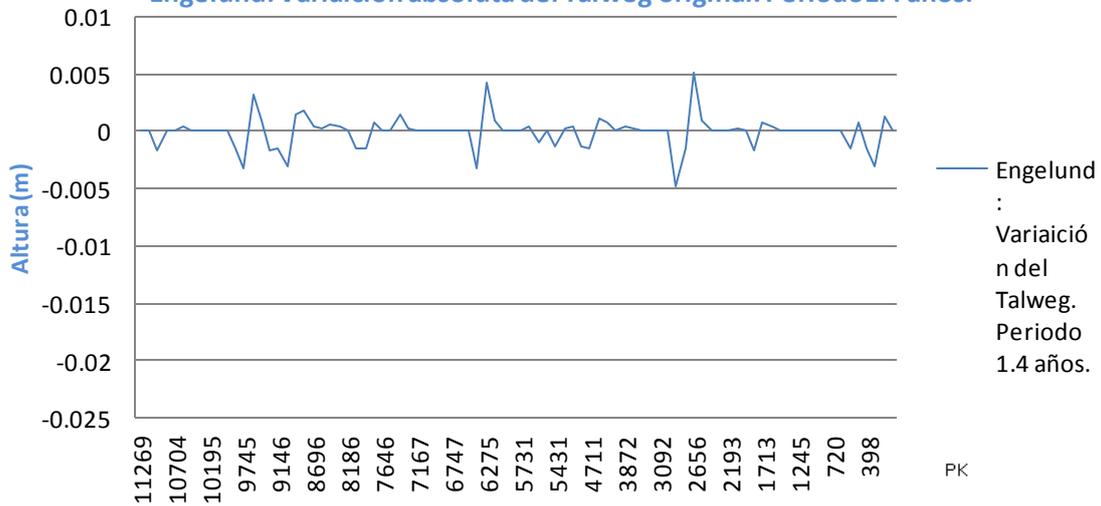
# Engelund

**Engelund: Balance Socavaciones y sedimentaciones**

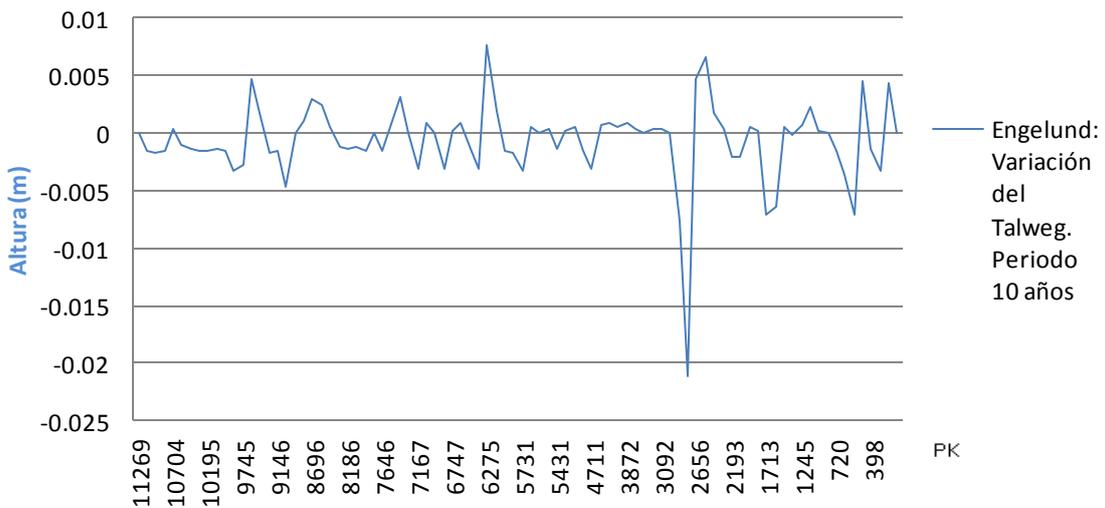


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
■ Engelund: Balance Sedimentos (Ton)	-685.97	-2210.14	-8868.03	-9804.44

**Engelund: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años.**



**Engelund: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años**



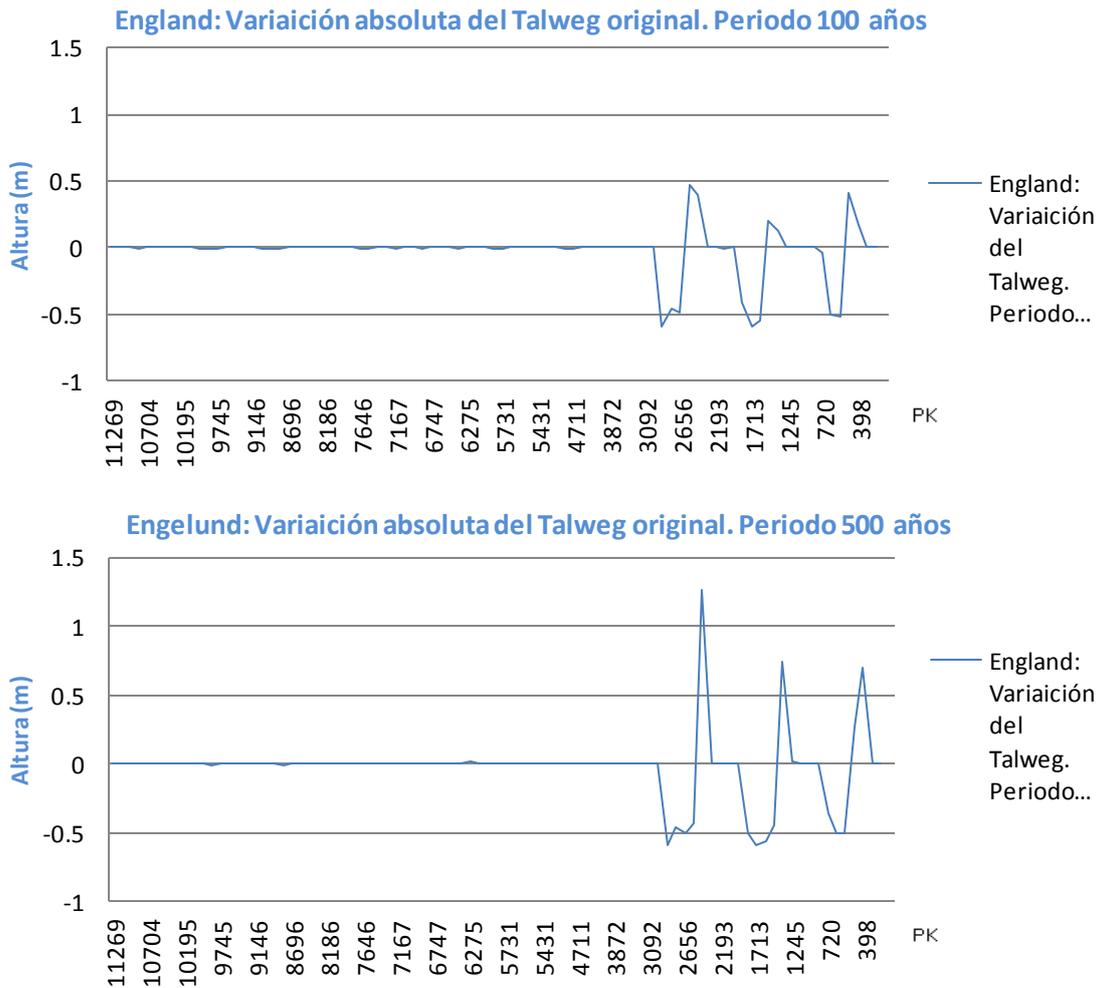


Figura 6.21 Engelund: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

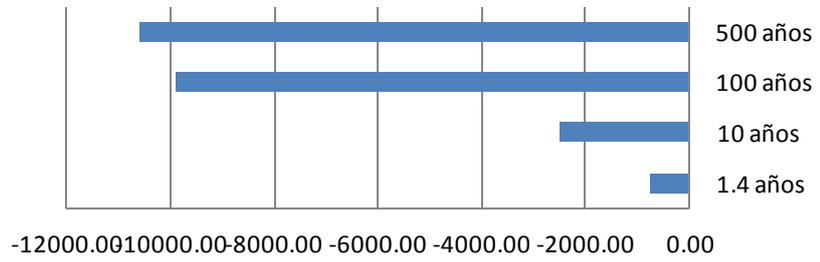
**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos que el carácter de la rambla es erosivo, en cada uno de los periodos. Los incrementos son cuantificados en: para los periodos de 1.4 y 10 años en 15.55%, para los periodos de 10 y 100 años en 67.9%, y para los periodos de 100 y 500 años en 9.56%, obteniendo un incremento medio de 44.09%.

Respecto a la variación absoluta del Talweg original, se observa la similitud de los eventos de sedimentación y socavación, entre los periodos de 1.4 y 10 años, con algunas diferencias en este último periodo, debidas al incremento del esfuerzo cortante. Destacar que las variaciones del talweg para el periodo 1.4 años se encuentra entre 0.0009m y -0.04m, y para el periodo de 10 años, entre 0.007m y -0.021m. Al igual que sus ecuaciones homologas, para las variaciones en los periodos de 100 y 500 años, observamos dos tramos diferenciados, el tramo alto, con diferencias en la variación del talweg en el rango de las anteriormente señaladas, y el tramo bajo, con variaciones más potentes, cuantificadas para el periodo de 100 años, entre 0.0013m y -0.42m, y para el periodo de 500 años, entre 1.26m y -0.59m

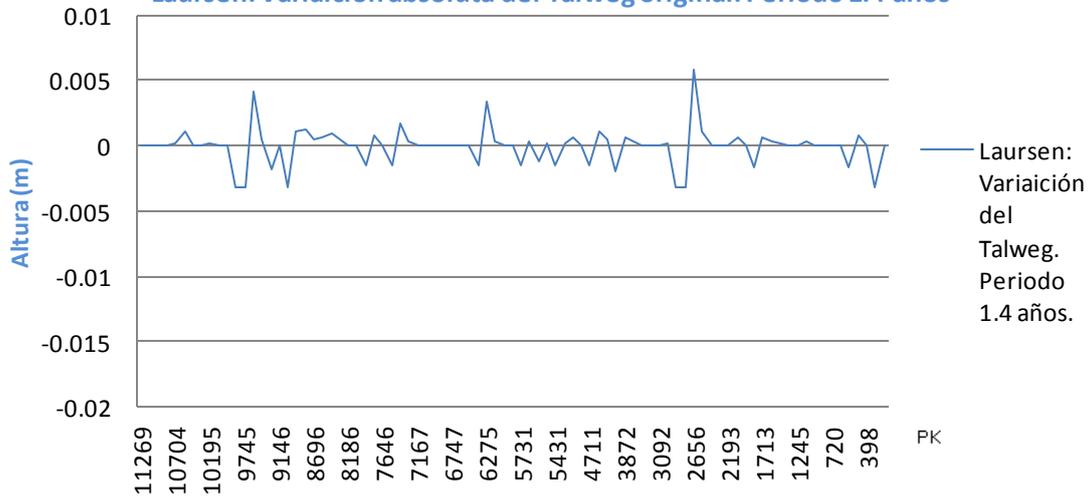
# Laursen

## Laursen: Balance Socavaciones y sedimentaciones

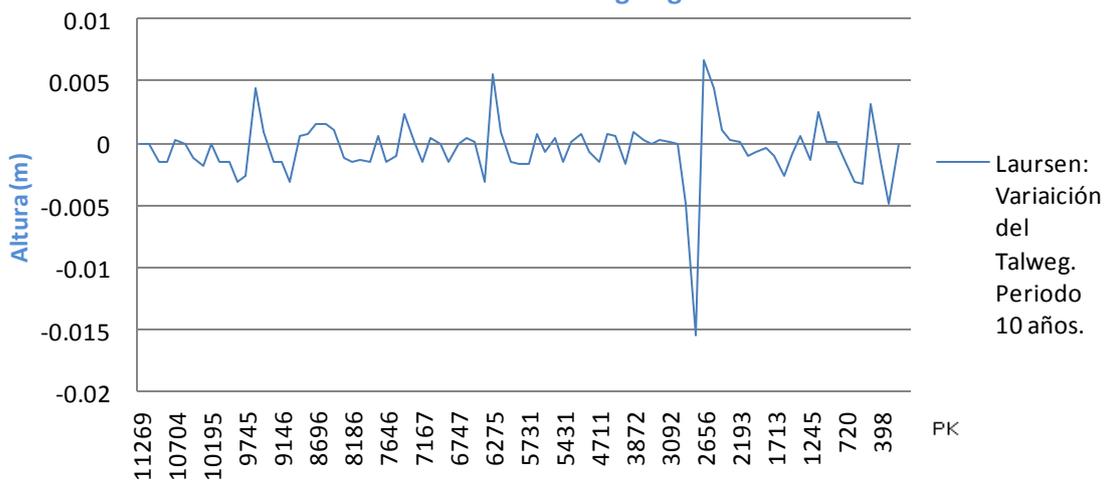


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
■ Laursen: Balance Sedimentos (Ton)	-776.09	-2516.16	-9923.66	-10615.38

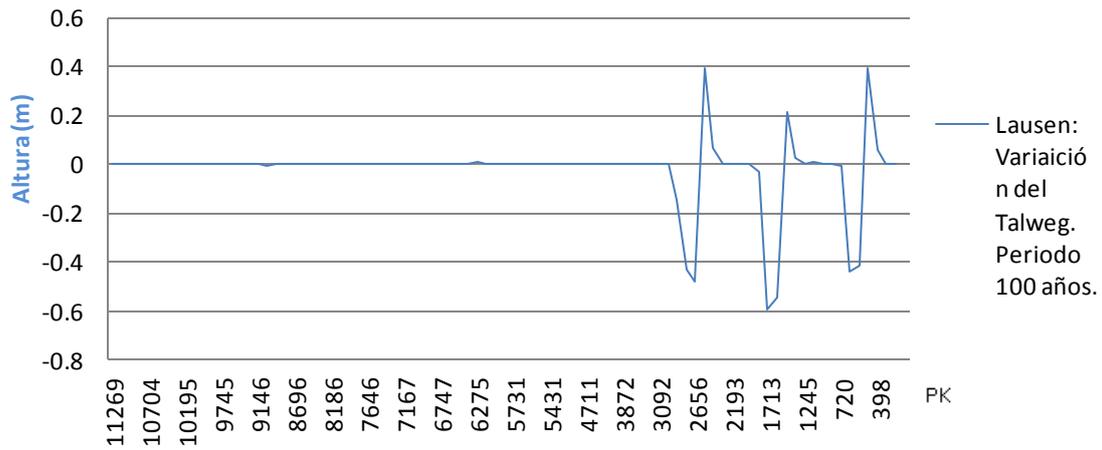
### Laursen: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años



### Laursen: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años



Laursen: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 100 años



Laursen: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 500 años

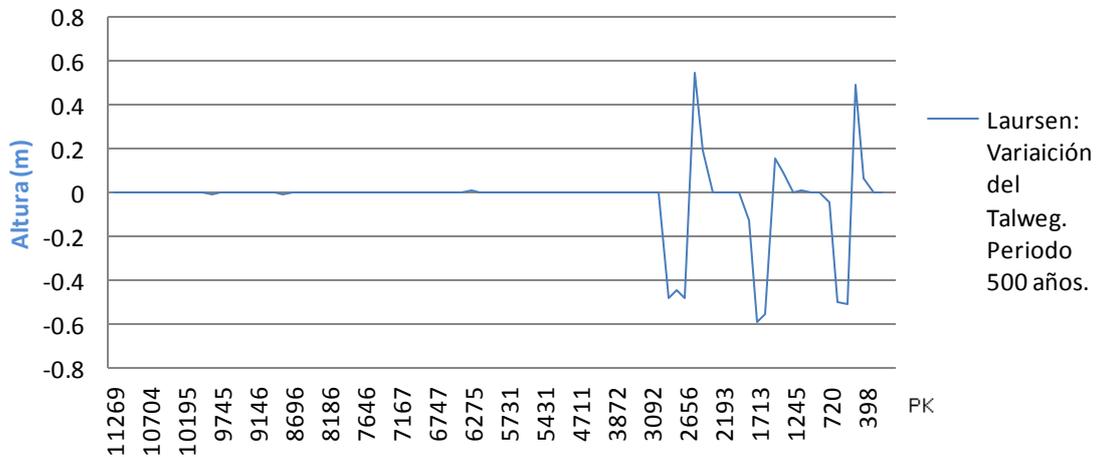


Figura 6.22 Laursen: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

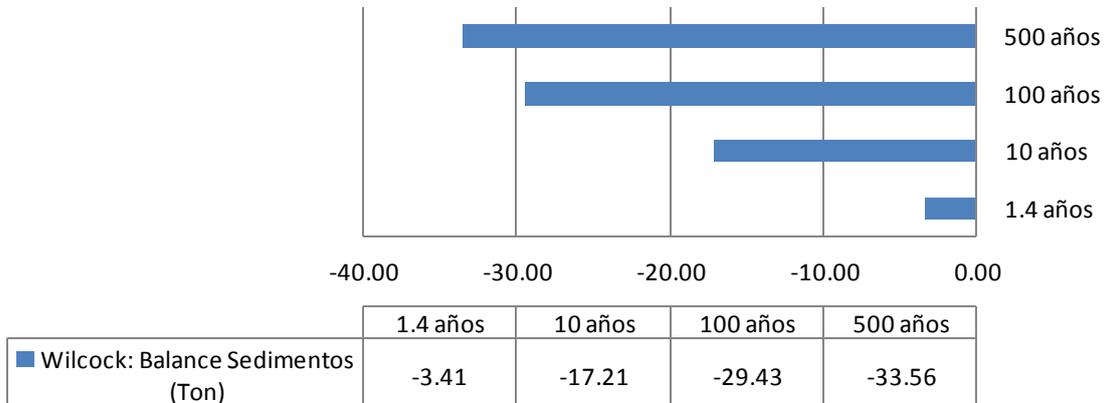
COMENTARIO:

Respecto al balance de sedimentos, observamos que el carácter de la rambla es erosivo, en cada uno de los periodos. Los incrementos del balance de sedimentos se cuantifican en: para los periodos de 1.4 y 10 años en 16.39%, para los periodos de 10 y 100 años en 69.78%, y para los periodos de 100 y 500 años en 6.52%, obteniendo un incremento medio cuantificado en 40.76%.

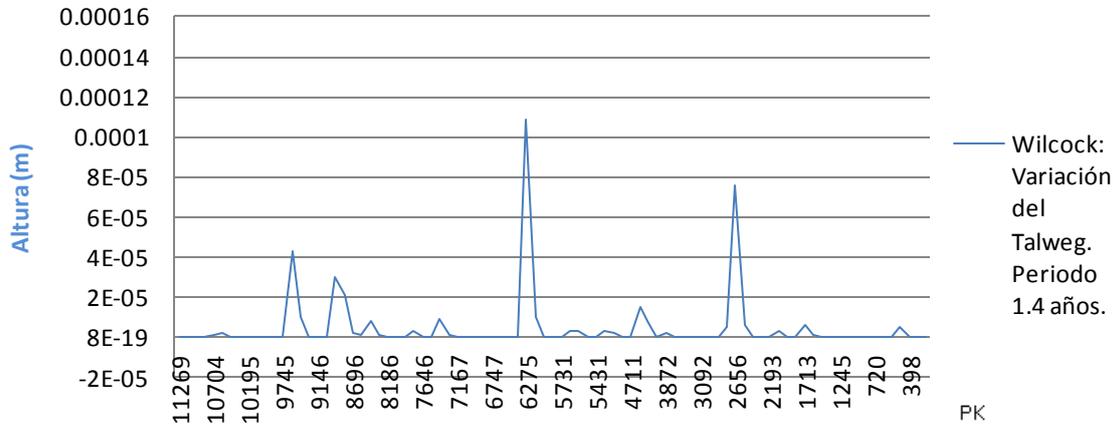
Respecto a la variación absoluta del Talweg original, observamos que para los periodos de 1.4 y 10 años, los eventos de las socavaciones y sedimentaciones coinciden aproximadamente en las mismas secciones, pero con diferente magnitud. Una vez más, los periodos de 100 y 500 años producen eventos claramente diferenciados en dos tramos, como ya se ha hecho referencia anteriormente. Las variaciones en el tramo bajo se cuantifican de la siguiente forma: para el periodo de 100 años entre 0.38m y -0.39m, y para el periodo de 500 años entre 0.54m y 0.59m.

# Wilcock

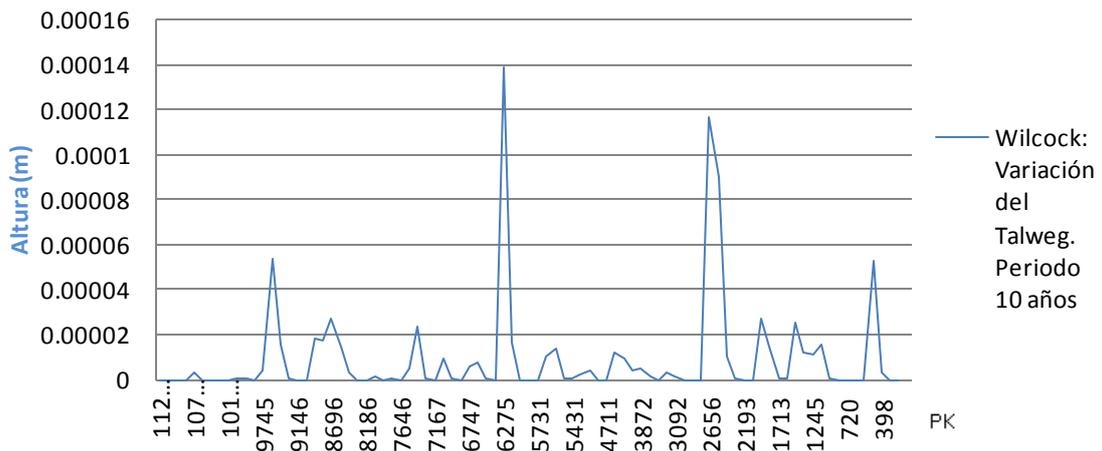
**Wilcock: Balance socavaciones y sedimentaciones**



**Wilcock: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años.**



**Wilcock: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años**



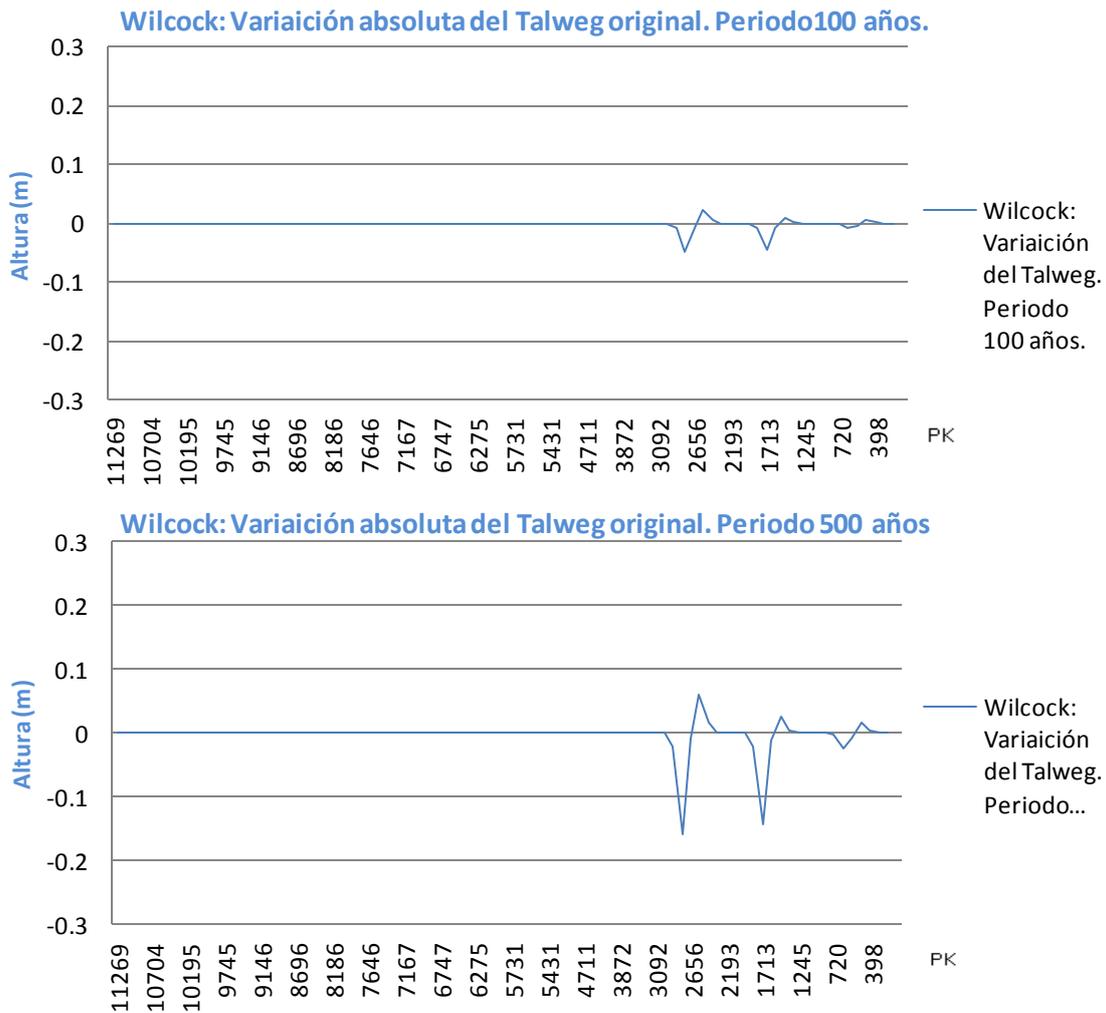


Figura 6.23 Wilcock: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

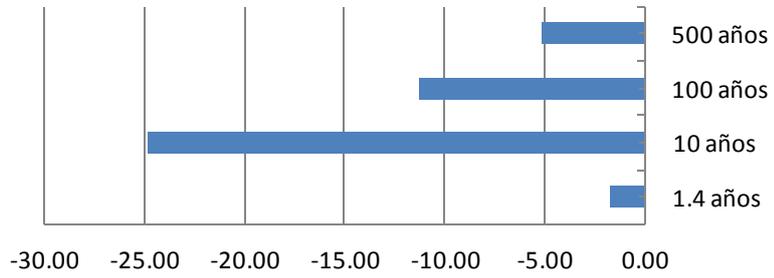
**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos que el carácter de la rambla es erosivo en cada uno de los periodos analizados. La evolución de los incrementos es ahora menos escalonada, y son cuantificados en: para los periodos de 1.4 y 10 años en 41.12%, para los periodos de 10 y 100 años en 36.41%, y para los periodos de 100 y 500 años en 12.31%, obteniendo un incremento medio cuantificado en 31.56%.

Respecto a la variación absoluta del Talweg original, observamos que para los periodos de 1.4 y 10 años las variaciones del Talweg son similares, destacando un gran número de sedimentaciones y muy escasas erosiones en el Talweg. Respecto a los periodos de 100 y 500 años, otra vez se diferencian dos tramos diferenciados, en el que el tramo más bajo, produce sedimentaciones más grandes y socavaciones más profundas, en el entorno de 0.0021m y -0.008m para el periodo de 100 años, y de 0.058m y -0.15m para el periodo de 500 años.

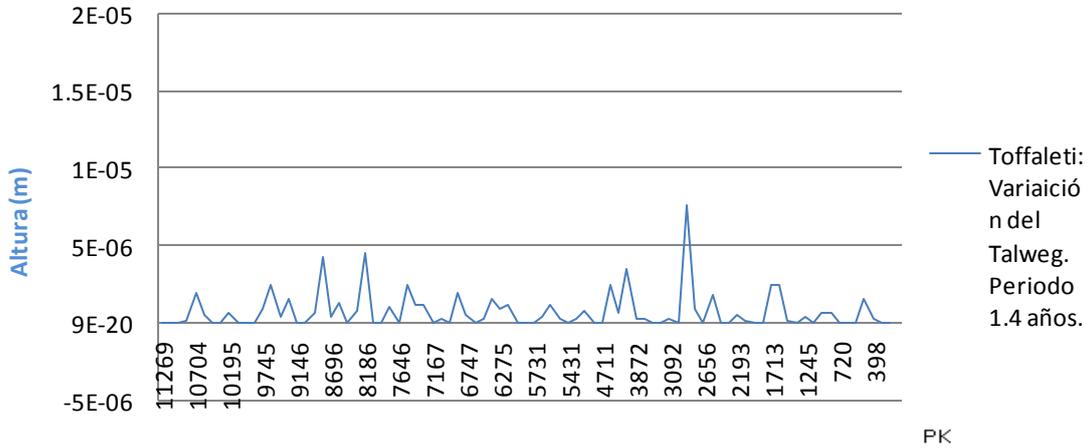
# Toffaleti

**Toffaleti: Balance Socavaciones y sedimentaciones**

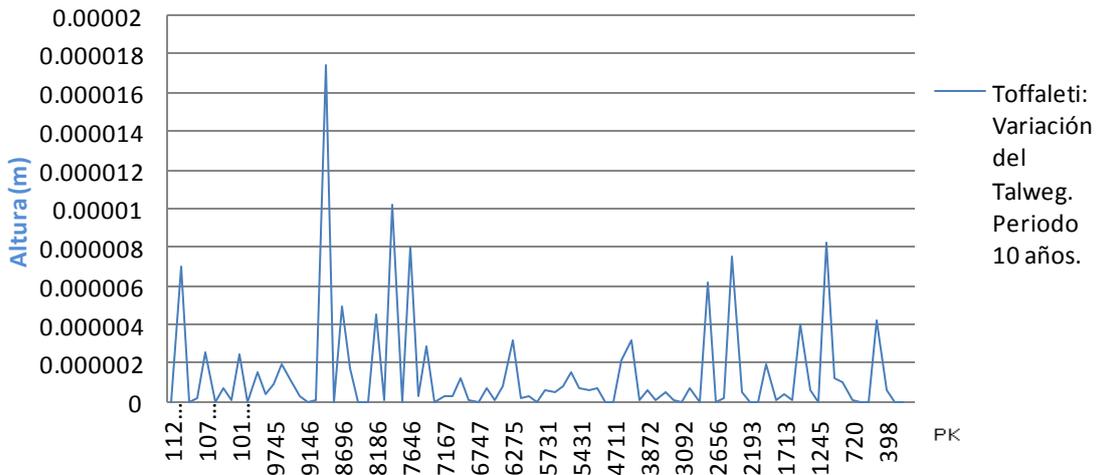


	1.4 años	10 años	100 años	500 años
■ Toffaleti: Balance Sedimentos (Ton)	-1.74	-24.78	-11.27	-5.12

**Toffaleti: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 1.4 años**



**Toffaleti: Variación absoluta del Talweg original. Periodo 10 años**



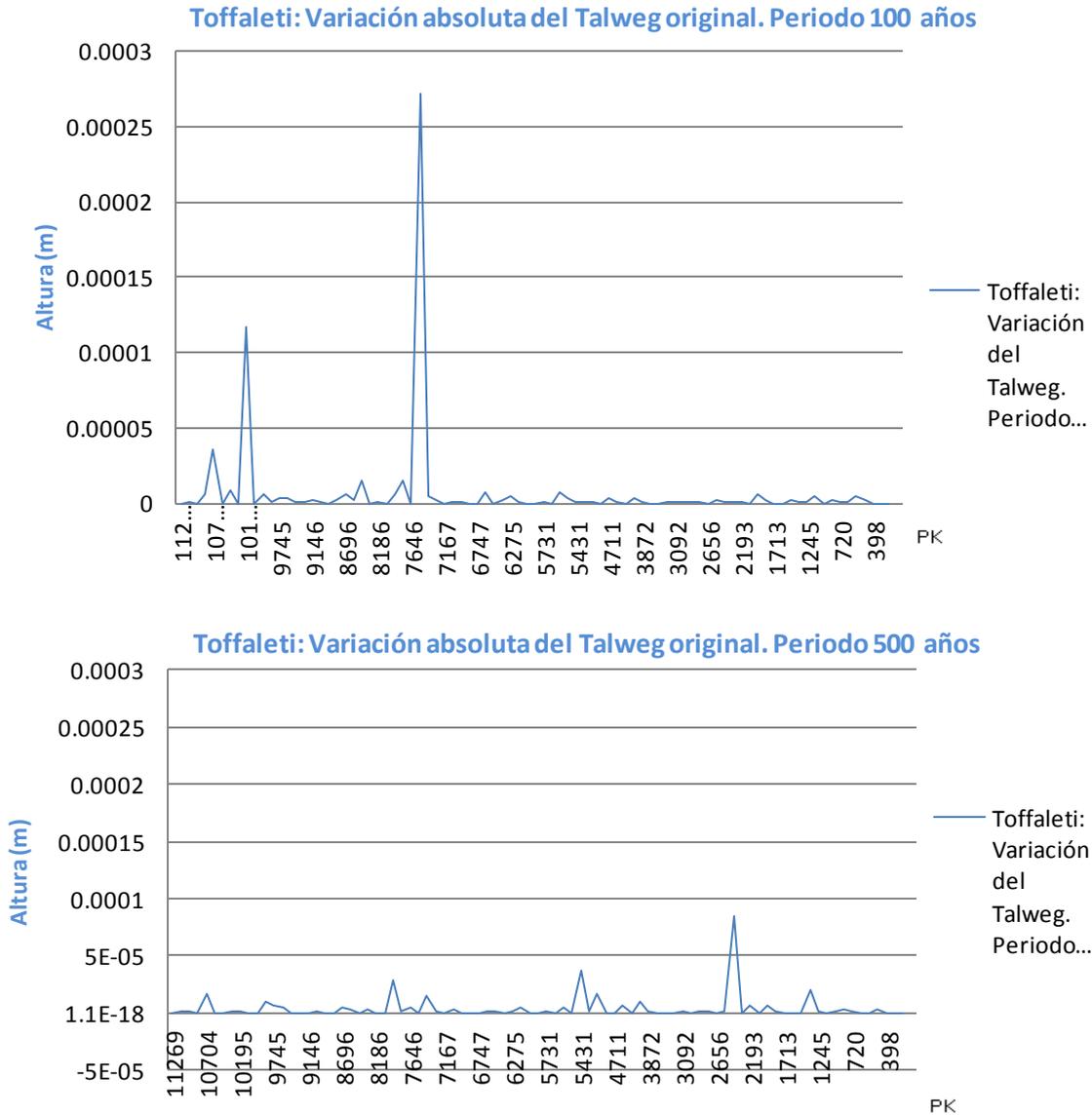


Figura 6.24 Toffaleti: Balance de sedimentos y Variación absoluta del Talweg

**COMENTARIO:**

Respecto al balance de sedimentos, observamos carácter erosivo en la rambla, pero por primera vez un balance irregular no ascendente, donde periodos tales como 1.4, 100 y 500 años, compensan las socavaciones con las erosiones mucho mejor que el periodo de 10 años. Los incrementos obtenidos para este caso son: para los periodos de 1.4 y 10 años, un incremento del 92.98%, para los periodos de 10 y 100 años, se cuantifica en -54.2%, y para los periodos de 100 y 500 años, se cuantifica en -24.82%, obteniendo un incremento medio de 56.55%.

Respecto a las variaciones absolutas del Talweg original, solo muestra sedimentaciones en cada uno de los periodos, sin mostrar signos de sedimentaciones, siendo un comportamiento errático y poco coherente, si lo comparamos con el resto de ecuaciones.

### 6.3.1.1.1 Comparación del Balance de socavaciones y sedimentaciones

#### PERIODO 1.4 AÑOS

Balance Socavaciones y sedimentaciones. Periodo 1.4 años

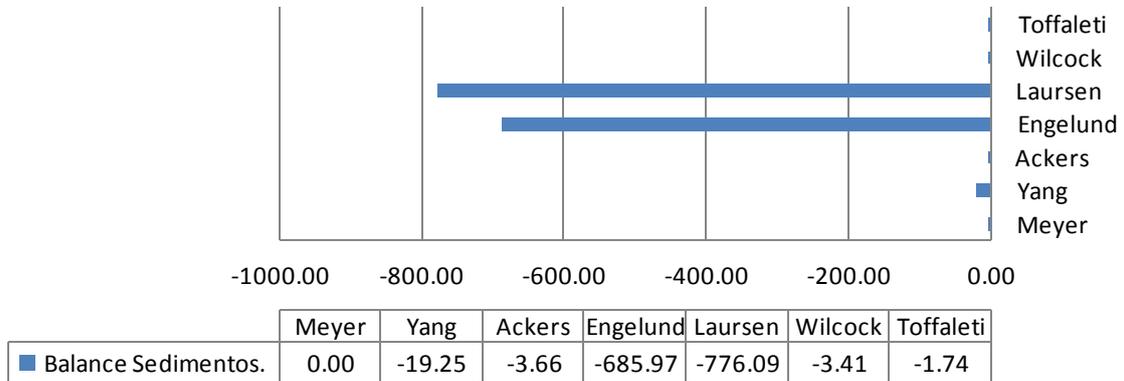


Figura 6.25 Balance de sedimentos

COMENTARIO:

Para el periodo 1.4 años con caudal punta de 34.3 m<sup>3</sup>/s, observamos que un primer grupo formado por Laursen y Engelund, destacando como las formulaciones más erosivas, mientras en un segundo grupo formado por Ackers, Toffaleti, Wilcock, Yang y Meyer, destacamos la formulación de Yang como la más erosiva en este grupo.

#### PERIODO 10 AÑOS

Balance Socavaciones y sedimentaciones. Periodo 10 años

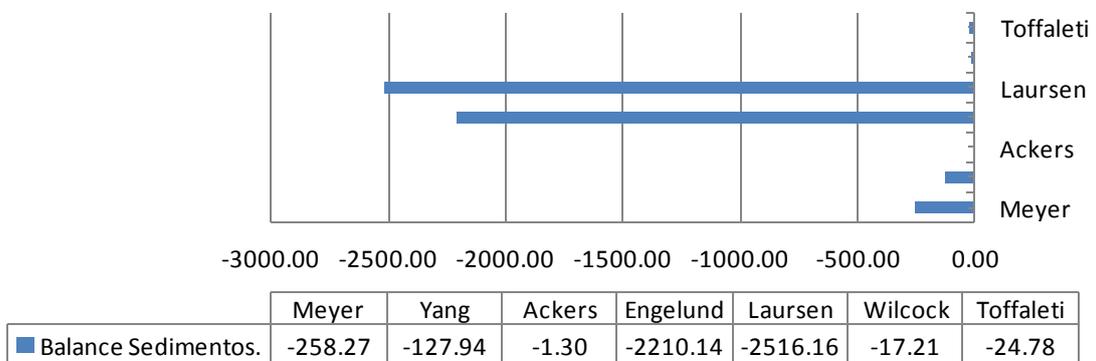


Figura 6.26 Balance de sedimentos

COMENTARIO:

Para el periodo 1.4 años con caudal punta de 758.4 m<sup>3</sup>/s, observamos un primer grupo formado por Laursen y Engelund, destacando como las formulaciones con carácter más erosivo, mientras un segundo grupo formado por Ackers, Toffaleti, Wilcock, Yang Y Meyer, destacamos este ultimo por ser para este segundo grupo la formulación con mayor carácter erosivo.

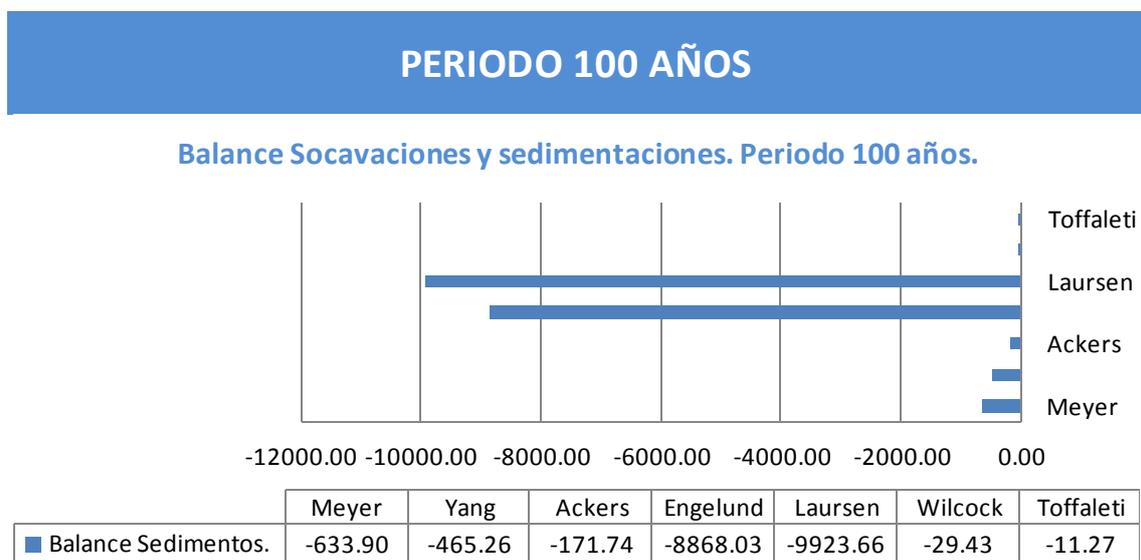


Figura 6.27 Balance de sedimentos

COMENTARIO:

Para el periodo de 100 años con caudal punta de 3687.6 m<sup>3</sup>/s, observamos un primer grupo formado por Laursen y Engelund, destacando como las formulaciones con carácter más erosivo, mientras, un segundo grupo formado por Ackers, Toffaleti, Wilcock, Yang y Meyer, destacando al igual que en el periodo 10 años, Meyer como la formulación con mayor carácter erosivo para este segundo grupo.

## PERIODO 500 AÑOS

**Balance Socavaciones y sedimentaciones. Periodo 500 años**

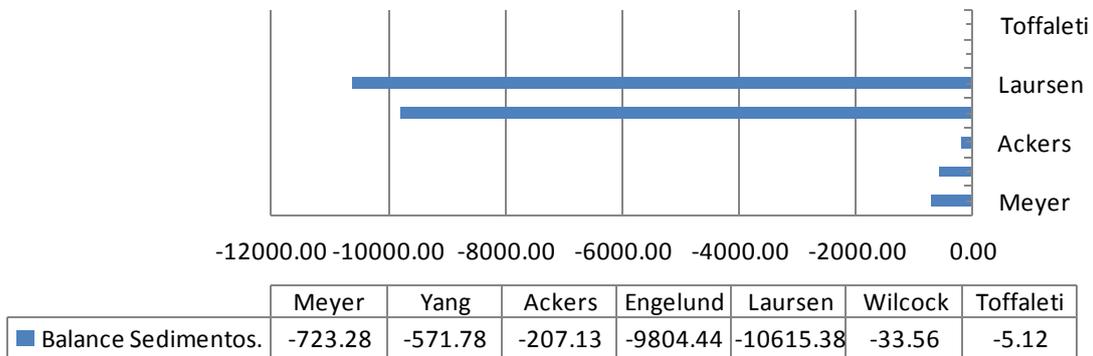


Figura 6.28 Balance de sedimentos

### COMENTARIO:

Para el periodo de 500 años con caudal punta de 5168.7 m<sup>3</sup>/s, observamos un primer grupo formado por Laursen y Engelund, destacando como las formaciones con carácter más erosivo, mientras, un segundo grupo formado por Ackers, Toffaleti, Wilcock, Yang y Meyer, destacando al igual que en el periodo 10 y 100 años, Meyer como la formulación con mayor carácter erosivo para este segundo grupo.

### NOTA

**Hay que destacar que:**

- **Engelund no es una formulación adecuada para el rango de tamaños representados en la Rambla del Albuñón, al subestimar para la carga total, la parte correspondiente a gravas medias.**
- **Laursen puede ocasionar incertidumbre estándar en el cálculo de la capacidad de transporte. (Incertidumbre estándar: incertidumbre de una medición expresada como una desviación típica).**
- **Toffaleti es una formulación muy sensible a la temperatura y contiene un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas.**
- **Wilcock posee en su formulación, una función cuya misión es la de reducir el potencial de transporte de partículas, con la premisa que estas pueden ser depositadas entre grandes depósitos de grava, y no experimentar completamente la fuerza del campo de flujo (en el límite de la capa turbulenta).**

### 6.3.2. Análisis del transporte de sedimentos

Hay que destacar una vez más, que el presente análisis, no contempla en la última sección aguas arriba de la zona de estudio, el incremento en el transporte de sedimentos que debería ser ingresado en dicha sección por los diferentes hidrogramas, como consecuencia de interaccionar con toda la cuenca restante.

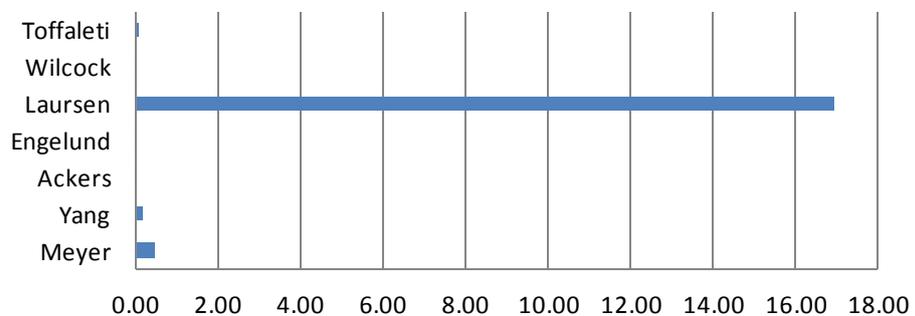
Respecto al transporte de sedimentos a caudal máximo ( $Q_{max}$ ), Hec-Ras determina que sedimento, en masa o en volumen, es transportado a la salida en cada una de las secciones, para el caudal pico del hidrograma, durante la duración de un diferencial de tiempo, siendo este sedimento aportado como entrada de material en la sección inmediata aguas abajo. De la misma manera, para el transporte de sedimentos acumulados, Hec-Ras también determina para cada sección, que masa o volumen de sedimento es transportado, pero con la peculiaridad que el tiempo a considerar ahora, es la duración total del hidrograma (4 días), y por lo tanto el sedimento transportado, es el acumulado en cada sección, durante la duración del hidrograma.

Si analizamos el transporte de sedimentos a  $Q_{max}$  y el acumulado, en la última sección, es decir, en la desembocadura, donde el sedimento es transportado hasta el mar, podemos obtener la masa o volumen de sedimentos que son aportados por la Rambla del Albuñón al Mar Menor, ya sea de manera parcial, durante la duración del caudal punta, o de forma total, tras la finalización del hidrograma.

A continuación se analiza el transporte de sedimentos en la desembocadura al Mar Menor, en la Rambla del Albuñón, para las distintas formulaciones, destacando para cada periodo de retorno, el transporte a caudal máximo, y el transporte acumulado tras la finalización del hidrograma correspondiente.

## PERIODO 1.4 AÑOS

**Sedimento Transportado a  $Q_{max}$**



	Meyer	Yang	Ackers	Engelund	Laursen	Wilcock	Toffaleti
■ Sed. Transportado (ton)	0.48	0.17	0.02	0.00	16.98	0.02	0.08

### Sedimento Transportado acumulado

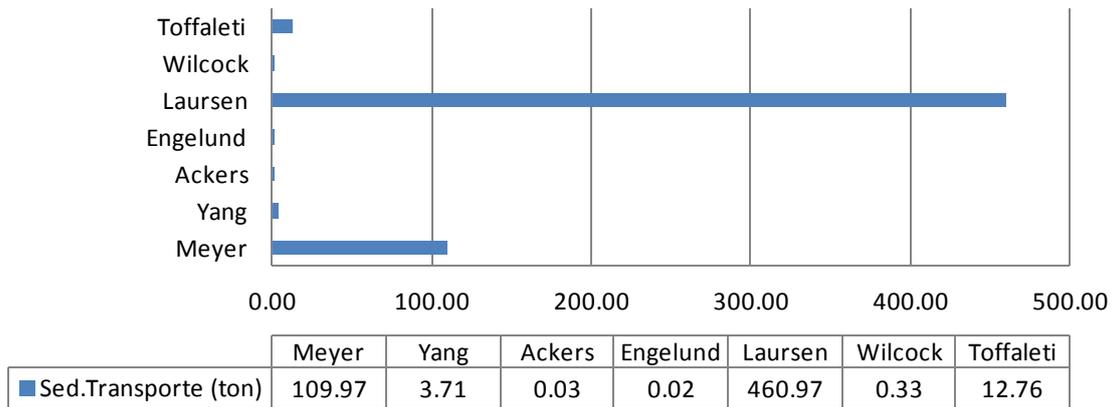


Figura 6.29 Periodo 1.4 años: Sedimento transportado a Qmax y acumulado

#### COMENTARIO:

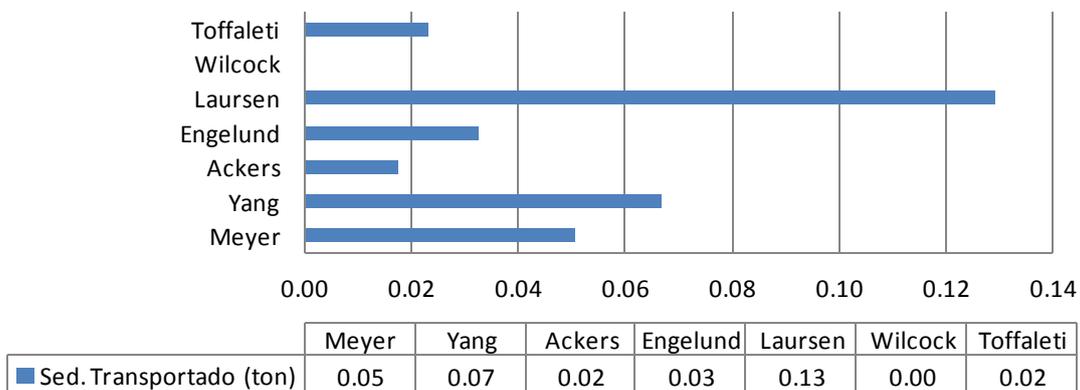
Para el periodo de retorno de 1.4 años, el mayor transporte a caudal máximo es obtenido por Laursen, con un valor a la salida de 16.8 ton, seguido por Meyer, con un valor de 0.48 ton, existiendo una diferencia entre ellos de 16.50 ton. Yang se sitúa en el tercer puesto con un valor de 0.17 ton.

Respecto al sedimento transportado acumulado, se continúa la tendencia de transporte que existe a caudal máximo, destacando Laursen, Meyer e Yang, con valores a la salida de 460.97, 109.97 y 3.71 toneladas respectivamente.

Toffaleti logra transportar 12.76 toneladas, pero al no describir de una forma razonada las variaciones sufridas en el talweg, los valores obtenidos no son del todo convincentes.

## PERIODO 10 AÑOS

### Sedimento transportado a Qmax



### Sedimento Transportado acumulado. Periodo 10 años

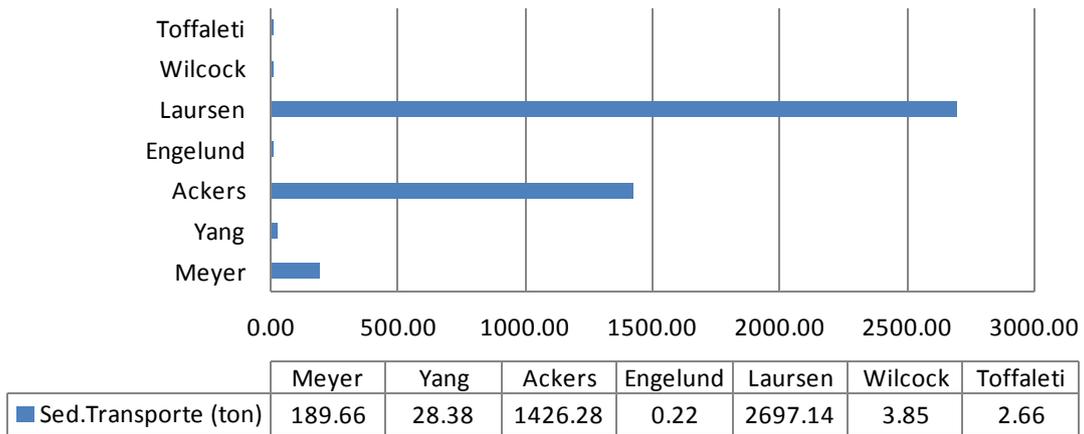


Figura 6.30 Periodo 10 años: Sedimento transportado a Qmax y acumulado

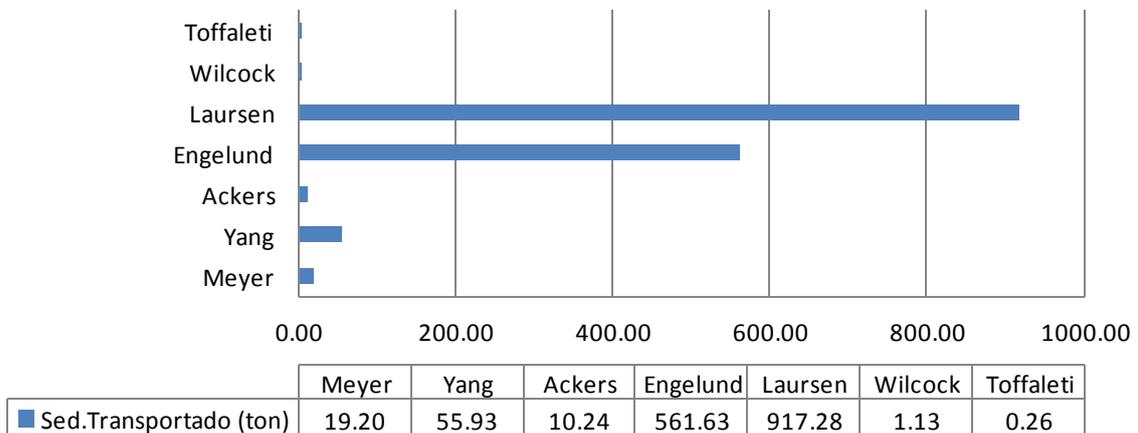
#### COMENTARIO:

Para el periodo de retorno de 10 años, una vez más, el mayor transporte a caudal máximo es obtenido por Laursen, con un valor a la salida de 0.13 ton, seguido por Yang, con un valor de 0.07 ton, ahora Meyer se sitúa en el tercer puesto con un valor de 0.05 ton.

Respecto al sedimento transportado acumulado, solo destacan Laursen, Ackers y Meyer, con valores a la salida de 2697.14, 1426.28 y 189 toneladas respectivamente, mientras Toffaleti, Wilcock, Yang y Engelund, no logran sobrepasar la frontera de las 30 toneladas.

## PERIODO 100 AÑOS

### Sedimento transportado a Qmax



### Sedimento Transportado acumulado. Periodo 100 años

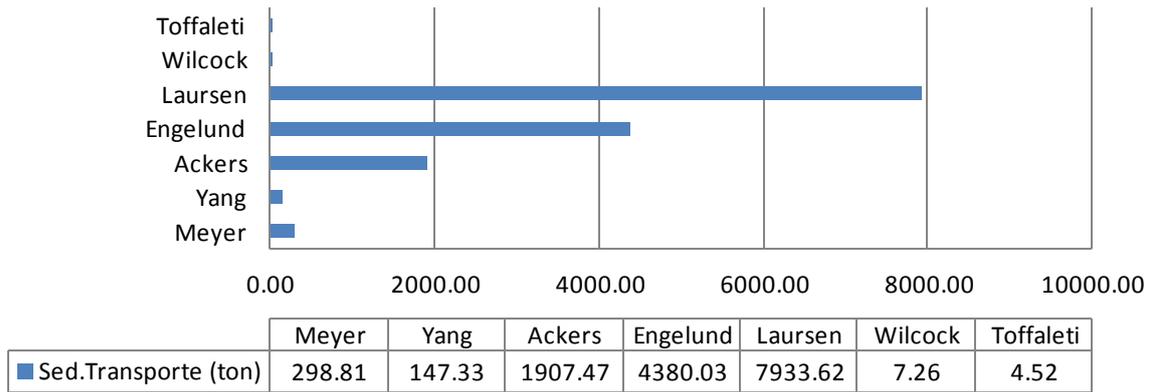


Figura 6.31 Periodo 10 años: Sedimento transportado a Qmax y acumulado

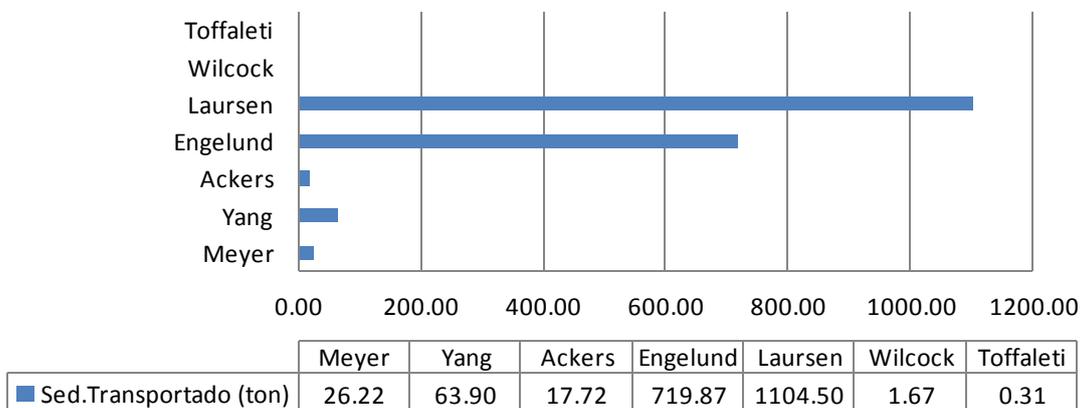
#### COMENTARIO:

Para el periodo de retorno de 100 años, una vez más, el mayor transporte a caudal máximo es obtenido por Laursen, pero esta vez seguido de Engelund, con valores de transporte a la salida de 917.28 y 561.63 toneladas respectivamente, seguido por Yang, con un valor de 55.93 ton. En este periodo Meyer se sitúa en el cuarto puesto con un valor de 19.20 ton.

Respecto al sedimento transportado acumulado, solo destacan Laursen, Engelund y Ackers, con valores a la salida de 7933.62, 4380.03 y 1907.47 toneladas respectivamente, mientras Yang y Meyer no logran sobrepasar la frontera de las 300 toneladas.

## PERIODO 500 AÑOS

### Sedimento transportado a Qmax



### Sedimento Transportado acumulado. Periodo 500 años

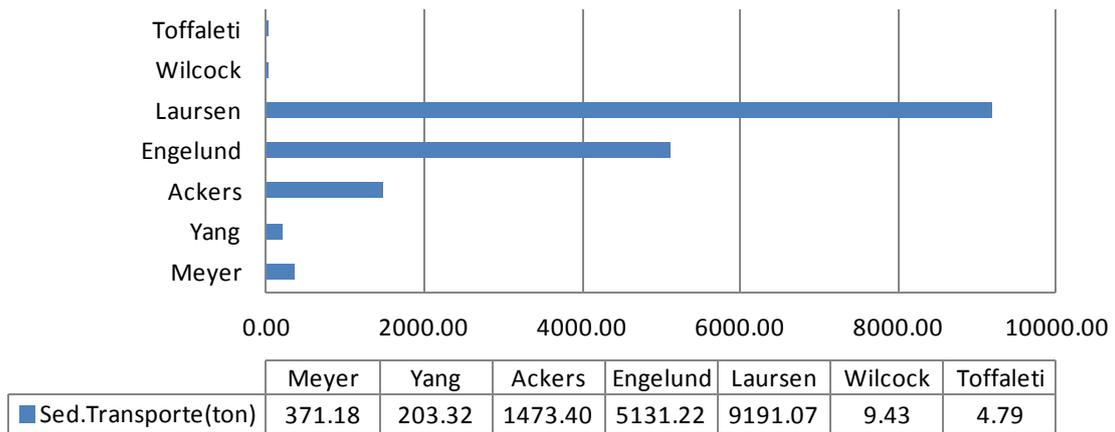


Figura 6.31 Periodo 10 años: Sedimento transportado a Qmax y acumulado

#### COMENTARIO:

Para el periodo de retorno de 500 años, el mayor transporte a caudal máximo es obtenido por Laursen, seguido de Engelund, con valores de transporte a la salida de 1104.50 y 719.87 toneladas respectivamente, seguido por Yang, con un valor de 63.90 ton. En este periodo Meyer se sitúa en el cuarto puesto con un valor de 19.20 ton.

Respecto al sedimento transportado acumulado, solo destacan Laursen, Engelund y Ackers, con valores a la salida de 9191.07, 5131.22 y 1473.40 toneladas respectivamente, mientras Meyer solo alcanza las 371.18 toneladas.

#### COMENTARIO GENERAL:

- De forma general, Laursen, que es una formulación de carga total, siempre transporta en los distintos periodos más material que sus formulaciones homologas.

### Sedimento transportado acumulado

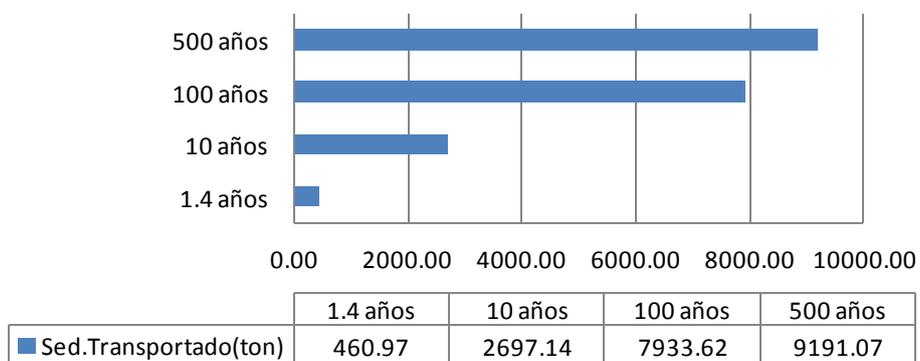


Figura 6.32 Sedimento transportado acumulado

- Respecto a Engelund no cabe mención, al no ser una ecuación idónea, debido a que solamente es válida para sistemas arenosos.
- Ackers no muestra continuación en el aumento de toneladas transportadas, produciendo valores muy similares entre los periodos de 10 y 500 años, para caudales tan dispares como  $758.4 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $5168.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

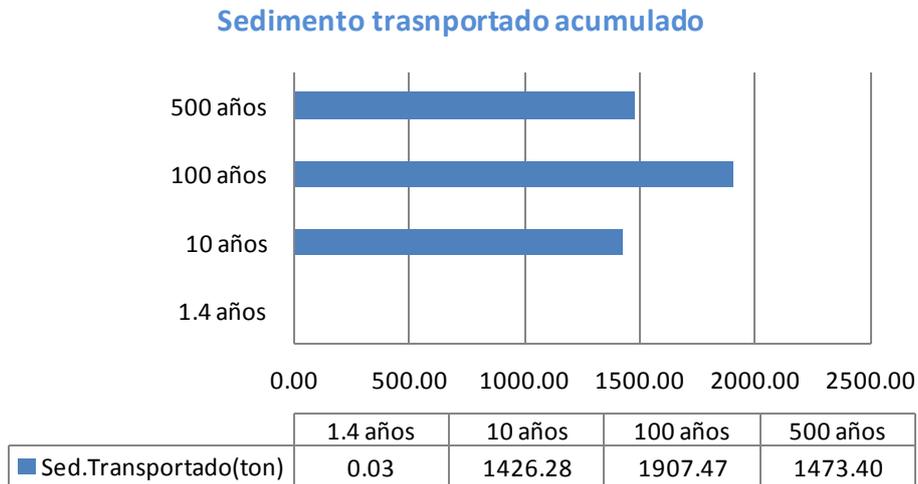


Figura 6.33 Sedimento transportado acumulado

- Así mismo Meyer, que es una formulación de carga de lecho, muestra para los distintos periodos, valores inferiores, si lo comparamos con la formulación de Yang, (formulación de carga total), en el transporte a caudal máximo; sin embargo no es así para el transporte acumulado, donde Meyer logra transportar mas sedimento en la desembocadura que Yang.

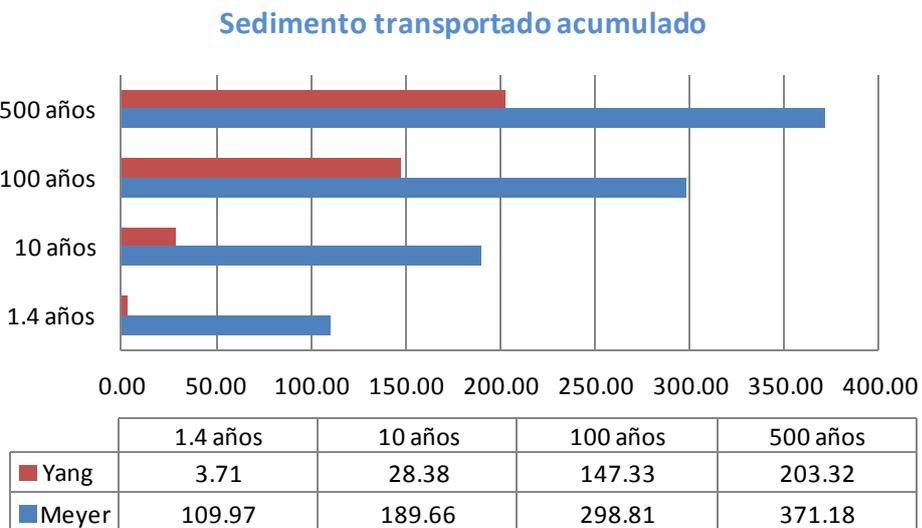


Figura 6.34 Sedimento transportado acumulado

### 6.3.3. Caudal Líquido Vs Caudal solido

En cuanto a la curva de caudales, se observa que por lo general los valores medios para cada una de las ecuaciones, se encuentran más alejados entre sí, a medida que aumenta el caudal líquido, concretamente a partir del entorno de los 3000 m<sup>3</sup>/s. En cuanto a Laursen y Engelund, muestran valores superiores a la media, frente a Wilcock, Ackers, Yang y Toffaleti que arrojan valores inferiores a la media, únicamente Meyer mantiene valores en el entorno de ambas desviaciones típicas, situándose como la formulación más próxima a la media en cada uno de los periodos.

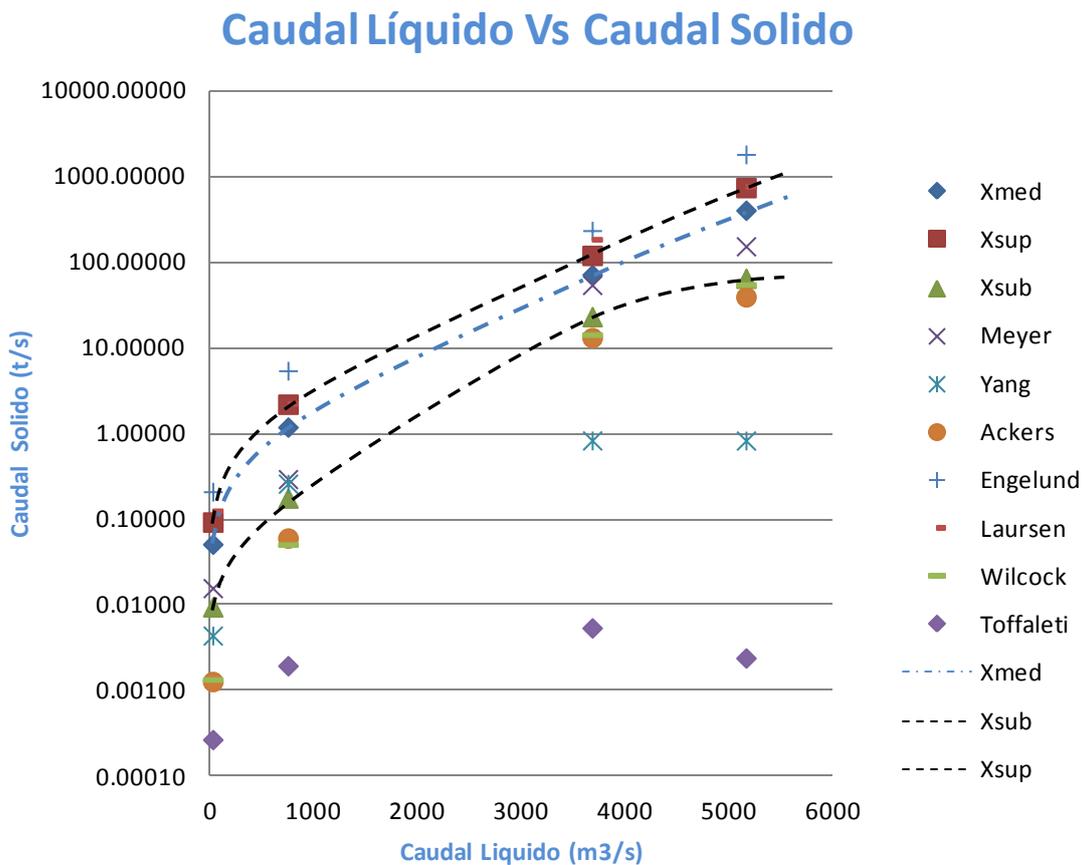


Figura 6.35 Caudal Líquido Vs Caudal Sólido (Valores Mayorados)

Toffaleti y Yang muestran progresiones muy subestimadas respecto a los valores medios, y respecto de sus ecuaciones homologas, concretamente en los dos últimos periodos, y Engelund es una formulación propia de sistemas arenosos.

A continuación se muestra la nueva curva de caudales (figura 6.36), habiendo descartado las formulaciones de Toffaleti, Yang y Engelund, donde de una forma más clara se observa la progresión próxima a la media descrita por la formulación de Meyer Peter & Müller.

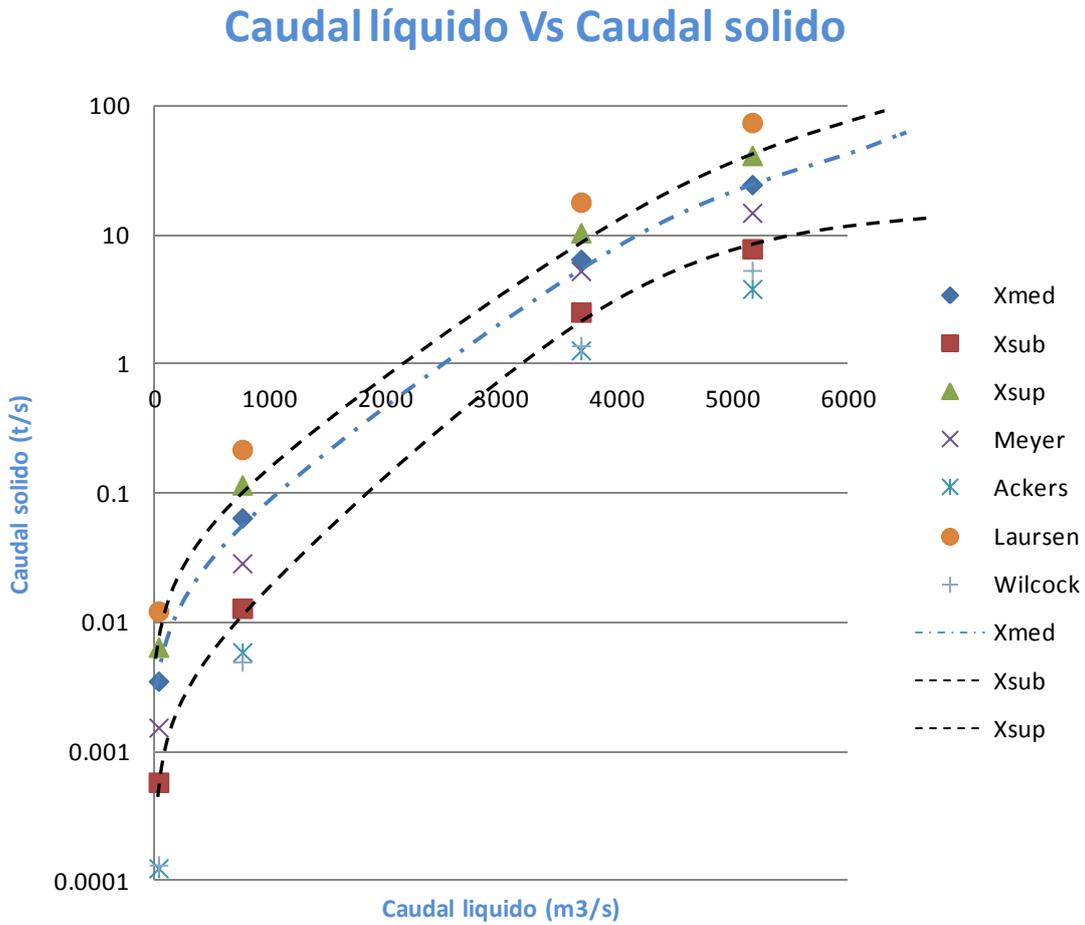


Figura 6.36 Caudal Líquido Vs Caudal Solido (Valores Mayorados)