UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DEL EFECTO LAMINADOR DEL CAUCE
UTILIZANDO MODELOS FLUVIALES BIDIMENSIONALES

Ignacio Martínez González
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MADRID 2015

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DEL EFECTO LAMINADOR DEL CAUCE UTILIZANDO MODELOS FLUVIALES BIDIMENSIONALES

Presentada por:

D. Ignacio Martínez González

Dirigida por:

Dr. Francisco Laguna Peñuelas

TRIBUNAL ENCARGADO DE JUZGAR LA TESIS DOCTORAL:

Presidente:

Vocales:

Vocal Secretario:

Calificación

Madrid, a ____ de _____ de 2016

*A mi mujer, Paloma, siempre dispuesta a ayudar,
y a mis hijos, Elena y Juan, siempre dispuestos a sonreír.*

RESUMEN

El método de Muskingum-Cunge, con más de 45 años de historia, sigue siendo uno de los más empleados a la hora de calcular el tránsito en un cauce. Una vez calibrado, permite realizar cálculos precisos, siendo asimismo mucho más rápido que los métodos que consideran las ecuaciones completas. Por esta razón, en el presente trabajo de investigación se llevó a cabo un análisis de su precisión, comparándolo con los resultados de un modelo hidráulico bidimensional. En paralelo se llevó a cabo un análisis de sus limitaciones y se ensayó una metodología práctica de aplicación.

Con esta motivación se llevaron a cabo más de 200 simulaciones de tránsito en cauces prismáticos y naturales. Los cálculos se realizaron empleando el programa HEC-HMS con el método de Muskingum-Cunge de sección de 8 puntos, así como con la herramienta de cálculo hidráulico bidimensional InfoWorks ICM. Se eligieron HEC-HMS por su gran difusión e InfoWorks ICM por su rapidez de cálculo, pues emplea la tecnología CUDA (Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cálculo).

Inicialmente se validó el modelo hidráulico bidimensional contrastándolo con la formulación unidimensional en régimen uniforme y variado, así como con fórmulas analíticas de régimen variable, consiguiéndose resultados muy satisfactorios. También se llevó a cabo un análisis de la sensibilidad al mallado del modelo bidimensional aplicado a tránsitos, obteniéndose unos ábacos con tamaños recomendados de los elementos 2D que cuantifican el error cometido.

Con la técnica del análisis dimensional se revisó una correlación de los resultados obtenidos entre ambos métodos, ponderando su precisión y definiendo intervalos de validez para la mejor utilización del método de Muskingum-Cunge.

Simultáneamente se desarrolló una metodología que permite obtener la sección característica media de 8 puntos para el cálculo de un tránsito, basándose en una serie de simulaciones bidimensionales simplificadas. De este modo se pretende facilitar el uso y la correcta definición de los modelos hidrológicos.

Ignacio Martínez González

ABSTRACT

The Muskingum-Cunge methodology, which has been used for more 45 than years, is still one of the main procedures to calculate stream routing. Once calibrated, it gives precise results, and it is also much faster than other methods that consider the full hydraulic equations. Therefore, in the present investigation an analysis of its accuracy was carried out by comparing it with the results of a two-dimensional hydraulic model. At the same time, reasonable ranges of applicability as well as an iterative method for its adequate use were defined.

With this motivation more than 200 simulations of stream routing were conducted in both synthetic and natural waterways. Calculations were performed with the aid of HEC-HMS choosing the Muskingum-Cunge 8 point cross-section method and in InfoWorks ICM, a two-dimensional hydraulic calculation software. HEC-HMS was chosen because its extensive use and InfoWorks ICM for its calculation speed as it takes advantage of the CUDA technology (Compute Unified Device Architecture).

Initially, the two-dimensional hydraulic engine was compared to one-dimensional formulation in both uniform and varied flow. Then it was contrasted to variable flow analytical formulae, achieving most satisfactory results. A sensitivity size analysis of the two-dimensional routing model mesh was also conducted, obtaining charts with suggested 2D element sizes to narrow the committed error.

With the technique of dimensional analysis a correlation of results between the two methods was reviewed, assessing their accuracy and defining valid intervals for improved use of the Muskingum-Cunge method.

Simultaneously, a methodology to draw a representative 8 point cross-section was developed, based on a sequence of simplified two-dimensional simulations. This procedure is intended to provide a simplified approach and accurate definition of hydrological models.

Ignacio Martínez González

AGRADECIMIENTOS

Al director de esta tesis, el profesor D. Francisco Laguna Peñuela por su maravilloso carácter, su buen hacer y su gran disposición para todo.

A mi mujer, Paloma, única donde las haya, por alentarme constantemente a continuar, por su imprescindible ayuda y por distraerme cuando hacía falta para poder continuar.

A mis padres, por ser los mejores, sin discusión alguna, y por su irremplazable apoyo para que esta aventura llegara a buen término.

Al resto de las personas que habéis participado leyendo, corrigiendo, alentando y apoyando en la realización de este trabajo de investigación que, por increíble que parezca tras tanto tiempo, ha terminado tomando forma.

SÍMBOLOS Y NOTACIÓN

<i>Símbolo</i>	Denominación
A	Área
A	Punto genérico
a	Ancho
$\bar{a}$	Aceleración
a_i	Componente de la aceleración en la dirección i
b	Ancho de un cauce
$\overline{C_m}$	Cantidad de movimiento del sistema
c	Celeridad de onda
D	Diámetro
D_m	Diámetro medio
d	Calado
d	Distancia genérica
E	Energía
e	Espesor
F	Fuerza genérica
F	Número de Froude
F_D	Fuerza de resistencia al movimiento
$\overline{F_e}$	Fuerzas exteriores al sistema
f	Coeficiente de Darcy
g	Aceleración gravitatoria
G	Centro de gravedad
$\overline{G}$	Fuerzas de gravedad
H	Altura total
h	Altura
h	Carga hidráulica
I	Intensidad de lluvia
i	Intensidad de lluvia por unidad de ancho
$\bar{i}$	Versor en la dirección x
$\bar{j}$	Versor en la dirección y
$\bar{k}$	Versor en la dirección z
K	Constante
k	Rugosidad absoluta
L	Longitud
L_1	Longitud cauce

<i>Símbolo</i>	Denominación
L_2	Longitud ladera
L_R	Ancho del cauce
l	Longitud
M	Momento
M_o	Cantidad de movimiento
M_S	Masa del sistema
m	Masa
n	Coefficiente de Manning
n'	Coefficiente n de Manning corregido por la pendiente
$\bar{n}$	Vector normal a una superficie
P	Peso
P	Presión
P	Punto genérico
P_e	Perímetro mojado
$\bar{P}$	Fuerzas de presión
P	Coefficiente de pérdidas localizadas
P^*	Reacción del contorno
Q	Caudal
Q_p	Caudal de pico
q	Caudal específico
Re	Número de Reynolds
R	Radio
R_H	Radio hidráulico
$\bar{R}$	Reacciones del contorno
R^2	Error medio cuadrático
r	Radio
r_i	Coordenadas de un punto
S	Pendiente de un canal
S_1	Pendiente del cauce
S_2	Pendiente de la ladera
S_f	Pendiente de fricción
S_o	Pendiente media del fondo
S	Superficie
S_o	Pendiente de la solera de un cauce
S_f	Pendiente de energía de un cauce
s	Distancia
T	Temperatura absoluta (en °K)

Símbolo	Denominación
t	Tiempo
t_c	Tiempo de concentración
t_{lag}	Tiempo de retardo
t_p	Tiempo de pico del hidrograma
t_b	Tiempo de base
u	Velocidad de un fluido; componente en x
u_0	Velocidad del fluido libre
u'	Fluctuación de la velocidad
$\bar{u}$	Velocidad media del fluido
V	Velocidad
V_s	Volumen del sólido
v	Volumen específico
v	Velocidad
$\bar{v}$	Velocidad media
w	Peso específico del agua
w	Velocidad de un fluido; componente en z
x_i	Variables generales
x	Distancia genérica
y	Calado de un canal
y	Distancia genérica
z	Distancia genérica
z	Elevación o altura genérica

Símbolo griego	Denominación
α	Ángulo genérico
β	Factor de corrección de la cantidad de movimiento
β	Parámetro
δ	Espesor capa límite
Δ	Incremento
ε	Rugosidad relativa
ε	Parámetro
ϕ	Ángulo genérico
ϕ	Diámetro
γ	Peso específico
γ_s	Peso específico de un sólido
γ_s'	Peso específico de un sólido sumergido

φ	Ángulo genérico
λ	Ángulo genérico
λ	Escala
λ_n	Escala del número n de Manning
λ_f	Semejanza dinámica
λ_v	Semejanza cinemática
μ	Viscosidad absoluta o dinámica
π	Plano genérico
π_i	Monomio adimensional
θ	Ángulo genérico
θ	Factor de ponderación
ρ_a	Densidad del agua
τ	Cortante
ν	Viscosidad cinemática
ω	Relación de anchos
ω	Velocidad angular
ξ	Parámetro

INDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
SÍMBOLOS Y NOTACIÓN	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. MOTIVACIÓN	1
1.3. OBJETIVOS GENERALES	2
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	2
1.4.1. Contenido de los Capítulos	2
1.4.2. Contenido de los Anejos	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. PUNTO DE PARTIDA DEL PROBLEMA: LA ECUACIÓN DE SAINT VENANT	8
2.3. MÉTODOS HIDROLÓGICOS DE TRÁNSITO	10
2.3.1. Método Lag	11
2.3.2. Método de Kalinin-Milyukov	11
2.3.3. Método modificado de Puls	12
2.3.4. Método de Muskingum	12
2.3.5. Método SSARR	14
2.4. MÉTODOS HIDRÁULICOS DE TRÁNSITO	14
2.4.1. Método de la onda cinemática	15
2.4.2. Método de la onda difusiva	16
2.4.3. Onda dinámica	17
2.4.4. Desarrollo de las ecuaciones en diferencias finitas	23
2.4.5. Integración por diferencias finitas	26
2.5. MÉTODOS MIXTOS DE CÁLCULO DEL TRÁNSITO	29
2.5.1. Método de Muskingum-Cunge	29
2.5.2. Método de Muskingum-Cunge de 8 puntos	32
2.6. ECUACIONES BIDIMENSIONALES PARA EL TRÁNSITO	33
2.6.1. Ecuaciones	33
2.6.2. Integración numérica	34
2.7. DISCUSIÓN FINAL DEL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE	36
2.8. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA	38
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO EN CAUCES	39
3.1. INTRODUCCIÓN	39
3.2. PARÁMETROS QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL TRÁNSITO	39
3.2.1. Influencia de la longitud del cauce en la laminación	40
3.2.2. Influencia de la pendiente en la laminación	40
3.2.3. Influencia del ancho en la laminación	41
3.2.4. Influencia de la n de Manning en la laminación	42
3.2.5. Influencia del caudal inicial en la laminación	42
3.3. PARÁMETROS EMPLEADOS EN LOS CÁLCULOS	43

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO 2D APLICADO AL TRÁNSITO EN CAUCES.....	47
4.1. CONTRASTE DEL MODELO MATEMÁTICO.....	47
4.2. COMPARACIÓN CON LA FORMULACIÓN DE MANNING	47
4.2.1. Resultados Utilizando la fórmula de Manning.....	47
4.2.2. Resultados Utilizando un modelo bidimensional	48
4.3. COMPARACIÓN CON EL MODELO HEC-RAS	52
4.3.1. Modelo bidimensional: ICM.....	52
4.3.2. Resultados del modelo 2D en régimen uniforme	52
4.3.3. Curva de remanso.....	53
4.3.4. Elevación de solera.....	55
4.4. COMPROBACIÓN CON LA FÓRMULA MATEMÁTICA DE ROTURA DE DIQUES	56
4.4.1. Modelo hidráulico bidimensional.....	57
4.4.2. Datos hidráulicos	57
4.4.3. Topología del modelo 2D.....	57
4.4.4. Comparación de resultados del modelo 2D con la formulación analítica	58
4.4.5. Conclusiones	59
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS 2D	61
5.1. ENSAYOS REALIZADOS	62
5.2. MODELO DE CAUCE TRAPEZIAL	62
5.2.1. Simulaciones realizadas	62
5.2.2. Resultados utilizando la fórmula de Manning	63
5.2.3. Resultados de los modelos 2D	63
5.2.4. Conclusiones de los resultados obtenidos en cauce sintético	66
5.3. MODELO INICIAL EN CAUCE NATURAL	67
5.3.1. Simulaciones realizadas	67
5.3.2. Análisis de resultados	68
5.4. MODELO DETALLADO DE DENSIDAD DE ELEMENTOS.....	69
5.4.1. Cálculos realizados	69
5.4.2. Resultados obtenidos.....	70
5.4.3. Conclusiones del análisis de sensibilidad en cauce natural	75
5.4.4. Ábacos para el Mallado Óptimo de los Elementos 2D.....	75
CAPÍTULO 6. CÁLCULOS BIDIMENSIONALES REALIZADOS.....	79
6.1. INTRODUCCIÓN	79
6.2. MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL UTILIZADO	79
6.3. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELO MATEMÁTICO.....	79
6.3.1. Datos geométricos de definición del modelo	79
6.3.2. Datos hidráulicos	80
6.3.3. Rugosidad	81
6.3.4. Condiciones de contorno	84
6.4. RESULTADOS OBTENIDOS.....	84
6.4.1. Resultados en cauces prismáticos	85
6.4.2. Resultados en cauces naturales	88
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
7.1. INTRODUCCIÓN	91
7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TRÁNSITOS EN CAUCES “PRISMÁTICOS”	91
7.2.1. Influencia del valor del caudal	91
7.2.2. Influencia del valor del ancho de la sección.....	95

7.2.3. Influencia del valor de la n de Manning	98
7.2.4. Influencia del valor de la pendiente en la laminación	102
7.3. COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE CON MODELOS BIDIMENSIONALES	107
7.3.1. Introducción	107
7.3.2. Criterios de comparación.....	107
7.3.3. Error en los modelos prismáticos	108
CAPÍTULO 8. DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN PARA EL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE DE 8 PUNTOS.....	111
8.1. INTRODUCCIÓN.....	111
8.2. DATOS NECESARIOS PARA EL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE	111
8.3. METODOLOGÍA	112
8.3.1. Pendiente media del cauce	113
8.3.2. Longitud del cauce	115
8.3.3. Sección tipo de ocho puntos	116
8.3.4. Rugosidad n de Manning	120
8.4. CÁLCULOS REALIZADOS	120
8.4.1. Modelo bidimensional	120
8.4.2. Modelo HEC-HMS	121
8.5. CONCLUSIONES.....	123
CAPÍTULO 9. RELACIONES FUNCIONALES (RANGOS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO) .	125
9.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y RELACIONES FUNCIONALES	125
9.2. RANGOS DE APLICABILIDAD.....	126
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES	135
10.1. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES GENERALES.....	135
10.2. APORTACIONES ORIGINALES	136
10.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	139
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEJO A. FLUJO EN RÉGIMEN UNIFORME, VARIADO Y VARIABLE	151
A.1. INTRODUCCIÓN.....	153
A.2. MOVIMIENTO PLANO UNIFORME	153
A.2.1. Flujo en régimen uniforme	153
A.2.2. Resultado teórico en régimen uniforme.....	153
A.2.3. Modelo unidimensional: HEC-RAS	154
A.2.4. Modelo bidimensional: ICM.....	155
A.2.5. Resultados del modelo 2D en régimen uniforme	157
A.3. CURVA DE REMANSO	159
A.4. ELEVACIÓN DE SOLERA	160
A.5. FLUJO EN REGIMEN VARIABLE. ROTURA DE DIQUE	162
A.5.1. Objeto	162
A.5.2. Ecuaciones de Saint-Venant	162
A.5.3. Ecuaciones simplificadas de rotura de diques	162
A.5.4. Modelo hidráulico bidimensional.....	164
A.5.5. Comparación de Resultados: Modelo Bidimensional vs Formulación Analítica	165
A.5.6. Conclusiones.....	168

ANEJO B. PRECISIÓN DE LA MODELIZACIÓN 2D	169
B.1. INTRODUCCIÓN	171
B.2. ENSAYOS EN CAUCE TRAPEZIAL INDEFINIDO DE PENDIENTE CONSTANTE	171
<i>B.2.1. Objeto</i>	<i>171</i>
<i>B.2.2. Datos del canal y de la sección tipo</i>	<i>171</i>
<i>B.2.3. Resultados Utilizando la fórmula de Manning</i>	<i>172</i>
<i>B.2.4. Construcción del modelo 2D</i>	<i>173</i>
<i>B.2.5. Topología del modelo hidráulico</i>	<i>173</i>
<i>B.2.6. Caudales considerados</i>	<i>174</i>
<i>B.2.7. Resultados obtenidos</i>	<i>174</i>
<i>B.2.8. Conclusiones del ensayo de sensibilidad en cauce trapezoidal</i>	<i>181</i>
B.3. ENSAYOS EN CAUCE NATURAL	181
<i>B.3.1. Introducción</i>	<i>181</i>
<i>B.3.2. Comparación Inicial de la Precisión en función del número de elementos</i>	<i>183</i>
B.4. ANÁLISIS DETALLADO DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE ELEMENTOS ..	187
<i>B.4.1. Modelo empleado</i>	<i>188</i>
<i>B.4.2. Caudal utilizado</i>	<i>193</i>
<i>B.4.3. Resultados obtenidos</i>	<i>194</i>
<i>B.4.4. Conclusiones del análisis de sensibilidad en cauce natural</i>	<i>199</i>
<i>B.4.5. Ábacos para Mallado Óptimo de Elementos 2D</i>	<i>199</i>
<i>B.4.6. Fichas de los Cálculos de Sensibilidad en Cauce Natural</i>	<i>202</i>
ANEJO C. SECCIÓN EQUIVALENTE DE OCHO PUNTOS.....	233
C.1. INTRODUCCIÓN	235
C.2. OBTENCIÓN DE UNA SECCIÓN EQUIVALENTE DE OCHO PUNTOS.....	235
<i>C.2.1. Curva cotas-anchos en un cauce de sección constante</i>	<i>235</i>
<i>C.2.2. Curva cotas-anchos en cauce natural</i>	<i>239</i>
C.3. COMPARACIÓN RESULTADOS HEC-HMS Y MODELOS 2D.....	248
<i>C.3.1. Modelo HEC-HMS</i>	<i>248</i>
<i>C.3.1. Modelo bidimensional</i>	<i>251</i>
ANEJO D. ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	253
D.1. INTRODUCCIÓN	255
D.2. METODOLOGÍA	255
<i>D.2.1. Magnitudes físicas</i>	<i>256</i>
<i>D.2.2. Monomios adimensionales</i>	<i>256</i>
ANEJO E. RESUMEN DE CÁLCULOS DE LOS TRÁNSITOS.....	261
E.1. INTRODUCCIÓN	263
E.2. CÁLCULOS REALIZADOS.....	263
<i>E.2.1. Cauces prismáticos</i>	<i>263</i>
<i>E.2.2. Cauces naturales</i>	<i>267</i>
E.3. RESÚMENES DE RESULTADOS.....	268
<i>E.3.1. Cauces prismáticos</i>	<i>268</i>
<i>E.3.2. Cauces naturales</i>	<i>316</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Tránsito de un hidrograma por el cauce.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.2 Diferencia entre laminación y tránsito.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.3 Esquema representativo de tránsitos hidrológico e hidráulico</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.4 Clasificación de métodos de cálculo del tránsito en cauces.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.5 Esquema representativo de la ecuación de continuidad</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.6. Método de Muskingum</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.7. Esquema del método de las características en el plano x-t</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.8. Esquema del método de diferencias finitas en el plano x-t.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.9. Integración en el plano x-t.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.10. Esquema entrada-salida en el elemento de ancho Δx.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.11. Esquema de una sección de 8 puntos</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.1. Esquema de cauce.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.2. Influencia de la longitud en el efecto laminador</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.3. Influencia de la pendiente en el efecto laminador.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.4. Laminación en función del ancho del cauce</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.5. Laminación en función de la rugosidad del cauce</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.6. Laminación en función del caudal a la entrada del cauce.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.7. Distribución simétrica y asimétrica del cauce central.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.8. Laminación simétrica y asimétrica del cauce central.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.9. Distribución simétrica y asimétrica del cauce central con bancadas a distinto nivel.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.10. Laminación con distribución simétrica y asimétrica del cauce central y con bancadas a distinto nivel.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.1. Sección tipo del cauce trapecial (dimensiones en metros)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.2. Vistas del MDT del canal: Planta y vista 3D.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.3. Polígono de malla y esquema de líneas de rotura adoptada en cabeza y pie de talud</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.4. Puntos de resultados PK_750 en la que se analizan resultados.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.5. Distribución de velocidades en un cauce rectangular</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.6. Distribución de la velocidad en la sección PK_749</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.7. Curva de remanso en la salida con resultados del HEC-RAS y modelo bidimensional ICM.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.8. Vista 3D de la sobreelevación de solera con (desde aguas arriba a aguas abajo), zona de remanso, circulación sobre la sobreelevación vertido y resalto</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.9. Elevación de solera con resultados del modelo HEC-RAS y modelo bidimensional ICM</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.10. Ecuación simplificada de rotura de diques</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.11. Comparación de calados entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.12. Comparación de velocidades entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.13. Comparación de caudales entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.1. MDT tramos empleados en las simulaciones de análisis de sensibilidad a la densidad de elementos: río Esla y canal trapecial.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.2. Sección tipo del cauce trapecial empleado (dimensiones en metros).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.3. Hidrograma adoptado</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.4. Distribución de velocidades en un cauce rectangular</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.5. Evolución del caudal en la sección PK_750 (cálculo 8).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.6. Distribución de la velocidad en la sección PK_749 (cálculo 8).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.7. Mallado y detalle del modelo de 778000 elementos</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.8. Detalle del tramo fluvial con diferenciación de las 3 zonas de malla 2D consideradas</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.9. Hidrograma de entrada con caudal pico de 2000 m³/s empleado en los cálculos.....</i>	<i>68</i>

Figura 5.10. Hidrograma de entrada y de salida con distinta precisión.....	68
Figura 5.11. Relación entre los tiempos de cálculo de los modelos de sensibilidad y el nº total de elementos ..	73
Figura 5.12. Relación entre la reducción del tiempo de cálculo de los modelos 2D y la de elementos totales....	73
Figura 5.13. Relación entre el error en la laminación y el número de elementos totales de los modelos.....	74
Figura 5.14. Relación entre el error en la laminación y el número medio de elementos en la sección de cauce de aguas bajas	74
Figura 5.15. Ábaco I de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce	75
Figura 5.16. Ábaco II de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce.....	76
Figura 5.17. Ábaco III de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce.....	76
Figura 5.18. Ábaco IV de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce	77
Figura 6.1. Modelo digital del cauce.....	80
Figura 6.2. Hidrograma utilizado un régimen permanente con $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$	80
Figura 6.3. Hidrograma utilizado tipo SCS de $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$	81
Figura 6.4. Corrección en calados, velocidades y n de Manning por la pendiente	82
Figura 6.5. Error de velocidades y calados en modelos 2D en función de la pendiente.....	83
Figura 6.6. Error de la n de Manning en modelos 2D en función de la pendiente	84
Figura 6.7. Sección tipo de cauce prismático.....	85
Figura 7.1. Laminación en función del caudal ($L=10 \text{ km}$, ancho= 1000 m).....	92
Figura 7.2. Laminación en función del caudal ($L=10 \text{ km}$, ancho= 500 m).....	92
Figura 7.3. Laminación en función del caudal ($L=10 \text{ km}$, ancho= 250 m).....	93
Figura 7.4. Laminación en función del caudal ($L=20 \text{ km}$, ancho= 1000 m).....	93
Figura 7.5. Laminación en función del caudal ($L=20 \text{ km}$, ancho= 500 m).....	94
Figura 7.6. Laminación en función del caudal ($L=20 \text{ km}$, ancho= 250 m).....	94
Figura 7.7. Laminación en función del ancho del cauce ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.1%).....	95
Figura 7.8. Laminación en función del ancho del cauce ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.2%).....	96
Figura 7.9. Laminación en función del ancho del cauce ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.1%).....	97
Figura 7.10. Laminación en función del ancho del cauce ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.2%).....	97
Figura 7.11. Laminación en función de la n ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.1% , 3h).....	98
Figura 7.12. Laminación en función de la n ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.1% , 12h).....	99
Figura 7.13. Laminación en función de la n ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.2% , 3h).....	99
Figura 7.14. Laminación en función de la n ($L=10 \text{ km}$, pendiente= 0.2% , 12h).....	100
Figura 7.15. Laminación en función de la n ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.1% , 3h).....	100
Figura 7.16. Laminación en función de la n ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.1% , 12h).....	101
Figura 7.17. Laminación en función de la n ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.2% , 3h).....	101
Figura 7.18. Laminación en función de la n ($L=20 \text{ km}$, pendiente= 0.2% , 12h).....	102
Figura 7.19. Laminación en función de la pendiente ($L=10 \text{ km}$, $n=0.040$, 3h).....	103
Figura 7.20. Laminación en función de la pendiente ($L=10 \text{ km}$, $n=0.040$, 12h)	103
Figura 7.21. Laminación en función de la pendiente ($L=10 \text{ km}$, $n=0.060$, 3h).....	104
Figura 7.22. Laminación en función de la pendiente ($L=10 \text{ km}$, $n=0.060$, 12h)	104
Figura 7.23. Laminación en función de la pendiente ($L=20 \text{ km}$, $n=0.040$, 3h).....	105
Figura 7.24. Laminación en función de la pendiente ($L=20 \text{ km}$, $n=0.040$, 12h)	105
Figura 7.25. Laminación en función de la pendiente ($L=20 \text{ km}$, $n=0.060$, 3h).....	106
Figura 7.26. Laminación en función de la pendiente ($L=20 \text{ km}$, $n=0.060$, 12h)	106
Figura 7.27. Correlación entre el factor de laminación de los modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge (totalidad de modelos prismáticos).....	108
Figura 7.28. Diferencias en laminación entre modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge (totalidad de modelos prismáticos).....	109
Figura 7.29. Error en la laminación de los modelos basados en el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos (totalidad de modelos prismáticos).....	110

Figura 8.1. Datos para el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.....	111
Figura 8.2. Planta de un tramo trenzado del río Esla	113
Figura 8.3. Pendientes hidráulicas del cauce del río Esla (ES-01).....	114
Figura 8.4. Pendiente hidráulica media del cauce del río Esla (ES-01).....	115
Figura 8.5. Vector velocidad y eje principal del flujo.....	115
Figura 8.6. Tramo de cauce con las superficies de agua para distintos caudales.....	116
Figura 8.7. Sección en el tramo de cauce.....	117
Figura 8.8. Gráfico cotas anchos medios de las superficies de agua para distintos caudales.....	118
Figura 8.9. Gráfico cotas anchos margen derecha con rectas de regresión.....	118
Figura 8.10. Gráfico sección equivalente de 8 puntos.....	119
Figura 8.11. Zonas de rugosidad	120
Figura 8.12. Laminación para el caudal de 2000 m ³ /s, modelo 2D.....	121
Figura 8.13. Laminación para el caudal de 2000 m ³ /s, Muskingum-Cunge.....	122
Figura 8.14. Laminación para distintos caudales.....	123
Figura 8.15. Esquema de la metodología propuesta.....	124
Figura 9.1. Error en el método Muskingum-Cunge en función de la pendiente del cauce.....	127
Figura 9.2. Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio B/L.....	128
Figura 9.3. Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $n Q / L^{8/3}$	129
Figura 9.4. Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $n Q / L^{8/3}$ superior a 0.1.....	130
Figura 9.5. Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $V / L^* B^* H$	131
Figura 9.6. Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $V / L^* B^* H$ superior a 0.2.....	132
Figura 9.7. Error en el método Muskingum-Cunge con el monomio $n Q / L^{8/3} > 0.1$ o el $V / L^* B^* H > 0.2$	133
Figura 10.1. Ábaco 1, área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce.....	136
Figura 10.2. Ábaco 2, área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce.....	136
Figura 10.3. Esquema de la metodología propuesta.....	137
Figura 10.4. Ejemplo de sección equivalente de ocho puntos.....	137
Figura 10.5. Correlación entre el factor de laminación de los modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge.....	138
Figura 10.6. Rango de error con las condiciones $\pi_3 = n Q / L^{8/3} > 0.1$ ó $\pi_4 = V / L^3 > 0.2$	139
Figura A.1. Polígono de malla sobre MDT, con las líneas de rotura adoptadas, en la zona central del modelo.....	156
Figura A.2. Polígono de malla, en la zona con sobreelevación de solera.....	156
Figura A.3. Hidrograma adoptado	157
Figura A.4. Curva de remanso en la salida con resultados del HEC-RAS y modelo bidimensional ICM.....	159
Figura A.5. Vista 3D de la sobreelevación de solera con (desde aguas arriba a aguas abajo) zona de remanso, circulación sobre la sobreelevación, vertido y resalto	160
Figura A.6. Elevación de solera con resultados del modelo HEC-RAS y modelo bidimensional ICM.....	161
Figura A.7. Ecuación simplificada de rotura de diques	163
Figura A.8. Detalle del mallado	164
Figura A.9. Calados a los 60 segundos de la rotura	165
Figura A.10. Calados a los 180 segundos de la rotura	165
Figura A.11. Comparación de calados entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s	166
Figura A.12. Comparación de velocidades entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s	166
Figura A.13. Comparación de caudales entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s.....	167
Figura B.1. Sección tipo del cauce trapecial (dimensiones en metros)	172
Figura B.2. Vistas del MDT del canal: Planta y perspectiva 3D.....	173
Figura B.3. Polígono de malla y esquema de líneas de rotura adoptados en cabeza y pie de talud.....	174
Figura B.4. Hidrograma adoptado	174
Figura B.5. Distribución de velocidades en un cauce rectangular	175
Figura B.6. Sección PK_750 y Puntos en sección PK_749 donde se recogieron resultados.....	177

Figura B.7. Evolución del caudal en la sección PK_750 (cálculo 8).....	177
Figura B.8. Distribución de la velocidad en la sección PK_749 (cálculo 8).....	178
Figura B.9. Detalle de la malla con temático de calados	179
Figura B.10. Detalle de vectores velocidad con modelo de media precisión: 60000 elementos.....	180
Figura B.11. Detalle de vectores velocidad con modelo de alta precisión: 190000 elementos	180
Figura B.12. Vectores velocidad con modelo de alta precisión: 190000 elementos y líneas de rotura.....	180
Figura B.13. MDT tramo del río Esla considerado en el análisis de sensibilidad de la densidad de elementos, con indicación de secciones de comparación	182
Figura B.14. Mallado y detalle del modelo de 604000 elementos.....	183
Figura B.15. Mallado y detalle del modelo de 778000 elementos.....	184
Figura B.16. Mallado y detalle del modelo de 1113000 elementos.....	185
Figura B.17. Hidrograma de entrada y de salida con distinta precisión.....	186
Figura B.18. Detalle del pico del hidrograma de salida con distinta precisión en el número de elementos	186
Figura B.19. MDT tramo del río Esla simulado, con indicación de secciones de comparación y zonas de tamaños de elementos de malla.....	189
Figura B.20. Detalle del tramo considerado entre las secciones L-1 y L-2, con representación de las líneas de definición del cauce de aguas bajas empleadas en los cálculos 1 a 13.....	190
Figura B.21. Sección L_1: 9 Triángulos. Mallado Tipo I.....	190
Figura B.22. Sección L_2: 7 Triángulos. Mallado Tipo E.....	191
Figura B.23. Sección L_3: 28 Triángulos. Mallado Tipo B.....	191
Figura B.24. Sección L_4: 7 Triángulos. Mallado Tipo E.....	191
Figura B.25. Sección L_5: 12 Triángulos. Mallado Tipo A.....	192
Figura B.26. Sección L_6: 8 Triángulos. Mallado Tipo E.....	192
Figura B.27. Sección L_7: 6 Triángulos. Mallado Tipo F.....	192
Figura B.28. Sección L_8: 7 Triángulos. Mallado Tipo I.....	193
Figura B.29. Sección L_7: 8 Triángulos. Mallado Tipo Inteligente	193
Figura B.30. Hidrograma de entrada con caudal pico de 2000 m ³ /s empleado en los cálculos.....	194
Figura B.31. Relación entre los tiempos de cálculo de los modelos de sensibilidad y el nº total de elementos	197
Figura B.32. Relación entre la reducción del tiempo de cálculo de los modelos 2D y la de elementos totales...197	
Figura B.33. Relación entre el error en la laminación y el número de elementos totales de los modelos.....	198
Figura B.34. Relación entre el error en la laminación y el número medio de elementos en la sección de cauce de aguas bajas	198
Figura B.35. Ábaco I de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce	200
Figura B.36. Ábaco II de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce	200
Figura B.37. Ábaco III de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce.....	201
Figura B.38. Ábaco IV de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce	201
Figura C.1. Sección tipo con bancadas a distinto nivel.....	236
Figura C.2. Resultados del HEC-RAS	236
Figura C.3. Gráfico cotas-anchos	237
Figura C.4. Gráfico cotas-anchos margen derecha	238
Figura C.5. Sección tipo reconstruida	239
Figura C.6. MDT del cauce natural Esla-01.....	240
Figura C.7. Imagen 3D del MDT del cauce natural Esla-01.....	241
Figura C.8. Hidrograma de 2000 m ³ /s utilizado en el cauce natural	242
Figura C.9. Detalle de mallado con distintos grados de refinamiento de la malla.....	242
Figura C.10. Distribución de rugosidades en el cauce natural.....	243
Figura C.11. Pendientes para distintos caudales.....	245
Figura C.12. Pendiente representativa	245
Figura C.13. Curvas cotas-anchos	246

Figura C.14. Líneas de tendencia en las curvas cotas–anchos	246
Figura C.15. Sección equivalente de ocho puntos	247
Figura C.16. Modelo HEC-HMS	249
Figura C.17. Resultados del modelo HEC-HMS.....	250
Figura C.18. Hidrograma de entrada y tránsito del modelo HEC-HMS.....	250
Figura C.19. Comparación del modelo bidimensional con el modelo HEC-HMS	251
Figura E.1. Cauce prismático	263

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales modelos de tránsito hidrológico.....	10
Tabla 3.1. Factores y su afección a la laminación en un cauce	40
Tabla 3.2. Afección a la laminación del cauce la simetría del cauce central, bancadas y uniformidad de n	46
Tabla 4.1. Resultados utilizando la formulación de Manning.....	48
Tabla 4.2. Resultados con la formulación de Manning, rozamiento en el plano horizontal.....	48
Tabla 4.3. Resultados (PK_750) con la formulación de Manning, rozamiento en el plano horizontal.....	49
Tabla 4.4. Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749	51
Tabla 4.5. Valores de caudal, calados y velocidades en el modelo bidimensional sección PK_10000	53
Tabla 4.6. Comparación de resultados de velocidades y calados en un canal rectangular según la fórmula de Manning, modelos HEC-RAS y modelo bidimensional ICM.....	53
Tabla 4.7. Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en la curva de remanso de vertido libre	54
Tabla 4.8. Comparación de calados y velocidades entre el modelo 2D y HEC-RAS, en elevación de solera.....	55
Tabla 4.9. Comparación de resultados entre modelos 2D y fórmulas analíticas en rotura de dique a los 60s..	59
Tabla 5.1. Cálculos realizados con el modelo 2D de cauce trapecial con distintas densidades de mallado.....	63
Tabla 5.2. Resultados utilizando la formulación de Manning.....	63
Tabla 5.3. Resultados según Manning considerando rozamiento únicamente en el plano horizontal.....	63
Tabla 5.4. Resultados de la simulación 2D del cauce trapecial, rozamiento sólo en el plano horizontal.....	64
Tabla 5.5. Caudal en la sección PK_750 en el cálculo nº 8 (máximo de precisión)	65
Tabla 5.6. Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749	65
Tabla 5.7. Comparación de resultados en la sección PK_750.....	66
Tabla 5.8. Comparación de resultados del caudal máximo	69
Tabla 5.9. Listado de Cálculos de análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en cauce natural...	70
Tabla 5.10. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico} , Laminación y t_{Qpico}	71
Tabla 5.11. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos.....	71
Tabla 5.12. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico} , Laminación y t_{Qpico}	72
Tabla 5.13. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos.....	72
Tabla 6.1. Error en los modelos 2D en función de la pendiente	83
Tabla 6.2. Resultados de tránsito en cauces prismáticos.....	88
Tabla 6.3. Resultados de tránsito en cauces naturales.....	89
Tabla 7.1. Valores de la laminación en un tránsito de 20 km, ancho 250 m y pendiente 0.01	98

Tabla 8.1.	Pendientes medias en el cauce del Esla (ES-01).....	114
Tabla 8.2.	Resumen de la comparación de resultados en el cauce del Esla (ES-01).....	123
Tabla 10.1.	Número de cálculos realizados.....	135
Tabla A.1.	Resultados teóricos de calados y velocidades según la fórmula de Manning.....	154
Tabla A.2.	Sección tipo utilizada en el modelo HEC-RAS.....	154
Tabla A.3.	Valores de caudal, calados y velocidades en el modelo bidimensional sección PK_10000.....	158
Tabla A.4.	Comparación de resultados de velocidades y calados en un canal rectangular según la fórmula de Manning, modelos HEC-RAS e ICM.....	158
Tabla A.5.	Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en la curva de remanso de vertido libre.....	160
Tabla A.6.	Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en una elevación de solera.....	161
Tabla A.7.	Comparación de resultados entre modelos 2 D y fórmulas analíticas en rotura de dique a los 60s.....	167
Tabla B.1.	Resultados utilizando la formulación de Manning.....	172
Tabla B.2.	Resultados medios según Manning considerando rozamiento únicamente en el plano horizontal.....	172
Tabla B.3.	Resultados con la formulación de Manning, rozamiento sólo en el plano horizontal.....	175
Tabla B.4.	Cálculos realizados con el modelo 2D de cauce trapecial con distintas densidades de mallado.....	176
Tabla B.5.	Caudal en la sección PK_750 en el cálculo nº 8 (máximo de precisión).....	176
Tabla B.6.	Velocidades en los puntos de control PK_749.....	178
Tabla B.7.	Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749.....	178
Tabla B.8.	Comparación de resultados en la sección PK_750.....	179
Tabla B.9.	Comparación de resultados del caudal máximo.....	187
Tabla B.10.	Listado de Cálculos de análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en el cauce natural.....	188
Tabla B.11.	Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico} , Laminación y t_{Qpico}	195
Tabla B.12.	Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos.....	195
Tabla B.13.	Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico} , Laminación y t_{Qpico}	196
Tabla B.14.	Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos.....	196
Tabla C.1.	Sección tipo.....	235
Tabla C.2.	Resumen de los resultados hidráulicos.....	237
Tabla C.3.	Caudales utilizados en el modelo de cauce natural.....	241
Tabla C.4.	Caudales utilizados en el modelo de cauce natural.....	244
Tabla C.5.	Pendientes medias para distintos caudales.....	244
Tabla C.6.	Sección equivalente de 8 puntos.....	247
Tabla C.7.	Valores medios de la n de Manning.....	248
Tabla C.8.	Resumen de la laminación con HEC-HMS.....	250
Tabla C.9.	Comparación entre resultados de laminación con HEC-HMS y con modelos 2D.....	251
Tabla D.1.	Dimensiones y unidades de las variables relacionadas con el fenómeno físico.....	257
Tabla E.1.	Cálculos realizados con cauces prismáticos.....	267
Tabla E.2.	Cálculos realizados en cauces naturales.....	267

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La gestión de los recursos naturales, así como las tareas que se integran en la actual ordenación del territorio exigen herramientas eficaces que ayuden a un mejor conocimiento del medio y que sirvan como apoyo en la toma de decisiones a la hora de realizar la planificación. En el caso de los cursos de agua, resulta necesario conocer la distribución de caudales máximos en avenidas y su propagación a lo largo del tiempo y del espacio.

La simulación de este fenómeno es por lo tanto una tarea imprescindible para lograr esta finalidad. La necesidad de un "modelo" se justifica ante la imposibilidad de abarcar todas las variables que influyen, lo cual obliga a prescindir de aquéllas que son menos significativas. De esta manera se termina trabajando con una realidad simplificada que ayuda a comprender de forma más fácil dicho proceso.

El cálculo del tránsito de avenidas a lo largo de los cauces se realiza de forma habitual, empleando métodos simplificados como el Muskingum, Muskingum-Cunge, onda cinemática, etc., que exigen la determinación de diversos parámetros para cuantificar las características morfológicas del tramo del cauce por el que se produce el tránsito. Estos parámetros son función por ejemplo de la longitud del cauce, su sección, pendiente, rugosidad y del propio hidrograma de avenidas.

La determinación de dichos parámetros que caracterizan el cauce es en general difícil debido a la variabilidad de los cauces naturales. Resulta habitual que en el momento de realizar la modelización no se posea información suficiente como para poder determinar dichos parámetros, o que los métodos simplificados utilizados precisen una calibración detallada o parámetros derivados de difícil determinación para obtener resultados adecuados.

Esta problemática común a muchos métodos se pretende solventar en el presente trabajo de investigación enfocándolo al método de Muskingum-Cunge por ser el más utilizado y más concretamente en su implementación en el software HEC-HMS como método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

Por último, la herramienta de análisis con la que se intentará resolver dicho problema será la modelización bidimensional de los tránsitos, por su precisión en los resultados finales y por la facilidad que brinda el poder analizar los diferentes efectos de cada parámetro por separado.

1.2. MOTIVACIÓN

El presente trabajo tiene sus raíces en la aparente arbitrariedad del método de Muskingum-Cunge de 8 puntos a la hora de producir similares resultados en un mismo tramo de cauce analizado por diferentes técnicos.

Esta problemática aparece debido a que la selección de la sección representativa empleada al aplicar esta metodología, tal y como se verá más adelante, es un proceso artesanal basado en la pericia y experiencia del técnico, sin fundamentarse en un proceso concreto que **optimice y homogenice** los resultados obtenidos con este método.

Es por esto que, apoyándose en los modelos bidimensionales como herramienta de referencia y de análisis, la presente tesis persigue este objetivo de proporcionar dicho proceso, con vocación de ser una herramienta **práctica, unívoca y óptima**.

1.3. OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales buscados en el desarrollo de este trabajo de investigación, fundamentados en la motivación indicada, han sido los siguientes:

- **Definir un procedimiento** práctico y óptimo para la aplicación del método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.
- **Analizar la sensibilidad** de la malla espacial en la aplicación de los modelos bidimensionales al cálculo de tránsitos en cauces.
- Contrastar los resultados de la modelización de Muskingum-Cunge de ocho puntos en la modelización de los tránsitos y **cuantificar el error** cometido con esta metodología, llegando incluso a acotar los rangos de aplicación.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La tesis se ha estructurado en diez capítulos, a los que se añaden los anejos.

1.4.1. Contenido de los Capítulos

El capítulo primero *Introducción*, contiene los antecedentes, la motivación y los objetivos buscados.

La segunda sección, *Estado del Arte*, incluye los aspectos hidráulicos e hidrológicos que se han analizado inicialmente y que permiten conocer la situación actual del desarrollo de esta materia, terminando en una discusión concreta sobre la validez del método de Muskingum-Cunge y llegando a la justificación de la necesidad del presente trabajo de investigación.

El capítulo tercero, *Caracterización del Tránsito en Cauce*, expone todos los parámetros que afectan al comportamiento hidráulico del tránsito, con indicación de los que se han considerado en el presente trabajo de investigación.

En el cuarto epígrafe, denominado *Validación del Modelo 2D Aplicado al Tránsito en Cauce*, se detallan las comprobaciones del programa InfoWorks ICM realizadas frente a diversas formulaciones matemáticas y a la herramienta HEC-RAS.

El capítulo quinto, *Análisis de Sensibilidad de los Modelos 2D*, acota el error cometido en laminación y la precisión necesaria en la malla bidimensional, incluyendo como conclusión final una serie de ábacos que devuelven el tamaño medio del elemento 2D recomendado a partir de la anchura de la sección transversal del cauce de agua bajas.

En el apartado sexto, *Cálculos Bidimensionales Realizados*, se especifican las características de la herramienta InfoWorks ICM empleada, se enumeran los ensayos de laminación ejecutados en cauces tanto prismáticos como naturales, y se recogen los resultados obtenidos.

El capítulo séptimo, **Análisis de Resultados**, incluye el análisis de los resultados de los modelos hidráulicos bidimensionales de tránsito realizados y su comparación con el método de Muskingum-Cunge.

En el octavo epígrafe, **Desarrollo de un Nuevo Procedimiento de Aplicación para el Método de Muskingum-Cunge de 8 Puntos**, mediante la comparación de los resultados obtenidos en epígrafes anteriores se desarrolla una metodología para la estimación óptima de los 8 puntos de la sección representativa requerida en dicho método.

El capítulo noveno, **Relaciones Funcionales, Rangos de Aplicación**, contiene los resultados a los que se ha llegado partiendo del análisis dimensional, con la intención de acotar el error cometido en la aplicación del nuevo procedimiento.

En el último capítulo, **Conclusiones**, se recogen las impresiones finales y las aportaciones originales logradas en la presente tesis; además se plantean posibles líneas de investigación futuras que no se han tratado en este trabajo y cuyo contenido queda abierto.

1.4.2. Contenido de los Anejos

El Anejo A, **Flujo en régimen uniforme, variado y variable**, tiene como objetivo la validación de los modelos hidráulicos bidimensionales realizados con el programa InfoWorks ICM. Esto se lleva a cabo comparando los resultados de modelos 2D que a su vez tienen solución numérica, como son el régimen permanente con la formulación de Manning, el régimen variado con el modelo HEC-RAS y el régimen variable con una solución analítica.

En el Anejo B, **Precisión de la modelización 2D**, se estudia la precisión de los modelos bidimensionales en función del número de elementos utilizados y se analizan distintos niveles de densidad del mallado con el objetivo de determinar unos tamaños recomendados de malla dependientes del ancho de la sección de cauce.

El Anejo C, **Sección equivalente de ocho puntos**, desarrolla una metodología original para obtener la sección equivalente de ocho puntos que posteriormente es utilizada en el método de Muskingum-Cunge aplicada a cauces naturales.

En el Anejo D, **Análisis dimensional**, se aplica el análisis dimensional a los resultados de tránsito de todas las simulaciones realizadas, obteniéndose los monomios empleados en la determinación de los rangos de aplicación de la metodología de Muskingum-Cunge.

El Anejo E, **Resumen de los tránsitos**, recoge en formato de ficha los resultados más significativos de los modelos bidimensionales realizados, tanto en cauces prismáticos como naturales.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo se revisan los antecedentes que fundamentan la presente investigación analizándose los aspectos hidráulicos más relevantes relacionados con el efecto laminador del cauce. El estudio se ha ordenado atendiendo a la complejidad creciente de los diferentes métodos y agrupándolos en base a la simplificación que realizan sobre la ecuación de cantidad de movimiento, priorizando tanto los aspectos teóricos como los prácticos.

El capítulo finaliza con una discusión sobre los principales retos, ventajas e inconvenientes de las metodologías existentes.

El tránsito de avenidas se puede definir como la variación de un hidrograma a su paso por un cauce. Habitualmente se plantea como el cálculo del hidrograma de salida en un tramo de cauce cuando se conoce el de entrada y las características de éste.

Figura 2.1 Tránsito de un hidrograma por el cauce

En el paso de un hidrograma de avenida por un cauce existen dos aspectos diferenciados:

- El efecto de transmisión o desplazamiento en el tiempo.
- Laminación por acción del almacenamiento del cauce.

La figura 2.1 describe estos efectos; apreciándose que el caudal máximo de salida Q_O es inferior al caudal máximo de entrada Q_I .

El cociente Q_O/Q_I mide el efecto laminador del cauce por almacenamiento. Asimismo, existe un desfase entre el hidrograma de entrada y el hidrograma de salida. Este desfase es debido al proceso de tránsito por el cauce; en la figura 2.2 se pueden apreciar separados los efectos de ambos conceptos.

Figura 2.2 Diferencia entre laminación y tránsito

La propagación de la avenida en un cauce depende de la configuración del propio cauce más la superficie de la llanura de inundación. El estudio detallado de la propagación de la avenida se debería hacer con modelos hidráulicos en régimen variable, que resuelvan las ecuaciones de Saint-Venant, en principio en las tres dimensiones aunque hoy en la práctica sólo se pueden abordar en una o dos dimensiones. La conveniencia de la utilización de unas u otras es función de la configuración de la llanura de inundación. Con ello, una vez obtenido el hidrograma en la entrada del tramo de cauce (habitualmente por un modelo hidrológico), se debería introducir como dato en un modelo hidráulico y obtener un hidrograma propagado que sería la entrada del modelo hidrológico aguas abajo del tramo de propagación.

Sin embargo hasta ahora, es habitual una modelación hidrológica, también en los tramos de propagación, calculándolos con algunos de los modelos simplificados disponibles.

Los métodos de cálculo del tránsito de un hidrograma por un cauce pueden ser **hidrológicos** (también conocidos como agregados) e **hidráulicos** (también conocidos como distribuidos); los hidrológicos utilizan conceptos relacionados con el almacenamiento en el cauce (ecuación de continuidad), calculándose el caudal en función del tiempo únicamente. Entre estos se incluye el del Lag, el de Muskingum, el método de Puls, etc...

Los métodos hidráulicos utilizan las ecuaciones de la hidráulica (continuidad, y cantidad de movimiento), calculándose en este caso el caudal como función del espacio y del tiempo a través del sistema. Los métodos hidráulicos pueden incluir, o no, simplificaciones según los términos considerados de la ecuación de la cantidad de movimiento como son:

- El método de la onda cinemática.
- Onda difusiva.
- Onda dinámica.

Figura 2.3 Esquema representativo de tránsitos hidrológico e hidráulico

Existe una familia de **métodos mixtos**, en los que se enmarca el grupo de procedimientos derivados del **Muskingum-Cunge**, que tratan de mejorar los resultados incluyendo términos simples sobre la geometría del tramo tales como la forma de la sección, su longitud, el coeficiente de rugosidad medio y la pendiente sin complicar en demasía los cálculos numéricos necesarios.

En el siguiente esquema se recoge la clasificación indicada, junto con los diversos métodos existentes que se analizarán en los puntos siguientes:

Figura 2.4 Clasificación de métodos de cálculo del tránsito en cauces

A continuación se presenta un resumen de los aspectos hidráulicos relacionados más relevantes.

2.2. PUNTO DE PARTIDA DEL PROBLEMA: LA ECUACIÓN DE SAINT VENANT

En 1871, Barré de Saint Venant formuló la teoría básica para el análisis unidimensional del flujo transitorio o no permanente. Las ecuaciones generales para el régimen variable que formuló son actualmente conocidas como ecuaciones de Saint-Venant. En éstas, se considera la condición de contorno fijo y se excluye el movimiento en cauces erosionables, como es el caso de ríos con lecho móvil.

Asimismo la condición de pendiente pequeña afecta a las ecuaciones de la energía y se cumple habitualmente en cauces. Como resumen se tiene:

Ecuación de continuidad:

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

Ecuación dinámica:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2v}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{v^2}{Ag} \frac{\partial A}{\partial x} + (S_0 - S_f)$$

Siendo:

ρ = cte., densidad del líquido

γ = cte., peso específico

$v = V(x, t)$, velocidad media de la sección

$A = A(x, t)$, área de la sección transversal

$Y = y(x, t)$, calado de la sección transversal

$F^2 = \frac{v^2}{\frac{gA}{T}}$ = número de Froude

$T = T(x, t)$, ancho de la sección transversal

S_0 = Pendiente del fondo

S_f = Rozamiento contra el fondo

Especial mención merece el principio de la conservación de la masa, dado que es muy simple pero posiblemente también sea el más útil en el análisis hidrológico. La ecuación que refleja este principio, denominada como hemos visto antes "ecuación de continuidad", puede desarrollarse para un volumen de flujo, para una sección de flujo y para un punto en un flujo (Chow, y otros, 1988).

Figura 2.5 Esquema representativo de la ecuación de continuidad

En el caso de su aplicación a un tramo de cauce en el que la elevación de la superficie varía (Henderson, 1966) podemos considerar el esquema de la figura anterior, concretamente la sección de río de longitud Δx . Los flujos en los extremos (Q_1 , Q_2) diferirán conforme a la siguiente ecuación:

$$Q_2 - Q_1 = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x$$

El término en la parte derecha proporciona la rapidez con la que disminuye el volumen dentro de la región de análisis. Si h es la cota de la superficie de agua, entonces el volumen de agua en la sección con longitud Δx se incrementa de acuerdo a (Henderson, 1966):

$$B \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x$$

Donde B es el ancho de la superficie del agua. Ambos términos presentados deberían ser iguales en magnitud pero con signos opuestos, lo que nos lleva combinando ambos a la siguiente ecuación de continuidad para cauces abiertos en régimen variable (Henderson, 1966):

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

o también en su forma anterior:

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

Las ecuaciones de Saint-Venant se pueden integrar por métodos numéricos aunque la integración general tridimensional es compleja, por el contrario en la actualidad se han generalizado los modelos comerciales bidimensionales (2D) que en el caso de cauces reflejan con buena precisión su comportamiento hidráulico.

A lo largo del presente capítulo se presenta la situación actual de las distintas metodologías de cálculo del tránsito por el cauce que se derivan de las diferentes simplificaciones que se realizan

sobre esta ecuación general para obtener soluciones factibles capaces de describir las características más importantes de la onda de flujo y su movimiento.

2.3. MÉTODOS HIDROLÓGICOS DE TRÁNSITO

En el tránsito de flujo agrupado o tránsito hidrológico, el flujo se calcula como una función del tiempo para todo un tramo a lo largo del cauce.

De esta forma, considerando flujo no permanente a lo largo de un cauce, en el cual el hidrograma de entrada $I(t)$ en el comienzo aguas arriba y el hidrograma de salida $Q(t)$ en el extremo aguas abajo del cauce están relacionados en función del tiempo, si se aplica el principio de la conservación de la masa igualando la diferencia entre las descargas con el cambio de almacenamiento S en el intervalo de tiempo entre los extremos se obtiene:

$$I(t) - Q(t) = \frac{dS}{dt}$$

Generalmente los diversos métodos existentes relacionan el almacenamiento S con I y/o Q mediante una función denominada de almacenamiento y del tipo empírica. Entre las relaciones más simples se tiene $S=f(Q)$ o $S=f(h)$, esto último implica la existencia de una relación directa entre la superficie del agua y el caudal o nivel a lo largo del cuerpo de agua, usualmente esta relación se utiliza en los casos de tránsito de flujo a través de un embalse.

La solución de la ecuación anterior, es relativamente simple en comparación con los métodos de tránsito hidráulico debido a que existen técnicas gráficas y matemáticas bastante conocidas.

Las limitaciones que tienen estos métodos son la imposibilidad de describir el efecto de remanso así como también no son lo suficientemente exactos para transitar hidrogramas de rápido ascenso a lo largo de ríos con poca pendiente o para grandes embalses.

Entre los principales tipos de modelos, se pueden citar los siguientes:

<i>Tipo de Modelo</i>	<i>Nombre</i>
<i>Para embalses</i>	Puls, Goodrich
	Modified Puls
	Runge-Kutta
	Iterative trapezoidal integration
<i>Tránsito en cauces con almacenamiento</i>	Kalinin-Miljukov
	Lag and Route
	Muskingum
	SSARR
	Tatum
<i>Sistemas lineales</i>	Linear reservoir
	SOSM
	Linearized St.Venant
	Multiple linearized
	CLS

Tabla 2.1. Principales modelos de tránsito hidrológico

En el caso de los tránsitos para embalse y los sistemas lineales no se profundizará dado que no resultan de interés para la presente tesis.

De los métodos indicados para tránsito en cauces con almacenamiento se describen a continuación el método del Lag, el de Kalinin-Miljukov, el modificado de Puls, el de Muskingum y el SSARR, puesto que son los más representativos y relevantes.

2.3.1. Método Lag

Es el método más simple de los que van a exponerse en este capítulo puesto que se basa en representar el hidrograma de salida como una traslación directa (retraso temporal, traducción de lag) sobre el de entrada. El caudal no se atenúa, con lo cual la forma del hidrograma se mantiene. Su principal aplicación es en canales urbanos de drenaje (Pilgrim y Cordery, 1993).

Matemáticamente no entraña ninguna dificultad, calculándose las ordenadas del hidrograma aguas abajo como suma de la ordenada del hidrograma aguas arriba correspondiente al mismo instante y sumándole el tiempo de lag (retraso temporal) correspondiente.

Finalmente, a la hora de estimar el retraso (lag) se recomienda disponer de hidrogramas de episodios anteriores. El tiempo de lag, como se indicó inicialmente, puede calcularse como diferencia de tiempos entre los centroides de las áreas de ambos hidrogramas (entrada y salida). Nótese que también podría asimilarse al tiempo entre picos o el tiempo entre los puntos medios de los tramos crecientes de ambos.

Como se verá más adelante, este método puede considerarse un caso particular de otros métodos. Por ejemplo, si se fijan los parámetros $X = 0.5$ y $K = \Delta t$ en el método de Muskingum, el hidrograma calculado será exactamente el mismo que el de entrada pero desplazado temporalmente por K .

2.3.2. Método de Kalinin-Milyukov

El concepto de tramo característico nació del método desarrollado por Kalinin and Milyukov (1957, 1958) en la Unión Soviética. El tramo característico es un tramo conceptual del cauce en el que se puede establecer una relación uno a uno entre el calado en el punto medio y el hidrograma de salida aguas abajo, al menos para pequeñas desviaciones sobre el flujo permanente. Este concepto es en el que posteriormente se basa Perumal para su mejora del método de Muskingum-Cunge, como se incluye más adelante.

El método consiste en la representación del tránsito como un número n de embalses lineales, cada uno abstrayendo un "tramo característico" del cauce. Dado que el método se apoya en parámetros fácilmente identificables, resultó muy tentador. Estos parámetros, el número de embalses lineales y la constante temporal (o coeficiente de almacenamiento en la relación almacenamiento-caudal de salida de cada embalse en cascada), están relacionados con las características del cauce y las condiciones hidráulicas.

En su forma final, las ecuaciones de Kalinin-Milyukov son diferentes a las de Muskingum-Cunge dado que utilizan varias relaciones exponenciales como coeficientes. Este método posteriormente ha sido revisado por Miller y Cunge (1975) y Montes (1998).

2.3.3. Método modificado de Puls

En esencia, este método parte de la forma en diferencias finitas de la ecuación de continuidad, obteniendo la solución mediante un gráfico o tabla. La premisa es que el almacenamiento es función exclusivamente del hidrograma de salida. Debido a esto es un método muy indicado para embalses, si bien puede aplicarse a cauces en determinadas circunstancias. Strelkoff (1980), en su informe sobre la aplicación del método modificado de Puls en el arroyo Chuquatonchee, determinó que analizar la relación entre almacenamiento y caudal de salida era un factor clave a la hora de aplicar este método.

Para analizar el tránsito, se calcula la relación entre almacenamiento y caudal representándola en un gráfico. A continuación se resuelve para cada paso temporal la ecuación de continuidad en la siguiente forma:

$$\left(\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{O_2}{2} \right) = \left(\frac{S_1}{\Delta t} + \frac{O_1}{2} \right) - O_1 + \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)$$

El método modificado de Puls para el tránsito funciona adecuadamente en embalses especialmente cuando los efectos de la onda de avenida (diferencias en el almacenamiento en los episodios de subida o bajada del nivel) se minimizan, o incluso eliminan, por el propio embalse. Este método puede utilizarse en cauces de forma análoga considerando cada subsección del tramo de análisis como embalses en cascada. Evidentemente se cometerá cierto error aplicando este concepto dado que el almacenamiento en un río no es función exclusiva del hidrograma de salida.

Por esta razón, el método no se recomienda para canales con menos del 0.05% de pendiente, en tramos de cauce cuyas condiciones aguas abajo incluyan eventos variables en el tiempo como mareas, o en el caso de variaciones bruscas en los hidrogramas de entrada, como puede ser el caso de roturas de presas (HEC, 1990).

Se debe tener cierto cuidado en la selección del incremento temporal puesto que el método es muy sensible. El incremento temporal debe ser menor o sensiblemente igual al tiempo de recorrido del cauce. Se han planteado algunos criterios sobre el número de subsecciones y el paso temporal para el tiempo de tránsito. En general, la longitud del cauce, la velocidad media en el mismo y el intervalo temporal determinan el número de subsecciones (Hydrologic Engineering Center, 2002). Brunner (HEC-RAS User's Manual, 2010) afirma que el número de pasos (subsecciones del tramo) afecta a la atenuación del hidrograma y debería obtenerse por calibración. La mayor atenuación se presenta cuando el tránsito se calcula en un único paso. Por el contrario, la atenuación del hidrograma decrece a medida que se incrementa el número de pasos para el cálculo del tránsito.

2.3.4. Método de Muskingum

Entre los métodos hidrológicos, posiblemente el más utilizado en cálculos manuales por su sencillez sea el de Muskingum (Chow y otros., 1994, Singh, V.P, 1992; Wanielista, 1997; Viessman, 1995).

Este método que debe su nombre al río Muskingum, Ohio, combina el almacenamiento en un cauce en dos zonas "prisma" y "cuña" (figura 2.6).

Figura 2.6. Método de Muskingum

Este método es bastante común y sencillo de usar, pero incluye parámetros que no poseen base física y son complejos de estimar. Parte de la ecuación básica:

$$I - O = \Delta V / \Delta t$$

que puede discretizarse en el plano x, t en la forma:

$$\frac{I_n + I_{n+1}}{2} - \frac{O_n + O_{n+1}}{2} = \frac{V_{n+1} - V_n}{\Delta t}$$

La idea se basa en que el volumen almacenado puede expresarse como una función del hidrograma de entrada y del de salida, es decir, existe una relación entre la salida O , la entrada I y el almacenamiento V , que puede expresarse en la forma:

$$V = V(O, I)$$

Si el volumen almacenado es función lineal del caudal de entrada y salida se tiene:

$$V = K(XI + (1 - X)O)$$

El coeficiente K tiene como unidad el tiempo. K es función del tiempo de tránsito del hidrograma por el cauce. Por otra parte, el coeficiente X cuantifica el efecto almacenamiento / transmisión según:

$$\text{Para el valor } X = 0 \quad \Rightarrow \quad V = KO$$

Esto representaría que el volumen almacenado sería función sólo del caudal de salida, y en este caso concreto se encontraría el límite, en el que el cauce se comportaría como un embalse puro, reduciéndose el método a las metodologías de Kalinin-Milyukov y el método modificado de Puls. Para el valor $X = 0.5$ el hidrograma de salida es igual al de entrada pero desplazado en el tiempo, lo que reduciría este método al de Lag, tal y como se ha indicado anteriormente.

Para valores $X > 0.5$ se produce una amplificación del hidrograma, efecto que no es posible en la realidad.

La ecuación anterior aplicada a los puntos 1 y 2 es:

$$V_1 = K(XI_1 + (1 - X)O_1)$$

$$V_2 = K(XI_2 + (1 - X)O_2)$$

que introducida en la ecuación básica queda en la forma:

$$O_2 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{k}\right) - 2X}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{k}\right)} I_2 + \frac{\left(\frac{\Delta t}{k}\right) + 2X}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{k}\right)} I_1 + \frac{2(1-X) - \left(\frac{\Delta t}{k}\right)}{2(1-X) + \left(\frac{\Delta t}{k}\right)} O_1$$

o bien:

$$O_2 = A_0 I_2 + A_1 I_1 + A_2 O_1$$

$$\text{siendo: } A_0 = \frac{\frac{\Delta t}{k} - 2X}{2(1-X) + \frac{\Delta t}{k}} \quad A_1 = \frac{\frac{\Delta t}{k} + 2X}{2(1-X) + \frac{\Delta t}{k}} \quad A_2 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{k}}{2(1-X) + \frac{\Delta t}{k}}$$

$$\text{Donde} \quad A_0 + A_1 + A_2 = 1 \quad y \quad K/3 \leq \Delta t \leq K$$

K y X son determinados mediante calibración de hidrogramas de entrada y salida observados en el tramo del cauce.

$$K = \frac{0.5\Delta t [I^{j+1} + I^j - (Q^{j+1} + Q^j)]}{X(I^{j+1} - I^j) + (1-X)(Q^{j+1} - Q^j)}$$

2.3.5. Método SSARR

El método SSARR (Stream-flow Synthesis and Reservoir Regulation Model) se desarrolló inicialmente para la División Pacífico Norte del US Army Corps of Engineers (USACE). Se ha seguido aplicando y desarrollando posteriormente desde 1956 y se ha aplicado a numerosos ríos en Estados Unidos y el resto del mundo.

En esencia es un método numérico que describe tanto la escurrentía en una cuenca como el tránsito posterior (USACE, 1991). Dejando a un lado el modelo de escurrentía y centrándonos en el de tránsito, este método también es una variante del concepto de “embalses lineales en cascada” (Nash, 1957), utilizado tanto en el de Kalinin-Milyukov como en el modificado de Puls; conceptualmente se simplifica el tránsito entre ambos extremos a través de almacenamientos en cauce y embalse, pudiéndose incluso simular el flujo a través de presas. Dado que se considera que este método no proporciona información de mayor relevancia para el presente análisis, no se profundizará más.

2.4. MÉTODOS HIDRÁULICOS DE TRÁNSITO

En el tránsito de flujo distribuido o tránsito hidráulico, el flujo se calcula como una función del tiempo, al igual que en el caso de los métodos de tránsito hidrológicos, pero de manera simultánea en varias secciones transversales a lo largo del cauce.

Su fundamento teórico proviene, tal y como se ha indicado anteriormente, de las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión. Recordando la formulación tenemos:

Ecuación de continuidad:

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

Cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0$$

(a) (b) (c) (d)

Siendo el término

(a) La expresión $\frac{\partial V}{\partial t}$ corresponde al término de aceleración local

(b) El término $V \frac{\partial V}{\partial x}$ es la aceleración convectiva

(c) La expresión $g \frac{\partial y}{\partial x}$ es la fuerza de presión

(d) El término $g(S_f - S_0)$ es la fuerza de fricción menos la gravitacional

Según se incluyan o no determinados términos, realizando simplificaciones, se tienen las distintas metodologías de cálculo del tránsito por el cauce:

- Onda dinámica, considera todos los términos.
- Onda difusiva, incluye los términos (c) y (d).
- Onda cinemática, sólo considera el término (d).

De entre estos tres tipos de ondas utilizadas en cauces abiertos, la cinemática es la más sencilla mientras que la dinámica es la más compleja. El caso de la onda difusiva queda aproximadamente entre ambas.

2.4.1. Método de la onda cinemática

En determinados casos de flujo en cauce se puede asumir que las fuerzas de presión y de fricción son sensiblemente iguales. En estos casos las variaciones en calado y velocidad respecto al tiempo y espacio son pequeñas comparadas con la pendiente del lecho del cauce (USACE, 1994), con lo cual pueden suprimirse de la ecuación general los términos de aceleración, tanto local como convectiva. Quedando reducida a $S_f = S_0$

En este caso la onda que se propagaría a lo largo del cauce tendría una pendiente de energía paralela a la del fondo siendo el flujo uniforme y permanente.

Las ecuaciones se derivan partiendo de la ecuación de continuidad:

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

y utilizando la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A S^{1/2} R_H^{2/3}$$

Permite transformar la ecuación de continuidad en la forma:

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

y suponiendo la velocidad constante, se puede expresar en la forma siguiente:

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

que es la expresión habitual de la onda cinemática.

Dado que el método de la onda cinemática desprecia todos los términos de aceleración (supone velocidad constante), implícitamente se asume régimen permanente uniforme, con lo cual no permite difusión en el hidrograma. En otras palabras, la ecuación de la onda cinemática únicamente traslada el hidrograma en el tiempo sin ningún tipo de atenuación del caudal pico.

2.4.2. Método de la onda difusiva

Si bien los métodos de Muskingum y onda cinemática son sorprendentemente similares, ambos métodos utilizan el mismo tipo de ecuación de tránsito, lo cierto es que el método de Muskingum permite representar la difusión del hidrograma. El método de la onda dinámica no es capaz de esto, salvo que utilice algún tipo de modificación posterior.

En base a esto se puede mejorar la teoría de la onda cinemática introduciendo otro término de la ecuación de cantidad de movimiento para representar la difusión física. Esta nueva formulación mejorada pasa a denominarse onda cinemática con difusión, que de forma abreviada se conoce como onda difusiva.

Nótese que este método se utiliza en el de Muskingum-Cunge, tal y como se verá posteriormente.

La ecuación puede derivarse de la simplificación de la ecuación de cantidad de movimiento, que se realiza partiendo de la fórmula de Manning en la siguiente forma:

$$Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} A S^{1/2}$$

y enunciando la pendiente de energía:

$$S = \left(S_0 - \frac{dy}{dx} \right)$$

La expresión de Manning se puede despejar:

$$C Q^2 = \left(S_0 - \frac{dy}{dx} \right)$$

Siendo:

$$C = \left(\frac{1}{\frac{1}{n} R_H^{2/3} A} \right)^2$$

No obstante se puede aplicar:

$$\frac{dA}{dy} = T$$

Tomando T como el ancho del cauce, y sustituyendo en la anterior expresión se tiene:

$$\frac{1}{T} \frac{dA}{dx} + C Q^2 - S_0 = 0$$

O bien:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{\partial Q}{\partial A} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} = \left(\frac{Q_0}{2 T S_0} \right) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

La expresión a la izquierda del signo igual corresponde a la ecuación de la onda cinemática, mientras que la parte de la derecha, que contiene un término en derivada segunda del caudal, corresponde a un efecto difusor cuyo coeficiente es:

$$\nu_h = \frac{Q_0}{2 T S_0} = \frac{q_0}{2 S_0}$$

Siendo q_0 el caudal específico.

Por último, el criterio para evaluar la aplicabilidad del método es:

$$t S \left(\frac{g}{d} \right)^{1/2} > M$$

Siendo

S = pendiente

d = calado

g = gravedad

t = tiempo pico de hidrograma

El valor es adimensional y M debe de ser superior a 15.

2.4.3. Onda dinámica

Cuando las fuerzas inerciales y las de presión son relevantes y es importante el efecto de las curvas de remanso, mareas, etc., caso de cauces de pendiente baja, es necesario utilizar todos los términos de las ecuaciones de Saint-Venant, utilizando la formulación completa de la onda dinámica.

Nótese que en este caso la onda que se propagaría a lo largo del cauce no tendría una pendiente de energía paralela a la del fondo.

Las primeras referencias del tránsito utilizando la onda dinámica son de Stokes (1953) en el río Ohio. Aunque existen distintos métodos para su integración numérica (método de las características, método de las diferencias finitas implícitas o explícitas, método de elementos finitos, etc.), el más eficaz es el de diferencias finitas implícitas de cuatro puntos. (Fead 1976, 1980, 1985).

En el método de las diferencias finitas, las ecuaciones en derivadas parciales se discretizan siguiendo un esquema numérico concreto. El método de las características está basado en la conversión del sistema de ecuaciones en derivadas parciales a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinario, y la solución sobre una *mallá característica*, que en esencia es una mallá a lo largo de las direcciones características. El método de elementos finitos integra el sistema de ecuaciones en base a una mallá determinada de elementos finitos.

En la práctica, la solución numérica al problema de la ecuación dinámica supone un orden de magnitud superior en la complejidad, comparado con los métodos de la onda cinemática y difusiva. Por esta razón únicamente se recomienda su uso en aquellos casos concretos en que los métodos anteriores no proporcionen resultados adecuados. Estos casos pueden ser tránsito sobre pendientes extremadamente planas o condiciones aguas abajo de flujo inverso.

Cabe notar que aún seguimos contando con las siguientes simplificaciones y limitaciones:

- La velocidad se considera constante y la superficie del agua horizontal a lo largo de las secciones transversales del cauce.
- Todos los flujos se consideran gradualmente variados de manera que la presión hidrostática prevalece en todos los puntos del flujo, con lo cual pueden despreciarse las aceleraciones verticales.
- No se considera circulación lateral secundaria puesto que el eje longitudinal del cauce se asume aproximadamente en una línea recta.
- Los límites del cauce se consideran fijos; esto es, no se contempla ni erosión ni deposición.
- El agua se considera con densidad uniforme. La resistencia al flujo se puede describir con fórmulas empíricas tales como las ecuaciones de Manning y Chezy.

A continuación se resumen los distintos métodos para dicha resolución numérica:

Método de las características

El método de las características es uno de los primeros que permitió integrar las ecuaciones de Saint-Venant y es anterior al desarrollo informático de los años 70 (las primeras referencias son Nassau (1900), Bergeron (1937), Levin (1942), Chow (1951), Isaacson (1956), basadas en métodos gráficos). Con la generalización de la informática esta metodología volvió a ser utilizada debido a su facilidad de programación, pero el desarrollo de los métodos en diferencias finitas que tienen mejor convergencia ha hecho que los métodos basados en las características hayan quedado en un segundo plano, en todo caso merecen una reseña aunque sea limitada.

Las ecuaciones de Saint-Venant pueden escribirse en la forma:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} + S_f - S_0 = 0$$

$$d \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial t} dt = dy$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial t} dt = dV$$

En las ecuaciones anteriores d es la relación entre el área y el ancho de la sección, $\partial y / \partial x$ es la pendiente de la superficie del agua, S_0 es la pendiente del cauce, $\partial V / \partial x$ y $\partial V / \partial t$ son las variaciones de la velocidad respecto de la longitud x y el tiempo t . Las ecuaciones anteriores pueden resolverse de forma simultánea con la ecuación:

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \frac{-d(S_0 - S_f) + \frac{d}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{V}{g} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dy}{dt} \frac{dz}{dt}}{\frac{1}{g} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 - \frac{2V}{g} \frac{dz}{dt} + \frac{V^2}{g} - d}$$

En la ecuación anterior, si el denominador es cero, el valor de dx es

$$dx = (V \pm c) dt$$

Donde c es la celeridad de onda, $c = \sqrt{g d}$ que para un cauce ancho es $c = \sqrt{g y}$

Si el numerador es cero, utilizando la ecuación anterior resulta: $d(V \pm 2c) = g(S_0 - S_f)dt$

El método se generaliza utilizando las ecuaciones:

$$\frac{dx}{dt} = V + c$$

$$d(V + 2c) = g(S_0 - S_f)dt$$

$$\frac{dx}{dt} = V - c$$

$$d(V - 2c) = g(S_0 - S_f)dt$$

Las condiciones de flujo de aguas arriba y abajo se pueden identificar con el subíndice a y b (o bien n y $n+1$), ver figura 2.7. Integrando la ecuación $d(V + 2c) = g(S_0 - S_f)dt$ entre t e Δt , se tiene la expresión:

$$V + 2c = V_a + 2c_a + g S_0 \Delta t - g \int_t^{t+\Delta t} S_f dt$$

Figura 2.7. Esquema del método de las características en el plano x-t

Si el intervalo Δt es suficientemente pequeño se puede considerar el valor medio

$$\int_t^{t+\Delta t} S_f dt = \frac{(S_{fa} + S_f) \Delta t}{2}$$

Luego la expresión de $V+2c$ se puede escribir en la forma:

$$V + 2c = V_a + 2c_a + g S_0 \Delta t - g \frac{(S_{fa} + S_f) \Delta t}{2}$$

Denominando

$$H_a = V_a + 2c_a + K_a$$

$$K_a = \frac{g(S_0 - S_{fu}) \Delta t}{2}$$

$$K = \frac{g(S_0 - S_f) \Delta t}{2}$$

La ecuación anterior queda en la forma:

$$V + 2c = H_a + K$$

De igual modo integrando la ecuación $d(V - 2c) = g(S_0 - S_f)dt$ en Δt desde aguas abajo hasta la sección considerada, resulta:

$$V - 2c = H_b + K$$

Donde

$$H_b = V_b - 2c_b + K_b \quad \text{y} \quad K_d = \frac{g(S_0 - S_{fd}) \Delta t}{2}$$

Al eliminar K de las ecuaciones anteriores y despejando c , se tiene:

$$c = \frac{H_a - H_b}{4}$$

Esta ecuación puede utilizarse para calcular c en el tiempo $t+\Delta t$ si se dan las condiciones de flujo aguas arriba y aguas abajo en el tiempo anterior t .

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$V - K = \frac{H_a + H_b}{2}$$

o bien:

$$V - K = H_b + 2c$$

Para poder calcular V se necesita utilizar la fórmula de Manning, $S_f = n^2 V^2 / R^{4/3}$, de forma que sustituyendo en la expresión de K y considerando que el cauce es ancho ($R = \text{calado} = c^2/g$), se tiene la ecuación de V en la forma:

$$V = \sqrt{\frac{g \Delta t S_0 - 2 K}{g \Delta t}} \left(\frac{c^2}{g} \right)^{2/3}$$

Que junto con la ecuación $V - K = H_b + 2c$, permiten calcular V y K en el tiempo $t+\Delta t$, conocida la velocidad en el tiempo t .

Modelo implícito de onda dinámica (diferencias finitas)

El esquema general de diferencias finitas, (figura 2.8, Fread, 1974, Chow y otros 1987), considera el plano $x-t$ (variables independientes x , t) donde la x representa las distancias y t el tiempo. Las ecuaciones dinámicas se resuelven en un número discreto de puntos, ordenados para formar la malla rectangular mostrada en la figura. Las líneas paralelas al eje vertical representan posiciones a lo largo del cauce y las líneas paralelas al eje de distancia representan los tiempos.

Considerando como variables independientes x (distancia eje de abscisas), y t (tiempo eje de ordenadas), los métodos implícitos de diferencias finitas integran las ecuaciones dinámicas desde una línea de tiempo hasta la siguiente de forma simultánea para todos los puntos a lo largo de la línea del tiempo. Se obtiene un sistema de ecuaciones aplicando de forma simultánea las ecuaciones de Saint-Venant a todos los valores desconocidos en una "línea" de tiempo.

Figura 2.8. Esquema del método de diferencias finitas en el plano x-t

Los métodos implícitos se han utilizado con mayor frecuencia que los explícitos, debido a que convergen con mayor rapidez que estos y permiten intervalos de tiempo de mayor longitud obteniéndose menores duraciones de cálculo. Por ejemplo, si un método explícito necesita un intervalo de tiempo de un minuto para ser estable, un modelo implícito aplicado al mismo problema podría usar un mayor intervalo de tiempo, hasta del orden de la hora.

El esquema implícito de diferencias finitas usa un método ponderado de cuatro puntos entre líneas de tiempo alrededor de un punto P , (figura 2.8). Una variable u que define el flujo, tal como velocidad, caudal o calado, se aproxima promediando los valores de las diferencias finitas en los puntos a distancia i e $i+1$. El valor en el punto a la distancia i es $(u_i^{j+1} - u_i^j) / \Delta t$ y en el punto de distancia $(i+1)$ es $(u_{i+1}^{j+1} - u_{i+1}^j) / \Delta t$, luego la aproximación de la derivada temporal es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_i^{j+1} + u_{i+1}^{j+1} - u_i^j - u_{i+1}^j}{2\Delta t}$$

para el punto P localizado a mitad de camino entre los puntos de distancia i e $(i+1)$.

La derivada espacial $\partial u / \partial x$ se aproxima de forma diferente, los términos de diferencias en las líneas de tiempo j y $(j+1)$ se calculan como:

$$(u_{i+1}^j - u_i^j) / \Delta x \text{ y } (u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}) / \Delta x$$

Y la derivada espacial:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \theta \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{\Delta x}$$

Que incluye un factor de ponderación/balanceo θ .

El valor de la media se calcula como:

$$\bar{u} = \theta \frac{u_i^{j+1} - u_{i+1}^{j+1}}{2} + (1 - \theta) \frac{u_i^j - u_{i+1}^j}{2}$$

El valor de $\theta = \Delta t' / \Delta t$ localiza el punto P verticalmente en la malla de la figura 2.8. Si se utiliza $\theta = 0.5$ se obtiene un sistema centrado o en "caja". Cuando $\theta = 0$, el punto P se sitúa justo en la línea de tiempo j y el esquema es "totalmente explícito", mientras que con un valor de $\theta = 1$ el esquema es "totalmente implícito" estando situado P en la línea de tiempo $(j+1)$. Los esquemas implícitos son aquellos con θ superior a 0.5; existen muchos trabajos para determinar qué valor es el más recomendable, es función del tipo del problema e incluso del paso temporal, aunque la mayoría de los estudios lo sitúan en el entorno de 0.6.

Como ya se ha indicado, la diferencia importante entre los métodos explícitos y los implícitos es que los métodos implícitos son generalmente estables para todos los intervalos de tiempo, mientras que los métodos explícitos son numéricamente estables sólo para intervalos de tiempo menores que un valor crítico determinado por la condición de Courant.

2.4.4. Desarrollo de las ecuaciones en diferencias finitas

La forma más general de las ecuaciones de Saint-Venant tiene la forma:

Continuidad:
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial (A + A_0)}{\partial t} - q = 0$$

Cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2 / A)}{\partial x} + g A \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0$$

Donde:

x = distancia longitudinal a lo largo del canal o río

t = tiempo

A = área de la sección transversal de flujo

A_0 = área de la sección transversal del almacenamiento muerto fuera del cauce central

q = caudal lateral de entrada por unidad de longitud a lo largo del canal

h = cota de la superficie de agua

v_x = velocidad del flujo en la dirección principal del flujo del canal

S_f = pendiente de fricción

S_e = pendiente de pérdidas

B = ancho del canal en la superficie de agua

W_f = fuerza cortante del viento

β = factor de conversión de la cantidad de movimiento

g = aceleración debida a la gravedad

Utilizando las ecuaciones anteriores (ver figura 2.8), las aproximaciones de las distintas variables ponderadas desde cuatro puntos (método de diferencias finitas) se utilizan para sustituir de forma aproximada los términos de las ecuaciones de Saint-Venant.

Las derivadas espaciales $\partial Q/\partial x$ y $\partial h/\partial x$ se estiman entre líneas de tiempo adyacentes, según:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1 - \theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \theta \frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1 - \theta) \frac{h_{i+1}^j - h_i^j}{\Delta x_i}$$

Las derivadas parciales temporales se estiman utilizando las ecuaciones:

$$\frac{\partial (A + A_0)}{\partial t} = \frac{(A + A_0)_i^{j+1} + (A + A_0)_{i+1}^{j+1} - (A + A_0)_i^j - (A + A_0)_{i+1}^j}{2\Delta t_j}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^j - Q_{i+1}^j}{2\Delta t_j}$$

Los términos directos (que no contienen derivadas parciales), se aproximan con las líneas de tiempo adyacentes utilizando las ecuaciones:

$$q = \theta \frac{q_i^{j+1} + q_{i+1}^{j+1}}{2} + (1 - \theta) \frac{q_i^j + q_{i+1}^j}{2} = \theta \bar{q}_i^{j+1} + (1 - \theta) \bar{q}_i^j$$

$$A = \theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1 - \theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} = \theta \bar{A}_i^{j+1} + (1 - \theta) \bar{A}_i^j$$

Donde $\bar{q}_i$ y $\bar{A}_i$ representan los valores medios (flujo lateral y área de la sección transversal) para cada elemento Δx_i .

La expresión en diferencias finitas de la ecuación de continuidad es:

$$\theta \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} - \bar{q}_i^{j+1} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} - \bar{q}_i^j \right) + \frac{(A + A_0)_i^{j+1} + (A + A_0)_{i+1}^{j+1} - (A + A_0)_i^j - (A + A_0)_{i+1}^j}{2\Delta t_j} = 0$$

La expresión en diferencias finitas de la ecuación de cantidad de movimiento es:

$$\begin{aligned} & \frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^j - Q_{i+1}^j}{2\Delta t_j} + \theta \left[\frac{(\beta Q^2 / A)_{i+1}^{j+1} - (\beta Q^2 / A)_i^{j+1}}{\Delta x_i} \right. \\ & + g \bar{A}_i^{j+1} \left(\frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (\bar{S}_f)_{i+1}^{j+1} + (\bar{S}_e)_i^{j+1} \right) - (\beta q v_x)_i^{j+1} + (\bar{W}_f \bar{B})_i^{j+1} \Big] \\ & + (1 - \theta) \left[\frac{(\beta Q^2 / A)_{i+1}^j - (\beta Q^2 / A)_i^j}{\Delta x_i} + g \bar{A}_i^j \left(\frac{h_{i+1}^j - h_i^j}{\Delta x_i} + (\bar{S}_f)_i^j + (\bar{S}_e)_i^j \right) - (\beta q v_x)_i^j + (\bar{W}_f \bar{B})_i^j \right] = 0 \end{aligned}$$

Es importante destacar que para su integración, tanto la ecuación de continuidad como la de cantidad de movimiento se pueden modificar multiplicando por Δx_i , de forma que las nuevas expresiones son:

Continuidad:

$$\theta \left(Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1} - \bar{q}_i^{j+1} \Delta x_i \right) + (1 - \theta) \left(Q_{i+1}^j - Q_i^j - \bar{q}_i^j \Delta x_i \right) + \frac{\Delta x_i}{2 \Delta t_j} \left[(A + A_0)_i^{j+1} + (A + A_0)_{i+1}^{j+1} - (A + A_0)_i^j - (A + A_0)_{i+1}^j \right] = 0$$

Cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta x_i}{2 \Delta t_j} \left(Q_i^{j+1} - Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^j - Q_{i+1}^j \right) \\ & + \theta \left\{ \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{i+1}^{j+1} - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_i^{j+1} + g \bar{A}_i^{j+1} \left[h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1} + (\bar{S}_f)_i^{j+1} \Delta x_i + (\bar{S}_e)_i^{j+1} \Delta x_i \right] \right. \\ & \quad \left. - (\bar{\beta q v_x})_i^{j+1} \Delta x_i + (\bar{W}_f \bar{B})_i^{j+1} \Delta x_i \right\} \\ & + (1 - \theta) \left\{ \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{i+1}^j - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_i^j + g \bar{A}_i^j \left[h_{i+1}^j - h_i^j + (\bar{S}_f)_i^j \Delta x_i + (\bar{S}_e)_i^j \Delta x_i \right] - (\bar{\beta q v_x})_i^j \Delta x_i + (\bar{W}_f \bar{B})_i^j \Delta x_i \right\} \end{aligned}$$

Donde los valores promedio son:

$$\bar{\beta}_i = \frac{\beta_i + \beta_{i+1}}{2} \quad \bar{A}_i = \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \quad \bar{B}_i = \frac{B_i + B_{i+1}}{2} \quad \bar{Q}_i = \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \quad \bar{R}_i = \frac{\bar{A}_i}{\bar{B}_i}$$

Para estimar las pérdidas por fricción S_f se puede utilizar la ecuación de Manning. Las pérdidas por rozamiento son positivas con la dirección del flujo, por lo que la ecuación de Manning puede escribirse en la siguiente forma

$$(\bar{S}_f)_i = \frac{\bar{n}_i^2 |\bar{Q}_i| \bar{Q}_i}{\bar{A}_i^2 \bar{R}_i^{4/3}}$$

De manera que el término $|Q| Q$ tiene magnitud Q^2 pero mantiene el signo positivo o negativo dependiendo de la dirección del flujo.

Las pérdidas por las contracciones y expansiones del canal son proporcionales a la diferencia entre los cuadrados de las velocidades aguas abajo y aguas arriba, con un coeficiente de pérdida de contracción expansión K_e :

$$(\bar{S}_e)_i = \frac{(K_e)_i}{2 g \Delta x_i} \left[\left(\frac{Q}{A} \right)_{i+1}^2 - \left(\frac{Q}{A} \right)_i^2 \right]$$

Aunque en general el efecto de la velocidad del viento es pequeño se puede incluir considerando la velocidad del viento relativa a la superficie del agua, V_r , definida por:

$$(\bar{V}_r)_i = \left(\frac{\bar{Q}_i}{\bar{A}_i} \right) - (\bar{V}_w)_i \cos \omega$$

donde ω es el ángulo entre las direcciones del viento y del agua. El factor de cortante por viento está estimado por:

$$(\overline{W}_r)_i = (C_w) |(\overline{V}_r)_i| (\overline{V}_r)_i$$

donde C_w es el coeficiente de arrastre por fricción.

Para los cálculos numéricos, nótese:

Los términos g , Δx_i , β_i , K_e , C_w y V_w se conocen inicialmente y son independientes de la solución numérica.

Los términos con el superíndice j en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento son datos (condiciones iniciales) o calculados con las ecuaciones de Saint-Venant en una línea de tiempo previa.

Las incógnitas son Q_i^{j+1} , Q_{i+1}^{j+1} , h_i^{j+1} , h_{i+1}^{j+1} , A_i^{j+1} , A_{i+1}^{j+1} , B_i^{j+1} y B_{i+1}^{j+1} . Sin embargo, todos los términos pueden expresarse como funciones de las incógnitas, Q_i^{j+1} , Q_{i+1}^{j+1} , h_i^{j+1} y h_{i+1}^{j+1} , de forma que sólo existen cuatro incógnitas. Por otra parte las incógnitas tienen potencias diferentes de la unidad, por lo que las ecuaciones no son lineales.

Con relación a las condiciones de frontera y al número de ecuaciones existentes, nótese que las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento se consideran en cada una de las $N - 1$ celdas de la figura 2.8, entre la frontera aguas arriba en $i = 1$ y la frontera aguas abajo en $i = N$, por lo que existen $2N - 2$ ecuaciones y dado que el número total de incógnitas es de dos en cada uno de los N puntos de la malla (Q y h), existen $2N$ incógnitas.

Las dos ecuaciones adicionales necesarias para completar el total de $2N$ están dadas por las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo.

La condición de frontera aguas arriba habitualmente es el hidrograma conocido, mientras que la condición de frontera aguas abajo puede ser la curva de capacidad, sección crítica, etc.

2.4.5. Integración por diferencias finitas

La integración por diferencias finitas de los valores de Q (Caudal) y h (calado) se puede abordar por el método Newton-Raphson (Chow y otros 1989), en el que el sistema de $2N$ ecuaciones no lineales con $2N$ incógnitas se resuelve para cada intervalo de tiempo partiendo de unos valores anteriores conocidos.

El procedimiento de cálculo para cada tiempo $j+1$ se inicia asignando unos valores de prueba a las $2N$ incógnitas en ese tiempo, estos valores de prueba de Q y h pueden ser los valores conocidos en el tiempo anterior j o las propias condiciones iniciales en el caso de $j = 1$. Una vez realizados los cálculos se obtienen unos errores o residuos, en función de ellos se consideran nuevos valores de Q y h , iterando hasta que los residuos sean suficientemente pequeños.

Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento relacionan caudal y calado (Q y h) en cada tiempo para el punto n y el punto $n+1$ con la excepción de las condiciones de borde que son sólo del punto inicial y final, de forma que si se denomina C_i y M_i a las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en el punto i , y B_i y B_f a las ecuaciones de las condiciones de contorno inicial (B_i) y final (B_f), las ecuaciones son:

- 1) Condición de contorno inicial $B_i(Q_i, h_i) = 0$ (sólo función del punto 1 y conocida)

2)	Celda 1	Continuidad	$C_1(Q_1, h_1, Q_2, h_2) = 0$ (función de puntos 1 y 2)
		Cantidad de movimiento	$M_1(Q_1, h_1, Q_2, h_2) = 0$ (función de puntos 1 y 2)
3)	Celda 2	Continuidad	$C_2(Q_2, h_2, Q_3, h_3) = 0$ (función de puntos 2 y 3)
		Cantidad de movimiento	$M_2(Q_2, h_2, Q_3, h_3) = 0$ (función de puntos 2 y 3)
.....			
$i+1$)	Celda i	Continuidad	$C_i(Q_i, h_i, Q_{i+1}, h_{i+1}) = 0$ (función de puntos i e $i+1$)
		Cantidad de movimiento	$M_i(Q_i, h_i, Q_{i+1}, h_{i+1}) = 0$ (función de puntos i y $i+1$)
.....			
$n-1$)	Celda última	Continuidad	$C_{n-1}(Q_{n-1}, h_{n-1}, Q_n, h_n) = 0$ (puntos $n-1$, n)
		Cantidad de movimiento	$M_{n-1}(Q_{n-1}, h_{n-1}, Q_n, h_n) = 0$ (puntos $n-1$, n)
n)	Condición de contorno final		$B_F(Q_1, h_1) = 0$ (solo función del punto F y conocida)

El procedimiento de cálculo para cada tiempo $j+1$ se inicia asignando valores de prueba (Q y h) en todos los puntos que habitualmente son los datos de contorno y los valores de Q y h en el tiempo anterior, al sustituir en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento el valor no es "cero", sino que resulta un error o residuo que si se denomina RC_i y EM_i , se puede escribir:

1)	Residuo en Condición de contorno inicial	$B_I(Q_1, h_1) = RB_I$	
2)	Residuo Celda 1	Continuidad	$C_1(Q_1, h_1, Q_2, h_2) = RC_1$
	Cantidad de movimiento	$M_1(Q_1, h_1, Q_2, h_2) = RM_1$	
.....			
i+1)	Residuo Celda i	Continuidad	$C_i(Q_i, h_i, Q_{i+1}, h_{i+1}) = RC_i$
	Cantidad de movimiento	$M_i(Q_i, h_i, Q_{i+1}, h_{i+1}) = RM_i$	

etc.

En general se necesitarán varias iteraciones, por lo que utilizando el superíndice k para describir la iteración k de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento quedan en la forma:

$$C_i(Q_i^k, h_i^k, Q_{i+1}^k, h_{i+1}^k) = RC_i^k$$

$$M_i(Q_i^k, h_i^k, Q_{i+1}^k, h_{i+1}^k) = RM_i^k$$

la solución es aproximada e iterativa de forma que los valores de las incógnitas Q y h sean tales que los residuos sean suficientemente pequeños. El método de Newton-Raphson es el más utilizado, el desarrollo de este método se puede generalizar considerando el conjunto de ecuaciones de los residuos de forma matricial, para ello supongamos el vector X que incluye la totalidad de las incógnitas en un tiempo $j+1$ como:

$$X = (Q_1, h_1, Q_2, h_2, \dots, Q_n, h_n)$$

En la iteración k el vector X tendrá la expresión:

$$X^k = (Q_1^k, h_1^k, Q_2^k, h_2^k, \dots, Q_n^k, h_n^k)$$

El objetivo es lograr que $f(x) = 0$, siendo f la ecuación de continuidad, de cantidad de movimiento y condiciones de borde.

El sistema no lineal puede linealizarse según:

$$f(x^{k+1}) \approx f(x^k) + J(x^k) (x^{k+1} - x^k)$$

Donde $J(x^k)$ es el jacobiano, es decir la matriz formada por las primeras derivadas parciales de $f(x)$ en el punto x^k . En la ecuación anterior el término de la derecha es la función lineal de x^k .

El procedimiento de cálculo para lograr el valor de x^{k+1} es iterativo, de forma que el valor final de x^{k+1} sea tal que el error residual $f(x^{k+1})$ en la ecuación anterior sea suficientemente pequeño, la forma numérica de realizarlo es haciendo que $f(x^{k+1}) = 0$ reordenando:

$$J(x^k) (x^{k+1} - x^k) = -f(x^k)$$

Este sistema se resuelve para $\Delta x^k = (x^{k+1} - x^k)$. El proceso se repite hasta que $(x^{k+1} - x^k)$, sea menor que alguna tolerancia determinada.

El jacobiano $J(x^k)$ está formado por las derivadas parciales de los términos de continuidad y cantidad de movimiento. El sistema de ecuaciones lineales anterior incluye el jacobiano $J(x^k)$ y el vector de los residuos. El sistema de ecuaciones resultante es:

$$\frac{\partial B_I}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial B_I}{\partial Q_1} dQ_1 = -RB_I^k$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_1} dQ_1 + \frac{\partial C_1}{\partial h_2} dh_2 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_2} dQ_2 = -RC_1^k$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_1} dQ_1 + \frac{\partial M_1}{\partial h_2} dh_2 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_2} dQ_2 = -RM_1^k$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial h_i} dh_i + \frac{\partial C_i}{\partial Q_i} dQ_i + \frac{\partial C_i}{\partial h_{i+1}} dh_{i+1} + \frac{\partial C_i}{\partial Q_{i+1}} dQ_{i+1} = -RC_i^k$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial h_i} dh_i + \frac{\partial M_i}{\partial Q_i} dQ_i + \frac{\partial M_i}{\partial h_{i+1}} dh_{i+1} + \frac{\partial M_i}{\partial Q_{i+1}} dQ_{i+1} = -RM_i^k$$

$$\frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_{N-1}} dh_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_{N-1}} dQ_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_N} dQ_N = -RC_{N-1}^k$$

$$\frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_{N-1}} dh_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_{N-1}} dQ_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_N} dQ_N = -RM_{N-1}^k$$

$$\frac{\partial B_F}{\partial h_N} dh_N + \frac{\partial B_F}{\partial Q_N} dQ_N = -RB_F^k$$

Para resolver este conjunto de ecuaciones puede utilizarse la eliminación gaussiana o la inversión matricial directa (Conte, 1965). La matriz de coeficientes jacobiana es una matriz con un ancho de banda muy pequeño (cuatro elementos como máximo a lo largo de la diagonal principal).

En 1971 Fread desarrolló una técnica de solución muy eficiente para resolver un sistema de ecuaciones como éste teniendo en cuenta estas estructuras en forma de banda.

2.5. MÉTODOS MIXTOS DE CÁLCULO DEL TRÁNSITO

Para superar las limitaciones del método de Muskingum, Cunge (1969) propuso un Nuevo método basado en el de Muskingum que proporciona una solución aproximada a las ecuaciones de la onda cinemática. Este método, denominado de Muskingum-Cunge, es uno de los más recomendados para uso de forma general. Si bien se clasifica como método hidrológico, dado que proporciona resultados comparables con métodos hidráulicos (Veissman y Lewis, 2003) se considera como una categoría mixta. En este método, el parámetro K corresponde al tiempo que tarda una onda en recorrer toda la longitud del cauce, con lo cual es dependiente de la celeridad y la longitud de dicho cauce. Esta celeridad es la velocidad con la que una variación en el caudal de entrada se propaga a lo largo de dicho cauce (velocidad de la onda). El valor de X también se calcula a partir del cauce y sus características de vertido. En definitiva, los valores de K y X varían respecto al tiempo y al espacio en este método.

De esta forma, se enmarcan bajo este epígrafe las formulaciones derivadas del método de Muskingum, siendo la más relevante para este trabajo el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

2.5.1. Método de Muskingum-Cunge

El método de Muskingum-Cunge es una variación del método de Muskingum hecha por Cunge y otros, la cual consiste en cambiar la base cinemática del método de Muskingum a un método análogo del tipo difusivo para tener la capacidad de predecir la atenuación de la onda del hidrograma.

Una onda en un flujo es la variación de la elevación de la superficie, y la celeridad de la onda es la velocidad con la que se propaga esta perturbación. Esta velocidad es en principio diferente de la velocidad del flujo en el cauce.

El método de la onda cinemática se basa en la aplicación de la ecuación de continuidad en el cauce

$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L$, siendo q_L la aportación de caudal por longitud, y la ecuación de la cantidad de movimiento reducida a $gS_t - gS_0 = 0$

Si por otra parte se utiliza la fórmula de Manning: $S = \frac{n^2 v^2}{R_H^{4/3}}$ o bien en la forma:

$$Q = \frac{1}{n} A S^{1/2} R_H^{2/3}$$

y sustituyendo el radio hidráulico por su valor:

$$Q = \frac{1}{n} A S^{1/2} \frac{A^{2/3}}{p^{2/3}} = \frac{1}{n} \frac{S^{1/2}}{p^{2/3}} A^{5/3}$$

En esta ecuación n y S son constantes y el perímetro hidráulico es cuasi constante, sobre todo en cauces de gran anchura, quedando:

$$Q = \alpha A^\beta$$

siendo:

$$\alpha = \frac{1}{n} \frac{S^{1/2}}{p^{2/3}} \quad y \quad \beta = 5/3$$

diferenciando:

$$\partial Q = \alpha \beta A^{\beta-1} \partial A = \alpha \beta \frac{A^{\beta}}{A} \partial A = \beta \frac{(\alpha A^{\beta})}{A} \partial A$$

o bien:

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \beta \frac{Q}{A} \quad \frac{\partial Q}{\partial A} = \beta V = c$$

Siendo c la celeridad de la onda cinemática y V velocidad media.

Dividiendo por el ancho:

$$\frac{\partial q}{\partial h} = c$$

Si la ecuación de continuidad por unidad de ancho es:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i$$

Si en la ecuación anterior se multiplica por el término $\frac{\partial q}{\partial h} = c$, se tiene:

$$\frac{\partial q}{\partial h} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = i \frac{\partial q}{\partial h}$$

Operando queda la expresión general de la onda dinámica:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = c i$$

La integración de la ecuación de la onda cinemática se puede resolver en el plano x, t . Sea (figura 2.9), el plano x, t en el que se ha representado el valor de q para una retícula $x-t$:

Figura 2.9. Integración en el plano $x-t$

La ecuación se puede resolver por varios criterios de aproximación:

1º) Calculando el valor del caudal Q en los puntos medios.

$$\frac{q_R - q_S}{\Delta t} + \beta v \frac{q_N - q_M}{\Delta x}$$

si se denomina:

$$C = \beta v \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

y con

$$C_0 = (C-1)/(C+1) \quad C_1 = 1 \quad C_2 = (1-C)/(C+1)$$

se puede expresar en la forma:

$$q(x_{n+1}, t_{n+1}) = C_0 q(x_n, t_{n+1}) + C_1 q(x_n, t_n) + C_2 q(x_{n+1}, t_n)$$

Nótese que si consideramos las secciones 1 y 2, la ecuación anterior quedaría como:

$$q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1$$

llamando I_1, I_2 a las entradas a la sección 1 en el tiempo 1 y 2 y q_1, q_2 las salidas de la sección 2 para el tiempo 1 y 2.

Figura 2.10. Esquema entrada-salida en el elemento de ancho Δx

2º) Otra posibilidad de solución corresponde a la aproximación:

$$\frac{q_D - q_B}{\Delta t} + \beta v \frac{q_D - q_C}{\Delta x} = 0$$

o bien:

$$\frac{q(x_{n+1}, t_{n+1}) - q(x_{n+1}, t_n)}{\Delta t} + \beta v \frac{q(x_{n+1}, t_{n+1}) - q(x_r)}{\Delta x}$$

que con:

$$C = \beta v \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

resulta:

$$q(x_{n+1}, t_{n+1}) = C_0 q(x_n, t_{n+1}) + C_2 q(x_{n+1}, t_n)$$

y con el criterio anterior

$$q_2 = C_0 I_2 + C_2 O_1$$

siendo:

$$C_0 = \frac{C}{1+C}$$

$$C_2 = \frac{1}{1+C}$$

$$C = \beta v \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Por último, también se puede discretizar la ecuación según:

$$\frac{q_D - q_B}{\Delta t} + \beta v \frac{q_B - q_A}{\Delta x} = 0$$

quedando en la forma:

$$q(x_{n+1}, t_{n+1}) = C_1 q(x_n, t_n) + C_2 q(x_{n+1}, t_n)$$

Los criterios para la convergencia en la utilización de la onda cinemática pueden expresarse en la inecuación:

$$\frac{V S t}{d} > N$$

Donde:

V = velocidad media.

S = pendiente.

d = calado.

t = tiempo de pico del hidrograma de entrada.

La expresión anterior es adimensional y el valor de N recomendado está entre 80 y 100. Nótese que para mayor velocidad V y pendiente el criterio se satisface con valores mayores.

Es interesante recalcar que la forma de la ecuación de tránsito es análoga al método de Muskingum, únicamente cambian las definiciones de los coeficientes. De esta forma, el método de Muskingum se puede considerar como un caso especial del método de Muskingum-Cunge.

2.5.2. Método de Muskingum-Cunge de 8 puntos

Esta metodología para la aplicación del método de Muskingum-Cunge, implementada en la aplicación HEC-HMS (USACE 1998), utiliza 8 puntos para describir la sección representativa de un tramo homogéneo de cauce conforme al siguiente esquema:

Figura 2.11. Esquema de una sección de 8 puntos

Los puntos etiquetados como 3 y 6 representan las bancadas izquierda y derecha del cauce. Los puntos 4 y 5 se encuentran dentro del cauce de aguas bajas. Los puntos 1 y 2 representan el límite izquierdo de la llanura de inundación, mientras que los puntos 7 y 8 representan el de la derecha.

Adicionalmente se suministran valores únicos para la longitud del cauce, la pendiente y los valores medios de la n de Manning en el lecho y las llanuras de inundación izquierda y derecha.

2.6. ECUACIONES BIDIMENSIONALES PARA EL TRÁNSITO

2.6.1. Ecuaciones

El movimiento del agua sobre la superficie terrestre tiene fundamentalmente dos componentes, por lo que se puede considerar el movimiento en un plano. Este tipo de movimiento si se considera de poco espesor, no está afectado de forma sustancial por la componente vertical del movimiento, de forma que el vector velocidad $V(u, v, w)$ puede ser considerado bidimensional $V(u, v)$.

Para exponer las consideraciones teóricas de este tipo de movimiento se puede utilizar la siguiente notación:

Coordenadas cartesianas con ejes x, y horizontales, z vertical.

Velocidad $V(u, v)$

Superficie del fondo $ZB(x, y)$

Calado $h(x, y)$

Superficie libre del agua $L = ZB + h$

Aceleración de la gravedad g

n de Manning n

La ecuación general del movimiento de un flujo poco profundo con superficie libre puede escribirse en la forma.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F = S_b + S_f$$

Donde los vectores de flujo U , S_b y S_f tienen la expresión:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad S_b = -gh \begin{bmatrix} 0 \\ \partial Z_b / \partial x \\ \partial Z_b / \partial y \end{bmatrix} \quad S_f = -\frac{g n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \end{bmatrix}$$

Y F tiene la expresión:

$$F = (E, G) = \begin{bmatrix} hu & hv \\ h u^2 + g h^2 / 2 & h u v \\ h u v & h v^2 + g h^2 / 2 \end{bmatrix}$$

La ecuación de conservación de energía es:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \cdot \text{grad } H = g \frac{\partial h}{\partial t}$$

Siendo $H(x,y)$ la energía, según la expresión:

$$H = \frac{1}{2} V \cdot V + g(Z_B + h)$$

2.6.2. Integración numérica

La integración de la ecuación del movimiento en un volumen finito V_k se puede escribir (según F. Alcrudo y J. Mulet), en la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} \mathbf{U} + dV + \oint_{S_k} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = \int_{V_k} (\mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f) dV$$

Los autores usan el método clásico de TVD (Total Variation Dimishing), empleado para resolver ecuaciones diferenciales parciales a partir de la aproximación Roe de la solución de Riemann para extrapolar volúmenes finitos de doble paso, con precisión de segundo orden e integración explícita en el tiempo. Se ha comprobado que el método es estable y preciso en muchas aplicaciones, pudiéndose aplicar en mallas estructuradas y no estructuradas de elementos tanto triangulares como rectangulares.

La ecuación anterior puede discretizarse en la forma:

$$U_k^{n+1/2} = U_k^n - \frac{\Delta t}{2V_k} \sum_{wk=l}^{wk=nk} \mathbf{F}_{wk}^{*n} \cdot \mathbf{n}_{wk} \Delta S_{wk} + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{S}_{bk}^{*n} + \mathbf{S}_{fk}^{n+1/2})$$

$$U_k^{n+1} = U_k^n - \frac{\Delta t}{V_k} \sum_{wk=l}^{wk=nk} \mathbf{F}_{wk}^{*n+1/2} \cdot \mathbf{n}_{wk} \Delta S_{wk} + \Delta t (\mathbf{S}_{bk}^{*n+1/2} + \mathbf{S}_{fk}^{n+1})$$

Donde U_k es el valor medio de las variables conservativas sobre el volumen finito V_k (ya que en el plano bidimensional, V_k es el área de una superficie), que está limitado por la superficie S_k (en el plano bidimensional es una línea).

S_k se descompone en muros planos (segmentos de líneas en 2D) con áreas de superficie ΔS_{wk} . El subíndice wk se refiere al muro del plano correspondiente en el que S_k se subdivide. El vector normal en sentido exterior de wk es $\mathbf{n}_{wk}$.

Los superíndices n , $n+1/2$ y $n+1$, se refieren a sucesivos pasos temporales, con Δt el incremento de tiempo entre los niveles n y $n+1$.

$\mathbf{F}^*$ representa el tensor numérico y $\mathbf{S}_b^*$ el vector numérico fuente, que corresponde sólo a la pendiente del lecho.

Las fuerzas de fricción $\mathbf{S}_f$ son directamente calculables linealizándolas evitando de esta forma resolver un sistema no lineal; según:

$$\mathbf{S}_{fk}^{n+1} \approx \mathbf{S}_{fk}^n + \left[\frac{\partial \mathbf{S}_f}{\partial \mathbf{U}} \right]_k^n (\mathbf{U}_k^{n+1} - \mathbf{U}_k^n)$$

El tensor numérico proyectado sobre el vector unitario normal al muro de la celda wk , puede expresarse como:

$$\mathbf{F}_{wk}^{*n} \cdot \mathbf{n}_{wk} = \frac{1}{2} \left[\left(\mathbf{F}_R^n \cdot \mathbf{n} \right)_{wk} + \left(\mathbf{F}_L^n \cdot \mathbf{n} \right)_{wk} - \left| \tilde{\mathbf{A}}_{RL_{wk}} \right| \left(\mathbf{U}_R^n - \mathbf{U}_L^n \right)_{wk} \right]$$

con:

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{E} n_x + \mathbf{G} n_y$$

Donde $n_{x,y}$ son los componentes x,y del vector unitario en las formulaciones de volúmenes finitos, y:

$$\mathbf{F}_{R,L}^n = \mathbf{F}(\mathbf{U}_{R,L}^n)$$

$\mathbf{U}_{R,L}^n$ es la aproximación al valor de $\mathbf{U}$, respectivamente a la derecha (R) y a la izquierda (L) del punto medio del muro de la celda wk . Estas aproximaciones se calculan a partir de las medias de las celdas adyacentes y las pendientes tienen que estar limitadas para asegurar que la solución no tenga un comportamiento oscilatorio. En la literatura (Sleigh P.A., Gaskell P.H., Berzins M., Wright N.G., "An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries", Computers & Fluids 1998), (Darwish M.S., Moukalled F., "TVD schemes for unstructured grids", In. j. Heat & Mass Transfer. 2003) se encuentran diferentes esquemas que respetan esas condiciones para mallas sin estructura. Se ha considerado que el lado izquierdo, L , del muro de la celda wk , se encuentra dentro del volumen finito k , mientras que el derecho, R , es externo a éste. Esto equivale a recorrer los bordes del volumen finito en el sentido de las agujas del reloj para numerarlos.

Si $\tilde{\mathbf{A}}_{RL_{wk}}$ es la matriz, cuyos autovalores son los módulos que en la matriz Roe (aproximación Roe de la solución de Riemann) corresponden al flujo normal, y las diferencias variables a lo largo del contorno de la celda wk , habitual en un esquema implícito, queda en la forma:

$$\left(\mathbf{F}_R^n \cdot \mathbf{n} \right)_{wk} - \left(\mathbf{F}_L^n \cdot \mathbf{n} \right)_{wk} = \tilde{\mathbf{A}}_{RL_{wk}} \cdot (\mathbf{U}_R - \mathbf{U}_L)_{wk}$$

Para poder obtener el balance correcto entre la variación del primer término y el segundo término de la ecuación anterior, la función de la pendiente del lecho queda en la forma de la expresión siguiente:

$$\mathbf{S}_{bk}^{*n} = \sum_{wk=l}^{wk=nk} \left[\frac{1}{2} \left(\mathbf{I} - \left| \tilde{\mathbf{A}}_{RL_{wk}} \right| \cdot \tilde{\mathbf{A}}_{RL_{wk}}^{-1} \right) \cdot \tilde{\mathbf{S}}_{wk} + \tilde{\mathbf{S}}_{Lk} \right]$$

Por otro lado, el término de evaluación, $\mathbf{S}_{wk}$ se calcula a partir de los valores medios de la aproximación de Roe, a fin de conseguir la compatibilidad entre ambos términos, según:

$$\tilde{\mathbf{S}}_{wk} = -g\Delta\Delta_{wk} \frac{h_R + h_L}{2} (z_{Bwk} - z_{Bk}) \begin{bmatrix} 0 \\ (n_{wk})_x \\ (n_{wk})_y \end{bmatrix}$$

Donde de nuevo, los subíndices L y R denotan la extrapolación de h a la izquierda (L) y a la derecha (R) del muro wk , considerando que de acuerdo al criterio previamente indicado, L corresponde al interior de la celda k , y R al exterior. La expresión $(z_{Bwk} - z_{Bk})$ corresponde a la diferencia entre la elevación del muro externo de la celda (R) wk , z_{Bwk} , y la elevación a considerar de la celda z_{Bz} . Por

último, $(n_{wk})_x$ y $(n_{wk})_y$ son los componentes x e y del vector unitario normal externo a la cara w_k . El último término de la ecuación es:

$$\tilde{S}_{Lk} = -g\Delta s_{wk} \frac{h_L + h_k}{2} (z_{B_{wk}} - z_{B_k}) \begin{bmatrix} 0 \\ (n_{wk})_x \\ (n_{wk})_y \end{bmatrix}$$

Donde h_k es el calado del agua en el centro de la celda k .

2.7. DISCUSIÓN FINAL DEL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE

En 1938 y 1940 McCarthy propuso un nuevo método *hidrológico* de tránsito que se hizo muy popular bajo el nombre de Método de Muskingum. El adjetivo *hidrológico* aplicado a un modelo de tránsito indica generalmente que los caudales de salida en el tramo finito de cauce se obtienen directamente como una función de los de entrada, mientras que las características geomorfológicas y las propiedades hidráulicas del tramo son condensadas en una serie de parámetros.

En 1969, Cunge extendió el método de Muskingum a parámetros variables en el tiempo cuyos valores pueden ser determinados como función de una descarga de referencia, reconociendo que el planteamiento original de Muskingum podía ser visto como una aproximación de primer orden de un modelo de difusión de onda, pero después convergiéndolo en una estimación parabólica al proponer una particular estimación de sus parámetros que garantizara que la difusión real sea igualada por la difusión numérica. Este método se ha utilizado ampliamente y con éxito en el cálculo de los hidrogramas de un tránsito, a pesar de que varios autores han señalado que el enfoque muestra un error de balance de masas que puede alcanzar valores del 8 al 10% (Tang y otros 1999; Tang y Samuels, 1999). Si bien muchos autores han trabajado en el problema del balance de masas (Ponce y Yevjevich, 1978; Koussis, 1983; Ponce y Chaganti, 1994; Tang y otros, 1999; Tang y Samuels, 1999; Perumal y otros, 2001), ninguno ha llegado a demostrar una razón concluyente.

Tras más de 45 años desde su desarrollo, el método de Muskingum-Cunge tiene aún un papel predominante en la hidrología moderna. Sigue empleándose como modelo del tránsito en muchos modelos hidrológicos, tanto distribuidos como semi-distribuidos. Y a pesar de que existen diversos programas comerciales y de libre distribución que resuelven las ecuaciones completas de Saint Venant (como MIKE11, HEC-RAS, InfoWorks y otros), la aproximación de Muskingum-Cunge sigue constituyendo una buena herramienta para los ingenieros que necesitan un rápido acceso a una amplia gama de resultados de simulaciones de avenida en los ríos de estudio tanto para planificación y operación como para proyectos, especialmente si no hay muchos datos de las secciones del cauce o de la cuenca completa. Por otro lado, es muy sencillo de programar y los resultados se obtienen mucho más rápido que en el caso de modelos de tránsito más complejos.

En esta línea, varios investigadores han revisado la validez de los métodos de tránsito de Muskingum y Muskingum-Cunge; en la mayoría de los casos se confrontan los resultados con los obtenidos con la aplicación de las ecuaciones completas de Saint Venant.

Son especialmente destacables los trabajos de Perumal (1989, 1992, 1994, 2003), que realizó numerosos estudios analizando la validez del método de Muskingum, proponiendo diversas soluciones alternativas para su mejora en la precisión de los resultados.

Garbrecht y Brunner (1991) evaluaron la validez y rapidez en la obtención de resultados de este último método frente al modelo DAMBRK. Para ello consideraron una serie de cauces sintéticos con gran proporción de almacenamiento en las bancadas laterales. La comparación de resultados destacó que los valores de caudal punta y tiempo de punta presentaban unas diferencias en torno al 4%, si bien los tiempos de cálculo eran de un orden de magnitud inferior.

Giorgini y Mendicino (1993) compararon los resultados del método de Muskingum con soluciones numéricas y analíticas para un cauce sintético.

Yoon y Padmanabhan (1993) revisaron diversas metodologías para estimar los parámetros del método de Muskingum.

Cunge y otros (2001) advirtieron que el método de Muskingum-Cunge constituye una metodología simplificada, y que en el caso de pendientes reducidas resulta especialmente necesario definir su validez.

Merkel (2002) llevó a cabo una serie de modelizaciones para cotejar los resultados y determinar los límites de aplicabilidad del método de Muskingum-Cunge frente a las ecuaciones completas de Saint Venant. Para ello realiza simulaciones en varios tipos de canales: rectangulares, trapeziales, con bancadas de inundación, con la sección de 8 puntos del manual de usuario de HEC-1, y de dos cauces naturales, a fin de barrer un rango lo más amplio posible de casos.

Heatherman (2004, 2008) llevó a cabo una revisión de las soluciones totalmente dinámicas aplicadas a los tránsitos y revisa el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos mediante comparación con modelización hidráulica unidimensional empleando el programa HEC-RAS.

Todini (2007) analizó los balances de masas en el método de Muskingum-Cunge en secciones rectangulares, triangulares y trapezoidales, comparándolos con los resultados obtenidos del programa MIKE11, acotando su error en el entorno de 8-10% y destacando que se ajusta mejor a cauces que no se vean afectados por condiciones de niveles aguas abajo o sometidos al efecto de curvas de remanso.

Perumal y Sahoo (2007, 2008) analizan la validez del método, comparando los resultados de cauces prismáticos rectangulares y trapeziales con la solución completa de las ecuaciones de Saint Venant, encontrando errores muy diversos, y buscando criterios de correcta aplicación del método para tener errores menores al 5%.

Koussis (2009), en su examen de los modelos de tránsito, especialmente de los métodos de Kalinin-Miljukov y Muskingum, aconsejó emplear el segundo, al ser más flexible, y por otro lado, destaca la importancia de una correcta división de los tránsitos según unidades morfológicas similares, en la adecuada determinación de la longitud efectiva de estos, y en la importancia de la calibración de parámetros para evitar errores.

Price (2009), en revisión de sus trabajos anteriores (1985), analizó los métodos de Muskingum y de onda difusiva. En ellos la velocidad de la onda cinemática y la laminación son funciones de la descarga, que se puede derivar de la geometría media de la sección y de las propiedades hidráulicas del tránsito. Sus experimentos en cauces sintéticos probaron que el método de Muskingum es muy preciso comparado con la solución completa de las ecuaciones de Saint Venant. Sin embargo, se señala que para pendientes reducidas se pierde exactitud en los resultados.

Baláž y otros (2010) estudiaron varios métodos para determinar los parámetros de Muskingum aplicados a un tramo del río Morava, confirmando su validez en el caso de contar con suficientes datos para la calibración.

Fenton (2011) examina la precisión en la laminación del hidrograma de salida aplicando el método de Muskingum-Cunge. Al analizar tránsitos observa que si las pendientes son altas, el método es adecuado, pero para pendientes reducidas y caudales rápidamente variados, el valor punta del hidrograma de salida obtenido no tiene la precisión suficiente.

Elbashir (2011) define la precisión del modelo de tránsito de Muskingum y Muskingum-Cunge en el caso de varios cauces naturales, analizando la imprecisión de estos métodos en el caso de pendientes muy pequeñas y caudales rápidamente variados.

2.8. CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Se ha argumentado que el método de Muskingum-Cunge sigue constituyendo una herramienta muy útil para el cálculo hidrológico habitual aplicado al tránsito de avenidas, por su facilidad de uso y su agilidad en la obtención de resultados.

Se han enumerado los trabajos de numerosos autores que han estudiado la validez de este modelo aplicado al tránsito de caudales de avenida, comparándolo con soluciones unidimensionales, como son las ecuaciones completas de Saint Venant, o programas de libre distribución (HEC-RAS) y comerciales (MIKE11, DAMBRK). Sin embargo, no se conocen estudios de comparación con soluciones de cálculo bidimensional.

Adicionalmente, varios investigadores han tratado de acotar el error máximo cometido con esta metodología, e incluso de obtener rangos de aplicación correcta de ésta, sin llegar a resultados concluyentes ni fácilmente medibles.

De igual forma, se ha comprobado que en concreto, la bibliografía sobre la correcta calibración del método de Muskingum-Cunge de sección de 8 puntos es muy escasa. Por ello se identifica la necesidad de un procedimiento para caracterizar la sección de 8 puntos del método de Muskingum-Cunge de forma óptima: minimizando el error cometido, unificando criterios y eliminando la incertidumbre generada por una definición arbitraria fundamentada únicamente en la experiencia del ingeniero.

Finalmente, tampoco existe un estudio que acote los rangos de aplicabilidad de esta metodología, que garanticen un error razonable en los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO EN CAUCES

3.1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de laminación de un cauce, entendiendo como tal la disminución del caudal máximo circulante a la salida, es función de las características topográficas, así como de la rugosidad y también de la tipología del hidrograma a la entrada del cauce. En la figura 3.1 se esquematizan las propiedades del cauce.

Figura 3.1. Esquema de cauce

Los parámetros básicos utilizados son:

- Longitud del cauce (L), definida como la longitud del cauce principal claramente diferenciado.
- Pendiente del cauce (S), definida como el cociente entre el desnivel y la longitud del cauce.
- Ancho de la sección (B).
- Rugosidad, habitualmente evaluada por la n de Manning.
- Hidrograma a la entrada, que puede ser definido por el caudal de entrada (Q_i) y su volumen total (V).

Por otra parte, estaría la forma del hidrograma que habitualmente podría ser del tipo SCS, otras veces, conocida la cuenca aguas arriba, el hidrograma puede quedar definido por intensidad, forma y duración de la lluvia.

3.2. PARÁMETROS QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL TRÁNSITO

Después de analizar los parámetros utilizados por las distintas metodologías estudiadas en el capítulo 2, *Estado del arte*, se ha procedido a revisar qué parámetros son básicos al analizar la laminación que se produce en un cauce, con el fin de determinar qué magnitudes es necesario

estudiar en las distintas modelizaciones hidráulicas posteriores; para ello se han utilizado los criterios del análisis dimensional. (Anejo D *Análisis dimensional*).

La respuesta de un tramo fluvial ante un proceso de laminación puede analizarse en un primer momento de forma cualitativa lo que permitirá analizar la dependencia de los distintos parámetros que caracterizan el cauce. En el cuadro siguiente se indican las dependencias existentes

Variables	Longitud del cauce (L)	Pendiente (S)	Ancho (B)	n de Manning	Volumen del hidrograma (V)	Caudal de entrada (Q_i)
Afección a la laminación	Crece	Decrece	Crece	Crece	Decrece	Decrece

Tabla 3.1. Factores y su afección a la laminación en un cauce

Este comportamiento puede observarse en los gráficos siguientes, en los que se incluye el efecto laminador de un cauce como disminución del caudal máximo entre la entrada y final del tramo en porcentaje.

3.2.1. Influencia de la longitud del cauce en la laminación

Es evidente que a mayor longitud de cauce se aumenta el efecto de la laminación, en la figura 3.2 se muestra el aumento del efecto laminador cuando se incrementa la longitud.

Figura 3.2. Influencia de la longitud en el efecto laminador

3.2.2. Influencia de la pendiente en la laminación

En la gráfica adjunta se muestra la influencia de la pendiente en la laminación, con un decrecimiento de ésta cuando aumenta la pendiente.

Figura 3.3. Influencia de la pendiente en el efecto laminador

3.2.3. Influencia del ancho en la laminación

La laminación es creciente con el ancho del cauce (ver figura 3.4).

Figura 3.4. Laminación en función del ancho del cauce

En la figura 3.4, se observa el crecimiento del efecto laminador cuando aumenta el ancho del cauce, manteniendo constante tanto la pendiente como la rugosidad y el volumen y la duración de la lluvia.

3.2.4. Influencia de la n de Manning en la laminación

Por otra parte en la figura 3.5 se puede ver el efecto de la rugosidad observándose que la laminación aumenta cuando se incrementa el valor de la n de Manning.

Figura 3.5. Laminación en función de la rugosidad del cauce

3.2.5. Influencia del caudal inicial en la laminación

El caudal entrante en un tramo de cauce condiciona su capacidad de laminación debido a que a mayor caudal el volumen de agua entrante es mayor y en consecuencia la capacidad de almacenamiento y de laminación disminuye. (Ver figura adjunta).

Figura 3.6. Laminación en función del caudal a la entrada del cauce

En el gráfico anterior se observa la disminución de la capacidad de laminación cuando el caudal de entrada aumenta.

3.3. PARÁMETROS EMPLEADOS EN LOS CÁLCULOS

Recapitulando en base a lo anterior y de acuerdo con los estudios previos analizados que se incluyen en el estado del arte, los parámetros básicos a utilizar en la caracterización del cauce son:

Parámetros geométricos del cauce:

- Longitud del tránsito medido a lo largo del cauce (L) en km.
- Desnivel total del cauce (H) en m.
- Pendiente media ($S=H/L$) m/m.
- Ancho del cauce en aguas altas (B) m.

Parámetros hidrológicos del cauce:

- Rugosidad de Manning (n)
- Volumen del hidrograma (V) Hm³.
- Caudal máximo (Q) m³/s.

Parámetros hidráulicos asociados al fluido:

- Viscosidad del agua (μ), en Kg/m s
- Densidad del agua (ρ_a), en Kg/m³
- Aceleración de gravedad (g), en m/s²

Existen otros condicionantes, como son la diferenciación en distintos tramos de pendiente, la consideración de valores de la n de Manning distribuida, la forma del cauce de aguas bajas, tanto en planta como en alzado, etc., que se analizan en apartados posteriores. Los modelos realizados confirman que su afección a los resultados no es muy importante y unido a la difícil evaluación ha hecho que se decida no incluir en la parametrización de los modelos realizados.

Por todo lo anterior se ha considerado que se puede caracterizar el tránsito en cauces por:

- Pendiente (S), de la que se han considerado dos (0.1% y 0.2%).
- Longitud de cauce (L), consideradas dos (10 km y 20 km).
- Anchos del cauce de avenida (B), considerados tres (250, 500 y 1000 m)
- Caudales máximos en el inicio del tramo (Q), considerados tres (1000, 2000 y 4000 m³/s).
- Rugosidades n de Manning, consideradas dos 0.04 y 0.06.

Adicionalmente se ha analizado la influencia de otros parámetros como son:

Influencia de la distribución en planta de la rugosidad. Es evidente que afecta a los resultados de la laminación en un cauce, pero es de muy difícil evaluación ya que la variabilidad de la distribución de la rugosidad es muy alta, por ello lo único que se ha realizado es la comparación en tramos naturales de cauce entre modelos bidimensionales con rugosidad distribuida (obtenida de los mapas CORINE) y modelos 2D con la rugosidad media obtenida también de los mapas del CORINE, los resultados son similares pero como es lógico no son generalizables aunque dada la gran similitud de resultados son inicialmente considerados como válidos para no incluir esta variable.

Influencia de la ubicación del cauce central en sección tipo prismática. Se han analizado varios modelos con distinta ubicación del cauce central dentro de la sección tipo prismática, los resultados muestran (ver figuras adjuntas) que la influencia en el resultado es muy baja, cosa que resulta intuitiva ya que no afecta al área total de la sección.

La sección considerada es de 500 m de ancho, cauce central de 50 m y 2 m de calado, la pendiente es de 0.1%, el hidrograma es de 3h con un volumen total de 85.50 hm³ y un caudal máximo de 4000 m³/s; se ha modelizado con cauce central simétrico y asimétrico:

Figura 3.7. Distribución simétrica y asimétrica del cauce central

Figura 3.8. Laminación simétrica y asimétrica del cauce central

Los resultados en el ejemplo anterior son:

- Caudal entrada 4000 m³/s
- Salida con cauce simétrico 3453.4 m³/s
- Salida con cauce asimétrico 3454.6 m³/s
- Diferencia 1.2 m³/s, (0.03% del caudal máximo a la entrada)

Estos resultados indican que en este caso la posición del cauce central es irrelevante.

Por último se ha considerado la variación de la cota de las bancadas laterales (ver figura adjunta).

Figura 3.9. Distribución simétrica y asimétrica del cauce central con bancadas a distinto nivel

Figura 3.10. Laminación con distribución simétrica y asimétrica del cauce central y con bancadas a distinto nivel

Los resultados son similares pero se aprecia aumento de las diferencias a medida que se van variando la “forma” de la sección, distribución de la rugosidad, etc.

En el cuadro adjunto se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el caso concreto analizado. Nótese que la variación de los resultados no es muy elevada, tiene signo tanto positivo como negativo y crece a medida que se van incrementando las sucesivas modificaciones (asimetría del cauce central, distintos niveles en las bancadas, distribución no uniforme de la n de Manning, etc.). En todo caso es importante tener presente que estos parámetros no han sido considerados en el estudio paramétrico que se ha realizado y en consecuencia se han realizado los modelos de cauces prismáticos considerando cauce central simétrico, bancadas al mismo nivel y rugosidad uniforme.

Posición C. Central	Altura bancadas	Distribución n	Q entrada (m³/s)	Q laminado (m³/s)	Dif Q (m³/s)	Dif Q (%)
Simétrica	Mismo nivel	Uniforme	4000.00	3401.00	599.00	0.00
Asimétrica	Mismo nivel	Uniforme	4000.00	3402.70	597.30	0.28
Simétrica	Mismo nivel	No uniforme	4000.00	3453.40	546.60	8.75
Asimétrica	Mismo nivel	No uniforme	4000.00	3454.60	545.40	8.95
Simétrica	Distinto nivel	Uniforme	4000.00	3384.00	616.00	-2.84
Asimétrica	Distinto nivel	Uniforme	4000.00	3380.10	619.90	-3.49
Simétrica	Distinto nivel	No uniforme	4000.00	3436.20	563.80	5.88
Asimétrica	Distinto nivel	No uniforme	4000.00	3436.50	563.50	5.93

Tabla 3.2. Afección a la laminación del cauce la simetría del cauce central, bancadas y uniformidad de n

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO 2D APLICADO AL TRÁNSITO EN CAUCES

4.1. CONTRASTE DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático 2D utilizado para los cálculos bidimensionales (InfoWorks ICM) es comercial, de amplia difusión y ha sido sometido a diferentes test de control, por lo que en principio no se necesitaría contrastar sus resultados, pese a ello se ha realizado una serie de pruebas de ajuste de los resultados comparándolos con soluciones teóricas dado que se utilizará como herramienta de validación posterior para la metodología de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

Los contrastes realizados han sido (ver Anejo A. *Flujo en régimen uniforme, variado y variable*):

- Comparación con la fórmula de Manning.
- Contraste con el modelo HEC-RAS en régimen variado.
- Comprobación con la fórmula matemática simplificada de rotura de diques.

4.2. COMPARACIÓN CON LA FORMULACIÓN DE MANNING

La sección a comparar escogida es de tipo trapecial, simétrica, con ancho en la base 40 m y taludes a 60° (1H/2V) de 20 m de altura. (Ver figura adjunta). La pendiente del cauce es constante e igual al 0.5 %. La longitud total adoptada es de 3000 m siendo la rugosidad de Manning 0.06.

Figura 4.1. Sección tipo del cauce trapecial (dimensiones en metros)

4.2.1. Resultados Utilizando la fórmula de Manning

El flujo analizado es de caudal constante en un cauce de sección uniforme y pendiente constante por lo que el régimen es uniforme, la pérdida de carga por unidad de longitud es igual a la pendiente. En este caso, se puede utilizar la expresión de Manning, según la cual, la pérdida de carga es:

$$j = \frac{n^2 \cdot V^2}{R_H^{\frac{4}{3}}}$$

La sección tipo está definida en la figura 4.1 con las características:

- Pendiente 0.5%
- $n=0.060$
- $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

En la tabla adjunta se incluyen los resultados obtenidos del calado y la velocidad, así mismo se incluyen los valores del perímetro mojado y del área para contrastar los resultados teóricos con los obtenidos con los modelos 2D.

Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	1891.2	49.86	3.63	4.265	2.782

Tabla 4.1. Resultados utilizando la formulación de Manning

Por otra parte, los modelos bidimensionales por su propia estructura tienen una velocidad única en cada elemento, es decir en toda su altura y el rozamiento sólo existe en el fondo que se supone horizontal. Por lo que para poder comprobar los resultados entre los modelos 2D con la fórmula de Manning el perímetro mojado incluirá el fondo del cauce y la proyección horizontal de los cajeros; en estas condiciones los resultados teóricos son:

Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	171.500	44.080	3.891	4.0795	2.9154

Tabla 4.2. Resultados con la formulación de Manning, rozamiento en el plano horizontal

4.2.2. Resultados Utilizando un modelo bidimensional

El modelo bidimensional realizado se muestra en la figura adjunta:

Figura 4.2. Vistas del MDT del canal: Planta y vista 3D

Sobre el modelo digital del terreno, se realiza un mallado. El régimen uniforme se logra manejando un caudal constante y utilizando los resultados en una sección suficientemente alejada de la condición de borde. El caudal utilizado es 500 m³/s, en la figura adjunta se muestra un detalle del mallado en el entorno de una sección a 750 m de la entrada y a 2250 m del borde de la salida.

Figura 4.3. Polígono de malla y esquema de líneas de rotura adoptada en cabeza y pie de talud

El análisis de los resultados de cara a cuantificar la precisión de la modelización se realiza en una sección (sección PK_750) suficientemente alejada de las condiciones de contorno en la que se ha estabilizado el flujo (ver tabla adjunta):

Tiempo (m)	Caudal (m ³ /s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 00:00:00	0	0	0
00 00:10:00	49.412	0.745	1.693
00 00:20:00	278.175	2.818	2.469
00 00:30:00	452.075	3.829	2.967
00 00:40:00	499.168	4.147	3.036
00 00:50:00	499.97	4.156	3.034
00 01:00:00	499.999	4.157	3.034
00 01:10:00	500	4.157	3.034
00 01:20:00	499.999	4.157	3.034
00 01:30:00	500.001	4.157	3.034
00 01:40:00	500.001	4.157	3.034
00 01:50:00	500	4.157	3.034
00 02:00:00	499.999	4.157	3.034

Tabla 4.3. Resultados (PK_750) con la formulación de Manning, rozamiento en el plano horizontal

Como se puede observar la estabilización es completa, en la lámina el calado de 4.157 m es totalmente constante así como el de la velocidad en 3.04 m/s. El caudal oscila en 0.001 m³/s en el entorno del caudal de entrada de 500 m³/s.

Los resultados analizados corresponden a una sección y a un grupo de puntos de resultados, en la figuras adjuntas se incluye una zona de mallado con la sección PK_750 y los puntos de control situados 1 metro aguas arriba.

Figura 4.4. Puntos de resultados PK_750 en la que se analizan resultados

Por otra parte la velocidad en una sección de un canal prismático (rectangular o trapecial) no es uniforme, los puntos situados en el centro, cerca de la superficie libre, presentan la máxima velocidad mientras que la velocidad en el contorno es nula. En la figura adjunta se esquematiza esta distribución para el caso de un cauce de sección rectangular.

Figura 4.5. Distribución de velocidades en un cauce rectangular

En los modelos bidimensionales la velocidad es constante a lo largo del calado pero varía con la distancia a la que se considere.

En la figura adjunta se muestra la distribución de velocidades en la sección PK_749 del cauce trapecial.

Figura 4.6 Distribución de la velocidad en la sección PK_749

La estimación de la velocidad media, para poder contrastarla con los resultados de la fórmula de Manning, se puede realizar obteniendo la velocidad media en la zona central y en las laterales y posteriormente calculando la media ponderada. Con este método se obtiene:

Zonas	Área parcial (m ²)	Velocidad media (m/s)	Velocidad ponderada (m/s)
Central	120.11	3.0029	
Izquierda	2.0	0.607	
Derecha	2.0	0.652	
Sumas parciales	124.1161		2.9264

Tabla 4.4. Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749

Conclusiones de la comparación con Manning

Se ha realizado un modelo en 2D con ICM para proceder al contraste de sus resultados. En este sentido, se ha comparado el modelo con los valores que ofrece la fórmula de Manning en la hipótesis de régimen uniforme. Para ello:

- El modelo consiste en una sección y pendiente constante en toda su longitud.
- La sección adoptada es trapezoidal de base 40 m y taludes laterales de 20 m de altura con pendientes 1H/2V.
- La pendiente adoptada es del 0.5 % y la rugosidad de Manning 0.06. El caudal constante es de 500 m³/s.
- El calado y la velocidad en régimen uniforme según la fórmula de Manning es 4.079 m y 2.915 m/s respectivamente.
- Los resultados en la sección de comparación perpendicular al eje y suficientemente alejada de los bordes, en el modelo 2D dan un caudal que oscila entre 499.999 y 500.001 por lo que se puede indicar que es prácticamente exacto.

- Las diferencias entre la velocidad obtenida con Manning y la calculada por media ponderada de la distribución de velocidades en la sección da una diferencia inferior al 0.4%, podría ser debida al error que se comete al estimar la velocidad media en la sección.

Como ya se ha indicado, se debe tener en cuenta que la distribución de velocidades en una sección es un fenómeno tridimensional. El cálculo por Manning supone que la velocidad es constante en toda la sección. En cambio, el modelo 2D recoge una distribución variable de velocidades y elevaciones en la sección, más acorde con la realidad, si bien tampoco refleja la variación existente en altura dentro de la propia sección.

4.3. COMPARACIÓN CON EL MODELO HEC-RAS

Se ha realizado un modelo HEC-RAS de un cauce rectangular en el que se ha evitado el rozamiento con los bordes, para lograrlo se ha considerado un cauce rectangular de 20 metros de altura y 50 de fondo. Este modelo se utiliza también en las comprobaciones de las curvas de remanso.

Con los datos anteriores los resultados del modelo HEC-RAS en régimen uniforme es:

Calado 3.61 m

Velocidad 2.77 m/s

Es importante indicar que los resultados del modelo HEC-RAS tienen dos decimales de precisión, correspondientes a 1cm en el calado y 0.01 m/s en la velocidad.

4.3.1. Modelo bidimensional: ICM

Se ha realizado un modelo bidimensional que se ha utilizado para comprobar los resultados del movimiento uniforme, la curva de remanso en el vertido final y la sobre elevación de solera.

El modelo bidimensional se ha realizado basándose en un modelo digital del terreno (MDT) con pendiente constante sobre el que se ha incluido el vertido libre y la elevación de la solera.

Como condición de contorno en los bordes del polígono se ha asignado "condición seca" o condición de vertido libre a la salida. La entrada de caudal se restringe al ancho del canal en el inicio, el modelo construido tiene una longitud de 20 km con un ancho de 50 m y pendiente 0.005, lo que permite comprobar un sólo modelo.

- Curva de remanso en el vertido libre del final del modelo.
- Régimen permanente en la zona central del modelo, suficientemente alejado del régimen variado de la salida.
- Sobreelevación de solera en la zona inicial del modelo, que se realiza con un polígono elevado 10 m sobre la solera.

4.3.2. Resultados del modelo 2D en régimen uniforme

Se utiliza el modelo en su zona central, en secciones no influidas por el remanso. Los resultados son de la sección PK_10000 (en el centro del modelo).

Calado 3.605 m

Velocidad 2.772 m/s

Es importante indicar que el modelo bidimensional se ha realizado con una precisión de cálculo en calados de 0.001 m, mientras que los cálculos realizados con el modelo unidimensional HEC-RAS se ejecutan con precisión de un centímetro, si bien es suficiente para efectos prácticos, puede distorsionar la comparación de resultados entre ambas.

Tiempo	Caudal (m ³ /s)	Mayor calado en la línea (m)	Velocidad máxima en la línea (m/s)	Menor calado en la línea (m)	Velocidad mínima en la línea (m/s)
00 00:00:00	0.000	0	0	0	0
00 00:30:00	0.000	0	0	0	0
00 01:00:00	0.000	0	0	0	0
00 01:30:00	0.000	0	0	0	0
00 01:45:00	482.908	3.521	2.748	3.514	2.731
00 02:00:00	497.346	3.597	2.77	3.59	2.753
00 02:15:00	499.578	3.607	2.774	3.601	2.758
00 02:30:00	499.929	3.609	2.775	3.603	2.758
00 04:30:00	500.000	3.609	2.775	3.603	2.759
00 04:45:00	500.001	3.609	2.775	3.603	2.758

Tabla 4.5. Valores de caudal, calados y velocidades en el modelo bidimensional sección PK_10000

En estas condiciones es muy importante observar la estabilidad del cálculo, en la tabla 4.6 se incluye la variación temporal de los resultados en la sección correspondiente al PK_10000 (en el centro del modelo). Se observa una gran estabilidad con diferencias mínimas entre los valores máximos y mínimos en la sección.

De lo anterior, se obtiene la siguiente tabla resumen que confirma la calidad de los resultados de los modelos bidimensionales:

	Manning	HEC-RAS	ICM
VELOCIDAD (m/s)	2.772	2.77	2.772
CALADO (m)	3.607	3.61	3.605

Tabla 4.6 Comparación de resultados de velocidades y calados en un canal rectangular según la fórmula de Manning, modelos HEC-RAS y modelo bidimensional ICM

4.3.3. Curva de remanso

Utilizando los modelos anteriores se han comparado las curvas de remanso obtenidas con el modelo 1D HEC-RAS y con el modelo 2D InfoWorks ICM. Como resumen de las características del modelo se puede indicar:

- Sección: Rectangular sin rozamiento con los cajeros.
- Ancho: 50 m

- Pendiente: 0.5%
- Longitud 20 km
- Rugosidad: n de Manning 0.060
- Condición de contorno: Vertido libre en la sección de aguas abajo

Se han analizado las secciones próximas al vertido libre obteniéndose los resultados que se muestran en la figura y la tabla adjuntas.

Se observa una concordancia prácticamente completa entre ambos resultados; es importante destacar que el modelo HEC-RAS tiene una precisión de 0.01 metros y que por otra parte en el modelo bidimensional los resultados son a nivel de triángulo, lo que dificulta la aproximación a la sección concreta del modelo unidimensional HEC-RAS.

Figura 4.7. Curva de remanso en la salida con resultados del HEC-RAS y modelo bidimensional ICM

Distancia (m)	HEC-RAS		ICM		Diferencias	
	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)
4010	3.61	2.77	3.605	2.802	0.005	-0.032
3010	3.61	2.77	3.610	2.795	0.000	-0.025
2010	3.61	2.77	3.607	2.796	0.003	-0.026
1010	3.61	2.77	3.604	2.812	0.006	-0.042
510	3.61	2.77	3.581	2.814	0.029	-0.044
210	3.47	2.88	3.445	2.908	0.025	-0.028
110	3.31	3.02	3.267	3.066	0.043	-0.046
50	3.09	3.24	3.032	3.32	0.058	-0.080

Tabla 4.7. Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en la curva de remanso de vertido libre

4.3.4. Elevación de solera

Con el objeto de contrastar resultados entre los modelos bidimensionales y las soluciones analíticas y modelos unidimensionales tipo HEC-RAS, se ha modelizado una elevación de solera tanto en el modelo bidimensional como en el unidimensional, con las características:

- Sección: Rectangular sin rozamiento con los cajeros.
- Ancho: 50 m
- Pendiente: 0.5%
- Longitud 20 km
- Rugosidad: n de Manning 0.060
- Elevación de solera de 10 m
- Condición de contorno: movimiento uniforme aguas abajo (vertido alejado)

Los resultados están contenidos en la tabla y figura adjuntos y muestran una gran coincidencia.

Figura 4.8. Vista 3D de la sobreelevación de solera con (desde aguas arriba a aguas abajo), zona de remanso, circulación sobre la sobreelevación vertido y resalto

PK (m)	Cota fondo (m)	HEC_RAS		ICM		Diferencias en el calado (%)
		Cota agua (m)	Calado (m)	Cota agua (m)	Calado (m)	
2980	294.6	297.64	3.04	297.607	3.007	1.09
2990	294.55	297.52	2.97	297.46	2.910	2.02
3000	294.5	297.37	2.87	297.308	2.808	2.16
3010	294.45	297.19	2.74	297.11	2.660	2.92

Tabla 4.8. Comparación de calados y velocidades entre el modelo 2D y HEC-RAS, en una elevación de solera

Figura 4.9. Elevación de solera con resultados del modelo HEC-RAS y modelo bidimensional ICM

Los resultados muestran una buena concordancia siempre considerando que el modelo HEC-RAS tiene una precisión de 0.01 metros y que por otra parte en el modelo bidimensional los resultados son a nivel de triángulo, lo que dificulta la aproximación a la sección concreta del modelo unidimensional HEC-RAS.

4.4. COMPROBACIÓN CON LA FÓRMULA MATEMÁTICA DE ROTURA DE DIQUES

Las ecuaciones simplificadas de flujo en la rotura instantánea de un dique en un cauce rectangular que se asimile a un movimiento plano en una superficie horizontal sin rozamiento son:

Ecuación de la velocidad

$$v(x,t) = \frac{2}{3} \left(c + \frac{x}{t} \right) \quad -c t \leq x \leq 2 c t$$

Perfil de la superficie del agua:

$$y(x,t) = \frac{(2 c t - x)^2}{9 g t^2}$$

Siendo c la celeridad de onda correspondiente al calado inicial del dique y_0 :

$$c = \sqrt{g y_0}$$

Las ecuaciones anteriores son válidas en el intervalo $-c t \leq x \leq 2 c t$

En la figura adjunta se muestra la forma de la superficie para un valor $t=t_0$

Figura 4.10. Ecuación simplificada de rotura de diques

Las ecuaciones anteriores cumplen las ecuaciones de continuidad y de equilibrio dinámico como puede comprobarse calculando las derivadas parciales de velocidad y calado e incluyendo en las ecuaciones anteriores.

4.4.1. Modelo hidráulico bidimensional

Con el objetivo de verificar la calidad de los resultados de los modelos hidráulicos bidimensionales utilizados en rotura de diques se ha realizado un modelo 2D en condiciones similares a las del movimiento simplificado descrito, es decir:

- Movimiento Plano
- Superficie horizontal
- Sin rozamiento

La primera condición se logra planteando un modelo formado por una "franja" de pequeña anchura en la que el flujo sea muy "ordenado" en el sentido longitudinal y que no tenga rozamiento con las zonas laterales. La superficie del lecho del modelo deberá ser horizontal y sin rozamiento.

Se ha considerado un modelo de 5 m de ancho y 3500 m de longitud, en el que se incluyen líneas de rotura cada 0.50 m, de forma que el flujo sea muy "ordenado" en el sentido longitudinal. En el modelo se han incluido líneas de resultados a distancias de 50 y 100 m.

4.4.2. Datos hidráulicos

Se ha considerado una rugosidad de Manning $n=0.0001$, prácticamente casi nula, para aproximarse a la condición de rotura teórica. Adicionalmente y debido a la estructura de la modelización 2D no existe rozamiento con los contornos verticales.

La rotura del dique se supone instantánea y se simula con la condición inicial que ha sido de dique de 10 metros de altura, lleno y situado en la sección PK 0.

4.4.3. Topología del modelo 2D

El modelo se ha mallado con triángulos de tamaño para mínimo 0.25 y máximo 1 m², lo que hace que se utilicen un total de 72000 elementos.

4.4.4. Comparación de resultados del modelo 2D con la formulación analítica

Dado que los resultados son función de la posición (x) y del tiempo (t), el análisis y comparación se ha realizado en tablas y gráficos para distintos valores de t , de forma que se pueden “ver” los perfiles del agua en distintos momentos para todo el modelo, también los caudales y velocidades existentes.

Con relación a la comparación de resultados entre el modelo 2D y la solución analítica, los resultados son muy similares como se observa en las tablas y gráficos adjuntos.

Figura 4.11. Comparación de calados entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Figura 4.12. Comparación de velocidades entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Figura 4.13. Comparación de caudales entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Sec.	Tiempo	Valores analíticos			Valores del modelo 2D			Error en %		
x	t (s)	v(x,t) (m/s)	y(x,t) (m)	Q (m³/s)	V (m/s)	Y (m)	Q (m³/s)	Calado	V	Q
-400	60	2.16	7.94	85.58	2.14	7.95	85.40	-0.11	0.71	0.21
-350	60	2.71	7.45	100.97	2.70	7.47	100.70	-0.28	0.40	0.26
-300	60	3.27	6.97	113.88	3.25	6.97	113.60	0.04	0.50	0.24
-250	60	3.82	6.51	124.44	3.80	6.54	124.10	-0.43	0.57	0.27
-200	60	4.38	6.07	132.79	4.36	6.09	132.50	-0.38	0.40	0.22
-150	60	4.93	5.64	139.05	4.91	5.66	138.80	-0.40	0.47	0.18
-100	60	5.49	5.22	143.37	5.47	5.25	143.20	-0.49	0.34	0.12
-50	60	6.04	4.83	145.86	6.02	4.86	145.80	-0.70	0.40	0.04
0	60	6.60	4.44	146.66	6.64	4.47	146.67	-0.57	-0.61	-0.01
50	60	7.16	4.08	145.90	7.17	4.07	145.89	0.20	-0.21	0.01
100	60	7.71	3.73	143.72	7.73	3.73	143.71	-0.06	-0.25	0.00
150	60	8.27	3.39	140.24	8.28	3.39	140.23	0.09	-0.16	0.00
200	60	8.82	3.07	135.59	8.82	3.08	135.60	-0.20	0.02	-0.01
250	60	9.38	2.77	129.91	9.37	2.78	129.99	-0.34	0.08	-0.06
300	60	9.93	2.48	123.32	9.93	2.49	123.45	-0.28	0.03	-0.10
350	60	10.49	2.21	115.97	10.48	2.22	116.01	-0.39	0.08	-0.04
400	60	11.04	1.96	107.97	11.04	1.96	108.09	-0.24	0.04	-0.11
500	60	12.16	1.49	90.59	12.15	1.48	90.80	0.37	0.04	-0.24
600	60	13.27	1.09	72.21	13.24	1.097	72.54	-0.77	0.20	-0.45

Tabla 4.9. Comparación de resultados entre modelos 2D y fórmulas analíticas en rotura de dique a los 60s

4.4.5. Conclusiones

De la comparación de los resultados entre la fórmula analítica simplificada de rotura de dique y el modelo 2D que se ha construido para aproximarse a la solución teórica, se puede afirmar que en este caso la aproximación del modelo 2D produce unos resultados con un error inferior al 1% de la solución analítica, con un modelo bidimensional de tan solo 72000 elementos.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS 2D

Complementariamente a las validaciones y simulaciones de tránsito realizadas, se ha llevado a cabo un estudio de la influencia de la densidad del mallado de los modelos bidimensionales; los resultados completos se pueden consultar en el Anejo B. Para ello se compararon entre sí modelos de distintos tamaños de elementos, con el objeto de confirmar su rigor y establecer criterios objetivos para la elección de su área media. Los tramos empleados corresponden a un canal artificial trapecial y al río Esla, con aproximadamente 30 km de longitud (ver figura adjunta).

Figura 5.1. MDT tramos empleados en las simulaciones de análisis de sensibilidad a la densidad de elementos: río Esla y canal trapecial

5.1. ENSAYOS REALIZADOS

El contraste de la precisión de los modelos 2D en función de la densidad del mallado se llevó a cabo mediante los ensayos siguientes:

- ▶ Modelo de Cauce trapezoidal (régimen permanente) con 8 configuraciones de mallado 2D.
- ▶ Modelo de Cauce natural (río Esla) con caudal variable y 3 densidades de malla 2D.
- ▶ Modelo de Cauce natural (río Esla) con caudal variable; 26 configuraciones de mallado 2D.

5.2. MODELO DE CAUCE TRAPEZIAL

La comparación de resultados hidráulicos de los modelos 2D con diferentes densidades de elementos de malla con los valores teóricos obtenidos con la fórmula de Manning resultó muy satisfactoria. El canal se dispuso con pendiente y caudal constante, con sección trapezoidal, según la figura adjunta. La pendiente es constante e igual al 0.5 %. La longitud total del tramo simulado es de 3000 m, con rugosidad de Manning $n=0.06$.

Figura 5.2. Sección tipo del cauce trapezoidal empleado (dimensiones en metros)

El caudal de cálculo se definió en 500 m³/s, con flujo uniforme tras un período inicial creciente.

Figura 5.3. Hidrograma adoptado

5.2.1. Simulaciones realizadas

Las simulaciones realizadas se recogen en la tabla adjunta, siendo en principio la última la más precisa, ya que consta de más elementos, líneas de rotura y presenta mallado "inteligente", que limita el desnivel máximo entre triángulos 2D contiguos:

Cálculo	Caudal (m³/s)	Nº triángulos	Tamaño triángulos		Líneas de rotura	Desnivel máximo en mallado
			Máximo	Mínimo		
1	500	30000	10	2	No	No
2	500	56000	5	1	No	No
3	500	190000	2	0.4	No	No
4	500	190000	2	0.4	No	Si
5	500	30000	10	2	Si	No
6	500	56000	5	1	Si	No
7	500	190000	2	0.4	Si	No
8	500	190000	2	0.4	Si	Si

Tabla 5.1. Cálculos realizados con el modelo 2D de cauce trapecial con distintas densidades de mallado

5.2.2. Resultados utilizando la fórmula de Manning

Al tratarse de un flujo con caudal, sección y pendiente constantes, el régimen es uniforme y la pérdida de carga por unidad de longitud es igual a la pendiente. Se emplea la fórmula de Manning, según la cual, la pérdida de carga es:

$$i = \frac{n^2 \cdot V^2}{R_H^{\frac{4}{3}}}$$

En la tabla adjunta se incluyen los resultados obtenidos del calado y la velocidad, además de los valores del perímetro mojado y del área, a fin de contrastar los resultados teóricos con los obtenidos con los modelos 2D:

Q (m³/s)	Área (m²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	1891.2	49.86	3.63	4.265	2.782

Tabla 5.2. Resultados utilizando la formulación de Manning

Es necesario tener en cuenta que los modelos bidimensionales, por definición, tienen una velocidad única en cada elemento, es decir en toda su altura, y el rozamiento sólo existe en el fondo que se supone horizontal. Por ello para poder comprobar los resultados entre los modelos 2D y la fórmula de Manning, el perímetro mojado se calcula según el fondo del cauce y la proyección horizontal de los cajeros; en estas condiciones los resultados teóricos son:

Q (m³/s)	Área (m²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	171.500	44.080	3.891	4.0795	2.9154

Tabla 5.3. Resultados según Manning considerando rozamiento únicamente en el plano horizontal

5.2.3. Resultados de los modelos 2D

El análisis de los resultados de cara a cuantificar la precisión de la modelización se llevó a cabo en una sección lo suficientemente alejada de las condiciones de contorno en la que se estabiliza el flujo (ver tabla adjunta):

Tiempo (m)	Caudal (m ³ /s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 00:00:00	0	0	0
00 00:10:00	49.412	0.745	1.693
00 00:20:00	278.175	2.818	2.469
00 00:30:00	452.075	3.829	2.967
00 00:40:00	499.168	4.147	3.036
00 00:50:00	499.97	4.156	3.034
00 01:00:00	499.999	4.157	3.034
00 01:10:00	500	4.157	3.034
00 01:20:00	499.999	4.157	3.034
00 01:30:00	500.001	4.157	3.034
00 01:40:00	500.001	4.157	3.034
00 01:50:00	500	4.157	3.034
00 02:00:00	499.999	4.157	3.034

Tabla 5.4. Resultados de la simulación 2D del cauce trapecial, rozamiento sólo en el plano horizontal

A partir de una hora de simulación, el calado de 4.157 m permanece constante, así como la velocidad, 3.04 m/s. El flujo oscila en 0.001 m³/s alrededor del valor de entrada de 500 m³/s.

Distribución de velocidades en un cauce prismático

La velocidad en la sección de un canal prismático (rectangular o trapecial) no es uniforme. Los puntos situados en el centro cerca de la superficie libre presentan la máxima velocidad, mientras que la velocidad en el contorno es nula. En la figura adjunta se esquematiza esta distribución para el caso de un cauce de sección rectangular:

Figura 5.4. Distribución de velocidades en un cauce rectangular

En los modelos bidimensionales la velocidad es constante a lo largo del calado pero varía en función de la distancia al eje de la sección.

Los resultados de los distintos modelos se han considerado en la sección PK_750, con resultados muy satisfactorios, pues en esta sección el caudal es prácticamente 500 m³/s, idéntico al introducido en el cauce (ver tabla y figuras adjuntas).

Tiempo	Caudal (m ³ /s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 00:00:00	39.935	0.607	1.675
00 00:10:00	277.944	2.817	2.473
00 00:20:00	452.828	3.813	2.970
00 00:30:00	499.267	4.113	3.035
00 00:40:00	499.980	4.121	3.034
00 00:50:00	499.999	4.121	3.034

Tiempo	Caudal (m ³ /s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 01:00:00	500.000	4.121	3.034
00 01:10:00	499.999	4.121	3.034
00 01:20:00	499.999	4.121	3.034
00 01:30:00	499.999	4.121	3.034
00 01:40:00	499.999	4.121	3.034
00 01:50:00	500.000	4.121	3.034

Tabla 5.5. Caudal en la sección PK_750 en el cálculo nº 8 (máximo de precisión)

Figura 5.5 Evolución del caudal en la sección PK_750 (cálculo 8)

Figura 5.6. Distribución de la velocidad en la sección PK_749 (cálculo 8)

La estimación de la velocidad media, que se contrasta con los resultados de la fórmula de Manning, se puede realizar calculando las velocidades medias en la parte central y en las bancadas laterales y posteriormente calculando la media ponderada. Con este método se obtiene:

Zonas	Área parcial (m ²)	Velocidad media (m/s)	Velocidad ponderada (m/s)
Central	120.11	3.003	
Izquierda	2.0	0.607	
Derecha	2.0	0.652	
Sumas parciales	124.11		2.9264

Tabla 5.6. Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749

Calculada la velocidad media de 2.9264 m/s, y comparándola con la obtenida con la fórmula de Manning de 2.915 m/s, se tiene una diferencia de 0.35 %; esta diferencia puede ser debida a la precisión del cálculo de la velocidad media. Por otra parte, confrontando los resultados obtenidos en la sección PK_750 en los modelos de máxima y mínima densidad de elementos, se observan valores muy similares (ver cuadro adjunto):

T (min.)	Modelo máxima precisión (190000 elementos)			Modelo mínima precisión (30000 elementos)			Diferencias en %		
	Q (m³/s)	Mayor calado (m)	Velocidad máxima (m/s)	Q (m³/s)	Mayor calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Dif. en Q (m³/s)	Dif. en calado (m)	Dif. en v (m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	277.944	2.817	2.473	278.175	2.818	2.469	-0.231	-0.001	0.004
40	499.267	4.113	3.035	499.168	4.147	3.036	0.099	-0.034	-0.001
60	499.999	4.121	3.034	499.999	4.157	3.034	0	-0.036	0
80	499.999	4.121	3.034	499.999	4.157	3.034	0	-0.036	0

Tabla 5.7. Comparación de resultados en la sección PK_750

5.2.4. Conclusiones de los resultados obtenidos en cauce sintético

De los ensayos de sensibilidad al número de elementos en modelos bidimensionales aplicados al tránsito en canales, con simulaciones realizadas en InfoWorks ICM y contrastadas con los valores que ofrece la fórmula de Manning en la hipótesis de régimen uniforme, se puede reseñar que:

- El modelo se ha dispuesto con sección y pendiente constantes en toda su longitud.
- La sección adoptada ha sido trapecial, de base 40 m y taludes laterales de 20 m de altura, con pendientes 1H/2V.
- La pendiente considerada ha sido del 0.5 %.
- La rugosidad de Manning se ha dispuesto igual a 0.06.
- El caudal de entrada, también constante, corresponde a 500 m³/s.
- El calado y la velocidad en régimen uniforme calculados según la fórmula de Manning son 4.079 m y 2.915 m/s, respectivamente.
- Los resultados en la sección de comparación perpendicular al eje y suficientemente alejada de los bordes, en todos los modelos 2D dan un caudal que oscila entre 499.999 y 500.001 m³/s, por lo que se puede indicar que es prácticamente exacto.
- Las diferencias entre la velocidad obtenida con Manning y la calculada por media ponderada de la distribución de velocidades en la sección son inferiores al 0.4%, lo cual podría ser debido al error que se comete con el propio método de estimación.
- La precisión en los resultados obtenidos apenas varía, incluso en los modelos con menor número de elementos, y sin líneas de rotura, una vez estabilizado el flujo, los resultados tienen diferencias menores al 1%.

5.3. MODELO INICIAL EN CAUCE NATURAL

5.3.1. Simulaciones realizadas

En este análisis se cotejaron los resultados de tres simulaciones del mismo tramo del río Esla con diferente número de elementos totales de mallado: 604000, 778000 y 1113000. Los resultados fueron muy semejantes entre sí. En las plantas siguientes se pueden apreciar los detalles de distribución de las zonas de malla empleadas, cada una con diferente densidad de triángulos 2D:

Figura 5.7. Mallado y detalle del modelo de 778000 elementos

Figura 5.8. Detalle del tramo fluvial con diferenciación de las 3 zonas de malla 2D consideradas

Se empleó un hidrograma de entrada tipo SCS con caudal pico de 2000 m³/s a las 17 h (1020 min), cuya forma se puede apreciar en la imagen adjunta:

Figura 5.9. Hidrograma de entrada con caudal pico de 2000 m³/s empleado en los cálculos

5.3.2. Análisis de resultados

En primer lugar se estudió la laminación en el tránsito comparando los hidrogramas de salida para los tres modelos bidimensionales de distinta precisión (ver figura adjunta).

Figura 5.10. Hidrograma de entrada y de salida con distinta precisión

En la tabla adjunta se incluye un detalle del hidrograma de salida de los tres modelos.

Tiempo (min)	Caudal m ³ /s		
	604 000 elementos	780 000 elementos	1 113 000 elementos
1375	1871.02	1895.01	1893.70
1380	1875.66	1897.67	1896.75
1385	1879.25	1899.39	1898.82
1390	1881.75	1900.31	1900.10

Tiempo (min)	Caudal m ³ /s		
	604 000 elementos	780 000 elementos	1 113 000 elementos
1395	1883.43	1900.44	1900.50
1400	1884.42	1899.90	1900.15
1405	1884.66	1898.66	1899.18
1410	1884.25	1896.82	1897.45
1415	1883.33	1894.42	1895.18

Tabla 5.8. Comparación de resultados del caudal máximo

De la observación de los gráficos y tabla de los hidrogramas se deduce que existe una similitud muy grande en los resultados de caudales y tiempos de caudal pico de los tres modelos. En concreto, entre las dos simulaciones de mayor precisión el caudal máximo presenta una diferencia de 0.06 m³/s, es decir del 0.0035 %; es decir, prácticamente son iguales. El momento en el que se produce el caudal máximo es el minuto 1395 sabiendo que los resultados están grabados cada cinco minutos.

En resumen, se puede indicar que:

- Los tres modelos analizados presentan resultados muy similares, si bien las dos configuraciones más detalladas prácticamente coinciden.
- Los caudales pico a la salida de los dos modelos más precisos tienen una diferencia en el caudal del 0.0035 %.
- El tiempo del caudal pico a la salida de los dos modelos con mayor densidad de elementos es el mismo.

5.4. MODELO DETALLADO DE DENSIDAD DE ELEMENTOS

En segunda fase, y para determinar con mayor detalle la influencia del tamaño de malla en la calidad de los resultados, se ha realizado una batería de 26 simulaciones con tamaños mínimos de malla crecientes, desde 1 hasta 200 m², considerando dos situaciones: con definición mediante líneas de rotura del cauce de aguas bajas o sin ella. Las dos últimas se llevaron a cabo con la herramienta de mallado inteligente, también con y sin líneas de situación del cauce de aguas bajas.

5.4.1. Cálculos realizados

Se empleó el mismo tramo del río Esla, de casi 30 km de longitud, con 8 secciones de control. Las simulaciones se plantearon según los siguientes criterios:

- ✓ Se definieron las mismas 3 zonas de influencia de inundación fluvial: Cauce, Bancadas y Llanura general, cada una con dimensiones de malla particulares.
- ✓ Se configuraron 13 modelos con distintas distribuciones de tamaños de elementos, realizándose la última mediante la herramienta de mallado inteligente de InfoWorks ICM.
- ✓ Cada uno de los 13 modelos se simuló con y sin definición del cauce de aguas bajas (mediante líneas de rotura).
- ✓ Cada modelo contaba con un número medio distinto de elementos de malla a lo largo del cauce de aguas bajas, en función del tamaño de los elementos y la existencia o no de líneas de rotura.

La lista completa de cálculos realizados se detalla en la tabla adjunta:

Cálculo	Denominación	Nº Total de Elementos	Elementos de Malla Zona Cauce (m ²)	Elementos de Malla Zona Bancadas (m ²)	Elementos de Malla Zona Llanura General (m ²)	Líneas de Definición Cauce de Aguas Bajas
1	Mallado A	2 134 546	1 - 10	10 - 50	100 - 1000	Sí
2	Mallado B	1 450 365	1.5 - 15	15 - 75	100 - 1000	Sí
3	Mallado C	1 108 739	2 - 20	20 - 100	100 - 1000	Sí
4	Mallado D	905 666	2.5 - 25	25 - 125	100 - 1000	Sí
5	Mallado E	772 002	3 - 30	30 - 150	100 - 1000	Sí
6	Mallado F	675 565	3.5 - 35	35 - 175	100 - 1000	Sí
7	Mallado G	604 033	4 - 40	40 - 200	100 - 1000	Sí
8	Mallado H	548 627	4.5 - 45	45 - 225	100 - 1000	Sí
9	Mallado I	504 184	5 - 50	50 - 250	100 - 1000	Sí
10	Mallado J	307 429	10 - 100	100 - 500	100 - 1000	Sí
11	Mallado K	211 311	20 - 200	100 - 1000	100 - 1000	Sí
12	Mallado L	155 351	200 - 1000	200 - 1000	200 - 1000	Sí
13	Mallado M	1 653 003	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . $\Delta h = 1$ m			Sí
14	Mallado A	2 131 844	1 - 10	10 - 50	100 - 1000	No
15	Mallado B	1 441 189	1.5 - 15	15 - 75	100 - 1000	No
16	Mallado C	1 096 234	2 - 20	20 - 100	100 - 1000	No
17	Mallado D	888 818	2.5 - 25	25 - 125	100 - 1000	No
18	Mallado E	750 040	3 - 30	30 - 150	100 - 1000	No
19	Mallado F	650 494	3.5 - 35	35 - 175	100 - 1000	No
20	Mallado G	576 495	4 - 40	40 - 200	100 - 1000	No
21	Mallado H	518 746	4.5 - 45	45 - 225	100 - 1000	No
22	Mallado I	471 878	5 - 50	50 - 250	100 - 1000	No
23	Mallado J	263 511	10 - 100	100 - 500	100 - 1000	No
24	Mallado K	160 641	20 - 200	100 - 1000	100 - 1000	No
25	Mallado L	117 719	200 - 1000	200 - 1000	200 - 1000	No
26	Mallado M	1 6525 258	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . $\Delta h = 1$ m			No

Tabla 5.9. Listado de Cálculos de análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en el cauce natural

Una vez completados todos los cálculos, y tras analizar los errores de laminación en cada uno de ellos, se obtuvieron unos ábacos para determinar el tamaño de malla recomendado a partir del ancho medio de cauce de aguas bajas.

5.4.2. Resultados obtenidos

En las tablas y gráficas siguientes se recogen los resultados obtenidos en las simulaciones, organizados entre los que cuentan con definición de la zona de cauce de aguas bajas mediante líneas de rotura, y los que no:

MODELOS CON DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS								
Cálculo	Nº Total de Elementos	% Reducción Nº Elem.	Tiempo de Cálculo (s)	Reducción Tiempo de Cálculo (%)	Q pico L ₈ (m ³ /s)	Laminación (%)	Error en laminación (%)	t _Q pico L ₈ (min)
Mallado A	2 134 546	0%	53 195	0.00%	1904.83	4.759%	0.000%	1385
Mallado B	1 450 365	32%	39 850	25.09%	1904.84	4.758%	0.000%	1385
Mallado C	1 108 739	48%	27 161	48.94%	1904.69	4.766%	0.007%	1385
Mallado D	905 666	58%	22 350	57.98%	1904.67	4.766%	0.008%	1385
Mallado E	772 002	64%	19 835	62.71%	1903.80	4.810%	0.051%	1385
Mallado F	675 565	68%	17 999	66.16%	1903.78	4.811%	0.052%	1385
Mallado G	604 033	72%	16 678	68.65%	1903.64	4.818%	0.059%	1385
Mallado H	548 627	74%	14 373	72.98%	1903.03	4.849%	0.090%	1385
Mallado I	504 184	76%	13 433	74.75%	1902.54	4.873%	0.114%	1385
Mallado J	307 429	86%	8 495	84.03%	1900.40	4.980%	0.222%	1385
Mallado K	211 311	90%	6 766	87.28%	1898.93	5.054%	0.295%	1385
Mallado L	155 351	93%	5 257	90.12%	1897.93	5.104%	0.345%	1390
Mallado M	1 653 003	23%	40 911	23.09%	1898.67	5.067%	0.308%	1390

Tabla 5.10. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico}, Laminación y t_Qpico

MODELOS CON DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS						
Cálculo	Laminación (%)	Error en laminación (%)	Nº Medio Elementos Sección Aguas Bajas	Á. Promedio Elementos Cauce (m ²)	Á. Mínima Elementos Cauce (m ²)	Á. Máxima Elementos Cauce (m ²)
Mallado A	4.76%	0.000%	15.6	5.5	1	10
Mallado B	4.76%	0.000%	13.1	8.25	1.5	15
Mallado C	4.77%	0.007%	10.4	11	2	20
Mallado D	4.77%	0.008%	9.5	13.75	2.5	25
Mallado E	4.81%	0.051%	8.8	16.5	3	30
Mallado F	4.81%	0.052%	8.5	19.25	3.5	35
Mallado G	4.82%	0.059%	8.1	22	4	40
Mallado H	4.85%	0.090%	7.6	24.75	4.5	45
Mallado I	4.87%	0.114%	7.3	27.5	5	50
Mallado J	4.98%	0.222%	5.8	55	10	100
Mallado K	5.05%	0.295%	4.4	110	20	200
Mallado L	5.10%	0.345%	3.0	320	200	1000
Mallado M	5.17%	0.334%	10.1	31	1	1000

Tabla 5.11. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos

MODELOS SIN DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS								
Cálculo	Nº Total de Elementos	% Reducción Nº Elem.	Tiempo de Cálculo (s)	Reducción Tiempo de Cálculo (%)	Q pico L ₈ (m ³ /s)	Laminación (%)	Error en laminación (%)	t _{Q pico} L ₈ (min)
Mallado A	2 131 844	0%	35 451	33.36%	1907.10	4.645%	0.113%	1385
Mallado B	1 441 189	32%	26 298	50.56%	1906.80	4.660%	0.099%	1380
Mallado C	1 096 234	49%	19 631	63.10%	1907.28	4.636%	0.123%	1375
Mallado D	888 818	58%	16 607	68.78%	1907.28	4.636%	0.123%	1380
Mallado E	750 040	65%	12 851	75.84%	1907.15	4.643%	0.116%	1375
Mallado F	650 494	70%	10 158	80.90%	1907.92	4.604%	0.155%	1375
Mallado G	576 495	73%	6 797	87.22%	1908.19	4.591%	0.168%	1375
Mallado H	518 746	76%	3 819	92.82%	1908.21	4.590%	0.169%	1375
Mallado I	471 878	78%	3 173	94.04%	1909.11	4.544%	0.214%	1375
Mallado J	263 511	88%	2 232	95.80%	1910.28	4.486%	0.273%	1375
Mallado K	160 641	92%	593	98.89%	1913.44	4.328%	0.430%	1375
Mallado L	117 719	94%	211	99.60%	1919.02	4.049%	0.710%	1370
Mallado M	1 625 258	24%	37 773	28.99%	1898.15	5.092%	0.334%	1385

Tabla 5.12. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico}, Laminación y t_{Qpico}

MODELOS SIN DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS						
Cálculo	Laminación (%)	Error en laminación (%)	Nº Medio Elementos Sección Aguas Bajas	Á. Promedio Elementos Cauce (m ²)	Á. Mínima Elementos Cauce (m ²)	Á. Máxima Elementos Cauce (m ²)
Mallado A	4.65%	0.113%	14.8	8.5	1	10
Mallado B	4.66%	0.099%	12.5	10	1.5	15
Mallado C	4.64%	0.123%	9.9	14	2	20
Mallado D	4.64%	0.123%	8.8	16	2.5	25
Mallado E	4.64%	0.116%	8.4	18	3	30
Mallado F	4.60%	0.155%	7.6	22	3.5	35
Mallado G	4.59%	0.168%	7.0	24	4	40
Mallado H	4.59%	0.169%	6.9	30	4.5	45
Mallado I	4.54%	0.214%	6.5	35	5	50
Mallado J	4.49%	0.273%	5.0	60	10	100
Mallado K	4.33%	0.430%	3.5	150	20	200
Mallado L	4.05%	0.710%	2.0	600	200	1000
Mallado M	5.09%	0.334%	9.5	36	1	1000

Tabla 5.13. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos

Figura 5.11. Relación entre los tiempos de cálculo de los modelos de sensibilidad y el nº total de elementos

Figura 5.12. Relación entre la reducción del tiempo de cálculo de los modelos 2D y la de elementos totales

Figura 5.13. Relación entre el error en la laminación y el número de elementos totales de los modelos

Figura 5.14. Relación entre el error en la laminación y el número medio de elementos en la sección de cauce de aguas bajas

5.4.3. Conclusiones del análisis de sensibilidad en cauce natural

De los ensayos realizados en cauce natural para analizar la influencia del tamaño de los elementos 2D en los resultados de laminación, se puede colegir que:

- ▶ El tiempo de cálculo está directamente relacionado con el nº de elementos 2D de los modelos.
- ▶ La precisión de los resultados es muy buena; incluso en modelos con poca densidad de elementos y sin líneas de definición de cauce de aguas bajas, el error no llega al 1%.
- ▶ Se ha relacionado la precisión del modelo con el número de elementos 2D en la sección de aguas bajas; a partir de 9-10 triángulos, la precisión no mejora.
- ▶ La existencia de líneas de definición del cauce de aguas bajas del tránsito reducen el error en $\approx 0.1\%$.
- ▶ La herramienta de mallado sensible al terreno (mallado inteligente) no supone una ventaja respecto a las líneas de rotura de delimitación del cauce.

5.4.4. Ábacos para el Mallado Óptimo de los Elementos 2D

En las páginas siguientes se incluyen, en forma de ábacos, las conclusiones del estudio de sensibilidad, que relacionan el ancho del cauce con el error cometido según los tamaños de malla.

Figura 5.15. Ábaco I de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura 5.16. Ábaco II de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura 5.17. Ábaco III de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura 5.18. Ábaco IV de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

CAPÍTULO 6. CÁLCULOS BIDIMENSIONALES REALIZADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se recogen los ensayos de cálculo de laminación simulados. Estos se llevaron a cabo en tramos de cauces de ríos reales y en secciones prismáticas sintéticas mediante la herramienta de cálculo hidráulico 2D InfoWorks ICM. Con la ayuda de esta batería de simulaciones se pretende conseguir nuevos criterios aplicables a la utilización de los modelos 2D en tránsitos, así como información para la determinación de la sección óptima para emplear el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

6.2. MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL UTILIZADO

El modelo InfoWorks ICM es un modelo hidrodinámico con las siguientes características:

- Emplea las ecuaciones de Navier-Stokes para movimiento de un fluido incompresible poco profundo (elimina la componente vertical de las mismas).
- Cálculo en volúmenes finitos.
- Conservación de la masa y la cantidad de movimiento.
- Basado en el esquema de Gudunov y la solución de Riemann.
- Resolución con método semi-implícito, con el paso temporal de Runge-Kutta (predicción-corrección).
- Mallado triangular sin estructura, posibilidad de incluir líneas de rotura.
- Mallado "inteligente", con la posibilidad de limitar el desnivel máximo entre vértices del triángulo para lograr mayor densidad en zonas con mayor desnivel.
- Utilización de la tecnología CUDA para "vectorizar" los procesos de operación y disminuir el tiempo de cálculo, esta disminución es proporcional al número y velocidad de los núcleos existentes en la tarjeta gráfica, actualmente alcanzan los 3000 procesadores.

6.3. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático emplea para el cálculo tres tipos de datos:

1. Datos geométricos con definición del contorno por medio de un MDT.
2. Datos hidráulicos.
3. Condiciones de contorno.

6.3.1. Datos geométricos de definición del modelo

Los modelos matemáticos han sido contruidos partiendo de un modelo digital del terreno (MDT). Se han utilizado MDT de cauces naturales y también de cauces "prismáticos", es decir de cauces de sección constante:

1. Los cauces naturales han sido modelizados a partir de un MDT con malla de 5 x 5 m, además se ha complementado con otros datos de mayor densidad obtenidos de otros

levantamientos, sobre todo en las zonas del cauce de aguas bajas, por lo que su precisión es variable.

2. Los MDT en cauces "prismáticos" se han obtenido mediante definición geométrica de la sección.

En la figura 6.1 se incluyen vistas del modelo TIN de un cauce:

Figura 6.1. Modelo digital del cauce

6.3.2. Datos hidráulicos

Los datos hidráulicos pueden ser suministrados de dos formas:

- Como hidrograma en la entrada del cauce.
- Como lluvia directa.

Cuando el dato hidráulico es un caudal constante y dado que el cálculo se realiza en régimen variable, es necesario introducir un hidrograma con un caudal creciente y posteriormente estabilizado, ver figura adjunta, de forma que el régimen en el cauce se equilibre y sea permanente.

Figura 6.2. Hidrograma utilizado un régimen permanente con $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

Si el dato hidráulico es la lluvia directa sobre la cuenca de cabecera del cauce analizado, el proceso se reduce a definir el pluviograma de precipitación sobre la misma. En los cálculos realizados se ha utilizado como entrada de caudal en los cauces, hidrogramas sintéticos tipo SCS, acordes con las características de la cuenca existente aguas arriba (ver figura adjunta).

Figura 6.3. Hidrograma utilizado tipo SCS de $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

6.3.3. Rugosidad

La forma de introducir la rugosidad en los modelos hidráulicos bidimensionales es utilizando polígonos de rugosidades, es decir áreas en la que la rugosidad es conocida. Los datos utilizados son del CORINE and Cover (Coordination of Information on the Environment), y se incluyen directamente como capas de GIS. La rugosidad en los cauces prismáticos se supone constante y solo se diferencian el cauce central y las bancadas laterales, con el objeto de adecuarse a los datos utilizables en los modelos hidrológicos de tránsito.

Con relación a la rugosidad, la formulación del modelo matemático 2D se sitúa en el plano X Y, de forma que las dimensiones y las ecuaciones en dirección Z son lógicamente ortogonales al plano XY situado horizontal, por lo que el calado o la cota no serán perpendiculares a los planos no horizontales. Esto obliga a tener en cuenta algunas consideraciones, dentro de las que se incluyen la determinación del calado de la superficie libre, que han sido anteriormente abordadas por algunos investigadores (Martínez Olmos, 2011). Estas reflexiones corresponden a las laderas de fuerte pendiente (habitualmente para pendientes superiores al 10%).

Figura 6.4. Corrección en calados, velocidades y n de Manning por la pendiente

Los calados en modelos bidimensionales se calculan como diferencia entre la superficie libre del agua en el baricentro del triángulo de malla y la cota en el baricentro del triángulo de malla, por lo que se mide en la vertical. En consecuencia, sobre este paramento deberá considerarse su equivalente en la dirección Z. Si la pendiente del terreno es p:1 (p dimensión horizontal), las relaciones geométricas son:

$$\text{Tag } a = \frac{1}{p} \quad \cos a = \frac{L'}{L} \quad L' = L \cos a$$

El calado se puede expresar como:

$$\cos a = \frac{d}{d'} \quad d = d' \cos a$$

Utilizando la ecuación de continuidad se puede obtener la relación de la velocidad, de forma que estableciendo la continuidad del caudal por unidad de ancho se tiene:

$$q = V' d' = V d = V' \frac{d}{\cos a} \quad V = \frac{V'}{\cos a}$$

La rugosidad presenta una relación similar, de forma que utilizando la fórmula de Manning se necesita emplear un valor corregido de la n para que compense la diferencia entre la longitud real de la superficie y la proyectada sobre el plano horizontal, así como la diferencia de velocidades, de manera que considerando la fórmula de Manning e igualando pérdidas de energía, se tiene:

$$L I = L \frac{n^2 V^2}{R_h^{4/3}} = L' I' = L' \frac{(n')^2 (V')^2}{(R'_h)}$$

Por otra parte, dado que los calados son pequeños con relación al ancho, se puede asimilar el radio hidráulico al calado:

$$R_h \cong d$$

De forma que la ecuación anterior queda en la forma:

$$L \frac{n^2 V^2}{d^{4/3}} = L' \frac{(n')^2 (V')^2}{(d')^{4/3}}$$

Operando:

$$n = n' (\cos a)^{13/6}$$

Con el fin de estimar el error que se comete al no considerar las pendientes en los taludes del cauce se han analizado los errores en el cálculo de calados y velocidades y en la estimación del valor de la n de Manning en pendientes entre el 1 y el 30%.

Pendiente	Error calado /velocidad	Error "n"
1.0%	0.005%	0.01%
2.0%	0.020%	0.04%
3.0%	0.045%	0.10%
5.0%	0.125%	0.27%
10.0%	0.496%	1.08%
15.0%	1.106%	2.44%
20.0%	1.942%	4.34%
25.0%	2.986%	6.79%
30.0%	4.218%	9.79%

Tabla 6.1. Error en los modelos 2D en función de la pendiente

Como conclusión se puede decir que el error de las velocidades y calados es bajo, ya que para pendientes del 10% el error no alcanza el 0.5%, incluso para pendientes del 20% resulta inferior al 2%. La inexactitud en el valor de la n de Manning es muy reducida e inferior al error habitual en su estimación, ya que para una pendiente del 10%, el error en n es del orden del 1% y en el caso de una pendiente del 20%, sólo se llega al 4 %.

Figura 6.5. Error de velocidades y calados en modelos 2D en función de la pendiente

Figura 6.6. Error de la n de Manning en modelos 2D en función de la pendiente

En todo caso y de ser necesario, se podría corregir el error introducido en la evaluación de la n de Manning modificando este valor en función de la pendiente.

6.3.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno posibles en el modelo son:

- Condición "seca" aguas abajo, presupone que en la sección final el agua "vierte" saliendo del contorno definido.
- Condición "normal", es decir que la pendiente del flujo será igual a la pendiente media del terreno en esa zona.
- Sección crítica, considera que en la sección final se produce un régimen crítico (es una condición muy similar a la condición "seca").
- Nivel conocido, cuando se supone que en la sección de salida se conoce el nivel.
- Curva de caudal/calado conocida.

En los cálculos realizados se ha utilizado la condición "normal", para disminuir el efecto de la condición del contorno en los resultados de los tránsitos.

6.4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los cálculos realizados se agrupan en cauces prismáticos y cauces naturales, dentro de los cauces prismáticos se han realizado cálculos variando la pendiente, el ancho de la sección, la longitud del cauce así como la rugosidad. En cada uno de estos cauces se ha realizado un modelo 2D y un HEC-HMS para tres caudales y dos tiempos de lluvia (lo que hace variar el volumen del hidrograma), en los cuadros siguientes se incluye el resumen de los datos y resultados de estos cálculos.

Los cauces naturales tienen sus características propias por lo que lo único que se ha variado son los caudales de entrada y la duración de la precipitación que los origina (que condiciona el volumen del

hidrograma), en alguno de ellos se han considerado dos distribuciones de la n de Manning, un valor uniforme y el distribuido obtenido del CORINE.

Los resultados detallados están incluidos en el Anejo E, *Resumen de cálculos de los tránsitos*. A continuación se incluye un resumen de los resultados con los datos geométricos básicos (longitud del tramo, pendiente, ancho, etc.), datos hidrológicos (coeficiente de Manning, caudal, duración lluvia, etc.) y los resultados básicos (caudal de salida, tiempo del caudal máximo de salida, laminación, etc.).

En la figura adjunta se incluye un esquema de la sección tipo utilizada:

Figura 6.7. Sección tipo de cauce prismático

6.4.1. Resultados en cauces prismáticos

En la tabla 5.1 se incluyen los resultados de los cálculos:

Cauce	Long (km)	Pend cauce	n	Ancho (m)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2DQo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQo (m ³ /s)	Desfase (m)
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	878.6	5.00	917.4	4.67
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1860.1	3.42	1887.4	3.33
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3813.3	2.42	3825.4	2.42
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	983.7	4.08	984.0	4.08
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1975.9	3.25	1975.2	3.25
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3962.6	2.25	3960.4	2.25
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	767.7	6.8	818.2	6.42
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1683.7	4.8	1728.3	4.67
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3563.4	3.3	3589.0	3.42
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	965.5	5.3	968.2	5.25
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1950.3	4.1	1950.1	4.08
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	3920.0	2.92
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	964.6	2.17	968.8	2.17
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1948.0	1.58	1949.3	1.58
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3915.9	1.17	3914.4	1.17
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	991.9	2.00	992.0	2.00
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1988.0	1.75	1987.5	1.75
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3980.9	1.08	3979.8	1.08
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	920.0	2.9	932.2	2.92
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1885.6	2.1	1893.4	2.08
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3820.3	1.5	3820.2	1.58
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	991.9	2.0	984.0	2.58
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1975.0	2.2	1974.8	2.17

Cauce	Long (km)	Pend cauce	n	Ancho (m)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2DQo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQo (m ³ /s)	Desfase (m)
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	3959.2	1.42
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	923.7	3.58	939.1	3.42
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1901.6	2.50	1907.9	2.50
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3853.6	1.83	3846.9	1.83
P_114-16	20.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	986.2	3.08	986.0	3.08
P_114-16	20.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1979.4	2.50	1978.2	2.50
P_114-16	20.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3968.2	1.67	3964.6	1.75
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	838.3	4.83	862.6	4.75
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1775.9	3.42	1788.2	3.42
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3681.9	2.42	3660.5	2.50
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	972.0	3.92	972.0	4.00
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1957.9	3.17	1955.4	3.17
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3936.3	2.17	3927.7	2.25
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	971.5	1.67	972.9	1.67
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1955.7	1.17	1955.3	1.25
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3927.5	0.92	3923.1	0.92
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	993.1	1.50	993.0	1.50
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1989.6	1.42	1978.2	2.50
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3983.6	0.83	3964.6	1.75
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	939.0	2.17	943.2	2.17
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1906.8	1.58	1906.0	1.58
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3849.4	1.17	3839.1	1.17
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	986.1	1.92	985.8	1.92
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1978.5	1.67	1977.3	1.67
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3966.1	1.08	3963.3	1.08
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	947.2	2.58	949.5	2.58
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1923.9	1.83	1917.4	1.92
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3882.3	1.33	3855.5	1.42
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	988.4	2.33	987.5	2.33
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1982.5	1.92	1980.0	2.00
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3973.6	1.25	3966.7	1.33
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	885.1	3.42	888.0	3.50
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1836.0	2.42	1818.0	2.58
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3761.2	1.75	3686.4	1.92
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	976.7	2.92	974.9	3.00
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1965.1	2.42	1958.8	2.50
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3948.7	1.58	3930.4	1.75
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	1000	380.0	21.1	976.4	1.25	975.7	1.25
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	2000	375.0	42.4	1962.5	0.92	1958.7	0.92
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	4000	370.0	85.5	3938.2	0.67	3927.9	0.75
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	1000	1040.0	43.4	994.1	1.17	993.7	1.17
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1991.1	1.08	1989.9	1.08
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3985.7	0.67	3983.2	0.67
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	1000	380.0	21.1	951.1	1.58	949.5	1.67
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	2000	375.0	42.4	1922.4	1.17	1913.3	1.25

Cauce	Long (km)	Pend cauce	n	Ancho (m)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2DQo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQo (m ³ /s)	Desfase (m)
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	4000	370.0	85.5	3873.0	0.83	3845.8	0.92
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	1000	1040.0	43.4	988.1	1.42	987.2	1.50
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1981.5	1.33	1979.0	1.33
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3970.9	0.83	3964.8	0.83
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	972.4	3.67	982.2	3.42
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1972.5	2.50	1972.6	2.50
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3956.5	1.83	3954.2	1.83
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	995.5	3.33	995.4	3.33
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1993.9	2.67	1993.3	2.67
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3990.5	1.83	3989.0	1.83
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	920.4	5.0	952.8	4.67
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1925.1	3.4	1942.8	3.25
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3902.7	2.4	3906.0	2.42
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	991.1	4.2	991.2	4.17
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1986.7	3.3	1986.3	3.33
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3979.1	2.3	3977.7	2.33
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	991.1	1.75	991.3	1.67
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1986.7	1.25	1986.1	1.25
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3978.7	0.92	3977.1	0.92
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	997.9	1.67	997.7	1.67
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1997.0	1.42	1996.6	1.42
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3995.5	0.92	3994.3	0.92
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	982.1	2.2	983.1	2.17
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1972.0	1.6	1972.2	1.58
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3953.7	1.2	3953.6	1.17
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	995.7	2.1	995.5	2.08
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1993.6	1.8	1993.1	1.75
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3989.8	1.2	3988.9	1.17
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	984.0	2.58	985.0	2.58
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1976.9	1.92	1975.9	1.92
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3963.0	1.42	3959.6	1.42
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	996.3	2.50	996.0	2.50
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1994.8	2.08	1994.0	2.08
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3991.6	1.33	3990.1	1.42
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	959.3	3.50	985.2	1.67
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1948.7	2.50	1975.4	1.25
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3919.4	1.83	3958.7	0.92
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	992.4	3.17	992.2	3.17
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1988.6	2.58	1987.8	2.58
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3981.9	1.75	3980.2	1.75
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	992.6	1.33	992.4	1.33
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1988.4	1.00	1987.6	0.92
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3980.9	0.67	3978.7	0.67
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	998.2	1.25	998.0	1.25
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1997.5	1.17	1997.0	1.17

Cauce	Long (km)	Pend cauce	n	Ancho (m)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2DQo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQo (m ³ /s)	Desfase (m)
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3994.9	0.92	3995.0	0.67
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	985.0	1.67	985.2	1.67
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1975.8	1.25	1975.4	1.25
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3960.2	0.92	3958.7	0.92
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	996.3	1.58	996.1	1.58
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1994.5	1.42	1993.8	1.42
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3990.9	0.83	3989.9	0.92
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	987.2	1.92	986.9	2.00
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1980.5	1.42	1978.1	1.50
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3968.4	1.08	3962.2	1.08
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	996.8	1.83	996.5	1.92
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1995.5	1.67	1994.6	1.67
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3992.9	1.08	3990.9	1.08
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	972.9	2.50	973.3	2.50
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1958.3	1.83	1955.1	1.92
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3931.4	1.33	3920.4	1.42
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	993.5	2.33	993.0	2.42
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1990.2	2.00	1988.8	2.08
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3984.4	1.33	3980.9	1.33
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	1000	380.0	21.1	993.9	1.00	993.4	1.00
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	2000	375.0	42.4	1990.2	0.75	1988.9	0.75
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	4000	370.0	85.5	3983.7	0.50	3980.4	0.58
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	1000	1040.0	43.4	998.5	0.92	998.2	0.92
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	2000	1005.0	89.7	1997.9	0.92	1997.3	0.92
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	4000	1000.0	185.3	3996.6	0.50	3995.3	0.50
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	1000	380.0	21.1	987.4	1.25	987.1	1.25
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	2000	375.0	42.4	1979.4	0.92	1977.6	0.92
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	4000	370.0	85.5	3965.5	0.67	3959.5	0.75
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	1000	1040.0	43.4	996.9	1.17	996.5	1.17
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	2000	1005.0	89.7	1995.2	1.08	1994.5	1.17
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	4000	1000.0	185.3	3992.2	0.67	3990.3	0.67

Tabla 6.2. Resultados de tránsito en cauces prismáticos

6.4.2. Resultados en cauces naturales

En la tabla 6.3 se incluyen los resultados de los cálculos realizados en cauces naturales:

Cauce	Nombre del río	Long. (km)	Pend cauce	n media	Q_i (m ³ /s)	T_i (m)	Vol. (hm ³ /s)	2D Qo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQ (m ³ /s)	Desfase (m)
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	1000	1720	43.4	887.6	9.67	930.0	7.58
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	1500	1705	66.4	1405.8	7.42	1409.6	7.67
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	2000	1700	89.7	1900.3	6.25	1900.9	6.92
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	500	1405	14.7	491.07	3.33	495.49	3.33
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	750	1355	23.1	738.63	2.92	744.6	2.83
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	1000	1350	31.8	985.97	2.67	993.79	2.50
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	500	630	14.7	128.53	11.58	307.43	9.66

Cauce	Nombre del río	Long. (km)	Pend cauce	<i>n</i> media	Qi (m ³ /s)	Ti (m)	Vol. (hm ³ /s)	2D Qo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQ (m ³ /s)	Desfase (m)
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	750	625	23.1	246.33	9.583	493.96	9
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	1000	620	31.8	371.80	9.66	684.4	8.08
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	500	845	14.7	498.17	1.00	498.49	1.08
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	750	835	23.1	747.90	0.83	748.10	0.92
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	1000	825	31.8	997.32	0.83	997.74	0.83
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	1000	8730	308.53	991.85	5.83	999.17	5.67
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	3000	8520	956.76	2997.87	3.42	2997.8	4.42
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	6000	8400	1955.12	5997.5	2.33	5995.7	3.42
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	500	855	13.813	495.393	1.08	494.38	1.33
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	750	845	21.706	741.844	1.00	744.45	1.08
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	1000	840	29.915	993.9	0.92	994.0	0.92
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	1000	2535	121.661	996.733	2.67	999.59	1.58
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	2000	2490	246.863	1993.819	2.33	1999.3	1.25
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	4000	2445	501.028	3988.4	2.00	3998.5	1.08
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	500	865	12.8	144.174	12.67	392.36	11.58
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	750	860	20.1	332.979	10.08	629.23	9.50
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	1000	850	27.7	550.0	8.50	875.1	8.08
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	500	855	13.8	488.389	1.67	494.94	1.67
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	750	845	21.7	734.807	1.58	743.57	1.50
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	1000	840	29.9	982.1	1.42	993.2	1.25
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	500	860	13.3	487.804	1.75	489.68	2.00
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	750	850	20.9	735.461	1.58	742.14	1.42
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	1000	845	28.8	983.6	1.42	990.7	1.25

Tabla 6.3. Resultados de tránsito en cauces naturales

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. INTRODUCCIÓN

El análisis de los resultados se ha estructurado analizando la influencia de los distintos parámetros considerados (longitud del tránsito, pendientes, rugosidad, volumen, caudal máximo del hidrograma de entrada,...etc.) en los cauces prismáticos y naturales. También se han comparado con los resultados proporcionados por el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos, con el objeto de extraer conclusiones relevantes para los objetivos de esta tesis.

En los resultados de los cauces “prismáticos” se ha analizado el peso de los siguientes parámetros:

- Longitud del cauce
- Pendiente
- Ancho del cauce central
- Rugosidad n de Manning.
- Duración de la precipitación (volumen del hidrograma)
- Caudal máximo.

En los cauces naturales se ha comprobado la influencia de:

- Rugosidad n de Manning tanto media como diferenciada por áreas.
- Duración de la precipitación (volumen del hidrograma).
- Caudal máximo.

7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TRÁNSITOS EN CAUCES “PRISMÁTICOS”

7.2.1. Influencia del valor del caudal

La laminación se ha determinado según la siguiente expresión:

$$L (\%) = (Q_{pE} - Q_{pS}) / Q_{pE}$$

en la cual:

Q_{pE} = Caudal pico de entrada

Q_{pS} = Caudal pico de salida

La laminación disminuye con el caudal si el resto de los parámetros se mantienen constantes. En los gráficos adjuntos se incluyen los resultados de laminación frente al caudal en los siguientes casos:

1. Longitud de cauce 10 km, ancho 1000 m.
2. Longitud de cauce 10 km, ancho 500 m.
3. Longitud de cauce 10 km, ancho 250 m.
4. Longitud de cauce 20 km, ancho 1000 m.
5. Longitud de cauce 20 km, ancho 500 m.
6. Longitud de cauce 20 km, ancho 250 m.

En cada uno de los gráficos se han representado los valores correspondientes a distintas pendientes, duraciones de la precipitación en la cuenca aguas arriba (lo que condiciona el volumen del hidrograma) y rugosidad n de Manning.

Figura 7.1. Laminación en función del caudal ($L=10$ km, ancho=1000 m)

Figura 7.2. Laminación en función del caudal ($L=10$ km, ancho=500 m)

Figura 7.3. Laminación en función del caudal ($L=10$ km, ancho=250 m) Figura 7.4. Laminación en función del caudal ($L=20$ km, ancho=1000 m)

Figura 7.5. Laminación en función del caudal ($L=20$ km, ancho=500 m) Figura 7.6. Laminación en función del caudal ($L=20$ km, ancho=250 m)

Del análisis de las gráficas anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La laminación decrece con el caudal. Todos los gráficos son claramente descendentes.
- El volumen del hidrograma afecta a la laminación: ésta disminuye al aumentar el caudal.
- Los resultados del modelo hidrológico HEC-HMS son similares, aunque cuando la laminación es más alta presentan menores valores.

7.2.2. Influencia del valor del ancho de la sección

La laminación es creciente con el ancho de la sección, cuando el resto de los parámetros se mantienen constantes. En las figuras adjuntas se incluyen los resultados de laminación frente al ancho de la sección en los siguientes casos:

1. Longitud de cauce 10 km, pendiente 0.1%.
2. Longitud de cauce 10 km, pendiente 0.2%.
3. Longitud de cauce 20 km, pendiente 0.1%.
4. Longitud de cauce 20 km, pendiente 0.2%.

En cada uno de los gráficos se dibujan los valores correspondientes a las rugosidades, duraciones de la precipitación en la cuenca aguas arriba (que condiciona el volumen del hidrograma) y caudales ensayados.

Figura 7.7. Laminación en función del ancho del cauce ($L=10$ km, pendiente=0.1 %)

Figura 7.8. Laminación en función del ancho del cauce ($L=10$ km, pendiente=0.2 %)

Del análisis de las dos figuras anteriores se observa con claridad la disminución del efecto laminador cuando aumenta la pendiente. Por ejemplo, el máximo se produce en la figura 7.7 en un cauce con rugosidad $n=0.06$ cuando el caudal es $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y una lluvia de 3 horas, siendo su valor del 8%; este valor de la laminación baja hasta 1.8% cuando la pendiente pasa del 0.1% a 0.2%, manteniéndose el resto de los parámetros constantes (rugosidad $n=0.06$, caudal $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y lluvia de 3 horas).

Si se analizan los resultados equivalentes para una longitud de 20 km. (ver figuras 7.9 Y 7.10), se tiene que: La laminación en un cauce de 20 km de longitud con $n=0.06$ y pendiente del 0.1 %, caudal $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, y lluvia uniforme de 3 h es del 23.2%. Mientras que la laminación en un cauce de 20 km de longitud con $n=0.06$ y pendiente de 0.2 %, con el mismo caudal pico de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ y una lluvia uniforme de 3 h se reduce al 8%. Se aprecia por tanto, la gran influencia que tiene la pendiente en el efecto laminador de un cauce.

Figura 7.9. Laminación en función del ancho del cauce (L=20 km, pendiente=0.1 %)

Figura 7.10. Laminación en función del ancho del cauce (L=20 km, pendiente=0.2 %)

7.2.3. Influencia del valor de la n de Manning

Como resulta lógico, el efecto laminador de un cauce es mayor cuanto más alto es el valor de la rugosidad de Manning. Este efecto, que se puede apreciar en los gráficos incluidos más abajo, se explica por la disminución de la capacidad del cauce, aumentándose el calado y en consecuencia el almacenamiento. La dependencia del valor de la rugosidad es bastante significativa. Se ha querido destacar este efecto en el cuadro adjunto, en el que se comparan la laminación en función de la n para distintos anchos y pendientes, observándose un importante incremento al aumentar la rugosidad:

Q inicial (m ³ /s)	Ancho (m)	Pendiente (%)	Longitud (km)	Duración lluvia (h)	n	Q final (m ³ /s)	Laminación (%)
1000	250	0.1	20	3	0.040	947.22	5.28
1000	250	0.1	20	3	0.060	885.06	11.49
2000	250	0.1	20	3	0.040	1923.87	3.81
2000	250	0.1	20	3	0.060	1836.04	8.20

Tabla 7.1. Valores de la laminación en un tránsito de 20 km, ancho 250 m y pendiente 0.01

A continuación se incluyen los resultados de laminación de los cauces ensayados en función de la rugosidad n de Manning, con indicación de los demás parámetros: Q_p , duración de lluvia en la cuenca aguas arriba, ancho de la sección y pendiente del tramo.

Figura 7.11. Laminación en función de la n ($L=10$ km, pendiente=0.1 %, 3h)

Figura 7.12. Laminación en función de la n (L=10 km, pendiente=0.1 %, 12h) Figura 7.13. Laminación en función de la n (L=10 km, pendiente=0.2 %, 3h)

Figura 7.14. Laminación en función de la n (L=10 km, pendiente=0.2 %, 12h)

Figura 7.15. Laminación en función de la n (L=20 km, pendiente=0.1 %, 3h)

Figura 7.16. Laminación en función de la n (L=20 km, pendiente=0.1 %, 12h) Figura 7.17. Laminación en función de la n (L=20 km, pendiente=0.2 %, 3h)

Figura 7.18. Laminación en función de la n ($L=20$ km, pendiente=0.2 %, 12h)

7.2.4. Influencia del valor de la pendiente en la laminación

La laminación resulta decreciente con la pendiente cuando el resto de los parámetros se mantienen constantes. En los gráficos adjuntos se incluyen los porcentajes de laminación frente a la pendiente del tramo, en los siguientes casos:

1. Longitud de cauce 10 km $n=0.040$, lluvia de 3 horas.
2. Longitud de cauce 10 km $n=0.040$, lluvia de 12 horas.
3. Longitud de cauce 10 km $n=0.060$, lluvia de 3 horas.
4. Longitud de cauce 10 km $n=0.060$, lluvia de 12 horas.
5. Longitud de cauce 20 km $n=0.040$, lluvia de 3 horas.
6. Longitud de cauce 20 km $n=0.040$, lluvia de 12 horas.
7. Longitud de cauce 20 km $n=0.060$, lluvia de 3 horas.
8. Longitud de cauce 20 km $n=0.060$, lluvia de 12 horas.

En cada una de las figuras se han trazado los valores correspondientes a distintas rugosidades y duraciones de la precipitación en la cuenca aguas arriba (lo que condiciona el volumen del hidrograma), caudales y anchos de la sección de aguas altas.

Figura 7.19. Laminación en función de la pendiente ($L=10$ km, $n=0.040$, 3h) Figura 7.20. Laminación en función de la pendiente ($L=10$ km, $n=0.040$, 12h)

Figura 7.21. Laminación en función de la pendiente ($L=10$ km, $n=0.060$, 3h) Figura 7.22. Laminación en función de la pendiente ($L=10$ km, $n=0.060$, 12h)

Figura 7.23. Laminación en función de la pendiente ($L=20$ km, $n=0.040$, 3h) Figura 7.24. Laminación en función de la pendiente ($L=20$ km, $n=0.040$, 12h)

Figura 7.25. Laminación en función de la pendiente ($L=20$ km, $n=0.060$, 3h) Figura 7.26. Laminación en función de la pendiente ($L=20$ km, $n=0.060$, 12h)

7.3. COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE MUSKINGUN-CUNGE CON MODELOS BIDIMENSIONALES

7.3.1. Introducción

A lo largo del presente trabajo se han realizado una serie de modelos bidimensionales tanto con cauces “prismáticos” como naturales, teniendo presente que actualmente la práctica habitual es calcular los tránsitos con métodos aproximados (como el de Muskingum-Cunge, uno de los más empleados). A fin de cuantificar el error cometido en ese tipo de modelos distribuidos, se han comparado los resultados de cada tránsito ejecutado mediante HEC-HMS con el método de Muskingum-Cunge con su simulación bidimensional realizada en InfoWorks ICM.

Este epígrafe muestra el grado de exactitud que ofrece el método de Muskingum-Cunge al contrastarlo con el modelo 2D equivalente en el caso de modelos “prismáticos”. Posteriormente se analizarán los rangos de aplicación de esta metodología, en función de los parámetros del tránsito para los que la aproximación es mejor.

7.3.2. Criterios de comparación

Dado que se han realizado modelos HEC-HMS en paralelo con cada modelo bidimensional, se dispone de un grupo importante de resultados para realizar la comparación. En un primer momento se han considerado en su totalidad y posteriormente se han analizado por grupos empleando los criterios del análisis dimensional que permiten agrupar las variables que afectan al fenómeno en monomios (ver Anejo D, *Análisis dimensional*). La ecuación final obtenida es:

$$\frac{Q_s}{Q} = \Phi \left(\frac{H}{L}, \frac{L}{B}, \frac{nQ}{L^{8/3}}, \frac{V}{L^3} \right)$$

Siendo:

- H = Desnivel del cauce
- L = Longitud del cauce.
- B = Ancho del cauce.
- n = Numero de Manning.
- V = Volumen del hidrograma.
- Q = Caudal al inicio del cauce.
- Q_s = Caudal al final del tránsito.

Todos los monomios anteriores afectan al error cometido. En los Capítulos 7 y 8 se analiza con detalle esta influencia, así como se proponen alternativas para obtener la sección tipo de ocho puntos que se aplica en el método de Muskingum-Cunge. A nivel de bibliografía existe poca que haga referencia a este tema, aunque ya es citada por varios autores (Ponce, 1978; Moussa y Bocquillon, 2000; Perumal y otros, 2001, 2007, 2008; Heatherman, 2008; Elbashir, 2011, etc.).

7.3.3. Error en los modelos prismáticos

Se ha analizado la correlación entre la laminación en porcentaje del modelo bidimensional con la obtenida en el modelo HEC-HMS (método de Muskingum-Cunge) para la totalidad de los casos.

Como ya se ha indicado, el porcentaje de laminación se ha determinado según la expresión:

$$L (\%) = (Q_{pE} - Q_{pS}) / Q_{pE}$$

en la que:

Q_{pE} = Caudal pico de entrada

Q_{pS} = Caudal pico de salida

Figura 7.27. Correlación entre el factor de laminación de los modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge (totalidad de modelos prismáticos)

La figura anterior muestra una buena correlación entre los resultados de laminación derivada de la aplicación del método Muskingum-Cunge de sección de ocho puntos frente a los resultados del modelo bidimensional para la totalidad de los modelos prismáticos.

- Recta de regresión. $Y = 0.8456 x + 0.2571$
- Coeficiente de correlación $R^2 = 0.97$

Los valores muestran un **sesgo del lado de la seguridad en el porcentaje de laminación** en los tránsitos calculados mediante el método de Muskingum-Cunge.

En el gráfico siguiente se analiza la distribución de dicho sesgo. Como puede observarse, las diferencias entre ambos métodos crecen más rápido a partir del 5% de laminación:

Figura 7.28. Diferencias en laminación entre modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge (totalidad de modelos prismáticos)

Análogamente, en la gráfica siguiente se muestra el porcentaje de error cometido en la laminación obtenida con el método Muskingum-Cunge en referencia al modelo 2D, considerado el de referencia, para todos los modelos realizados, clasificados únicamente por su ordinal. Dicho error se ha contabilizado conforme a:

$$error (\%) = (Q_{2D} - Q_{HMS}) / Q_{2D}$$

Donde:

Q_{2D} = Caudal pico laminado obtenido en el modelo bidimensional

Q_{HMS} = Caudal pico laminado obtenido de la aplicación en HEC-HMS del método de Muskingum-Cunge de 8 puntos

Nótese que el error en este caso es diferente que en los esquemas anteriores, puesto que se está analizando el error entre las predicciones de los modelos bidimensionales y el método de Muskingum-Cunge, mientras que antes se analizaba el porcentaje de laminación referido al caudal de entrada.

Figura 7.29. Error en la laminación de los modelos basados en el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos (totalidad de modelos prismáticos)

En la figura anterior vuelve a ponerse de manifiesto que existe una concentración del error en un grupo reducido de modelos, mientras que en el resto el error es muy limitado. Este indicio propicia el análisis realizado en el capítulo 9 en referencia a los **rangos de aplicación** efectiva del método de Muskingum-Cunge.

CAPÍTULO 8. DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN PARA EL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE DE 8 PUNTOS

8.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el nuevo procedimiento propuesto para la estimación de la sección de 8 puntos óptima requerida en el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos. Adicionalmente, con el fin de ilustrar su aplicación, se emplea en uno de los tramos de cauces naturales simulados en el presente trabajo.

8.2. DATOS NECESARIOS PARA EL MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE

Conforme a la implementación del método de Muskingum-Cunge en HEC-HMS vía sección de 8 puntos, los datos necesarios son:

- Pendiente media del tramo.
- Longitud del cauce.
- Sección tipo de ocho puntos representativa del cauce.
- Rugosidad n de Manning repartida en bancadas y lecho.

Como resulta lógico es necesario que este grupo de datos sea sensiblemente uniforme en el tramo de cauce analizado, cosa que no resulta sencilla ni fácil de cuantificar.

En la figura adjunta se incluye una imagen del programa HEC-HMS con los parámetros necesarios.

Figura 8.1. Datos para el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos

En el presente capítulo se incluye una metodología original para obtener estos parámetros, basada en cálculos en régimen permanente, que permiten no sólo estimar los parámetros sino también contrastar la uniformidad del tramo ante estos mismos parámetros.

8.3. METODOLOGÍA

La metodología de obtención de los parámetros que se utilizarán en el método de Muskingum-Cunge se basa en criterios hidráulicos frente a los habituales criterios geométricos utilizados. Por ejemplo, para el caso del dato de pendiente, en lugar de optar por la pendiente media geométrica se calcularán las cotas de las láminas del agua para varios caudales, adoptándose una pendiente representativa en función de las pendientes de energía obtenidas. En el Anejo C, *Sección equivalente de ocho puntos*, se desarrolla con detalle esta metodología.

Esta metodología se compone de las siguientes etapas, cada una conforme a los datos requeridos anteriormente en la metodología de Muskingum-Cunge de 8 puntos:

- Pendiente media del cauce: mediante la simulación de diversos caudales se estima la pendiente media de energía para el cauce.
- Longitud del cauce: con los resultados anteriores se estima igualmente la longitud efectiva del tramo de cauce.
- Sección de 8 puntos: se analizan los resultados desde el punto de vista hidráulico y se estima la sección en dos mitades diferenciadas, obteniendo los puntos característicos mediante la intersección de las rectas de regresión que se construyen con los resultados anteriores.
- Rugosidad n de Manning: promediada en base a datos disponibles (por ejemplo a partir de datos del CORINE).

En la figura siguiente se incluye una planta del tramo de cauce utilizado en este apartado para desarrollar la metodología, se trata de un tramo del río Esla en una zona de cauce trenzado con dificultades para determinar una sección que lo caracterice.

Figura 8.2 Planta de un tramo trenzado del río Esla

8.3.1. Pendiente media del cauce

En un primer paso, con el objetivo de determinar una pendiente significativa del tramo de cauce analizado, se realizan cálculos hidráulicos bidimensionales de distintos caudales, desde uno de valor muy bajo que permita determinar el cauce inicial de aguas bajas hasta el máximo caudal que se

necesite evaluar. En el desarrollo del trabajo se ha contrastado que son suficientes entre 8 y 10 caudales.

Una vez calculados los modelos hidráulicos se determinan las cotas del agua en varias secciones transversales con el objetivo de determinar la uniformidad del tramo y apreciar si existen cambios de tendencia en la pendiente, ver figura adjunta.

Figura 8.3. Pendientes hidráulicas del cauce del río Esla (ES-01)

Como se observa en la figura anterior se puede indicar:

- Las pendientes hidráulicas del cauce son muy similares en su conjunto.
- El tramo considerado es homogéneo con relación a la pendiente.
- Sólo el caudal menor, $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$, presenta alguna variación local de la pendiente.

Por lo que de forma bastante objetiva se puede afirmar que el tramo de cauce considerado es suficientemente homogéneo con relación a la pendiente. Si esto no fuera así habría que aplicar el procedimiento en cada subtramo de cauce homogéneo.

Para poder elegir una pendiente significativa se han calculado las pendientes medias entre las distintas secciones consideradas (ver figura 8.3).

Q (m ³ /s)	10	200	445	600	800	1000	1500	2000	2500
Pendiente	0.001100	0.001078	0.001072	0.001070	0.001072	0.001075	0.001079	0.001082	0.001084

Tabla 8.1. Pendientes medias en el cauce del Esla (ES-01)

Como se observa en la tabla, la uniformidad de las pendientes es muy alta.

Dentro de los perfiles hidráulicos se ha elegido el de 2000 m³/s como significativo y con este perfil se ha realizado un ajuste lineal para confirmar su uniformidad a lo largo del cauce (ver figura adjunta).

Figura 8.4. Pendiente hidráulica media del cauce del río Esla (ES-01)

La pendiente media considerada como de referencia es de 0.001078.

8.3.2. Longitud del cauce

En un segundo paso, para estimar la longitud del cauce se ha considerado un eje (ver figura adjunta), que sigue al flujo principal en aguas altas, por lo que se ha presentado el vector velocidad de forma que se compruebe que con los caudales medios y altos el vector velocidad sigue sensiblemente el eje considerado. La longitud considerada en estas condiciones es de 23 712 m.

Figura 8.5. Vector velocidad y eje principal del flujo

8.3.3. Sección tipo de ocho puntos

El tercer paso implica la determinación de la sección tipo del cauce. Por lo general esto resulta muy complejo e inexacto, ya que para su estimación habitualmente se realizan una serie de secciones transversales y pese a las grandes diferencias entre ellas, es necesario elegir una como sección característica. La propuesta de criterios para obtener la sección de ocho puntos se basa en el conocimiento del comportamiento hidráulico de la sección.

Considérese un tramo de cauce en el que se han discreteado distintas zonas por medio de secciones transversales producidas por el corte del MDT por planos π_i ; ver figura adjunta, en la que se ha dibujado la intersección del plano con el contorno del cauce.

Figura 8.6. Tramo de cauce con las superficies de agua para distintos caudales

Sean L_i las distancias entre las secciones definidas, si se conoce la superficie del agua para distintos caudales circulantes en el tramo de cauce en régimen permanente S_i , se puede definir la intersección de estas superficies con los planos π_i . Si consideramos los anchos medios T_i de estas secciones se puede expresar el volumen definido entre dos superficies con la expresión:

$$\Delta V = \frac{(S_n + S_{n+1})}{2} \Delta Z$$

Por otra parte este mismo volumen puede expresarse como la suma de los volúmenes parciales definidos entre las sucesivas secciones. (Ver figura adjunta).

Figura 8.7. Sección en el tramo de cauce

La expresión del volumen será

$$\Delta V = \sum L_i \frac{(T_n^i + T_{n+1}^i)}{2} \Delta Z$$

Donde la longitud L_i es el valor de las distancias entre las sucesivas secciones transversales y T_n^i es el ancho medio de la sección entre cada dos secciones.

Igualando ambos volúmenes se tiene:

$$\frac{(S_n + S_{n+1})}{2} \Delta Z = \sum L_i \frac{(T_n^i + T_{n+1}^i)}{2} \Delta Z$$

O bien

$$\frac{(S_n + S_{n+1})}{2} = \sum L_i \frac{(T_n^i + T_{n+1}^i)}{2}$$

Si se considera que los sucesivos tramos de cauce son del mismo ancho se tiene $L = \sum L_i$, luego:

$$\frac{(S_n + S_{n+1})}{2} = L \frac{(T_n^i + T_{n+1}^i)}{2}$$

Si se considera la sección media S_i y el T_i según:

$$S_i = \frac{(S_n + S_{n+1})}{2}; \quad T_i = L \frac{(T_n^i + T_{n+1}^i)}{2}$$

Queda la expresión:

$$T_i = \frac{S_i}{L}$$

La expresión anterior puede ser aplicada a cualquier zona de cauce delimitada por secciones transversales. Adicionalmente si se considera un eje del río, esta expresión permitiría calcular el ancho de la sección separando ambas márgenes, dado que este fundamento teórico es igualmente aplicable a cada margen por separado.

Por último, una vez logrado un gráfico de cotas anchos con puntos en la margen izquierda y derecha, se puede transformar esta sección en una de ocho puntos.

Figura 8.8 Gráfico cotas anchos medios de las superficies de agua para distintos caudales

Como es lógico se obtendrá un punto para cada uno de los cálculos hidráulicos realizados, el paso a la sección equivalente de ocho puntos puede hacerse por linealización de varios tramos de la curva como se puede apreciar en la figura adjunta:

Figura 8.9 Gráfico cotas anchos margen derecha con rectas de regresión

En la figura anterior el punto 7 se obtendrá como intersección de la línea del punto 6 al 7 con la recta de regresión de los puntos del final de la curva.

La cota del punto 8 se obtendrá por intersección de esa recta de regresión con la vertical a la distancia del último punto.

En la figura adjunta se incluyen las curvas de margen izquierda y derecha de forma conjunta y la sección de ocho puntos obtenida con los criterios descritos:

Figura 8.10 Gráfico sección equivalente de 8 puntos

En el gráfico se pueden apreciar los criterios de aproximación a la sección esquemática de ocho puntos, basándose en considerar el cauce de aguas bajas a partir de un caudal muy bajo (en el ejemplo $10 \text{ m}^3/\text{s}$), "buscando" en cada margen tres tramos lo más lineales para completar la sección.

8.3.4. Rugosidad n de Manning

El cuarto paso implica la introducción de la rugosidad n de Manning. En este caso la rugosidad utilizada se basa en el CORINE, por lo que se trata de áreas de rugosidad (ver figura adjunta).

Figura 8.11 Zonas de rugosidad

La forma de pasar de estas zonas de rugosidad a las que el modelo HEC-HMS utiliza (n en el cauce central y en cada bancada), puede realizarse calculando el valor medio de la n en el cauce de aguas bajas que ya ha sido calculado en un modelo hidráulico 2D, y por otra parte determinando los valores medios de n en ambas márgenes, esto último en la zona afectada por cada caudal, por ello estas rugosidades de las bancadas podrían variar para cada caudal que se calcule.

8.4. CÁLCULOS REALIZADOS

Con el fin de comparar los resultados obtenidos aplicando este procedimiento y los datos resultantes del modelo bidimensional de referencia, se han realizado los cálculos siguientes:

8.4.1. Modelo bidimensional

Se han realizado tres cálculos con el modelo bidimensional correspondientes a los caudales de 1000, 1500 y 2000 m³/s, utilizando una malla con las características.

- Rugosidad de Manning obtenida del CORINE (Ver figura 8.11).
- Modelo de 1.113.000 elementos.
- Condición de borde a la entrada, caudal repartido en una línea perpendicular al cauce.

- Condición de borde a la salida de "pendiente normal", de forma que el agua en la sección de salida mantiene la pendiente media del tramo.
- Hidrograma de entrada tipo SCS, correspondiente a una lluvia de duración 12 horas.

Los resultados del modelo con el caudal de 2000 m³/s pueden apreciarse en la figura adjunta.

Figura 8.12 Laminación para el caudal de 2000 m³/s, modelo 2D

8.4.2. Modelo HEC-HMS

Utilizando el mismo hidrograma anterior es decir del tipo SCS, correspondiente a una lluvia de duración 12 horas, se ha realizado un modelo HEC-HMS de tránsito por el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos basado en el procedimiento descrito, con las siguientes características:

- Longitud: 23 712 m.
- Pendiente: 0.001078
- Rugosidad n de Manning: (0.0546 / 0.049 / 0.0546)
- Sección de ocho puntos:

Punto	x	y
1	0.00	714.68
2	78.97	713.69
3	603.44	711.83
4	702.60	709.62
5	770.68	709.62
6	816.92	711.83
7	1097.46	713.12
8	2284.94	714.54

Los resultados para el caudal de 2000 m³/s pueden apreciarse en la figura adjunta:

Figura 8.13 Laminación para el caudal de 2000 m³/s, Muskingum-Cunge

8.5. CONCLUSIONES

El contraste de los cálculos llevados a cabo con el procedimiento propuesto, confirman que la metodología de obtención de los parámetros (área, sección tipo de ocho puntos, longitud, etc...), es apropiada permitiendo, como se aprecia en la figura 8.14 y tabla 8.2, lograr unos resultados muy similares:

Figura 8.14 Laminación para distintos caudales

Q Inicio (m ³ /s)	HEC-HMS			Modelo 2D		
	Salida (m ³ /s)	Laminación (%)	Desfase (h)	Salida (m ³ /s)	Laminación (%)	Desfase (h)
1000	930.01	7.00	7.5	887.56	11.24	10.50
1500	1409.6	6.03	7.75	1405.79	6.28	7.5
2000	1900.9	4.96	6.91	1900.32	4.98	6.17

Tabla 8.2. Resumen de la comparación de resultados en el cauce del Esla (ES-01)

Por otra parte, tras una observación detallada del gráfico y la tabla anteriores, se puede apreciar que los resultados del modelo HEC-HMS son más aproximados en caudales altos que en caudales bajos.

En resumen, se puede indicar que:

- La aproximación obtenida con el nuevo procedimiento de obtención de la sección de ocho puntos aproxima el método hidrológico de Muskingum-Cunge a la solución hidráulica bidimensional con desviaciones bajas.
- Los caudales máximos son muy similares en ambos casos, sobre todo en caudales elevados.
- El tiempo de desplazamiento en ambos métodos es muy similar.
- Por el contrario, la forma del hidrograma en ambos métodos tiene mayor diferencia, sobre todo en los caudales menores. Esto se debe a que el modelo bidimensional tiene en cuenta las variaciones de la sección a lo largo del tramo mientras que el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos los ignora a favor de una sección representativa que minimice el error en el cálculo del caudal pico laminado y su tiempo de desplazamiento.

Finalmente, en el esquema siguiente puede verse resumida dicha metodología:

Figura 8.15 Esquema de la metodología propuesta

CAPÍTULO 9. RELACIONES FUNCIONALES (RANGOS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO)

9.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y RELACIONES FUNCIONALES

Para la determinación de los rangos de aplicación del método se ha aplicado la técnica del análisis dimensional (ver Anejo D, *Análisis dimensional*), partiendo de las magnitudes físicas que intervienen en el fenómeno, agrupadas como sigue:

- Parámetros geométricos: Longitud del cauce (L), desnivel del cauce (H), ancho total del cauce (B), pendiente (S).
- Parámetros del fluido: viscosidad (μ), densidad del agua (ρ_a), gravedad (g).
- Parámetros del flujo: Caudal máximo en la entrada (Q), Caudal máximo de salida (Q_s), volumen del hidrograma (V), rugosidad del cauce (n), tiempo de tránsito (T).

El análisis inicial de estas variables proporciona una serie de condicionantes previos que permiten simplificar las expresiones que las relacionan conforme a las siguientes premisas:

1. Se han tenido en cuenta ciertas dependencias geométricas, como por ejemplo, la pendiente como cociente entre el desnivel y la longitud, entre otras.
2. El flujo dentro del cauce puede considerarse en su totalidad turbulento desarrollado.
3. Un planteamiento totalmente ortodoxo: la pérdida de energía por rugosidad se debería abordar a través de la rugosidad absoluta; se considera que de cara a la utilización práctica, es conveniente utilizar el número de Manning n como medida de la rugosidad y como ya se ha analizado, la influencia de la distribución del valor de la n de Manning en el cauce es relativamente baja, por lo que se puede considerar un valor medio.

Con estas consideraciones se ha aplicado el análisis dimensional obteniendo una función dependiente de los siguientes monomios:

$$\Phi \left(\frac{H}{L}, \frac{L}{B}, \frac{nQ}{L^{8/3}}, \frac{V}{L^3}, \frac{Q_s}{Q} \right) = 0$$

O bien de forma explícita:

$$\frac{Q_s}{Q} = \Phi \left(\frac{H}{L}, \frac{L}{B}, \frac{nQ}{L^{8/3}}, \frac{V}{L^3} \right)$$

Donde:

- H = Desnivel del cauce
- L = Longitud del cauce.
- B = Ancho del cauce.
- n = Número de Manning.
- V = Volumen del hidrograma.
- Q = Caudal al inicio del cauce.
- Q_s = Caudal al final del tránsito.

La forma funcional de la relación entre ellas se determina con la información obtenida de los cálculos. La nomenclatura empleada en los monomios es:

$$\pi_1 = \frac{H}{L} \quad \text{Pendiente}$$

$$\pi_2 = \frac{L}{B} \quad \text{Relación longitud / ancho}$$

$$\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}} \quad \text{Relación caudal x rugosidad / longitud de cauce}$$

$$\pi_4 = \frac{V}{L^3} \quad \text{Relación volumen del hidrograma / almacenamiento}$$

El cuarto monomio en cierta forma relaciona el volumen del hidrograma con el volumen del cauce disponible para laminación del mismo, por lo que se ha reemplazado por el siguiente monomio con las mismas dimensiones y con mayor sentido práctico:

$$\pi_4 = \frac{V}{L B H} \quad \text{Relación volumen del hidrograma / almacenamiento del cauce}$$

A continuación se presentan los análisis realizados para acotar el error cometido en el método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

9.2. RANGOS DE APLICABILIDAD

En los esquemas siguientes el error cometido en el método de Muskingum-Cunge se ha contabilizado conforme a:

$$error = \frac{Q_{2D} - Q_{HMS}}{Q_{2D}}$$

Donde:

Q_{2D} es el caudal laminado obtenido en el modelo bidimensional

Q_{HMS} es el caudal laminado obtenido de la aplicación en HEC-HMS del método de Muskingum-Cunge de 8 puntos

La figura siguiente muestra el error relativo cometido en la laminación cuando varía la pendiente (monomio π_1):

Figura 9.1 Error en el método Muskingum-Cunge en función de la pendiente del cauce

De la figura anterior se deduce que para pendientes de 0.1% el error es muy superior a los que se producen para pendientes de 0.2%, coincidiendo con lo indicado por otros autores (Ponce, 1978; Moussa y Bocquillon, 2000,...etc.).

Esta diferencia se debe a la no consideración de las ecuaciones de Saint-Venant en la totalidad de sus términos.

En las figuras siguientes se muestra la influencia en el error cometido en función del resto de monomios considerados.

Figura 9.2 Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio B/L

En los resultados de este monomio no se puede sacar ninguna conclusión, con lo cual este monomio no se tendrá en cuenta en la identificación posterior de rangos de aplicabilidad del método.

Figura 9.3 Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $n Q / L^{8/3}$

En la figura anterior se muestra que el error producido con el método de Muskingum-Cunge es creciente con el monomio $\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}}$, por ello se ha considerado la condición de analizar el error a partir de un valor mínimo de este parámetro, es decir:

$$\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}} > 0.1$$

Los resultados se muestran en la figura siguiente, observándose que el error está acotado entre +2%, -2%.

Figura 9.4 Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $n Q / L^{8/3}$ superior a 0.1

El análisis del monomio $\pi_4 = \frac{V}{LBH}$ se ha realizado en la gráfica adjunta; en ella se observa que los errores se concentran en la zona de valores bajos del monomio.

Esa tendencia es alta ya que para valores del 0.025 del monomio el error cometido es del orden del 6%, que se sitúa por debajo del 2% si el valor del monomio supera el 0.01.

Figura 9.5 Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $V/L*B*H$

En figuras siguientes se ha representado el error cometido, acotando el monomio π_4 con valores superiores a 0.2.

Figura 9.6 Error en el método Muskingum-Cunge en función del Monomio $V / L * B * H$ superior a 0.2

Por otra parte se ha realizado un estudio de error cometido cuando se analizan los monomios

$$\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}} \text{ y } \pi_4 = \frac{V}{L B H} \text{ de forma conjunta, imponiendo los límites inferiores adoptados en el}$$

análisis anterior.

Los resultados muestran que el error es inferior al 2%, empleando tramos que cumplan con una u otra condición.

Figura 9.7 Error en el método Muskingum-Cunge con el monomio $n Q / L^{8/3} > 0.1$ o el $V / L * B * H > 0.2$

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos permite presentar el siguiente capítulo como resumen de actividades realizadas, conclusiones obtenidas y aportaciones originales.

10.1. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES GENERALES

- Se ha confirmado la **bondad** de los resultados obtenidos con los modelos hidráulicos bidimensionales, comparándolos con formulación clásica, modelos unidimensionales y fórmulas analíticas en régimen variable (rotura de diques), obteniendo resultados muy precisos.
- Se ha analizado exhaustivamente la **precisión espacial** de la malla en la herramienta de cálculo bidimensional mediante 26 simulaciones de tránsito, contrastando su rigor en función de la densidad de elementos de los distintos modelos en diversas secciones de control.
- Se han realizado adicionalmente 180 **cálculos de comparación de tránsito** tanto con el método de Muskingum-Cunge de sección de 8 puntos como con el programa de modelización bidimensional InfoWorks ICM, distribuidos según:

Tabla 10.1. Número de cálculos realizados

En estos modelos se ha introducido el hidrograma inicial del tramo, para determinar los parámetros que caracterizan el tránsito en un cauce:

- Hidrograma a la salida $Q=Q(t)$.
 - Caudal máximo a la salida Q_s .
 - Tiempo de pico a la salida T_p .
 - Porcentaje de laminación del cauce $L (\%) = (Q_{pE} - Q_{pS}) / Q_{pE}$
- Se ha desarrollado una **metodología óptima** para definir los parámetros utilizados en el método de Muskingum-Cunge de ocho puntos, basados en el uso de modelos bidimensionales sencillos en régimen permanente (ver figura 10.3), que permite la definición de una sección equivalente de ocho puntos para todo un tramo.
 - A través de la metodología del análisis dimensional, se han acotado los **rangos de aplicabilidad** del método de Muskingum-Cunge de 8 puntos.

10.2. APORTACIONES ORIGINALES

De los trabajos realizados en la presente tesis se han obtenido las siguientes aportaciones originales:

- **Análisis de sensibilidad** del tamaño de malla en la aplicación de los modelos bidimensionales al cálculo de tránsitos en cauces, cuyas conclusiones se han representado mediante **ábacos** de sencilla aplicación.

Figura 10.1. Ábaco 1, área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura 10.2. Ábaco 2, área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

- Desarrollo de una **nueva metodología** para la aplicación óptima y con criterios objetivos de la sección de ocho puntos utilizable en el método Muskingum-Cunge de 8 puntos.

Figura 10.3 Esquema de la metodología propuesta

Figura 10.4 Ejemplo de sección equivalente de ocho puntos

- Estimación del error cometido en la laminación con el método de Muskingum-Cunge comparándola con los modelos hidráulicos bidimensionales:

Ecuación $Y = 0.8456x + 0.2571$

Coefficiente de correlación $R^2 = 0.97$

Figura 10.5 Correlación entre el factor de laminación de los modelos 2D y el método de Muskingum-Cunge

- Establecimiento de **rangos de aplicabilidad** del método de Muskingum-Cunge utilizando los monomios adimensionales obtenidos del análisis dimensional, de forma que el error cometido es inferior al $\pm 2\%$ si se cumplen las condiciones:

Condición: $\frac{Qn}{L^{8/3}} > 0.1$ ó $\frac{V}{LBH} > 0.2$

Figura 10.6 Rango de error con las condiciones $\pi_3 = n Q / L^{8/3} > 0.1$ ó $\pi_4 = V/L^3 > 0.2$

10.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se han manifestado varias cuestiones susceptibles de ser estudiadas y que no han podido ser incluidas, pero que son continuación; como:

- **Utilización de los resultados de la modelización bidimensional en la cuantificación de los parámetros del método de Muskingum.** En la mayoría de los modelos de evento, si se utiliza el método de Muskingum resulta muy difícil la evaluación del parámetro X de almacenamiento y el parámetro k de tránsito, que podrían ser evaluados a partir de los resultados de los modelos 2D con procedimientos similares al utilizado en el calibrado con datos reales del tránsito.
- **Modelos hidrológicos completos con lluvia directa.** Con la capacidad actual de cálculo se podrían abordar modelos hidrológicos completos sin tener que acudir a modelización por sistemas de cuencas y tránsitos (modelos hidrológicos como el HEC-HMS).
- **Dentro del apartado anterior** se podría abordar una modelización mixta, como es un modelo bidimensional del cauce con inclusión lateral de los caudales obtenidos en otros modelos 2D y/o por métodos hidro-meteorológicos, como HEC-HMS.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Akers, B. and Bokhove O.** "Hydraulic Flow through a Channel Contraction: Multiple Steady States". APS/123-QED. 2007.
2. **Akan, A.O.** "Urban Storm water Hydrology". Technomic Publishing, Lancaster, PA. 1993.
3. **Archana, S., Rakesh, K.** "Artificial Neural Networks for Event Based Rainfall-Runoff Modeling", Journal of Water Resource and Protection, Vol. 4, 891-897, 2012.
4. **ASCE.** "Sedimentation Engineering". ASCE Manuals and Report on Engin. Practice nº 54, Vanoni, V. A. Editor, 1975.
5. **Asquith, W. H., Slade, R. M.** "Regional equations for estimation of peak stream flow frequency for natural basins in Texas." U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Rep. 96-4307, Austin, Tex., p. 68, 1997.
6. **Asquith, W. H., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., and Fang, X.** "Synthesis of rainfall and runoff data used for Texas Department of Transportation Research Projects 0-4193 and 0-4194." U.S. Geological Survey Open-File Rep. No. 2004-1035, Austin, Tex., 2004.
7. **Baláž, M., Danáčová, M., Szolgay, J.** "On the use of the Muskingum Method for the Simulation of Flood Wave Movements". 2010/3 Pages 14 – 20. Slovak Journal of Civil Engineering. 2010.
8. **Bates,** "Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models". P. D. 2003.
9. **Bates, K. J. Marks, M. S. Horritt.** "Hydrological processes", volume 17, issue 3, pages 537–557, 28, february, 2003.
10. **Bennis, S., and Crobeddu, E. (2007).** "New runoff simulation model for small urban catchments". Journal of Hydrologic Engineering, 12(5), 540-544.
11. **Bjerklie, D.M., Dingman, S.I. y Bolster, C.H.,** "Comparison of constitutive flow resistance equations based on the manning and chézy equations applied to natural rivers". Water Resource. Res., 41, W11502, 2005.
12. **Bladé i Castellet, Ernest,** "Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones". Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
13. **Brunner, G. W.** "HEC-RAS User's Manual". U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center Version 4. 1. January 2010.
14. **Bureau of Reclamation.** "Flood Hydrology manual". USDI, 1989.
15. **Carling, P. A. y Petts, G. E. (eds.).** "Lowland floodplain rivers", John Wiley and Sons, 302 pp., 1992.
16. **CEDEX.** "Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular". Informe técnico para la dirección general del agua del MARM. Centro de estudios hidrográficos del CEDEX, diciembre 2009.

17. **Clark, R.** "Water Quality Modeling-Case Studies. *Water Distribution Systems Handbook*", (edited by Mays, L.W.), McGraw-Hill, New York, 2000.
18. **Cleveland, T. G., Garcia, A., He, X., Fang, X. and Thompson, D. B.** "Comparison of physical characteristics for selected small watersheds in Texas as determined by automated and manual methods". Proc., Texas ASCE Section Fall Meeting, El Paso, Tex. 2005.
19. **Cleveland, T. G., Thompson, D. B., Fang, X., and He, X.** "Synthesis of unit hydrographs from a digital elevation model". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(2), 212-221, 2008.
20. **Cleveland, T. G., Thompson, D. B., Fang, X., and Li, M.-H.** "Establish effective lower bounds of watershed slope for traditional hydrologic methods – Final Report". Research Report 0-6382-1, Department of Civil and Environmental Engineering, Texas Tech University Lubbock, Tx. 2011.
21. **Cobby D.M., Mason, D.C., Horritt, M.S. y Bates, P.D.,** "Two dimensional hydraulic flood modeling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry", *Hydrological Processes* 17, 1979-2000, John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
22. **Cunge, J. A.** "On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 7, Nº 2, 1969, pp. 205-230. 1969.
23. **Cunge, J., Tang, X., Knight, D., y Samuels, P.** "Discussion and Closure: Volume Conservation in Variable Parameter Muskingum-Cunge Method." *J. Hydraul. Eng.*, 127(3), 239–240. 2001.
24. **Cunge, J. A.** "Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method: Discussion", *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 127(3), 239–239. 2001.
25. **Chen, C. L. And Chow, V. T.** "Hydrodynamics of mathematically simulated surface runoff." *Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series Nº 18*, Univ. Of Illinois, Urbana III, Agosto, 132 p. 1968.
26. **Chen, C. N., and T. S. W. Wong.** "Critical Rainfall Duration for Maximum Discharge from Overland Plane". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, 1993, pp. 1040–1045.
27. **Chow, V.T.** "Open Channel Hydraulics". New York: McGraw-Hill Book Co., 1959.
28. **Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W.** "Applied Hydrology". McGraw-Hill, New York. 1988.
29. **Chow, V.T.** "Hidráulica de canales abiertos". Ed. Mc Graw Hill. Bogotá. 1994.
30. **Dhakal, N., Fang, X., Cleveland, G. T., Thompson, D., Asquith, W. H., and Marzen, L. J.** "Estimation of volumetric runoff coefficients for Texas watersheds using land use and rainfall runoff data". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 43-54. 2012.
31. **Eagleson, P. S.** "Dynamic Hydrology". McGraw-Hill, New York, 1970.
32. **Elbashir, S.:** "Flood Routing in Natural Channels Using Muskingum Methods". Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the DIT's Master of Engineering Computation. 2011.
33. **Fang, Xing, Thompson, David B., Cleveland, Theodore G., Pradhan, P. and Malla Ranjit** "Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by

- Automated and Manual Methods*". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, march/april, 2008.
34. **Felicitimo Á. M.** "*Modelos Digitales del Terreno: Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales*". Ed. Pentalfa ediciones. Oviedo. 1994.
 35. **Fenton, J. D.** "*Accuracy of Muskingum-Cunge flood routing*", Technical report, Alternative Hydraulics Paper 3. 2011.
 36. **Fischenich, C.** "*Resistance due to vegetation*", EMRRP-SR-07. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 2000.
 37. **Ford, D. and Hamilton, D.** "Computer Models for Water-Excess Management, in *Water Resources Handbook*". Edited by L.W. Mays, McGraw-Hill, New York, 1996.
 38. **French, R. H.** "*Hidráulica de Canales Abiertos*". Méjico: McGraw- Hill, 1988.
 39. **Gall M., B. J. Boruff, and S. L. Cutter.** "*Assessing flood hazard zones in the absence of digital flood plain maps: a comparison of alternative approaches*", *Natural Hazards Review* 8(1): 1-21. 2007.
 40. **Garbrecht, J. and Brunner, G.** "*Hydrologic Channel-Flow Routing for Compound Sections*" *J. Hydraul. Eng.*, 117(5), 629–642. 1991.
 41. **Giorgini, A. y Mendicino, G.** "*Reliability of the Muskingum Method for the Prediction of Flood Wave Propagation*", *Proceedings of the International Conference on Hydrology and Water Resources*, New Delhi, India, Volume 16 of the series *Water Science and Technology Library* pp 297-323. December 1993.
 42. **Grayman, W.M. and Kirmeyer, G.J.** "*Quality of Water in Storage. Water Distribution Systems Handbook*". (edited by Mays, L.W.), McGraw-Hill, New York, 2000.
 43. **Grimaldi, S., Petroselli, A., Romano, N.,** "*Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modeling in small and ungagged basins*". *Hydrol. Process*, 2012.
 44. **Haan, C.T., Johnson, H.P. y Brakensiek, D.L. eds.** "*Hydrologic Modeling of Small Watersheds*". ASAE Monograph 5, 1982.
 45. **Haestad Methods Inc.** "*Computer applications in hydraulic engineering*". 5th Ed., Waterbury, Conn. 2003.
 46. **He, X.** "*Comparison of gamma, Rayleigh, Weibull, and NRCS models with observed runoff data for central Texas small watersheds*". Master's thesis, Univ. of Houston, Houston. 2004.
 47. **Heatherman, W.** "*Muskingum-Cunge Revisited. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*" pp. 1-11. 2004.
 48. **Heatherman, W. J.** "*Flood Routing on Small Streams: A Review of Muskingum-Cunge, Cascading Reservoirs, and Full Dynamic Solutions*". Submitted to the graduate degree program in Civil Engineering and the Graduate Faculty of the University of Kansas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2008.
 49. **Henderson, FM.** "*Open Channel flow*". Macmillan, N.Y., 1996.
 50. **Hill, J., and Neary, V. S.** "*Factors affecting estimates of average watershed slope*". *J. Hydrol. Eng.*, 10(2), 130–140. 2005.

51. **Hoggan, D.H.** "Computer-Assisted Floodplain Hydrology and Hydraulics". Ed. Mc Graw-Hill. New-York. 1966.
52. **Horrit, M.S.** "A methodology for the validation of uncertain flood inundation models". Journal of Hydrology 326, pp 153-165, 2006.
53. **Ivanov, V. Y., Vivoni, E. R., Bras, R. L., and Entekhabi, D.** "Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically-based approach". Journal of Hydrologic 298(1) 80-111. 2004.
54. **Jia, Y., Ni, G. Kawahara, Y., and Suetsugi, T.** "Development of WEP model and its application to an urban watershed". Hydrological Processes, 15(11), 2175-2194. 2001.
55. **Johnson. R.W.** "The handbook of fluid dynamic". C R C. Press, 1998.
56. **Jones, S.B.** "Choice of space and time steps in the Muskingum-Cunge flood routing method". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Volume 71 Issue 3, Part. 2. pp. 759-772. September 1981.
57. **Jones, S.B., Pratt, C. J.** "Choice of space and time steps in the Muskingum-Cunge flood routing method". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Volume 73 Issue 3, Part. 2. pp. 679-688. September 1982.
58. **Kalinin, G.P., Milyukov, P.I.** "O raschete neustanovivshegosya dvizheniya vody v otkrytykh ruslakh" (On the computation of unsteady flow in open channels). Met. i Gydrolgia Zhurnal 10, 10-18. 1957.
59. **Kalinin, G.P., Milyukov, P.I.** "Priblizheniy raschete neustanoviv-shegosya dvizheniya vodnyh mas" (Approximation of unsteady flow) Trudi CIP, 66. Leningrad. 1958.
60. **Koussis, A. D.:** "Comparison of Muskingum method difference scheme Journal of Hydraulic Division", ASCE, 106(5), 925-929, 1980.
61. **Koussis, A. D.:** "Accuracy criteria in diffusion routing: a discussion. Journal of Hydraulic Division", ASCE, 109(5), 803-806, 1983.
62. **Koussis, A. D.** "Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method", Hydrological Sciences Journal, 54:1, Pp. 43-61. 2009.
63. **Li, M.-H., Chibber, P., and Cahill, A. T.** "Estimating time of concentration of overland flow on very flat terrains". 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida. 2005.
64. **Li, M.-H., and Chibber, P.** "Overland flow time of concentration on very flat terrains." Transportation Research Record, 2060, 133-140, doi: 10.3141/2060-15. 2008.
65. **Liggett, J. A. and Cunge, J. A.,** "Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations in Unsteady Flow in Open Channels", Vol. 1, K. Mahmood and V. Yevjevich, editors. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado. 1975.
66. **Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H.** "Hydrology for Engineers". 3d. Ed. McGraw-Hill, New York, 1982.
67. **Loganathan, G.V., Kibler, D.F. and Grizzard, T.J.** "Urban Storm water Management. Water Resources Handbook". Edited by Mays, L.W. McGraw-Hill, New York, 1996.

68. **López-Barrera, D., García-Navarro, P., Brufau, P., and Burguete.** "Diffusive-Wave Based Hydrologic-Hydraulic Model with Sediment Transport. I: Model Development." *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(10), 1093-1104. 2012.
69. **Maidment, D. R. ed.** "Handbook of Hydrology". McGraw Hill, New York, 1993.
70. **Malla, R.** "Estimating time parameters of direct runoff hydrograph and unit hydrograph for Texas watersheds". Master's thesis, Lamar Univ., Beaumont, Tex. 2004.
71. **Martínez Olmos E.** "Estudio experimental de cuencos amortiguadores en aliviaderos con cajeros altamente convergentes", Tesis (doctoral), E.T.I. Caminos C y P, UPM, 2011.
72. **Masch, F.D.** "Hydrology". Hydraulic Engineering Circular, N° 19, FHWA-10-84-15, Federal Highway Administration, U.S. Department of the Interior, McLean, VA, 1984.
73. **McCarthy, G. T.** "The Unit Hydrograph and Flood Routing". Manuscrito no publicado en North Atlantic Division Conference. US Army Corps of Engineers. 1938.
74. **McCarthy, G. T.** "Flood Routing, Chap. V of 'Flood Control'". The Engineer School, Fort Belvoir, Virginia, pp. 127-177. 1940.
75. **McCuen, R. H.** "Hydrologic analysis and design", 2nd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J. 1998.
76. **McCuen, R. H.** "Uncertainty analyses of watershed time parameters". *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5), 490-498. 2009.
77. **Merkel W. H.** "Muskingum-Cunge Flood Routing Procedure in NRCS Hydrologic Models". Presented at the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. July. 2002.
78. **Miller, W. A., and Cunge, J. A.** "Simplified Equations of Unsteady Flow." Chapter 5 in *Unsteady Flow in Open Channels*, Vol. I. Mahmaud, K. and Yevjevich, V, editors. Water Resources Publications, Fort Collins, Colo., 216-242. 1975.
79. **Ministerio de Medio Ambiente.** "Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico". Servicio de Publicaciones, 5ª Reimpresión. 2004.
80. **Mintegui Aguirre, J.A. y Robredo Sánchez, J.C.** "Formulación de modelos para la caracterización de las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico-forestal" *Actas del II Congreso Forestal Español Irati-97*, tomo II, pp. 425-430. 1997.
81. **Moussa, R. Y Bocquillon.** "Approximation zones of the Saint-Venant equations for flood routing with overbank flow", *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 251-261, 2000.
82. **Montes, S.,** "Hydraulics of open channel flow". ASCE Press, Reston, Va., 564- 580. 1998.
83. **Moramarcos, T., and Singh, V. P.** "Accuracy of kinematic wave and diffusion wave for spatial-varying rainfall excess over a plane". *Hydrological Processes*, 16(17), 3419-3435. 2002.
84. **Nash, J. E.** "A note on the Muskingum flood-routing method." *Journal of Geophysical Research*, 64(8), 1053-1056. 1959.
85. **Natural Resource Conservation Service (NRCS).** "Urban hydrology for small watersheds". Technical Release 55, Washington, D.C. 1986.
86. **Naudascher, E.** "Hidráulica de Canales", Ed Limusa, páginas 315 a 327. 2001.

87. **O'Loughlin, G., Huber, W. y Chocat, B.** "Rainfall-Runoff processes and modeling", Journal of Hydraulic Research, 2010.
88. **Perumal, M., O'Connell, P. E. y Ranga Raju, K. G.:** "Field Applications of a Variable-Parameter Muskingum Method", J. Hydrol. Eng., ASCE, 6(3), 196–207, 2001
89. **Perumal, M. and Sahoo, B.** "Applicability criteria of the variable parameter Muskingum stage and discharge routing methods". Water Resour. Res., 43(5): 1–20. 2007.
90. **Perumal, M. and Sahoo, B.** "Volume conservation controversy of the variable parameter Muskingum-Cunge method". J. Hydraul. Engng ASCE, 134(4): 475–485. 2008.
91. **Perumal, M.** "Unification of Muskingum difference schemes". J. Hydraul. Engng ASCE, 115(4): 536–543. 1989.
92. **Perumal, M.** "Multilinear Muskingum flood routing method". J. Hydrol., 133(3-4): 259–272. 1992.
93. **Perumal, M.** "The cause of negative initial outflow with the Muskingum method". Hydrol. Sci. J., 37(4): 391–401. 1992.
94. **Perumal, M.** "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 1. Theory and solution procedure". Hydrol. Sci. J., 39(5): 431–442. 1994.
95. **Perumal, M.** "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification". Hydrol. Sci. J., 39(5): 443–458. 1994.
96. **Perumal, M.** "Removing some anomalies of the Muskingum method". Proceedings of International Conference on Water and Environment. 15–18, Bhopal. December 2003.
97. **Petaccchia, G., Natale, L., Savi, F., Velickovic, M., Zech, Y. & Soares-Fraza, S.** "Flood wave propagation in steep mountain rivers". Journal of Hydro informatics 15(1): 120-137. 2013.
98. **Pilgrim, D. H., and Cordery, I.** "Flood runoff". Handbook of hydrology, D. R. Maidment, ed., Chap. 9, McGraw-Hill, New York, 9.1–9.42. 1993.
99. **Ponce, V. M. and Yevjevich, V.:** "Muskingum-Cunge method with variable parameters", J. Hydraulic Division, ASCE, 104(12), 1663–1667, 1978.
100. **Ponce, V. M. y Chaganti, P. V.:** "Variable-parameter Muskingum-Cunge revisited", J. Hydrol., 162 (3–4), 433–439. 1994.
101. **Ponce, V. M. and Lugo, A.:** "Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing", J. Hydrol. Eng., ASCE, 6(2), 119– 124, 2001.
102. **Price, R. K.,** "Volume-conservative nonlinear flood routing", Journal of Hydraulic Engineering 135(10), 838–845. 2009.
103. **Price, R. K. ,** Flood Routing, in P. Novak, ed., "Developments in Hydraulic Engineering" Vol. 3, Elsevier Applied Science, chapter 4, pp. 129–173. 1985.
104. **Puls, L. G.** "Construction of flood routing curves". In House document 185, US 70th Congress, First Session Washington, DC. 1928.
105. **Ponce, V. M., Li, R. M. and Simons, D. B.** "Applicability of Kinematic and Diffusion Models". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, N° HY3, March, 1978.

-
106. **Ponce, V. M. and Yevjevich, V.** "Muskingum-Cunge Method with Variable Parameters". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, N° HY12, pp. 1663-1667, December, 1978.
107. **Ponce, V. M.** "Engineering Hydrology. Principles and Practices". Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
108. **Roberson, J.A., Cassidy, J.J. and Chaudhry. M.H.** "Hydraulic Engineering". 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998. 1997.
109. **Raber, G.T, Jensen, J.R, Hodgson, M.E, Tullis, J.A, Davis, B and Berglund, J** "Impact of lidar nominal post-spacing on demaccuracy and flood zone delineation". Photogrametric Engineering & Remote Sensing, Vol. 73, no. 7, july 2007, pp. 793-804.
110. **Rainald Löhner.** "Applied computational fluid dynamics techniques: an introduction based on finite element methods". John Wiley and Sons. Chinchester, uk; 366 pp. 2001.
111. **Rouse, H.** "Advanced mechanics of fluids". John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 274.1959.
112. **Roussel, M. C., Thompson, D. B., Fang, X., Cleveland, T. G., and Garcia, A. C.** "Timing parameter estimation for applicable Texas watersheds". Research Rep. No. 0-4696-2, Texas Department of Transportation, Austin, Tex. 2005.
113. **Schleiss, A.J., De Cesare, G., Franca, M.J., Pfister, M.** "River Flow 2014 International Conference on Fluvial Hydraulics". CRC Press. Taylor & Francis Group. London, UK. 2014.
114. **Shaw, E. M.** "Hydrology in Practice". Van Nostrand Reinhold (U.K.), Wokingham, England, 1983.
115. **Sheridan, J. M., Merkel, W. H., and Bosch, D. D.** "Peak rate factors for flatland watersheds". Applied Engineering in Agriculture, 18(1), 65-69. 2002.
116. **Simas, M. J., and Hawkins, R. H.** "Lag time characteristics in small watersheds in the United States". Proc., 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conf., Las Vegas. 2002.
117. **Singh, V. P.** "Elementary Hydrology." Ed. Prentice Hall. 1992.
118. **Singh, V. P., Jain, S. K., and Sherif, M. M.** "Errors of kinematic wave and diffusion wave approximations for time-independent flows with infiltration and momentum exchange included." Hydrological Processes 19(9), 1771-1790. 2005.
119. **Strelkoff, T.** "Modified-Puls Routing in Chuquatonchee Creek". U. S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Sep. 1980.
120. **Su, D. H., and Fang, X.** "Estimating traveling time of flat terrain by 2-dimensional overland flow model". Shallow flows, G. H. Jirka and W. S. J. Uijtewaald, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 629-635. 2004.
121. **Subramanya, K.** "Engineering Hydrology". 3rd Edition, Tata McGraw-Hill. 2008.
122. **Tang, X., Knight, D. W. and Samuels, P. G.:** "Volume conservation in Variable Parameter Muskingum-Cunge Method", J. Hydraulic Eng. (ASCE), 125(6), 610-620, 1999.
123. **Tang, X. and Samuels, P. G.:** "Variable Parameter MuskingumCunge Method for flood routing in a compound channel", J. Hydraulic Res., 37, 591-614, 1999.
124. **Task Committee on Sedimentation Manual.** "Sedimentation Engineering". Vito A. Vanoni, ed. ASCE, 1972.

-
125. **Thompson, D. B., Cleveland, T. G., Copula, D. B., and Fang, X.** "Loss-rate functions for selected Texas watersheds". FHWA/TX-08/0-4193-6, Texas Department of Transportation. 2008.
 126. **Thompson, D. B., Harle, H. K., Keister, H., McLendon, D., and Sandrana, S.** "Climatic adjustments of natural resource conservation service (NRCS) runoff curve numbers". Final Rep., Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Department of Civil Engineering, Texas Tech Univ., Lubbock, Tex. 2003.
 127. **Todini.** "A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach". Hydrol. Earth System Sci., 11: 1645–1659. 2007.
 128. **U. S. Army Corps of Engineers,** "HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual". Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, USACE, 2008.
 129. **U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.** "HEC-1, Flood Hydrograph Package, User's Manual Version 4.0". September 1990.
 130. **U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.** "HEC-HMS User's Manual". March 2000.
 131. **U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.** "HEC-HMS, Technical reference manual". March 2000.
 132. **U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.** "HEC-HMS, Applications Guide". December 2002.
 133. **U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division.** "Program Description and User Manual for SSARR Model, Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation". Portland, Oregon, issued September 1972, revised June 1975, revised April 1986 (Draft).
 134. **U. S. Department of Agriculture Soil Conservation Service.** "Urban hydrology for small watersheds". Tech. Release nº 55, June, 1986.
 135. **U. S. Soil Conservation Service.** "S.C.S. National". Engineering handbook section 4, Hidrology, Washington D.C., 1985.
 136. **Viessman, W. and Lewis, G. L.** "Introduction to Hydrology". 5th Ed., Pearson Education, Upper Saddle River, N.J. 2002.
 137. **Wang Y. Ch., Yu P. S. and Yang T. Ch.,** "Comparison of genetic algorithms and shuffled complex evolution approach for calibrating distributed rainfall-runoff model". Hydrol. Process. No. 24, 1015–1026 pp. 2010.
 138. **Wanielista, M., Kersten, R y Eaglin R.** "Hydrology: Water quantity and quality control". Second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1997.
 139. **Ward, R.C., Robinson, M.** "Principes of Hydrology". McGraw-Hill, N.Y. 1999.
 140. **Wong, T. S. W.** "Assessment of time of concentration formulas for overland flow". J. Irrig. Drain. Eng., 131(4), 383–387. 2005.
 141. **Yen, B. C. and Akan, A.O.** "Hydraulic Design of Urban Drainage Systems. Hydraulic Design Handbook", Edited by Mays, L.W., McGraw-Hill, New York, 1999.
 142. **Yoon, J. y Padmanabhan, G.** "Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models". J. Water Resour. Plann. Management. Div., ASCE, 119(5). Pp: 600–610. 1993.

143. **Zhang, J.B. y Chu, V.H.** "*Shallow Turbulent Flows by Video Imaging Method*", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, October, pp. 1164-1172, 2003.

ANEJO A. FLUJO EN RÉGIMEN UNIFORME, VARIADO Y VARIABLE

A.1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este anejo es abordar la situación hidráulica que se plantea en el tránsito de avenidas en un cauce utilizando diferentes métodos; solución analítica, modelo unidimensional y modelo bidimensional. Con el objetivo de validar la metodología de la modelización bidimensional, que si bien está ampliamente aceptada en toda la bibliografía consultada, se ha utilizado en modelos de rotura de diques lógicamente en régimen variable. Para ello se han analizado:

- Flujo en un plano indefinido con pendiente constante (flujo teórico en ladera).
- Régimen variado (curvas de remanso) (con soluciones analíticas y modelos 1D y 2D).
- Régimen variable (rotura de diques) utilizando soluciones analíticas y modelos 2D.

A.2. MOVIMIENTO PLANO UNIFORME

El objeto de este apartado es abordar el flujo hidráulico que se plantea en la ladera de un cauce con métodos analíticos y modelos matemáticos.

Se considera un cauce rectangular de 50 metros de ancho y hasta 20000 metros de largo (con varias rugosidades), se supone movimiento plano en el que no se incluye el rozamiento con los laterales. La pendiente es de cinco milésimas (5 ‰). En él se han analizado:

- Régimen uniforme cuando circula un caudal total de 500 m³/s.
- Curva de remanso.
- Flujo vertiendo por encima de un talud utilizando la formulación del vertido sobre pared gruesa.

En todos los casos anteriores se analizará solución teórica, modelización 1D con HEC-RAS y modelización 2D con InfoWorks ICM.

A.2.1. FLUJO EN RÉGIMEN UNIFORME

El primer caso consiste en el equivalente a un canal cilíndrico de rugosidad constante con valor de pendiente también constante e igual a 5 ‰. Se estudiará con los dos modelos y con las fórmulas simplificadas.

A.2.2. RESULTADO TEÓRICO EN RÉGIMEN UNIFORME

En el régimen uniforme la pérdida de carga por unidad de longitud es igual a la pendiente. En este caso, se recurre a la expresión de Manning, según la cual, la pérdida de carga es:

$$i = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_H^{\frac{4}{3}}}$$

i : Pérdida de carga por unidad de longitud.

n : número de Manning, de valor 0.060 en la hipótesis actual.

v : velocidad en m/s.

R_H : radio hidráulico de la sección.

Si I es la pendiente del canal, la expresión queda finalmente:

$$I = i = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_H^{\frac{4}{3}}}$$

Por otro lado, de la ecuación de continuidad $Q = v S$, siendo S la sección mojada, y despejando en la ecuación de Manning, queda:

$$S^2 R_H^{4/3} = \frac{n^2 Q^2}{I}$$

La ecuación permite calcular los valores de calado y velocidad teóricos.

Se ha distinguido el caso en el que los **bordes no tienen rozamiento** (perímetro mojado = $b = 50$ m que es la base del canal) y en el que los **bordes sí tienen rozamiento** (perímetro mojado = $2xh + b$, siendo h el calado y b el ancho de la base del canal).

Para el caso de estudio de canal de base 50 m de ancho, rugosidad 0.060, caudal 500 m³/s y pendiente 5 ‰, se obtienen los siguientes resultados:

	RESUMEN DE RESULTADOS	
	CALADO (m)	VELOCIDAD (m/s)
CON ROZAMIENTO LATERAL	3.818	2.619
SIN ROZAMIENTO LATERAL	3.607	2.772

Tabla A.1. Resultados teóricos de calados y velocidades según la fórmula de Manning

A.2.3. MODELO UNIDIMENSIONAL: HEC-RAS

Se ha realizado un modelo HEC-RAS de un cauce cuasi-rectangular en el que se ha evitado el rozamiento con los bordes, para lograrlo se ha considerado un cauce rectangular de 20 metros de altura y 50 de fondo en el que a los cajeros se les da una mínima pendiente (un centímetro) de forma que se ha asignado un valor de la n de Manning de 0.060 para el cauce central que coincide con el fondo del rectángulo y un valor mínimo de la n de Manning ($n=0.001$) en los cauces laterales de forma que se evita el rozamiento con el contorno (Tabla A.2).

Punto	Distancia origen (m)	Cota (m)	n de Manning
1	0	220	0.001 0.060 0.001
2	0.01	200	
3	50	200	
4	50.01	220	

Tabla A.2. Sección tipo utilizada en el modelo HEC-RAS

Este modelo se utiliza también en las comprobaciones de las curvas de remanso.

Con los datos anteriores los resultados del modelo HEC-RAS en régimen uniforme son:

Calado 3.61 m

Velocidad 2.77 m/s

Es importante indicar que los resultados del modelo HEC-RAS tienen dos decimales de precisión, correspondientes a 1cm en el calado y 0.01 m/s en la velocidad.

A.2.4. MODELO BIDIMENSIONAL: ICM

Se ha realizado un modelo bidimensional que se ha utilizado para comprobar los resultados del movimiento uniforme, la curva de remanso en el vertido final y la sobre elevación de solera.

El modelo bidimensional se ha realizado basándose en un modelo digital del terreno (MDT) de pendiente constante sobre el que se ha incluido el vertido libre y la sobre elevación de la solera.

A.2.4.1. Modelo digital del terreno

El modelo hidráulico bidimensional requiere apoyarse en un modelo digital del terreno previo. Con este fin se ha creado un modelo triangular (TIN) que representa la geometría del canal.

A.2.4.2. Topología del modelo hidráulico

Sobre el modelo digital del terreno, se crea el polígono de simulación con un ancho máximo de malla de 5 m². Dentro del polígono de simulación se han insertado una serie de líneas de rotura en las que se apoyarán los triángulos, de esta manera se facilita la ordenación del flujo principal.

Como condición de contorno en los bordes del polígono se ha asignado "condición seca" o condición de vertido libre a la salida. La entrada de caudal se restringe al ancho del canal en el inicio, el modelo construido tiene una longitud de 20 km con un ancho de 50 m y pendiente 0.005, lo que permite comprobar un sólo modelo.

- Curva de remanso en el vertido libre del final del modelo.
- Régimen permanente en la zona central del modelo, suficientemente alejado del régimen variado de la salida.
- Sobreelevación de solera en la zona inicial del modelo, que se realiza con un polígono elevado 10 m sobre la solera.

En las imágenes adjuntas se incluye la distribución del mallado en la zona central (régimen uniforme) y en la zona con sobre elevación de solera en la que se han incluido zonas de malla con triángulos de menor tamaño.

Figura A.1. Polígono de malla sobre MDT, con las líneas de rotura adoptadas, en la zona central del modelo

Figura A.2. Polígono de malla, en la zona con sobreelevación de solera

A.2.4.3. Caudales

El caudal de cálculo adoptado es de 500 m³/s. El cálculo se realiza siempre en régimen variable por lo que se debe introducir un caudal constante. Para evitar distorsiones se introduce gradualmente desde 0. Una vez alcanzado el valor punta, se mantiene constante el tiempo suficiente que permita estabilizar el régimen permanente en todas las zonas del modelo:

Figura A.3. Hidrograma adoptado

A.2.5. RESULTADOS DEL MODELO 2D EN RÉGIMEN UNIFORME

Se utiliza el modelo en su zona central, en secciones no influidas por el remanso. Los resultados son de la sección PK_10000 (en el centro del modelo).

Calado 3.605 m

Velocidad 2.772 m/s.

Es importante indicar que el modelo bidimensional se ha realizado con una precisión de cálculo en calados de 0.001 m, mientras que los cálculos realizados con el modelo unidimensional HEC-RAS se ejecutan con precisión de un centímetro, si bien es suficiente para efectos prácticos, puede distorsionar la comparación de resultados entre ambas.

Tiempo	Caudal (m ³ /s)	Mayor calado en la línea (m)	Velocidad máxima en la línea (m/s)	Menor calado en la línea (m)	Velocidad mínima en la línea (m/s)
00 00:00:00	0.000	0	0	0	0
00 00:15:00	0.000	0	0	0	0
00 00:30:00	0.000	0	0	0	0
00 00:45:00	0.000	0	0	0	0
00 01:00:00	0.000	0	0	0	0
00 01:15:00	0.000	0	0	0	0
00 01:30:00	0.000	0	0	0	0
00 01:45:00	482.908	3.521	2.748	3.514	2.731
00 02:00:00	497.346	3.597	2.77	3.59	2.753
00 02:15:00	499.578	3.607	2.774	3.601	2.758
00 02:30:00	499.929	3.609	2.775	3.603	2.758
00 02:45:00	499.990	3.609	2.775	3.603	2.758
00 03:00:00	499.999	3.609	2.775	3.603	2.758
00 03:15:00	500.001	3.609	2.775	3.603	2.759
00 03:30:00	500.000	3.609	2.775	3.603	2.759
00 03:45:00	500.005	3.609	2.775	3.603	2.759
00 04:00:00	500.001	3.609	2.775	3.603	2.759
00 04:15:00	499.999	3.609	2.775	3.603	2.759
00 04:30:00	500.000	3.609	2.775	3.603	2.759
00 04:45:00	500.001	3.609	2.775	3.603	2.758
00 05:00:00	500.002	3.609	2.775	3.603	2.759

Tabla A.3. Valores de caudal, calados y velocidades en el modelo bidimensional sección PK_10000

Por otra parte es importante considerar que el modelo bidimensional calcula en régimen variable, de hecho el permanente se obtiene manteniendo el caudal constante; en el caso analizado el caudal se inicia en cero y llega a los 500 m³/s en 30 minutos manteniéndose constante hasta el final de la simulación.

En estas condiciones es muy importante observar la estabilidad del cálculo, en la tabla A.3 se incluye la variación temporal cada 15 minutos de los resultados en la sección correspondiente al PK_10000 (en el centro del modelo). Se observa una gran estabilidad con diferencias mínimas entre los valores máximos y mínimos en la sección, lo que indica un comportamiento plano, de forma que los parámetros hidráulicos son sensiblemente iguales a lo largo del ancho (50 m) del modelo.

De lo anterior, se obtiene la siguiente tabla resumen que confirma la calidad de los resultados de los modelos bidimensionales:

	Manning	HEC-RAS	ICM
VELOCIDAD (m/s)	2.772	2.77	2.772
CALADO (m)	3.607	3.61	3.605

Tabla A.4 Comparación de resultados de velocidades y calados en un canal rectangular según la fórmula de Manning, modelos HEC-RAS e ICM

A.3. CURVA DE REMANSO

Utilizando los modelos anteriores se han comparado las curvas de remanso obtenidas con el modelo 1D HEC-RAS y con el modelo 2D Info Works ICM. Como resumen de las características del modelo se puede indicar:

Sección: Rectangular sin rozamiento con los cajeros.

Ancho: 50 m

Pendiente: 0.5%

Longitud 20 km

Rugosidad: n de Manning 0.060

Condición de contorno: Vertido libre en la sección de aguas abajo

Se han analizado las secciones próximas al vertido libre obteniéndose los resultados que se adjuntan en la figura A.4 y en la tabla A.5.

Se observa una concordancia prácticamente completa entre ambos resultados; es importante destacar que el modelo HEC-RAS tiene una precisión de 0.01 metros y que por otra parte en el modelo bidimensional los resultados son a nivel de triángulo, lo que dificulta la aproximación a la sección concreta del modelo unidimensional HEC-RAS.

Figura A.4. Curva de remanso en la salida con resultados del HEC-RAS y modelo bidimensional ICM

	HEC-RAS		ICM		Diferencias	
Distancia (m)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)
4010	3.61	2.77	3.605	2.802	0.005	-0.032
3010	3.61	2.77	3.610	2.795	0.000	-0.025
2010	3.61	2.77	3.607	2.796	0.003	-0.026
1010	3.61	2.77	3.604	2.812	0.006	-0.042
510	3.61	2.77	3.581	2.814	0.029	-0.044
210	3.47	2.88	3.445	2.908	0.025	-0.028
110	3.31	3.02	3.267	3.066	0.043	-0.046
50	3.09	3.24	3.032	3.32	0.058	-0.080

Tabla A.5. Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en la curva de remanso de vertido libre

A.4. ELEVACIÓN DE SOLERA

Con el objeto de contrastar resultados entre los modelos bidimensionales y las soluciones analíticas y modelos unidimensionales tipo HEC-RAS, se ha modelizado una elevación de solera tanto en el modelo bidimensional como en el unidimensional, con las características:

Sección: Rectangular sin rozamiento con los cajeros.

Ancho: 50 m

Pendiente: 0.5%

Longitud 20 km

Rugosidad: n de Manning 0.060

Elevación de solera de 10 m

Condición de contorno: movimiento uniforme aguas abajo (vertido alejado)

Los resultados están contenidos en la tabla y gráfico adjuntos y muestran coincidencia.

Figura A.5. Vista 3D de la sobreelevación de solera con (desde aguas arriba a aguas abajo) zona de remanso, circulación sobre la sobreelevación, vertido y resalto

PK (m)	Cota fondo (m)	HEC_RAS		ICM		Diferencias en el calado (%)
		Cota agua (m)	Calado (m)	Cota agua (m)	Calado (m)	
2980	294.6	297.64	3.04	297.607	3.007	1.09
2990	294.55	297.52	2.97	297.46	2.910	2.02
3000	294.5	297.37	2.87	297.308	2.808	2.16
3010	294.45	297.19	2.74	297.11	2.660	2.92

Tabla A.6. Comparación de los valores de calados y velocidades entre el modelo bidimensional y HEC-RAS, en una elevación de solera

Figura A.6. Elevación de solera con resultados del modelo HEC-RAS y modelo bidimensional ICM

Los resultados muestran una buena concordancia siempre considerando que el modelo HEC-RAS tiene una precisión de 0.01 metros y que por otra parte en el modelo bidimensional los resultados son a nivel de triángulo, lo que dificulta la aproximación a la sección concreta del modelo unidimensional HEC-RAS.

A.5. FLUJO EN REGIMEN VARIABLE. ROTURA DE DIQUE

A.5.1. OBJETO

El objeto de este apartado es confirmar los resultados de los modelos bidimensionales aplicados a la rotura de dique con resultados analíticos. Dada la complejidad de las ecuaciones de Saint Venant sólo en casos muy concretos tienen solución analítica

A.5.2. ECUACIONES DE SAINT-VENANT

Las ecuaciones de Saint-Venant pueden escribirse en la forma:

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

Continuidad

Supuesto un movimiento plano, si se aplica a un ancho unidad queda en la forma:

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de equilibrio dinámico

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} + S_f - S_0 = 0$$

Si el movimiento es plano y horizontal sin rozamiento con el contorno resulta:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Esta ecuación puede expresarse como:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(y + \frac{v^2}{2g} \right) = 0 \quad (2)$$

A.5.3. ECUACIONES SIMPLIFICADAS DE ROTURA DE DIQUES

Las ecuaciones simplificadas de flujo en la rotura instantánea de un dique en un cauce rectangular que se asimile a un movimiento plano en una superficie horizontal sin rozamiento son:

Ecuación de la velocidad

$$v(x, t) = \frac{2}{3} \left(c + \frac{x}{t} \right) \quad -c t \leq x \leq 2 c t \quad (3)$$

Perfil de la superficie del agua:

$$y(x, t) = \frac{(2 c t - x)^2}{9 g t^2} \quad (4)$$

Siendo c la celeridad de onda correspondiente al calado inicial del dique y_0 :

$$c = \sqrt{g y_0}$$

Las ecuaciones anteriores son válidas en el intervalo $-c t \leq x \leq 2 c t$

En la figura adjunta se muestra la forma de la superficie para un valor $t=t_0$

Figura A.7. Ecuación simplificada de rotura de diques

Las ecuaciones anteriores cumplen las ecuaciones de continuidad y de equilibrio dinámico como puede comprobarse calculando las derivadas parciales de velocidad y calado e incluyendo en las ecuaciones 1 y 2.

Las derivadas parciales de velocidad y calado son:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{2}{3t}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{2x}{3t^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{2(x-2ct)}{qgt^2}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{2x(2ct-x)}{qgt^3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(y + \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{2x}{3gt^2}$$

Introducidas en las ecuaciones de continuidad y de equilibrio dinámico

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(y + \frac{v^2}{2g} \right) = 0$$

Permiten confirmar que se cumplen estas ecuaciones.

A.5.4. MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

Con el objetivo de verificar la calidad de los resultados de los modelos hidráulicos bidimensionales utilizados en rotura de diques se ha realizado un modelo 2D en condiciones similares a las del movimiento simplificado descrito, es decir:

- Movimiento Plano
- Superficie horizontal
- Sin rozamiento

La primera condición se logra planteando un modelo formado por una “franja” de pequeña anchura en la que el flujo sea muy “ordenado” en el sentido longitudinal y que no tenga rozamiento con las zonas laterales.

La superficie del lecho del modelo deberá ser horizontal y sin rozamiento.

A.5.4.1. Modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno utilizado (TIN) está esquematizado en la figura adjunta. Se ha considerado un modelo de 5 m de ancho y 3500 m de longitud, en el que se incluyen líneas de rotura cada 0.50 m, de forma que el flujo sea muy “ordenado” en el sentido longitudinal.

En el modelo se han incluido líneas de resultados a distancias de 50 y 100 m.

A.5.4.2. Datos hidráulicos

Se ha considerado una rugosidad de Manning $n=0.0001$, prácticamente casi nula, para aproximarse a la condición de rotura teórica.

Adicionalmente y debido a la estructura de la modelización 2D no existe rozamiento con los contornos verticales.

La rotura del dique se supone instantánea y se simula con la condición inicial que ha sido de dique de 10 metros de altura, lleno y situado en la sección PK₀.

A.5.4.3. Topología del modelo 2D

El modelo se ha mallado con triángulos de tamaño para mínimo 0.25 y máximo 1m², lo que hace que se utilicen un total de 72000 elementos como se aprecia en la figura adjunta.

Figura A.8. Detalle del mallado

A.5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS: MODELO BIDIMENSIONAL VS FORMULACIÓN ANALÍTICA

Los resultados del modelo bidimensional son muy similares a los obtenidos con la formulación analítica con errores inferiores al 1% tanto en calados como en velocidades y caudales.

Dado que los resultados son función de la posición (x) y del tiempo (t), el análisis y comparación se ha realizado en tablas y gráficos para distintos valores de t , de forma que se pueden “ver” los perfiles del agua en distintos momentos para todo el modelo, también los caudales y velocidades existentes.

Como ejemplo en las figuras adjuntas se muestran los calados obtenidos en los primeros 300 m aguas abajo del dique.

Figura A.9. Calados a los 60 segundos de la rotura

Figura A.10. Calados a los 180 segundos de la rotura

Con relación a la comparación de resultados entre el modelo 2D y la solución analítica, los resultados son muy similares como se observa en las tablas y gráficos adjuntos.

Figura A.11. Comparación de calados entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Figura A.12. Comparación de velocidades entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Figura A.13. Comparación de caudales entre la solución analítica y modelo 2D a los 60 s

Sec.	Tiempo	Valores analíticos			Valores del modelo 2D			Error en %		
x	t (s)	v(x,t) (m/s)	y(x,t) (m)	Q (m³/s)	V (m/s)	Y (m)	Q (m³/s)	Calado	V	Q
-400	60	2.16	7.94	85.58	2.14	7.95	85.40	-0.11	0.71	0.21
-350	60	2.71	7.45	100.97	2.70	7.47	100.70	-0.28	0.40	0.26
-300	60	3.27	6.97	113.88	3.25	6.97	113.60	0.04	0.50	0.24
-250	60	3.82	6.51	124.44	3.80	6.54	124.10	-0.43	0.57	0.27
-200	60	4.38	6.07	132.79	4.36	6.09	132.50	-0.38	0.40	0.22
-150	60	4.93	5.64	139.05	4.91	5.66	138.80	-0.40	0.47	0.18
-100	60	5.49	5.22	143.37	5.47	5.25	143.20	-0.49	0.34	0.12
-50	60	6.04	4.83	145.86	6.02	4.86	145.80	-0.70	0.40	0.04
0	60	6.60	4.44	146.66	6.64	4.47	146.67	-0.57	-0.61	-0.01
50	60	7.16	4.08	145.90	7.17	4.07	145.89	0.20	-0.21	0.01
100	60	7.71	3.73	143.72	7.73	3.73	143.71	-0.06	-0.25	0.00
150	60	8.27	3.39	140.24	8.28	3.39	140.23	0.09	-0.16	0.00
200	60	8.82	3.07	135.59	8.82	3.08	135.60	-0.20	0.02	-0.01
250	60	9.38	2.77	129.91	9.37	2.78	129.99	-0.34	0.08	-0.06
300	60	9.93	2.48	123.32	9.93	2.49	123.45	-0.28	0.03	-0.10
350	60	10.49	2.21	115.97	10.48	2.22	116.01	-0.39	0.08	-0.04
400	60	11.04	1.96	107.97	11.04	1.96	108.09	-0.24	0.04	-0.11
500	60	12.16	1.49	90.59	12.15	1.48	90.80	0.37	0.04	-0.24
600	60	13.27	1.09	72.21	13.24	1.097	72.54	-0.77	0.20	-0.45

Tabla A.7. Comparación de resultados entre modelos 2D y fórmulas analíticas en rotura de dique a los 60s

A.5.6. CONCLUSIONES

De la comparación de los resultados entre la fórmula analítica simplificada de rotura de dique y el modelo 2D que se ha construido para aproximarse a la solución teórica, se puede afirmar que en este caso la aproximación del modelo 2D produce unos resultados con un error inferior al 1% de la solución analítica.

ANEJO B. PRECISIÓN DE LA MODELIZACIÓN 2D

B.1. INTRODUCCIÓN

En el presente anejo se incluyen los resultados de las pruebas de sensibilidad respecto a la densidad de elementos de los modelos bidimensionales. Estos modelos realizan una aproximación de la realidad mediante la discretización de la geometría del terreno a simular a través de elementos de malla. En ellos, los cálculos hidráulicos se efectúan integrando temporal y espacialmente por iteraciones las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a un flujo incompresible con superficie libre y de poco espesor. Los elementos de malla pueden ser cuadrados o triangulares, como es el caso de la herramienta informática elegida en este trabajo de investigación, InfoWorks ICM.

Por tanto, en los modelos bidimensionales, la precisión final dependerá de la adecuada aproximación a la geometría del cauce (influenciada a su vez por el tamaño de los elementos de la malla), así como de la exactitud en las soluciones hidráulicas obtenidas de la integración numérica. Esto último se realiza en el proceso de cálculo que el propio motor del programa InfoWorks ICM controla comparando los sucesivos resultados obtenidos. Sin embargo, el programa no consta con ninguna función que permita contrastar la bondad del ajuste de la geometría de los elementos de la malla con la realidad. Esta comprobación puede llevarse a cabo confrontando modelos 2D de distintas densidades de mallado con soluciones analíticas, o bien cotejando los propios modelos con diferentes configuraciones de malla entre sí.

Para ello se ha analizado dos ejemplos: Por una parte el flujo en un cauce trapecial en régimen uniforme en el que se compara la precisión de los modelos 2D que tienen distinto afinamiento en el mallado con la solución analítica, y por otra el tránsito en un mismo cauce natural en el que se han construido 24 modelos con diversos tamaños y configuración de elementos.

B.2. ENSAYOS EN CAUCE TRAPEZIAL INDEFINIDO DE PENDIENTE CONSTANTE

B.2.1. OBJETO

En este epígrafe se contrastan los resultados hidráulicos del modelo 2D de un cauce trapecial calculado mediante InfoWorks ICM con los valores teóricos obtenidos con la fórmula de Manning. Para ello se ha simulado el caso de un canal con pendiente y caudal constante. Se ha dotado al canal de una condición de contorno "normal" que es equivalente a mantener la pendiente del cauce, por lo que se alcanza el régimen uniforme con rapidez.

Los modelos 2D se han construido con diferentes densidades de triángulos. Como los taludes laterales son 2V:1H, se ha empleado también la herramienta de mallado sensible al terreno específica de InfoWorks ICM, que permite definir un desnivel máximo entre elementos de malla, colocando por tanto mayor densidad de triángulos en las zonas de mayor pendiente.

La elección del régimen uniforme en un cauce con pendiente lateral se debe a que la aproximación bidimensional al borde inclinado presenta mayor dificultad que cuando el talud es vertical.

B.2.2. DATOS DEL CANAL Y DE LA SECCIÓN TIPO

La sección a comparar escogida es de tipo trapecial, simétrica, con ancho en la base 40 m y taludes a 60° (1H/2V) de 20 m de altura. Se prolonga además en la parte superior la coronación del talud 5

m horizontalmente. La pendiente del cauce es constante e igual al 0.5 %. La longitud total del tramo simulado es de 3000 m, con rugosidad de Manning 0.06.

Figura B.1. Sección tipo del cauce trapecial (dimensiones en metros)

B.2.3. RESULTADOS UTILIZANDO LA FÓRMULA DE MANNING

El flujo analizado tiene caudal constante que discurre en un cauce de sección y pendiente no variables, por lo que el régimen es uniforme; por ello la pérdida de carga por unidad de longitud es igual a la pendiente. En este caso, se puede utilizar la expresión de Manning, según la cual, la pérdida de carga es:

$$i = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_H^{\frac{4}{3}}}$$

La sección tipo está definida en la figura B.1 con las características:

i = pendiente 0.5%

n = 0.060

Q = 500 m³/s

En la tabla adjunta se incluyen los resultados obtenidos del calado y la velocidad, además de los valores del perímetro mojado y del área, a fin de contrastar los resultados teóricos con los obtenidos con los modelos 2D:

Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	1891.2	49.86	3.63	4.265	2.782

Tabla B.1. Resultados utilizando la formulación de Manning

Es necesario tener en cuenta que los modelos bidimensionales, por definición, tienen una velocidad única en cada elemento, es decir en toda su altura, y el rozamiento sólo existe en el fondo que se supone horizontal. Por ello para poder comprobar los resultados entre los modelos 2D y la fórmula de Manning, el perímetro mojado se calcula según el fondo del cauce y la proyección horizontal de los cajeros; en estas condiciones los resultados teóricos son:

Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Perímetro m	Rh (m)	Calado(m)	V (m/s)
500.00	171.500	44.080	3.891	4.0795	2.9154

Tabla B.2. Resultados medios según Manning considerando rozamiento únicamente en el plano horizontal

B.2.4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 2D

B.2.4.1. Modelo digital del terreno

El modelo hidráulico bidimensional requiere apoyarse en un modelo digital del terreno previo. Con este fin se ha creado un modelo triangular (en adelante TIN) que representa la geometría del canal:

Figura B.2. Vistas del MDT del canal: Planta y perspectiva 3D

B.2.5. TOPOLOGÍA DEL MODELO HIDRÁULICO

Sobre el modelo digital del terreno se crea el polígono de simulación en el cual se dispone el mallado con unas determinadas superficies máximas y mínimas (en este caso se han realizado varias pruebas para comprobar la precisión de los cálculos).

Adicionalmente, para mejorar la modelización, se pueden insertar una serie de líneas de rotura en las que se apoyarán los contornos de los triángulos. De esta manera se asegura que ningún elemento del fondo tome valores de cotas de los taludes y viceversa. La condición de contorno en los bordes del polígono que constituye la zona a modelizar se ha asignado como “normal seca” o condición de vertido libre. La entrada de caudales se ha dispuesto distribuida a lo largo de todo el ancho del fondo del canal en el inicio del tramo.

El régimen uniforme se logra manejando un caudal constante y analizando los resultados en una sección suficientemente alejada de la condición de borde. En la figura adjunta se muestra un detalle del mallado en el entorno de una sección a 750 m de la entrada y a 2250 m de la condición de vertido en la salida.

Figura B.3. Polígono de malla y esquema de líneas de rotura adoptados en cabeza y pie de talud

B.2.6. CAUDALES CONSIDERADOS

El caudal de cálculo se ha dispuesto de 500 m³/s, con flujo uniforme, si bien los modelos bidimensionales se calculan en régimen variado, por lo que el régimen uniforme se consigue mediante un hidrograma creciente hasta alcanzar el caudal objetivo. Una vez alcanzado éste, se ha mantenido el tiempo suficiente para conseguir estabilizar el régimen permanente en todos los puntos del modelo:

Figura B.4. Hidrograma adoptado

B.2.7. RESULTADOS OBTENIDOS

B.2.7.1. Introducción

Al cotejar los resultados de modelos 2D con soluciones analíticas, es importante indicar que la solución basada en la ecuación de Manning considera un flujo unidimensional en el que la velocidad en la sección es única, coincidente con la velocidad media y que la superficie del agua es horizontal. En un modelo bidimensional, la velocidad es un vector con dos dimensiones distinta para cada elemento de la malla, aunque sin componente en altura. En cada uno de los prismas de base

horizontal con altura igual al calado de agua que conforman el modelo 2D, la velocidad es constante. Por ello, el calado puede ser distinto en cada punto de una determinada sección aunque (como ocurre en la realidad) el flujo sea uniforme.

El análisis de los resultados de cara a cuantificar la precisión de la modelización se ha llevado a cabo en una sección (sección PK_750) suficientemente alejada de las condiciones de contorno y en la que se ha estabilizado el flujo (ver tabla adjunta):

Tiempo (m)	Caudal (m^3/s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 00:00:00	0	0	0
00 00:10:00	49.412	0.745	1.693
00 00:20:00	278.175	2.818	2.469
00 00:30:00	452.075	3.829	2.967
00 00:40:00	499.168	4.147	3.036
00 00:50:00	499.97	4.156	3.034
00 01:00:00	499.999	4.157	3.034
00 01:10:00	500	4.157	3.034
00 01:20:00	499.999	4.157	3.034
00 01:30:00	500.001	4.157	3.034
00 01:40:00	500.001	4.157	3.034
00 01:50:00	500	4.157	3.034
00 02:00:00	499.999	4.157	3.034

Tabla B.3. Resultados con la formulación de Manning, rozamiento sólo en el plano horizontal

Como se puede observar, la estabilización es completa, resultando un calado de 4.157 m totalmente constante, así como una velocidad de 3.04 m/s. El flujo oscila en $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ alrededor del valor de entrada de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

B.2.7.2. Distribución de velocidades en un cauce prismático

La velocidad en la sección de un canal prismático (rectangular o trapezoidal) no es uniforme. Los puntos situados en el centro cerca de la superficie libre presentan la máxima velocidad, mientras que la velocidad en el contorno es nula. En la figura adjunta se esquematiza esta distribución para el caso de un cauce de sección rectangular:

Figura B.5. Distribución de velocidades en un cauce rectangular

En los modelos bidimensionales la velocidad es constante a lo largo del calado pero varía en función de la distancia al eje de la sección.

B.2.7.3. Modelos bidimensionales

El cauce trapecial analizado se ha calculado con distintas características y densidades de malla, así como con líneas de rotura y sin ellas. Como ya se ha explicado, estas líneas obligan a que los triángulos del mallado se apoyen en ellas y si se dibujan siguiendo el flujo principal, se logra que éste sea más ordenado, mejorando la precisión de los resultados. Los modelos analizados se detallan en la tabla adjunta, siendo el último el más preciso, ya que consta de más elementos, líneas de rotura y presenta mallado "inteligente", que limita el desnivel máximo entre triángulos 2D contiguos:

Cálculo	Caudal (m ³ /s)	Nº triángulos	Tamaño triángulos		Líneas de rotura	Desnivel máximo en mallado
			Máximo	Mínimo		
1	500	30000	10	2	No	No
2	500	56000	5	1	No	No
3	500	190000	2	0.4	No	No
4	500	190000	2	0.4	No	Si
5	500	30000	10	2	Si	No
6	500	56000	5	1	Si	No
7	500	190000	2	0.4	Si	No
8	500	190000	2	0.4	Si	Si

Tabla B.4. Cálculos realizados con el modelo 2D de cauce trapecial con distintas densidades de mallado

B.2.7.4. Resultados del modelo 2D

Los resultados de los distintos modelos se han considerado en la sección PK_750 y en los puntos situados en la sección inmediatamente anterior PK_749. Su análisis muestra unos resultados muy satisfactorios ya que en la sección considerada el caudal circulante es prácticamente 500 m³/s, idéntico al introducido en el cauce (ver tabla y figuras adjuntas).

Tiempo	Caudal (m ³ /s)	Mayor Calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)
00 00:00:00	39.935	0.607	1.675
00 00:10:00	277.944	2.817	2.473
00 00:20:00	452.828	3.813	2.970
00 00:30:00	499.267	4.113	3.035
00 00:40:00	499.980	4.121	3.034
00 00:50:00	499.999	4.121	3.034
00 01:00:00	500.000	4.121	3.034
00 01:10:00	499.999	4.121	3.034
00 01:20:00	499.999	4.121	3.034
00 01:30:00	499.999	4.121	3.034
00 01:40:00	499.999	4.121	3.034
00 01:50:00	500.000	4.121	3.034

Tabla B.5. Caudal en la sección PK_750 en el cálculo nº 8 (máximo de precisión)

Figura B.6. Sección PK_750 y Puntos en sección PK_749 donde se recogieron resultados

Figura B.7. Evolución del caudal en la sección PK_750 (cálculo 8)

El análisis de estos resultados muestra un comportamiento muy bueno, ya que el caudal es exacto. El análisis de las velocidades es más complejo puesto que varía a lo largo de la sección; en la tabla y gráficos siguientes se incluyen los valores obtenidos:

Punto	X (m)	Y (m)	velocidad (m/s)
P_01	749.0	12.50	0
P_02	749.0	13.00	0.460
P_03	749.0	13.50	0.460
P_04	749.0	14.00	0.751
P_05	749.0	14.50	0.751
P_06	749.0	15.50	2.903
P_07	749.0	20.00	2.980
P_08	749.0	25.00	3.018
P_09	749.0	30.00	3.025

Punto	X (m)	Y (m)	velocidad (m/s)
P_10	749.0	35.00	3.027
P_11	749.0	40.00	3.027
P_12	749.0	45.00	3.017
P_13	749.0	50.00	3.008
P_14	749.0	54.50	2.954
P_15	749.0	55.50	0.797
P_16	749.0	56.00	0.634
P_17	749.0	56.50	0.634
P_18	749.0	57.00	0
P_19	749.0	57.50	0

Tabla B.6. Velocidades en los puntos de control PK_749

Figura B.8. Distribución de la velocidad en la sección PK_749 (cálculo 8)

Como ya se ha indicado, la distribución de velocidades en una sección hidráulica es un fenómeno tridimensional. Sin embargo, el cálculo mediante la expresión de Manning supone que la velocidad es constante en toda la sección. Por otro lado, los modelos 2D recogen una distribución variable de velocidades y elevaciones en la sección transversal, más acorde con la realidad, si bien tampoco refleja la variación en altura de los parámetros existente dentro de la propia sección.

La estimación de la velocidad media, que se contrasta con los resultados de la fórmula de Manning, se puede realizar calculando las velocidades medias en la parte central y en las bancadas laterales y posteriormente calculando la media ponderada. Con este método se obtiene:

Zonas	Área parcial (m ²)	Velocidad media (m/s)	Velocidad ponderada (m/s)
Central	120.11	3.003	
Izquierda	2.0	0.607	
Derecha	2.0	0.652	
Sumas parciales	124.11		2.9264

Tabla B.7. Cálculo de la velocidad media en la sección PK_749

Calculada la velocidad media de 2.9264 m/s, y comparándola con la obtenida con la fórmula de Manning de 2.915 m/s, se tiene una diferencia de 0.35 %; esta diferencia puede ser debida a la

precisión del cálculo de la velocidad media. Por otra parte, confrontando los resultados obtenidos en la sección PK_750 en los modelos de máxima y mínima densidad de elementos, se observan valores muy similares (ver cuadro adjunto):

T (min.)	Modelo máxima precisión (190000 elementos)			Modelo mínima precisión (30000 elementos)			Diferencias en %		
	Q (m ³ /s)	Mayor calado (m)	Velocidad máxima (m/s)	Q (m ³ /s)	Mayor calado (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Dif. en Q (m ³ /s)	Dif. en calado (m)	Dif. en v (m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	277.944	2.817	2.473	278.175	2.818	2.469	-0.231	-0.001	0.004
40	499.267	4.113	3.035	499.168	4.147	3.036	0.099	-0.034	-0.001
60	499.999	4.121	3.034	499.999	4.157	3.034	0	-0.036	0
80	499.999	4.121	3.034	499.999	4.157	3.034	0	-0.036	0

Tabla B.8. Comparación de resultados en la sección PK_750

En la figura adjunta se muestra una imagen de la distribución del calado a lo largo de la sección:

Figura B.9. Detalle de la malla con temático de calados

Si se analiza la organización del flujo se observa una circulación muy ordenada, incluso en los modelos de menor densidad de elementos. En las figuras adjuntas se muestran los vectores velocidad en el entorno de la sección PK_750:

Figura B.10. Detalle de vectores velocidad con modelo de media precisión: 60000 elementos

Figura B.11. Detalle de vectores velocidad con modelo de alta precisión: 190000 elementos

Figura B.12. Vectores velocidad con modelo de alta precisión: 190000 elementos y líneas de rotura

Apenas hay diferencias en las figuras anteriores, ya que el flujo es muy ordenado en todos los modelos.

B.2.8. CONCLUSIONES DEL ENSAYO DE SENSIBILIDAD EN CAUCE TRAPEZIAL

De los ensayos de sensibilidad al número de elementos en modelos bidimensionales aplicados al tránsito en canales, con simulaciones realizadas en InfoWorks ICM y contrastadas con los valores que ofrece la fórmula de Manning en la hipótesis de régimen uniforme, se puede reseñar que:

- ▶ El modelo se ha dispuesto con sección y pendiente constantes en toda su longitud.
- ▶ La sección adoptada ha sido trapezoidal, de base 40 m y taludes laterales de 20 m de altura, con pendientes 1H/2V.
- ▶ La pendiente considerada ha sido del 0.5 %.
- ▶ La rugosidad de Manning se ha dispuesto igual a 0.06.
- ▶ El caudal de entrada, también constante, corresponde a 500 m³/s.
- ▶ El calado y la velocidad en régimen uniforme calculados según la fórmula de Manning son 4.079 m y 2.915 m/s, respectivamente.
- ▶ Los resultados en la sección de comparación perpendicular al eje y suficientemente alejada de los bordes, en todos los modelos 2D dan un caudal que oscila entre 499.999 y 500.001 m³/s, por lo que se puede indicar que es prácticamente exacto.
- ▶ Las diferencias entre la velocidad obtenida con Manning y la calculada por media ponderada de la distribución de velocidades en la sección son inferiores al 0.4%, lo cual podría ser debido al error que se comete con el propio método de estimación.
- ▶ La precisión en los resultados obtenidos apenas varía, incluso en los modelos con menor número de elementos, y sin líneas de rotura, una vez estabilizado el flujo, los resultados tienen diferencias menores al 1%.

B.3. ENSAYOS EN CAUCE NATURAL

B.3.1. INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento de los modelos 2D aplicados a tránsitos naturales y calculados mediante InfoWorks ICM se ha realizado comparando entre sí simulaciones de un mismo tránsito con distinta distribución de elementos. El tramo ensayado pertenece al río Esla, de la cuenca del Duero, con una longitud de aproximadamente 30 km, cuya planta con indicación de las secciones de control se adjunta en la página siguiente.

En primer lugar se ha llevado a cabo un experimento sencillo, en el que se cotejaban los resultados de tres simulaciones del mismo tramo con diferentes densidades de mallado: 604000, 778000 y 1113000 elementos. Los resultados han sido muy semejantes entre sí.

En segunda fase, y para determinar con mayor detalle la influencia del tamaño de malla en la calidad de los resultados, se ha realizado una batería de 26 simulaciones con tamaños mínimos de malla crecientes, desde 1 hasta 200 m², considerando dos situaciones: con definición mediante líneas de rotura del cauce de aguas bajas o sin ella. Las dos últimas se han realizado con la herramienta de mallado inteligente, con y sin líneas de situación del cauce de aguas bajas.

Figura B.13. MDT tramo del río Esla considerado en el análisis de sensibilidad de la densidad de elementos, con indicación de secciones de comparación

B.3.2. COMPARACIÓN INICIAL DE LA PRECISIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS

Para este ensayo se han empleado tres modelos bidimensionales del tramo con 604000, 778000 y 1113000 elementos. En las figuras adjuntas se incluye una imagen y un detalle de la malla de la parte central de cada uno de los modelos, en los que se ha hecho una diferenciación entre las Zonas de Cauce, Bancadas y Llanuras generales de inundación, cada uno con elementos 2D de distintos tamaños.

Figura B.14. Mallado y detalle del modelo de 604000 elementos

Figura B.15. Mallado y detalle del modelo de 778000 elementos

Por último la malla más detallada es:

Figura B.16. Mallado y detalle del modelo de 1113000 elementos

B.3.2.1. Caudal utilizado

Se ha utilizado un hidrograma tipo SCS con caudal pico de 2000 m³/s a las 17 h (1020 min), cuya forma se puede apreciar en los gráficos de resultados adjuntos.

B.3.2.2. Análisis de resultados de los modelos

El análisis de los resultados es complejo y muy laborioso, debido a que la información obtenida de los modelos 2D es extensa por realizarse el cálculo en régimen variable y suministrar información hidráulica (calado, velocidad, caudal específico, número de Froude, etc...) en cada uno de los

elementos; por ello se ha realizado de manera global y sobre todo centrado en el efecto de laminación. El análisis se ha centrado por tanto en los parámetros:

- Caudal pico.
- Tiempo del caudal pico.

Se ha analizado el tránsito comparando los hidrogramas de salida para los tres modelos bidimensionales de distinta precisión (ver figura adjunta).

Figura B.17. Hidrograma de entrada y de salida con distinta precisión.

En la tabla y figura adjuntas se incluye un detalle del hidrograma de salida de los tres modelos.

Figura B.18. Detalle del pico del hidrograma de salida con distinta precisión en el número de elementos

Tiempo (min)	Caudal m ³ /s		
	604 000 elementos	780 000 elementos	1 113 000 elementos
1375	1871.02	1895.01	1893.70
1380	1875.66	1897.67	1896.75
1385	1879.25	1899.39	1898.82
1390	1881.75	1900.31	1900.10
1395	1883.43	1900.44	1900.50
1400	1884.42	1899.90	1900.15
1405	1884.66	1898.66	1899.18
1410	1884.25	1896.82	1897.45
1415	1883.33	1894.42	1895.18

Tabla B.9. Comparación de resultados del caudal máximo

De la observación de los gráficos y tabla de los hidrogramas se deduce que existe una similitud muy grande en los resultados de caudales y tiempos de caudal pico de los tres modelos. En concreto, entre las dos simulaciones de mayor precisión el caudal máximo presenta una diferencia de 0.06 m³/s, es decir del 0.0035 %; es decir, prácticamente son iguales. El momento en el que se produce el caudal máximo es el minuto 1395 sabiendo que los resultados están grabados cada cinco minutos.

B.3.2.3. Conclusiones

En resumen, se puede indicar que:

- Los tres modelos analizados presentan resultados muy similares, si bien las dos configuraciones más detalladas prácticamente coinciden.
- Los caudales pico a la salida de los dos modelos más precisos tienen una diferencia en el caudal del 0.0035 %.
- El tiempo del caudal pico a la salida de los dos modelos con mayor densidad de elementos es el mismo.

B.4. ANÁLISIS DETALLADO DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE ELEMENTOS

En este último ensayo se llevaron a cabo 26 cálculos con diferentes tamaños de malla en cada una de las áreas del cauce, a fin de definir la influencia del tamaño de los elementos en la precisión de los resultados de laminación.

Las simulaciones se plantearon según los siguientes criterios:

- ✓ Se definieron las mismas 3 zonas de influencia de inundación fluvial: Cauce, Bancadas y Llanura general, cada una con dimensiones de malla particulares.
- ✓ Se configuraron 13 modelos con distintas distribuciones de tamaños de elementos, realizándose la última mediante la herramienta de mallado inteligente de InfoWorks ICM.
- ✓ Cada uno de los 13 modelos se simuló con y sin definición del cauce de aguas bajas (mediante líneas de rotura).

La lista completa de cálculos realizados se detalla en la tabla adjunta:

Cálculo	Denominación	Nº Total de Elementos	Elementos de Malla Zona Cauce (m ²)	Elementos de Malla Zona Bancadas (m ²)	Elementos de Malla Zona Llanura General (m ²)	Líneas de Definición Cauce de Aguas Bajas
1	Mallado A	2 134 546	1 - 10	10 - 50	100 - 1000	Sí
2	Mallado B	1 450 365	1.5 - 15	15 - 75	100 - 1000	Sí
3	Mallado C	1 108 739	2 - 20	20 - 100	100 - 1000	Sí
4	Mallado D	905 666	2.5 - 25	25 - 125	100 - 1000	Sí
5	Mallado E	772 002	3 - 30	30 - 150	100 - 1000	Sí
6	Mallado F	675 565	3.5 - 35	35 - 175	100 - 1000	Sí
7	Mallado G	604 033	4 - 40	40 - 200	100 - 1000	Sí
8	Mallado H	548 627	4.5 - 45	45 - 225	100 - 1000	Sí
9	Mallado I	504 184	5 - 50	50 - 250	100 - 1000	Sí
10	Mallado J	307 429	10 - 100	100 - 500	100 - 1000	Sí
11	Mallado K	211 311	20 - 200	100 - 1000	100 - 1000	Sí
12	Mallado L	155 351	200 - 1000	200 - 1000	200 - 1000	Sí
13	Mallado M	1 653 003	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . $\Delta h = 1$ m			Sí
14	Mallado A	2 131 844	1 - 10	10 - 50	100 - 1000	No
15	Mallado B	1 441 189	1.5 - 15	15 - 75	100 - 1000	No
16	Mallado C	1 096 234	2 - 20	20 - 100	100 - 1000	No
17	Mallado D	888 818	2.5 - 25	25 - 125	100 - 1000	No
18	Mallado E	750 040	3 - 30	30 - 150	100 - 1000	No
19	Mallado F	650 494	3.5 - 35	35 - 175	100 - 1000	No
20	Mallado G	576 495	4 - 40	40 - 200	100 - 1000	No
21	Mallado H	518 746	4.5 - 45	45 - 225	100 - 1000	No
22	Mallado I	471 878	5 - 50	50 - 250	100 - 1000	No
23	Mallado J	263 511	10 - 100	100 - 500	100 - 1000	No
24	Mallado K	160 641	20 - 200	100 - 1000	100 - 1000	No
25	Mallado L	117 719	200 - 1000	200 - 1000	200 - 1000	No
26	Mallado M	1 6525 258	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . $\Delta h = 1$ m			No

Tabla B.10. Listado de Cálculos de análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en el cauce natural

Una vez completados todos los cálculos, y tras analizar los errores de laminación en cada uno de ellos, se obtuvieron unos ábacos para determinar el tamaño de malla recomendado a partir del ancho medio de cauce de aguas bajas.

B.4.1. MODELO EMPLEADO

Se empleó el mismo tramo del río Esla, de casi 30 km de longitud, con 8 secciones de control. En la imagen siguiente se pueden ver las zonas de Cauce, Bancadas y Llanura consideradas para cada una de las distribuciones de elementos.

Figura B.19. MDT tramo del río Esla simulado, con indicación de secciones de comparación y zonas de tamaños de elementos de malla

Figura B.20. Detalle del tramo considerado entre las secciones L-1 y L-2, con representación de las líneas de definición del cauce de aguas bajas empleadas en los cálculos 1 a 13

En las imágenes siguientes se incluyen plantas de las secciones de control del tramo con distintas densidades de elementos de malla, para que se aprecie la densidad de elementos en el cauce de aguas bajas y el número de triángulos a lo largo de la sección transversal.

Figura B.21. Sección L_1: 9 Triángulos. Mallado Tipo I

Figura B.22. Sección L_2: 7 Triángulos. Mallado Tipo E

Figura B.23. Sección L_3: 28 Triángulos. Mallado Tipo B

Figura B.24. Sección L_4: 7 Triángulos. Mallado Tipo E

Figura B.25. Sección L_5: 12 Triángulos. Mallado Tipo A

Figura B.26. Sección L_6: 8 Triángulos. Mallado Tipo E

Figura B.27. Sección L_7: 6 Triángulos. Mallado Tipo F

Figura B.28. Sección L_8: 7 Triángulos. Mallado Tipo I

Figura B.29. Sección L_7: 8 Triángulos. Mallado Tipo Inteligente

B.4.2. CAUDAL UTILIZADO

Se ha utilizado un hidrograma tipo SCS con caudal pico de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 17 h (1020 min), cuya forma se puede apreciar en la imagen adjunta:

Figura B.30. Hidrograma de entrada con caudal pico de 2000 m³/s empleado en los cálculos

B.4.3. RESULTADOS OBTENIDOS

En las tablas y gráficas siguientes se detallan los resultados obtenidos en las simulaciones, organizadas entre las que tienen definición de la zona de cauce de aguas bajas mediante líneas de rotura, y las que no, incluyendo:

- Número Total de Elementos de Malla.
- % de Reducción del N° Total de Elementos de Malla.
- Tiempo de Cálculo del modelo.
- % de Reducción del Tiempo de Cálculo del modelo.
- Caudal pico en la sección L_8 de fin de tránsito.
- % de Laminación respecto al caudal de entrada: $Laminación = (Q_{pico\ E} - Q_{pico\ S}) / Q_{pico\ E}$.
- Error de Laminación (%) respecto al cálculo inicial con el Mallado A y definición del cauce de aguas bajas.
- Tiempo de pico en la sección L_8 de fin de tránsito.
- Número Medio de Elementos de Malla en las secciones de comparación L_1 a L_8.
- Área Media de los Elementos de Malla en Cauce de Aguas Bajas en las secciones de comparación.
- Áreas Máximas y Mínimas de los Elementos en Zona Cauce.

MODELOS CON DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS								
Cálculo	Nº Total de Elementos	% Reducción Nº Elem.	Tiempo de Cálculo (s)	Reducción Tiempo de Cálculo (%)	Q pico L ₈ (m ³ /s)	Laminación (%)	Error en laminación (%)	t _Q pico L ₈ (min)
Mallado A	2 134 546	0%	53 195	0.00%	1904.83	4.759%	0.000%	1385
Mallado B	1 450 365	32%	39 850	25.09%	1904.84	4.758%	0.000%	1385
Mallado C	1 108 739	48%	27 161	48.94%	1904.69	4.766%	0.007%	1385
Mallado D	905 666	58%	22 350	57.98%	1904.67	4.766%	0.008%	1385
Mallado E	772 002	64%	19 835	62.71%	1903.80	4.810%	0.051%	1385
Mallado F	675 565	68%	17 999	66.16%	1903.78	4.811%	0.052%	1385
Mallado G	604 033	72%	16 678	68.65%	1903.64	4.818%	0.059%	1385
Mallado H	548 627	74%	14 373	72.98%	1903.03	4.849%	0.090%	1385
Mallado I	504 184	76%	13 433	74.75%	1902.54	4.873%	0.114%	1385
Mallado J	307 429	86%	8 495	84.03%	1900.40	4.980%	0.222%	1385
Mallado K	211 311	90%	6 766	87.28%	1898.93	5.054%	0.295%	1385
Mallado L	155 351	93%	5 257	90.12%	1897.93	5.104%	0.345%	1390
Mallado M	1 653 003	23%	40 911	23.09%	1898.67	5.067%	0.308%	1390

Tabla B.11. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico}, Laminación y t_Qpico

MODELOS CON DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS						
Cálculo	Laminación (%)	Error en laminación (%)	Nº Medio Elementos Sección Aguas Bajas	Á. Promedio Elementos Cauce (m ²)	Á. Mínima Elementos Cauce (m ²)	Á. Máxima Elementos Cauce (m ²)
Mallado A	4.76%	0.000%	15.6	5.5	1	10
Mallado B	4.76%	0.000%	13.1	8.25	1.5	15
Mallado C	4.77%	0.007%	10.4	11	2	20
Mallado D	4.77%	0.008%	9.5	13.75	2.5	25
Mallado E	4.81%	0.051%	8.8	16.5	3	30
Mallado F	4.81%	0.052%	8.5	19.25	3.5	35
Mallado G	4.82%	0.059%	8.1	22	4	40
Mallado H	4.85%	0.090%	7.6	24.75	4.5	45
Mallado I	4.87%	0.114%	7.3	27.5	5	50
Mallado J	4.98%	0.222%	5.8	55	10	100
Mallado K	5.05%	0.295%	4.4	110	20	200
Mallado L	5.10%	0.345%	3.0	320	200	1000
Mallado M	5.17%	0.334%	10.1	31	1	1000

Tabla B.12. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo con definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos

MODELOS SIN DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS								
Cálculo	Nº Total de Elementos	% Reducción Nº Elem.	Tiempo de Cálculo (s)	Reducción Tiempo de Cálculo (%)	Q pico L ₈ (m ³ /s)	Laminación (%)	Error en laminación (%)	t _{Q pico} L ₈ (min)
Mallado A	2 131 844	0%	35 451	33.36%	1907.10	4.645%	0.113%	1385
Mallado B	1 441 189	32%	26 298	50.56%	1906.80	4.660%	0.099%	1380
Mallado C	1 096 234	49%	19 631	63.10%	1907.28	4.636%	0.123%	1375
Mallado D	888 818	58%	16 607	68.78%	1907.28	4.636%	0.123%	1380
Mallado E	750 040	65%	12 851	75.84%	1907.15	4.643%	0.116%	1375
Mallado F	650 494	70%	10 158	80.90%	1907.92	4.604%	0.155%	1375
Mallado G	576 495	73%	6 797	87.22%	1908.19	4.591%	0.168%	1375
Mallado H	518 746	76%	3 819	92.82%	1908.21	4.590%	0.169%	1375
Mallado I	471 878	78%	3 173	94.04%	1909.11	4.544%	0.214%	1375
Mallado J	263 511	88%	2 232	95.80%	1910.28	4.486%	0.273%	1375
Mallado K	160 641	92%	593	98.89%	1913.44	4.328%	0.430%	1375
Mallado L	117 719	94%	211	99.60%	1919.02	4.049%	0.710%	1370
Mallado M	1 625 258	24%	37 773	28.99%	1898.15	5.092%	0.334%	1385

Tabla B.13. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Nº Elementos, Tiempos de Cálculo, Q_{pico}, Laminación y t_{Qpico}

MODELOS SIN DEFINICIÓN DEL CAUCE DE AGUAS BAJAS						
Cálculo	Laminación (%)	Error en laminación (%)	Nº Medio Elementos Sección Aguas Bajas	Á. Promedio Elementos Cauce (m ²)	Á. Mínima Elementos Cauce (m ²)	Á. Máxima Elementos Cauce (m ²)
Mallado A	4.65%	0.113%	14.8	8.5	1	10
Mallado B	4.66%	0.099%	12.5	10	1.5	15
Mallado C	4.64%	0.123%	9.9	14	2	20
Mallado D	4.64%	0.123%	8.8	16	2.5	25
Mallado E	4.64%	0.116%	8.4	18	3	30
Mallado F	4.60%	0.155%	7.6	22	3.5	35
Mallado G	4.59%	0.168%	7.0	24	4	40
Mallado H	4.59%	0.169%	6.9	30	4.5	45
Mallado I	4.54%	0.214%	6.5	35	5	50
Mallado J	4.49%	0.273%	5.0	60	10	100
Mallado K	4.33%	0.430%	3.5	150	20	200
Mallado L	4.05%	0.710%	2.0	600	200	1000
Mallado M	5.09%	0.334%	9.5	36	1	1000

Tabla B.14. Resultados del análisis de sensibilidad del tamaño de malla realizados en modelo sin definición de cauce de aguas bajas: Laminación, Error de Laminación, Nº Medio Elementos y Áreas de elementos

Figura B.31. Relación entre los tiempos de cálculo de los modelos de sensibilidad y el nº total de elementos

Figura B.32. Relación entre la reducción del tiempo de cálculo de los modelos 2D y la de elementos totales

Figura B.33. Relación entre el error en la laminación y el número de elementos totales de los modelos

Figura B.34. Relación entre el error en la laminación y el número medio de elementos en la sección de cauce de aguas bajas

B.4.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN CAUCE NATURAL

De los ensayos realizados en cauce natural para analizar la influencia del tamaño de los elementos 2D en los resultados de laminación, se puede colegir que:

- ▶ El tiempo de cálculo está directamente relacionado con el nº de elementos 2D de los modelos.
- ▶ La precisión de los resultados es muy buena; incluso en modelos con poca densidad de elementos y sin líneas de definición de cauce de aguas bajas, el error no llega al 1%.
- ▶ Se ha relacionado la precisión del modelo con el número de elementos 2D en la sección de aguas bajas; a partir de 9-10 triángulos, la precisión no mejora.
- ▶ La existencia de líneas de definición del cauce de aguas bajas del tránsito reducen el error en $\approx 0.1\%$.
- ▶ La herramienta de mallado sensible al terreno (mallado inteligente) no supone una ventaja respecto a las líneas de rotura de delimitación del cauce.

B.4.5. ÁBACOS PARA MALLADO ÓPTIMO DE ELEMENTOS 2D

En las páginas siguientes se incluyen, en forma de ábacos, las conclusiones del estudio de sensibilidad, que relacionan el ancho del cauce con el error cometido según los tamaños de malla.

Figura B.35. Ábaco I de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura B.36. Ábaco II de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura B.37. Ábaco III de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

Figura B.38. Ábaco IV de área media recomendada de elementos 2D según anchura del cauce

B.4.6. FICHAS DE LOS CÁLCULOS DE SENSIBILIDAD EN CAUCE NATURAL

A continuación se incluyen las fichas completas de los 26 cálculos de laminación con diferentes tamaños de malla realizados en el cauce ensayado del río Esla.

DATOS DEL CAUCE

Situación y Datos Generales:

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Río	Pendiente (m/m)	Rugosidad media n
Duero	X	Y	X	Y	Río Esla	0.001078	0.0524
	287381.72	4671475.34	281775.07	4650655.09			

MDT

Sección	Ancho Sección Aguas Bajas	X	Y
Entrada	35	288418.62	4671987.82
L_1	68	287461.51	4671302.33
L_2	57	287508.78	4668928.19
L_3	112	287154.41	4666727.01
L_4	47	286712.43	4661720.50
L_5	45	284731.85	4658232.78
L_6	35	284286.93	4654554.39
L_7	54	283794.31	4651792.67
L_8	58	281922.57	4650542.33
Salida	51	281634.63	4650328.05

Planta de Rugosidades:

RESUMEN MALLADOS A-M (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO						
MALLADO	Elementos de Malla Zona Cauce (m ²)	Elementos de Malla Zona Bancadas (m ²)	Q pico (m ³ /s)	Laminación (%)	t _Q pico (min)	Retraso en t _Q pico (min)
A	1 - 10	10 - 50	1904.83	4.76%	1385	0
B	1.5 - 15	15 - 75	1904.84	4.76%	1385	0
C	2 - 20	20 - 100	1904.69	4.77%	1385	0
D	2.5 - 25	25 - 125	1904.67	4.77%	1385	0
E	3 - 30	30 - 150	1903.80	4.81%	1385	0
F	3.5 - 35	35 - 175	1903.78	4.81%	1385	0
G	4 - 40	40 - 200	1903.64	4.82%	1385	0
H	4.5 - 45	45 - 225	1903.03	4.85%	1385	0
I	5 - 50	50 - 250	1902.54	4.87%	1385	0
J	10 - 100	100 - 500	1900.40	4.98%	1385	0
K	20 - 200	100 - 1000	1898.93	5.05%	1385	0
L	200 - 1000	200 - 1000	1897.93	5.10%	1390	5
M	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . Δh = 1 m		1898.67	5.07%	1390	5

RESUMEN MALLADOS A-M (sin definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO						
MALLADO	Elementos de Malla Zona Cauce (m ²)	Elementos de Malla Zona Bancadas (m ²)	Q pico (m ³ /s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
A	1 - 10	10 - 50	1907.10	4.65%	1385	0
B	1.5 - 15	15 - 75	1906.86	4.66%	1380	-5
C	2 - 20	20 - 100	1907.28	4.64%	1375	-10
D	2.5 - 25	25 - 125	1907.28	4.64%	1380	-5
E	3 - 30	30 - 150	1907.15	4.64%	1375	-10
F	3.5 - 35	35 - 175	1907.92	4.60%	1375	-10
G	4 - 40	40 - 200	1908.19	4.59%	1375	-10
H	4.5 - 45	45 - 225	1908.21	4.59%	1375	-10
I	5 - 50	50 - 250	1909.11	4.54%	1375	-10
J	10 - 100	100 - 500	1910.28	4.49%	1375	-10
K	20 - 200	100 - 1000	1913.44	4.33%	1375	-10
L	200 - 1000	200 - 1000	1919.02	4.05%	1370	-15
M	Mallado inteligente 1 – 1000 m ² . Δh = 1 m		1898.15	5.09%	1385	0

MALLADO A (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			1 – 10 m ²	10 – 50 – 1000 m ²	
MALLADO A	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.86	0.21%	1035	15
L_2	3944	1984.19	0.79%	1075	55
L_3	6393	1974.97	1.25%	1110	90
L_4	12557	1959.61	2.02%	1185	165
L_5	17541	1944.69	2.77%	1250	230
L_6	23218	1930.42	3.48%	1305	285
L_7	26635	1919.18	4.04%	1345	325
L_8	29189	1904.83	4.76%	1385	365

MALLADO B (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			1.5 – 15 m²	15 – 75 – 1000 m²	
MALLADO B	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.78	0.21%	1035	15
L_2	3944	1984.22	0.79%	1075	55
L_3	6393	1974.61	1.27%	1110	90
L_4	12557	1959.68	2.02%	1185	165
L_5	17541	1945.26	2.74%	1250	230
L_6	23218	1930.42	3.48%	1305	285
L_7	26635	1919.35	4.03%	1345	325
L_8	29189	1904.84	4.76%	1385	365

MALLADO C (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			2 – 20 m ²	20 – 100 – 1000 m ²	
MALLADO C	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.69	0.22%	1035	15
L_2	3944	1984.10	0.80%	1075	55
L_3	6393	1974.89	1.26%	1110	90
L_4	12557	1960.17	1.99%	1185	165
L_5	17541	1945.58	2.72%	1250	230
L_6	23218	1930.05	3.50%	1305	285
L_7	26635	1919.02	4.05%	1345	325
L_8	29189	1904.69	4.77%	1385	365

MALLADO D (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			2.5 – 25 m ²	25 – 125 – 1000 m ²	
MALLADO D	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.64	0.22%	1035	15
L_2	3944	1984.30	0.78%	1075	55
L_3	6393	1974.85	1.26%	1110	90
L_4	12557	1960.06	2.00%	1185	165
L_5	17541	1945.49	2.73%	1245	225
L_6	23218	1929.99	3.50%	1305	285
L_7	26635	1919.10	4.04%	1345	325
L_8	29189	1904.67	4.77%	1385	365

MALLADO E (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			3 – 30 m ²	30 – 150 – 1000 m ²	
MALLADO E	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.68	0.22%	1035	15
L_2	3944	1984.52	0.77%	1075	55
L_3	6393	1974.95	1.25%	1110	90
L_4	12557	1959.24	2.04%	1185	165
L_5	17541	1945.47	2.73%	1250	230
L_6	23218	1929.90	3.50%	1305	285
L_7	26635	1919.41	4.03%	1345	325
L_8	29189	1903.80	4.81%	1385	365

MALLADO F (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			3.5 – 35 m²	35– 175 – 1000 m²	
MALLADO F	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.57	0.22%	1035	15
L_2	3944	1984.51	0.77%	1075	55
L_3	6393	1974.95	1.25%	1110	90
L_4	12557	1959.62	2.02%	1185	165
L_5	17541	1945.33	2.73%	1250	230
L_6	23218	1929.90	3.51%	1305	285
L_7	26635	1919.35	4.03%	1345	325
L_8	29189	1903.78	4.81%	1385	365

MALLADO G (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			4 – 40 m ²	40– 200 – 1000 m ²	
MALLADO G	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.65	0.22%	1035	15
L_2	3944	1983.78	0.81%	1075	55
L_3	6393	1974.59	1.27%	1110	90
L_4	12557	1959.76	2.01%	1185	165
L_5	17541	1945.56	2.72%	1250	230
L_6	23218	1929.60	3.52%	1305	285
L_7	26635	1918.79	4.06%	1345	325
L_8	29189	1903.64	4.82%	1385	365

MALLADO H (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			4.5 – 45 m ²	45– 225 – 1000 m ²	
MALLADO H	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.37	0.23%	1035	15
L_2	3944	1984.25	0.79%	1075	55
L_3	6393	1975.08	1.25%	1110	90
L_4	12557	1959.83	2.01%	1185	165
L_5	17541	1945.55	2.72%	1250	230
L_6	23218	1929.22	3.54%	1305	285
L_7	26635	1918.58	4.07%	1345	325
L_8	29189	1903.03	4.85%	1385	365

MALLADO I (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			5 – 50 m²	50– 250 – 1000 m²	
MALLADO I					
Sección	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Entrada	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
L_1	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_2	1334	1995.59	0.22%	1035	15
L_3	3944	1984.70	0.77%	1075	55
L_4	6393	1973.45	1.33%	1115	95
L_5	12557	1958.68	2.07%	1185	165
L_6	17541	1944.90	2.75%	1250	230
L_7	23218	1929.00	3.55%	1305	285
L_8	26635	1918.56	4.07%	1345	325

MALLADO J (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			10 – 100 m ²	100 – 500 - 1000 m ²	
MALLADO J	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.32	0.23%	1035	15
L_2	3944	1983.96	0.80%	1075	55
L_3	6393	1974.58	1.27%	1110	90
L_4	12557	1959.07	2.05%	1185	165
L_5	17541	1944.02	2.80%	1250	230
L_6	23218	1927.32	3.63%	1305	285
L_7	26635	1916.95	4.15%	1345	325
L_8	29189	1900.40	4.98%	1385	365

MALLADO K (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			20 – 200 m ²	100 – 1000 m ²	
MALLADO K	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.04	0.25%	1035	15
L_2	3944	1983.89	0.81%	1075	55
L_3	6393	1974.03	1.30%	1115	95
L_4	12557	1958.01	2.10%	1190	170
L_5	17541	1944.10	2.80%	1250	230
L_6	23218	1926.31	3.68%	1305	285
L_7	26635	1916.04	4.20%	1345	325
L_8	29189	1898.93	5.05%	1385	365

MALLADO L (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			200 – 1000 m ²	200 – 1000 m ²	
MALLADO L	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1994.82	0.26%	1040	20
L_2	3944	1983.22	0.84%	1080	60
L_3	6393	1973.74	1.31%	1115	95
L_4	12557	1956.85	2.16%	1190	170
L_5	17541	1942.04	2.90%	1250	230
L_6	23218	1923.27	3.84%	1310	290
L_7	26635	1913.79	4.31%	1350	330
L_8	29189	1897.93	5.10%	1390	370

MALLADO M (con definición de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO <i>Mallado inteligente 1 – 1000 m². $\Delta h = 1$ m</i>					
MALLADO M	(con definición de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m ³ /s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1994.94	0.25%	1035	15
L_2	3944	1981.37	0.93%	1080	60
L_3	6393	1970.86	1.46%	1110	90
L_4	12557	1957.30	2.13%	1185	165
L_5	17541	1943.13	2.84%	1250	230
L_6	23218	1927.55	3.62%	1305	285
L_7	26635	1916.18	4.19%	1350	330
L_8	29189	1898.67	5.07%	1390	370

MALLADO A (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			1 – 10 m ²	10 – 50 – 1000 m ²	
MALLADO A	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.08	0.20%	1035	15
L_2	3944	1985.20	0.74%	1070	50
L_3	6393	1976.73	1.16%	1105	85
L_4	12557	1963.23	1.84%	1180	160
L_5	17541	1948.72	2.56%	1245	225
L_6	23218	1933.22	3.34%	1300	280
L_7	26635	1922.39	3.88%	1340	320
L_8	29189	1907.10	4.65%	1385	365

MALLADO B (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			1.5 – 15 m ²	15 – 75 – 1000 m ²	
MALLADO B	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.10	0.20%	1035	15
L_2	3944	1985.52	0.72%	1070	50
L_3	6393	1976.93	1.15%	1105	85
L_4	12557	1963.78	1.81%	1175	155
L_5	17541	1949.60	2.52%	1240	220
L_6	23218	1932.68	3.37%	1295	275
L_7	26635	1921.97	3.90%	1340	320
L_8	29189	1906.86	4.66%	1380	360

MALLADO C (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			20 – 200 m ²		20 – 100 – 1000 m ²	
MALLADO C	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)					
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)	
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0	
L_1	1334	1996.10	0.19%	1035	15	
L_2	3944	1985.25	0.74%	1070	50	
L_3	6393	1977.02	1.15%	1105	85	
L_4	12557	1964.13	1.79%	1175	155	
L_5	17541	1950.07	2.50%	1240	220	
L_6	23218	1932.30	3.38%	1295	275	
L_7	26635	1921.61	3.92%	1335	315	
L_8	29189	1907.28	4.64%	1375	355

MALLADO D (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			2.5 – 25 m²		25 – 125 – 1000 m²	
MALLADO D						
Sección	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)					
Entrada	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)	
L_1	0	2000.00	0.00%	1020	0	
L_2	1334	1996.13	0.19%	1035	15	
L_3	3944	1985.19	0.74%	1070	50	
L_4	6393	1977.02	1.15%	1105	85	
L_5	12557	1964.15	1.79%	1175	155	
L_6	17541	1950.52	2.47%	1240	220	
L_7	23218	1931.89	3.41%	1295	275	
L_8	26635	1921.37	3.93%	1335	315

MALLADO E (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			30 – 30 m ²		30 – 150 – 1000 m ²	
MALLADO E	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)					
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)	
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0	
L_1	1334	1995.94	0.20%	1035	15	
L_2	3944	1985.28	0.74%	1070	50	
L_3	6393	1977.26	1.14%	1105	85	
L_4	12557	1964.44	1.78%	1175	155	
L_5	17541	1951.01	2.45%	1240	220	
L_6	23218	1932.03	3.40%	1295	275	
L_7	26635	1921.58	3.92%	1335	315	
L_8	29189	1907.15	4.64%	1375	355

MALLADO F (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			3.5 – 35 m ²		35 – 175 – 1000 m ²	
MALLADO F	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)					
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)	
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0	
L_1	1334	1996.17	0.19%	1035	15	
L_2	3944	1985.44	0.73%	1070	50	
L_3	6393	1977.33	1.13%	1105	85	
L_4	12557	1964.78	1.76%	1175	155	
L_5	17541	1951.50	2.43%	1240	220	
L_6	23218	1932.12	3.39%	1295	275	
L_7	26635	1921.91	3.90%	1335	315	
L_8	29189	1907.92	4.60%	1375	355

MALLADO G (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			4 – 40 m ²	40 – 200 – 1000 m ²	
MALLADO G	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.97	0.20%	1035	15
L_2	3944	1985.64	0.72%	1070	50
L_3	6393	1977.73	1.11%	1105	85
L_4	12557	1965.36	1.73%	1175	155
L_5	17541	1951.31	2.43%	1240	220
L_6	23218	1930.14	3.49%	1290	270
L_7	26635	1921.49	3.93%	1340	320
L_8	29189	1908.19	4.59%	1375	355

MALLADO H (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			4.5 – 45 m ²	45 – 225 – 1000 m ²	
MALLADO H	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.16	0.19%	1035	15
L_2	3944	1985.61	0.72%	1070	50
L_3	6393	1977.47	1.13%	1105	85
L_4	12557	1965.09	1.75%	1175	155
L_5	17541	1951.36	2.43%	1240	220
L_6	23218	1931.37	3.43%	1290	270
L_7	26635	1921.67	3.92%	1340	320
L_8	29189	1908.21	4.59%	1375	355

MALLADO I (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			50 – 500 m ²	50 – 250 – 1000 m ²	
MALLADO I	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.20	0.19%	1035	15
L_2	3944	1985.81	0.71%	1070	50
L_3	6393	1977.88	1.11%	1105	85
L_4	12557	1965.51	1.72%	1175	155
L_5	17541	1952.05	2.40%	1240	220
L_6	23218	1931.15	3.44%	1290	270
L_7	26635	1921.59	3.92%	1340	320
L_8	29189	1909.11	4.54%	1375	355

MALLADO J (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			10 – 100 m ²	100 – 500 – 1000 m ²	
MALLADO J	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.29	0.19%	1035	15
L_2	3944	1986.38	0.68%	1070	50
L_3	6393	1978.63	1.07%	1105	85
L_4	12557	1966.71	1.66%	1175	155
L_5	17541	1950.72	2.46%	1235	215
L_6	23218	1932.11	3.39%	1300	280
L_7	26635	1923.01	3.85%	1340	320
L_8	29189	1910.28	4.49%	1375	355

MALLADO K (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			20 – 2000 m ²	100– 1000 m ²	
MALLADO K	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.25	0.19%	1035	15
L_2	3944	1987.15	0.64%	1070	50
L_3	6393	1979.82	1.01%	1105	85
L_4	12557	1967.73	1.61%	1175	155
L_5	17541	1955.05	2.25%	1235	215
L_6	23218	1938.70	3.07%	1295	275
L_7	26635	1929.10	3.54%	1335	315
L_8	29189	1913.44	4.33%	1375	355

MALLADO L (sin delimitación de cauce de aguas bajas):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO			200 – 1000 m ²	200 – 1000 m ²	
MALLADO L	(sin delimitación de cauce de aguas bajas)				
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m³/s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1996.41	0.18%	1035	15
L_2	3944	1988.20	0.59%	1070	50
L_3	6393	1981.74	0.91%	1100	80
L_4	12557	1970.56	1.47%	1170	150
L_5	17541	1958.91	2.05%	1230	210
L_6	23218	1944.96	2.75%	1290	270
L_7	26635	1935.11	3.24%	1330	310
L_8	29189	1919.02	4.05%	1370	350

MALLADO M (sin delimitación de cauce de aguas bajas; mallado inteligente):

RESULTADOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL MALLADO <i>Mallado inteligente 1 – 1000 m². $\Delta h = 1\text{ m}$</i>					
MALLADO M (sin delimitación de cauce de aguas bajas; mallado inteligente)					
Sección	Distancia al inicio (m)	Q pico (m ³ /s)	Laminación (%)	t _{Q pico} (min)	Retraso en t _{Q pico} (min)
Entrada	0	2000.00	0.00%	1020	0
L_1	1334	1995.39	0.23%	1035	15
L_2	3944	1982.44	0.88%	1075	55
L_3	6393	1971.46	1.43%	1105	85
L_4	12557	1959.29	2.04%	1180	160
L_5	17541	1945.41	2.73%	1245	225
L_6	23218	1928.85	3.56%	1300	280
L_7	26635	1917.72	4.11%	1345	325
L_8	29189	1898.15	5.09%	1385	365

ANEJO C. SECCIÓN EQUIVALENTE DE OCHO PUNTOS

C.1. INTRODUCCIÓN

En la modelización hidrológica de los tránsitos por el cauce el método más utilizado es el Muskingum-Cunge con secciones de ocho puntos. El objetivo de este anejo es analizar la metodología aplicable a un tramo de cauce natural que permita aproximar su comportamiento a una sección de ocho puntos.

Para ello se ha analizado inicialmente, un cauce de sección constante y con pendiente uniforme, una vez conseguida una metodología, ésta se ha aplicado a cauces naturales.

C.2. OBTENCIÓN DE UNA SECCIÓN EQUIVALENTE DE OCHO PUNTOS

Resulta difícil y en general poco objetivo el tipificar un tramo de un río con una sola sección formada por un cauce central y dos bancadas laterales. Si bien existen criterios de uniformidad de la pendiente, de la forma de la sección (anchos del cauce central, taludes, etc.), los resultados son en general poco fiables y sobre todo no se pueden objetivar.

En el presente anejo se desarrolla una metodología para, partiendo de un análisis hidráulico, obtener la sección de ocho puntos representativa del tramo.

Los parámetros analizados son la pendiente de la lámina de agua y las curvas cotas-anchuras así como el valor y distribución de la n de Manning.

C.2.1. CURVA COTAS-ANCHOS EN UN CAUCE DE SECCIÓN CONSTANTE

Partiendo de un análisis hidráulico de un tramo de cauce uniforme con pendiente y sección constante se han obtenido las curvas de la lámina libre de un tramo con el objetivo de determinar la pendiente media del tramo y las curvas cotas-anchos.

El tramo analizado tiene una longitud de 5000 m, pendiente uniforme de 0.002 y rugosidad constante $n=0.060$.

La sección tipo está incluida en la tabla y figura adjunta:

Punto	X	Y
1	0.00	110.00
2	8.00	102.00
3	108.00	102.00
4	110.00	100.00
5	170.00	100.00
6	174.00	104.00
7	374.00	106.00
8	378.00	110.00

Tabla C.1. Sección tipo

Figura C.1. Sección tipo con bancadas a distinto nivel

Dado que es un movimiento uniforme se ha realizado un análisis hidráulico con HEC-RAS, obteniéndose los resultados que se adjuntan en el gráfico siguiente:

Figura C.2. Resultados del HEC-RAS

Los resultados numéricos se incluyen en la tabla adjunta:

Q (m ³ /s)	Cota fondo (m)	Cota lamina agua (m)	P energía (m/m)	Área flujo (m ²)	Ancho m. iz (m)	Ancho m. dz (m)	Ancho total (m)
5	104	104.270	0.002003	16.2	30.27	30.27	60.54
25	104	104.710	0.002001	42.9	30.71	30.71	61.41
100	104	105.620	0.002002	100.1	31.63	31.63	63.25
150	104	106.070	0.001999	134.9	132.07	32.07	164.13
600	104	107.760	0.002003	415.6	133.76	33.76	167.52
1000	104	108.700	0.002000	599.5	134.70	104.00	239.19
1500	104	109.570	0.002001	844.1	135.57	191.00	326.53
2000	104	110.230	0.002000	1077.6	136.23	234.23	370.45
4000	104	112.090	0.002000	1772.9	138.09	236.09	374.19
6000	104	113.540	0.002000	2316.3	139.54	237.54	377.08

Tabla C.2. Resumen de los resultados hidráulicos

Con los resultados del cálculo hidráulico se pueden representar los gráficos cotas del agua-anchos separando la margen derecha e izquierda (ver figura adjunta):

Figura C.3. Gráfico cotas-anchos

Una vez obtenido el gráfico cotas-anchos se pueden identificar cada uno de los elementos que estructuran una sección de ocho puntos, es decir que para cada margen se puede obtener:

- Ancho del cauce central
- Taludes del cauce central
- Ancho y taludes de cada una de las bancadas.
- Taludes externos de las bancadas

La forma de obtenerlos es por regresión lineal en el gráfico cotas-anchos. En el gráfico adjunto se incluye la obtención de estos valores para la margen derecha del modelo analizado.

Figura C.4. Gráfico cotas-anchos margen derecha

En el gráfico C.4 se han incluido las líneas de tendencia de los tres tramos diferenciados en la margen derecha de la sección. Partiendo de esos datos se puede reconstruir la forma de la sección inicial con los siguientes criterios:

- En primer lugar el ancho de la sección en la base del cauce de aguas bajas corresponde al ancho para el caudal más bajo, aunque podría extrapolarse desde caudales mayores utilizando la línea de tendencia de la zona baja. Éste correspondería al punto número 5 de la sección (si se analiza la margen izquierda se obtendría el punto 4).
- La pendiente de la línea de tendencia (en el caso analizado es 0.9977), corresponde a la pendiente entre el punto 5 y 6 (talud del cauce de aguas bajas).
- La línea de tendencia de la zona media proporcionará la pendiente de la bancada.
- La tendencia del tramo final proporciona los valores de los últimos puntos, 7 y 8.

En el caso analizado con sección y pendiente constante, la reconstrucción de la sección es inmediata y exacta como se puede apreciar en la figura adjunta, en la que se ha reconstruido la sección ordenando los gráficos de cotas-anchos.

El problema se presenta en un cauce natural en el que lógicamente no existirá uniformidad en la “forma” de la sección.

Figura C.5. Sección tipo reconstruida

C.2.2. CURVA COTAS-ANCHOS EN CAUCE NATURAL

Los cauces naturales no tienen lógicamente una sección constante sino que varían a lo largo de su desarrollo. En el presente apartado del anejo se incluye la metodología para la obtención de una sección de ocho puntos aplicable a un cauce natural.

El proceso es similar al utilizado anteriormente, en primer lugar se parte del MDT de un cauce; ver figuras adjuntas.

Figura C.6. MDT del cauce natural Esla-01

Figura C.7. Imagen 3D del MDT del cauce natural Eslla-01

En una segunda fase se analiza el comportamiento hidráulico del tramo para evaluar la capacidad de laminación. Los caudales utilizados deben cubrir la totalidad de los que puedan circular en el tramo, desde los más pequeños que permiten determinar el cauce de aguas bajas hasta los máximos que puedan circular por el tramo. Por otra parte el objetivo es determinar la zona ocupada por cada caudal en régimen permanente.

Los caudales utilizados en el tramo analizado son:

Caudal (m ³ /s)	Comentarios
10	Caudal mínimo para determinar el "fondo" del cauce de aguas bajas
200	Caudal que circula por el cauce de aguas bajas sin desbordamientos importantes
445	Caudal estimado del dominio público hidráulico
600	Caudal de inicio del desbordamiento generalizado del cauce de aguas bajas
800	Caudal de desbordamiento 1
1000	Caudal de desbordamiento 2
1500	Caudal de desbordamiento 3
2000	Avenida correspondiente al periodo de retorno 500
2500	Avenida máxima de estudio

Tabla C.3. Caudales utilizados en el modelo de cauce natural

Dado que los modelos bidimensionales se calculan en régimen variable, los hidrogramas utilizados se inician en cero, tienen una rama ascendente y son constantes en su tramo final para simular el régimen permanente, ver figura adjunta:

Figura C.8. Hidrograma de 2000 m³/s utilizado en el cauce natural

El tercer paso es realizar los cálculos hidráulicos, para lo cual se incluyen las rugosidades obtenidas del PNOA cuyo resumen está incluido en la figura siguiente. Adicionalmente se deben de delimitar con líneas de rotura las zonas singulares, como es el cauce u otras áreas en las que se desee mayor precisión, posteriormente se delimitan zonas de mallado, situando en las zonas más sensibles mayor densidad de triángulos de malla. En las figuras siguientes se han incluido distintas zonas de mallado.

Figura C.9. Detalle de mallado con distintos grados de refinamiento de la malla

Figura C.10. Distribución de rugosidades en el cauce natural

Por último se deben de incluir las condiciones de borde del tramo, el modelo bidimensional utilizado tiene un total de 1.113.000 elementos.

Los resultados se pueden conocer en cada uno de los triángulos del modelo, debido a la gran cantidad de información disponible se han seleccionado una serie de líneas y puntos de resultados que facilitan la interpretación de estos resultados.

Q (M ³ /s)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
10	720.859	717.820	715.616	709.621	705.234	700.960	698.245	699.945
200	722.821	720.038	717.693	711.829	707.969	703.828	700.642	699.945
445	723.852	721.278	718.828	713.268	709.183	704.764	701.814	699.945
600	724.215	721.613	719.155	713.694	709.401	705.015	702.203	700.083
800	724.543	721.835	719.373	713.940	709.548	705.217	702.498	700.398
1000	724.780	721.995	719.529	714.095	709.675	705.361	702.682	700.580
1500	725.178	722.317	719.780	714.343	709.944	705.617	702.990	700.909
2000	725.463	722.563	719.956	714.520	710.166	705.806	703.220	701.124
2500	725.700	722.762	720.105	714.681	710.359	705.957	703.416	701.334

Tabla C.4. Caudales utilizados en el modelo de cauce natural

Con los datos anteriores se puede calcular la pendiente en cada tramo del cauce natural (ver tabla y figura adjuntas).

Q (m ³ /s)	Pendiente superficie agua
10	0.00109961
200	0.00107849
445	0.00107164
600	0.00107035
800	0.00107194
1000	0.00107454
1500	0.00107895
2000	0.00108162
2500	0.00108357

Tabla C.5. Pendientes medias para distintos caudales

Figura C.11. Pendientes para distintos caudales

En el gráfico se aprecia que las distintas líneas de la pendiente del agua son muy similares y si se analiza con detalle una cualquiera de ellas, por ejemplo la correspondiente a 2000 m³/s, se observa que la aproximación lineal es casi completa, por lo que en el tramo se puede considerar como valor medio de la pendiente 0.001078.

Figura C.12. Pendiente representativa

La obtención de la sección equivalente de ocho puntos se realiza partiendo de la curva cotas-anchos, ver figura adjunta.

Figura C.13. Curvas cotas-anchos

Partiendo de estas curvas se pueden calcular las tendencias de cambio de pendiente, con ellas se pueden obtener los puntos que definen la sección tipo de ocho puntos.

Figura C.14. Líneas de tendencia en las curvas cotas-anchos

La intersección de las dos líneas de tendencia nos identifican el punto de la sección, según:

Ecuaciones de la intersección:

$$y = 0.0012 x + 712.7$$

$$y = 0.0046 x + 711.52$$

La intersección es:

$$x = 347.06$$

$$y = 713.12$$

Realizado esto con la totalidad de los puntos resultan los valores:

Punto	X	Y
1	0.00	714.681
2	78.98	713.694
3	603.44	711.829
4	702.60	709.621
5	770.68	709.621
6	816.93	711.829
7	1097.46	713.116
8	2284.94	714.510

Tabla C.6 Sección equivalente de 8 puntos

Figura C.15. Sección equivalente de ocho puntos

Por último se han calculado los valores medios de la n de Manning para las distintas zonas de flujo, los resultados se incluyen en la tabla adjunta:

Q (m ³ /s)	Manning
10	0.070
200	0.069
445	0.060
600	0.054
800	0.053
1000	0.052
1500	0.052
2000	0.051
2500	0.051

Tabla C.7 Valores medios de la n de Manning

C.3. COMPARACIÓN RESULTADOS HEC-HMS Y MODELOS 2D

Una vez obtenida la sección equivalente de ocho puntos se pueden comparar los resultados que se obtienen con el modelo HEC-HMS y los modelos bidimensionales.

C.3.1. MODELO HEC-HMS

Los datos para el modelo HEC-HMS obtenidos del análisis hidráulico en régimen permanente son:

- Pendiente media de la sección:

$$S=0.00178$$

- Sección tipo de ocho puntos:

Punto	X	Y
1	0.00	714.681
2	78.98	713.694
3	603.44	711.829
4	702.60	709.621
5	770.68	709.621
6	816.93	711.829
7	1097.46	713.116
8	2284.94	714.510

- Rugosidad de Manning. Se considera uniforme de valor 0.054.
- Longitud del cauce 23712 m

Con estos datos se ha realizado un modelo HEC-HMS simple (ver figura adjunta), formado por un cauce y un tránsito.

Figura C.16. Modelo HEC-HMS

El cauce tiene las características siguientes:

- Área 3500 Km²
- Tiempo de concentración 13.3 horas
- Índice de curva 78
- Hidrograma SCS

Por lo que el cauce proporciona un hidrograma del tipo SCS con un pico de 2000 m³/s.

El tránsito utilizado en el modelo HEC-HMS, tiene las características:

- Metodología Muskingum-Cunge de ocho puntos
- Longitud del tramo 23712 m
- Pendiente 0.001078127
- La sección de ocho puntos es la de la tabla C-7
- n de Manning 0.054 en bancadas y cauce.

Los resultados están recogidos en la tabla y figuras adjuntas:

Project : Modelos_2D Run Name : Run 2 Reach : Pen. 0.001078

Start of Run : 01Jan14 0000 Basin Model : Esquema1
 End of Run : 04Jan14 0000 Met. Model : 12h unif
 Execution Time : 25Sep15 1711 Control Specs : 12h unif

Volume Units : ☒ Millimeters ☐ Thousand Cubic Meters

Computed Results

Peak Inflow : 2000.1 (cms) Date/Time of Peak Inflow : 01 Jan 14 1700
 Peak Outflow : 1903.4 (cms) Date/Time of Peak Outflow : 01 Jan 14 2350
 Peak Stage :

Total Inflow : 25.7 (mm) Total Outflow : 25.6 (mm)

Print Close

Figura C.17. Resultados del modelo HEC-HMS

Figura C.18. Hidrograma de entrada y tránsito del modelo HEC-HMS

El resumen del tránsito es:

	Entrada	Salida	Laminación %	Desfase (h)	Vol. retenido
Caudal pico (m ³ /s)	2000.1	1903.4	4.83		
Tiempo de pico (h)	17	23.83	-	5.83	
Volumen (hm ³)	89.95	89.6			0.35

Tabla C.8 Resumen de la laminación con HEC-HMS

C.3.1. MODELO BIDIMENSIONAL

Utilizando el modelo bidimensional descrito en el apartado anterior, con un caudal de 2000 m³/s y una malla de 1113000 elementos, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla y figuras adjuntas:

Figura C.19. Comparación del modelo bidimensional con el modelo HEC-HMS

El gráfico anterior muestra que el modelo HEC-HMS tiene unos resultados similares al modelo 2D en cuanto al caudal máximo y al tiempo en el que se produce, pero presenta diferencias en el tramo ascendente y descendente del hidrograma.

En la tabla adjunta se cuantifican estos resultados:

	Entrada	Salida HEC_HMS	Laminación (%)	Desfase (h)	Salida modelo 2D	Laminación (%)	Desfase (h)
Caudal pico (m ³ /s)	2000	1903.4	4.83		1900.32	4.98	
Tiempo de pico (h)	17	23.83	-	6.83		23.17	6.17

Tabla C.9. Comparación entre resultados de laminación con HEC-HMS y con modelos 2D

De la tabla anterior se deduce que la laminación es similar en ambos métodos pero el tiempo de tránsito es ligeramente superior en el modelo bidimensional.

ANEJO D. ANÁLISIS DIMENSIONAL

D.1. INTRODUCCIÓN

El análisis dimensional es una técnica matemática utilizada en la investigación numérica y experimental para abordar problemas de la hidráulica, ya que se pueden determinar los parámetros físicos que influyen sustancialmente en el fenómeno y luego, agrupándolos en combinaciones adimensionales, permite un mejor conocimiento del mismo.

El análisis dimensional se basa en el hecho de que toda ecuación que relaciona magnitudes físicas tiene que ser dimensionalmente homogénea; es decir, los términos de la ecuación deben tener las mismas dimensiones. Muchas de las fórmulas desarrolladas han sido obtenidas por el ajuste de las ecuaciones que relacionan los datos observados en determinados estudios experimentales.

El método utilizado en el análisis dimensional fue propuesto inicialmente por Buckingham (1915), aunque existe numerosa bibliografía más reciente [Arenas, A. (1986); Franzini, J. y Finnemore, E.J. (1997)] y se basa en la agrupación de los parámetros que afectan en un determinado fenómeno, en un número menor de grupos de variables adimensionales que son conocidas como monomios adimensionales π .

Si denominamos como $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ las n variables que afectan a un determinado fenómeno físico, la ecuación dimensionalmente homogénea que relaciona estas variables tiene la forma:

$$F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

Mediante el teorema π , Buckingham, demostró que la ecuación anterior puede ser escrita según:

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-s}) = 0$$

Donde cada monomio π_i es un producto adimensional independiente de alguna de las variables x_i y s es la reducción en el número de términos desde n hasta $n-s$. El valor de reducción es normalmente igual al número de dimensiones fundamentales m implicadas en todas las variables.

La aplicación del análisis dimensional a un caso particular requiere un conocimiento del fenómeno físico y de su observación experimental o bien su análisis numérico para determinar inicialmente las variables involucradas y posteriormente para evaluar las relaciones existentes entre ellas. A continuación se indican los pasos a seguir

D.2. METODOLOGÍA

El procedimiento de utilización del análisis dimensional tiene los siguientes pasos:

- Análisis de las variables consideradas en el fenómeno.
- Buscar las dimensiones de cada una de las variables.
- Elegir las variables consideradas como fundamentales.
- Calcular los monomios adimensionales.
- Basándose en el esquema anterior se procede a la aplicación de esta metodología.

D.2.1. MAGNITUDES FÍSICAS

Las magnitudes físicas que afectan al fenómeno que se está analizando pueden agruparse en:

- Parámetros geométricos. Longitud del cauce (L), desnivel del cauce (H), ancho total del cauce (B), pendiente (S).
- Parámetros del fluido: viscosidad (μ), densidad del agua (ρ_a), gravedad (g).
- Parámetros del flujo: Caudal máximo entrada (Q), Caudal máximo salida (Q_T), volumen del hidrograma (V), rugosidad del cauce (n), tiempo de tránsito (T_T).

El análisis inicial de las variables anteriormente descritas permite establecer una serie de condicionantes previos que permiten simplificar la ecuación que relaciona las variables consideradas.

En primer lugar existen relaciones geométricas iniciales como son la pendiente como cociente entre el desnivel y la longitud, etc. Por lo que sólo se necesita considerar una parte de estas magnitudes.

En segundo lugar el flujo dentro del cauce puede considerarse en su totalidad turbulento desarrollado.

En tercer lugar aunque en un planteamiento totalmente ortodoxo la pérdida de energía por rugosidad se debería abordar a través de la rugosidad absoluta, se considera que de cara a la utilización práctica, es conveniente utilizar el número de Manning n como medida de la rugosidad y como ya se ha analizado la influencia de la distribución del valor de la n de Manning en el cauce es relativamente baja, por lo que se puede considerar un valor medio.

D.2.2. MONOMIOS ADIMENSIONALES

Partiendo de los parámetros y condicionantes analizados se puede escribir la ecuación dimensionalmente homogénea que relaciona estas variables como:

$$F(H, L, S, B, \mu, \rho_a, Q; Q_S; V_H, Q_T, n, T_T) = 0$$

Según lo analizado anteriormente, en la ecuación las magnitudes de longitud están relacionadas entre sí, según:

$$\text{Pendiente } S = H/L$$

$$\text{Coeficiente de laminación } C_L = Q_T / Q_p$$

$$\text{El tiempo de tránsito es función de otros parámetros } (Q, V; L, B)$$

Con lo que la ecuación anterior puede expresarse como:

$$F(H, L, B, n; Q; Q_S; V; \rho_a; \mu) = 0$$

Por tanto se tienen 9 variables que tienen influencia en el comportamiento del flujo en un cauce, por lo que $n=9$.

El sistema dimensional elegido es el de Masa (M), longitud (L), y tiempo (T), con lo cual es posible expresar las dimensiones de las variables en función de este sistema establecido, tabla D.1.

Como se dispone de tres dimensiones (M, L, T), el número de grupos adimensionales necesarios está dado por $n - 3 = 6$, por lo que se puede escribir:

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0$$

Donde cada monomio es un producto adimensional independiente.

Variable	Unidades	Dimensiones
H	m	L
L	m	L
B	m	L
n		T/L ^{1/3}
Q	m³/s	L³/T
Q_T	m ³ /s	L ³ /T
V	m ³	L ³
ρ_a	Kg/m³	M / L³
μ	Kg/m.s	M / T L

Tabla D.1. Dimensiones y unidades de las variables relacionadas con el fenómeno físico

De la lista de variables dimensionales que influyen en el fenómeno que se estudia, se han seleccionado 3 variables primarias que contienen las tres dimensiones fundamentales que son:

Longitud del cauce (L)

Densidad del agua (ρ_a)

Caudal de entrada al cauce (Q)

Elevando las variables fundamentales a exponentes, con cada una de las variables restantes, una por una, se formaron los grupos π_i adimensionales según:

$$\pi_1 = L^{x_1} \rho_a^{y_1} Q^{z_1} H$$

$$\pi_2 = L^{x_2} \rho_a^{y_2} Q^{z_2} B$$

$$\pi_3 = L^{x_3} \rho_a^{y_3} Q^{z_3} n$$

$$\pi_4 = L^{x_4} \rho_a^{y_4} Q^{z_4} Q_S$$

$$\pi_5 = L^{x_5} \rho_a^{y_5} Q^{z_5} V$$

$$\pi_6 = L^{x_6} \rho_a^{y_6} Q^{z_6} \mu$$

Al ser los grupos π adimensionales ($M^0 L^0 T^0$), y para satisfacer la homogeneidad dimensional, se deben igualar los exponentes de cada dimensión en ambos lados de la ecuación, permitiendo calcular los exponentes según:

Para π_1 :

$$\pi_1 = L^{x_1} \rho_a^{y_1} Q^{z_1} H$$

$$L^0 M^0 T^0 = (L)^{x_1} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_1} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_1} (L)$$

Igualando los exponentes en L , M y T se obtiene:

$$L: \quad 0 = x_1 - 3y_1 + 3z_1 + 1 \quad \text{Resolviendo:} \quad 0 = x_1 + 1$$

$$M: \quad 0 = 0 + y_1 + 0 + 0 \quad y_1 = 0$$

$$T: \quad 0 = 0 + 0 - z_1 + 0 \quad z_1 = 0$$

$$\text{Por lo que} \quad x_1 = -1, \quad y_1 = 0 \quad z_1 = 0$$

Resultando como primer monomio:

$$\boxed{\pi_1 = \frac{L}{H}}$$

El monomio π_2 es:

$$\pi_2 = L^{x_2} \rho_a^{y_2} Q^{z_2} B$$

$$L^0 M^0 T^0 = (L)^{x_2} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_2} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_2} (L)$$

$$L: \quad 0 = x_2 - 3y_2 + 3z_2 + 1 \quad x_2 - 3 + 3 + 1 = 0$$

$$M: \quad 0 = 0 + y_2 + 0 + 0 \quad \text{Resolviendo:} \quad y_2 = 0$$

$$T: \quad 0 = 0 + 0 - z_2 + 0 \quad z_2 = 0$$

$$\text{Despejando:} \quad x_2 = -1, \quad y_2 = 0 \quad \text{y} \quad z_2 = 0$$

Por lo que:

$$\boxed{\pi_2 = \frac{B}{L}}$$

Para π_3 :

$$\pi_3 = L^{x_3} \rho_a^{y_3} Q^{z_3} n$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L)^{x_3} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_3} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_3} \left(\frac{T}{L^{1/3}} \right)$$

$$L: \quad 0 = x_3 - 3y_3 + 3z_3 - 1/3 \quad x_3 + 1 - 1/3 = 0$$

$$M: \quad 0 = 0 + y_3 + 0 + 0 \quad \text{Resolviendo:} \quad y_3 = 0$$

$$T: \quad 0 = 0 + 0 - z_3 + 1 \quad z_3 = 1$$

$$\text{Despejando:} \quad x_3 = -8/3, \quad y_3 = 0 \quad \text{y} \quad z_3 = 1$$

Por tanto:

$$\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}}$$

Para π_4

$$\pi_4 = L^{x_4} \rho_a^{y_4} Q^{z_4} Q_s$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L)^{x_4} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_4} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_4} \left(\frac{L^3}{T} \right)$$

$$L : \quad 0 = x_4 - 3y_4 + 3z_4 + 3 \quad x_4 = 0$$

$$M : \quad 0 = 0 + y_4 + 0 + 0 \quad \text{Resolviendo} \quad y_4 = 0$$

$$T : \quad 0 = 0 + 0 + z_4 + 1 \quad z_4 = -1$$

Por tanto:

$$\pi_4 = \frac{Q_s}{Q}$$

El monomio π_5

$$\pi_5 = L^{x_5} \rho_a^{y_5} Q^{z_5} V$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L)^{x_5} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_5} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_5} (L^3)$$

$$L : \quad 0 = x_5 - 3y_5 + 3z_5 + 3 \quad x_5 = -3$$

$$M : \quad 0 = 0 + y_5 + 0 + 0 \quad \text{Resolviendo} \quad y_5 = 0$$

$$T : \quad 0 = 0 + 0 + z_5 + 0 \quad z_5 = 0$$

Por tanto:

$$\pi_5 = \frac{V}{L^3}$$

El monomio π_6

$$\pi_6 = L^{x_6} \rho_a^{y_6} Q^{z_6} \mu$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L)^{x_6} \left(\frac{M}{L^3} \right)^{y_6} \left(\frac{L^3}{T} \right)^{z_6} \left(\frac{M}{T L} \right)$$

$$L : \quad 0 = x_6 - 3y_6 + 3z_6 - 1 \quad x_6 = 1$$

$$M : \quad 0 = 0 + y_6 + 0 + 1 \quad \text{Resolviendo} \quad y_6 = -1$$

$$T : \quad 0 = 0 + 0 - z_6 - 1 \quad z_6 = -1$$

Por tanto:

$$\pi_6 = \frac{L \mu}{Q \rho_a}$$

Las fórmulas de cada número adimensional π se pueden reorganizar con el fin de obtener la expresión más acorde con la formulación del caudal de tránsito, los monomios π toman la expresión:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{H}{L} & \pi_2 &= \frac{L}{B} & \pi_3 &= \frac{Q n}{L^{8/3}} \\ \pi_4 &= \frac{Q_S}{Q} & \pi_5 &= \frac{V}{L^3} & \pi_6 &= \frac{L \mu}{Q \rho_a} \end{aligned}$$

El monomio $\pi_1 = \frac{H}{L}$, correspondía a la inversa de la pendiente, el monomio $\pi_2 = \frac{L}{B}$, relaciona la longitud del tránsito y el ancho de la sección, $\pi_6 = \frac{L \mu}{Q \rho_a}$ es una variante del número de Reynolds, por lo que si su valor es suficientemente alto el flujo turbulento es totalmente desarrollado y puede no considerarse.

El monomio $\pi_3 = \frac{Q n}{L^{8/3}}$ relaciona la rugosidad, el caudal y la longitud del tránsito y el monomio $\pi_4 = \frac{Q_S}{Q}$ relaciona los caudales iniciales y el de final del tránsito. El monomio $\pi_5 = \frac{V}{L^3}$ relaciona el volumen total del hidrograma de entrada con la longitud del tránsito.

Con todo ello se puede escribir la ecuación general en la forma:

$$\Phi \left(\frac{H}{L}; \frac{L}{B}; \frac{n Q}{L^{8/3}}; \frac{V}{L^3}; \frac{Q_S}{Q} \right) = 0$$

O bien de forma explícita:

$$\frac{Q_S}{Q} = \Phi \left(\frac{H}{L}; \frac{L}{B}; \frac{n Q}{L^{8/3}}; \frac{V}{L^3} \right)$$

Donde:

- H = Desnivel del cauce
- L = Longitud del cauce.
- B = Ancho del cauce.
- n = Numero de Manning.
- V = Volumen del hidrograma.
- Q = Caudal al inicio del cauce.
- Q_S = Caudal al final del tránsito.

ANEJO E. RESUMEN DE CÁLCULOS DE LOS TRÁNSITOS

E.1. INTRODUCCIÓN

El presente anejo contiene las fichas de los resultados de los cálculos realizados con el modelo hidráulico bidimensional. Se han utilizado cauces sintéticos de sección constante y cauces naturales.

E.2. CÁLCULOS REALIZADOS

Se ha realizado el análisis del tránsito de avenidas en cuencas de cauces prismáticos en las que se ha variado la pendiente, la longitud, la rugosidad, el caudal de entrada, etc. También se han estudiado cauces naturales, en los que se han analizado los resultados del tránsito para distintos caudales.

En ambos casos se han analizado los resultados con modelos bidimensionales y con el modelo hidrológico HEC.HMS.

E.2.1. CAUCES PRISMÁTICOS

Las cuencas prismáticas están formadas por un cauce de aguas bajas (figura 1), y dos bancadas laterales.

Figura E.1. Cauce prismático

En el cuadro adjunto se incluyen los datos y resultados de los tránsitos por estos cauces.

Cauce	Long (km)	Pend cuenca	n	Ancho (m)	Lluvia (h)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2D Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)	HMS Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	878.6	5.00	917.4	4.67
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1860.1	3.42	1887.4	3.33
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3813.3	2.42	3825.4	2.42
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	983.7	4.08	984.0	4.08
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1975.9	3.25	1975.2	3.25
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3962.6	2.25	3960.4	2.25
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	767.7	6.8	818.2	6.42
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1683.7	4.8	1728.3	4.67
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3563.4	3.3	3589.0	3.42
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	965.5	5.3	968.2	5.25
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1950.3	4.1	1950.1	4.08
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	3920.0	2.92
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	964.6	2.17	968.8	2.17
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1948.0	1.58	1949.3	1.58

Cauce	Long (km)	Pend cuenca	n	Ancho (m)	Lluvia (h)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2D Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)	HMS Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3915.9	1.17	3914.4	1.17
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	991.9	2.00	992.0	2.00
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1988.0	1.75	1987.5	1.75
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3980.9	1.08	3979.8	1.08
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	920.0	2.9	932.2	2.92
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1885.6	2.1	1893.4	2.08
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3820.3	1.5	3820.2	1.58
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	991.9	2.0	984.0	2.58
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1975.0	2.2	1974.8	2.17
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	3959.2	1.42
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	923.7	3.58	939.1	3.42
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1901.6	2.50	1907.9	2.50
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3853.6	1.83	3846.9	1.83
P_114-16	20.0	0.001%	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	986.2	3.08	986.0	3.08
P_114-16	20.0	0.001%	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1979.4	2.50	1978.2	2.50
P_114-16	20.0	0.001%	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3968.2	1.67	3964.6	1.75
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	838.3	4.83	862.6	4.75
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1775.9	3.42	1788.2	3.42
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3681.9	2.42	3660.5	2.50
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	972.0	3.92	972.0	4.00
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1957.9	3.17	1955.4	3.17
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3936.3	2.17	3927.7	2.25
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	971.5	1.67	972.9	1.67
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1955.7	1.17	1955.3	1.25
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3927.5	0.92	3923.1	0.92
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	993.1	1.50	993.0	1.50
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1989.6	1.42	1978.2	2.50
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3983.6	0.83	3964.6	1.75
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	939.0	2.17	943.2	2.17
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1906.8	1.58	1906.0	1.58
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3849.4	1.17	3839.1	1.17
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	986.1	1.92	985.8	1.92
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1978.5	1.67	1977.3	1.67
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3966.1	1.08	3963.3	1.08
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	947.2	2.58	949.5	2.58
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1923.9	1.83	1917.4	1.92
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3882.3	1.33	3855.5	1.42
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	988.4	2.33	987.5	2.33
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1982.5	1.92	1980.0	2.00
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3973.6	1.25	3966.7	1.33
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	885.1	3.42	888.0	3.50
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1836.0	2.42	1818.0	2.58

Cauce	Long (km)	Pend cuenca	n	Ancho (m)	Lluvia (h)	Qi (m ³ /s)	To (m)	Vol (hm ³)	2D Qo (m ³ /s)	Desfase (m)	HMS Qo (m ³ /s)	Desfase (m)
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3761.2	1.75	3686.4	1.92
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	976.7	2.92	974.9	3.00
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1965.1	2.42	1958.8	2.50
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3948.7	1.58	3930.4	1.75
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	976.4	1.25	975.7	1.25
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1962.5	0.92	1958.7	0.92
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3938.2	0.67	3927.9	0.75
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	994.1	1.17	993.7	1.17
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1991.1	1.08	1989.9	1.08
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3985.7	0.67	3983.2	0.67
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	951.1	1.58	949.5	1.67
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1922.4	1.17	1913.3	1.25
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3873.0	0.83	3845.8	0.92
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	988.1	1.42	987.2	1.50
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1981.5	1.33	1979.0	1.33
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3970.9	0.83	3964.8	0.83
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	972.4	3.67	982.2	3.42
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1972.5	2.50	1972.6	2.50
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3956.5	1.83	3954.2	1.83
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	995.5	3.33	995.4	3.33
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1993.9	2.67	1993.3	2.67
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3990.5	1.83	3989.0	1.83
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	920.4	5.0	952.8	4.67
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1925.1	3.4	1942.8	3.25
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3902.7	2.4	3906.0	2.42
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	991.1	4.2	991.2	4.17
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1986.7	3.3	1986.3	3.33
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3979.1	2.3	3977.7	2.33
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	991.1	1.75	991.3	1.67
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1986.7	1.25	1986.1	1.25
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3978.7	0.92	3977.1	0.92
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	997.9	1.67	997.7	1.67
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1997.0	1.42	1996.6	1.42
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3995.5	0.92	3994.3	0.92
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	982.1	2.2	983.1	2.17
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1972.0	1.6	1972.2	1.58
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3953.7	1.2	3953.6	1.17
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	995.7	2.1	995.5	2.08
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1993.6	1.8	1993.1	1.75
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3989.8	1.2	3988.9	1.17
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	984.0	2.58	985.0	2.58
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1976.9	1.92	1975.9	1.92

Cauce	Long (km)	Pend cuenca	n	Ancho (m)	Lluvia (h)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2D Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)	HMS Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3963.0	1.42	3959.6	1.42
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	996.3	2.50	996.0	2.50
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1994.8	2.08	1994.0	2.08
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3991.6	1.33	3990.1	1.42
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	959.3	3.50	985.2	1.67
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1948.7	2.50	1975.4	1.25
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3919.4	1.83	3958.7	0.92
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	992.4	3.17	992.2	3.17
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1988.6	2.58	1987.8	2.58
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3981.9	1.75	3980.2	1.75
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	992.6	1.33	992.4	1.33
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1988.4	1.00	1987.6	0.92
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3980.9	0.67	3978.7	0.67
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	998.2	1.25	998.0	1.25
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1997.5	1.17	1997.0	1.17
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3994.9	0.92	3995.0	0.67
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	985.0	1.67	985.2	1.67
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1975.8	1.25	1975.4	1.25
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3960.2	0.92	3958.7	0.92
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	996.3	1.58	996.1	1.58
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1994.5	1.42	1993.8	1.42
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3990.9	0.83	3989.9	0.92
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	987.2	1.92	986.9	2.00
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1980.5	1.42	1978.1	1.50
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3968.4	1.08	3962.2	1.08
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	996.8	1.83	996.5	1.92
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1995.5	1.67	1994.6	1.67
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3992.9	1.08	3990.9	1.08
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	972.9	2.50	973.3	2.50
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1958.3	1.83	1955.1	1.92
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3931.4	1.33	3920.4	1.42
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	993.5	2.33	993.0	2.42
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1990.2	2.00	1988.8	2.08
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3984.4	1.33	3980.9	1.33
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	3	1000	380.0	21.1	993.9	1.00	993.4	1.00
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	3	2000	375.0	42.4	1990.2	0.75	1988.9	0.75
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	3	4000	370.0	85.5	3983.7	0.50	3980.4	0.58
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	12	1000	1040.0	43.4	998.5	0.92	998.2	0.92
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	12	2000	1005.0	89.7	1997.9	0.92	1997.3	0.92
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	12	4000	1000.0	185.3	3996.6	0.50	3995.3	0.50
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	3	1000	380.0	21.1	987.4	1.25	987.1	1.25
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	3	2000	375.0	42.4	1979.4	0.92	1977.6	0.92

Cauce	Long (km)	Pend cuenca	n	Ancho (m)	Lluvia (h)	Q_i (m ³ /s)	T_o (m)	Vol (hm ³)	2D Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)	HMS Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	3	4000	370.0	85.5	3965.5	0.67	3959.5	0.75
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	12	1000	1040.0	43.4	996.9	1.17	996.5	1.17
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	12	2000	1005.0	89.7	1995.2	1.08	1994.5	1.17
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	12	4000	1000.0	185.3	3992.2	0.67	3990.3	0.67

Tabla E.1. Cálculos realizados con cauces prismáticos

E.2.2. CAUCES NATURALES

Los cauces naturales analizados corresponden a tipologías diversas tanto en longitud como en pendiente y forma de la sección. En la tabla E.2 se incluyen los resultados de los cálculos:

Cauce	Nombre del río	Long. (km)	Pend cauce	n media	Lluvia (h)	Q_i (m ³ /s)	T_i (m)	Vol. (hm ³ /s)	2D Q_o (m ³ /s)	Desfase (m)	HMSQ (m ³ /s)	Desfase (m)
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	12	1000	1720	43.4	887.6	9.67	930.0	7.58
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	12	1500	1705	66.4	1405.8	7.42	1409.6	7.67
ES-01	Esla	23.71	0.001078	0.0524	12	2000	1700	89.7	1900.3	6.25	1900.9	6.92
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	3h	500	1405	14.7	491.07	3.33	495.49	3.33
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	3h	750	1355	23.1	738.63	2.92	744.6	2.83
CI-01	Gigüela	20.45	0.0025	0.0477	3h	1000	1350	31.8	985.97	2.67	993.79	2.50
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	3h	500	630	14.7	128.53	11.58	307.43	9.66
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	3h	750	625	23.1	246.33	9.583	493.96	9
CI-02	Gigüela	18.08	0.0008	0.055	3h	1000	620	31.8	371.80	9.66	684.4	8.08
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	3h	500	845	14.7	498.17	1.00	498.49	1.08
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	3h	750	835	23.1	747.90	0.83	748.10	0.92
ZA-01	Záncara	6.26	0.001918	0.050	3h	1000	825	31.8	997.32	0.83	997.74	0.83
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	72h	1000	8730	308.531	991.849	5.83	999.17	5.67
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	72h	3000	8520	956.759	2997.87	3.42	2997.8	4.42
EB-01	Ebro	14.35	0.009	0.066	72h	6000	8400	1955.118	5997.5	2.33	5995.7	3.42
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	12h	500	855	13.813	495.393	1.08	494.38	1.33
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	12h	750	845	21.706	741.844	1.00	744.45	1.08
GU-01	Guadarrama	7670.4	0.001739	0.056	12h	1000	840	29.915	993.9	0.92	994.0	0.92
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	24h	1000	2535	121.661	996.733	2.67	999.59	1.58
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	24h	2000	2490	246.863	1993.819	2.33	1999.3	1.25
GQ-01	Guadalquivir	16353	0.001938	0.045	24h	4000	2445	501.028	3988.4	2.00	3998.5	1.08
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	12h	500	865	12.8	144.174	12.67	392.36	11.58
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	12h	750	860	20.1	332.979	10.08	629.23	9.50
CI-03	Gigüela	3367	0.0008	0.053	12h	1000	850	27.7	550.0	8.50	875.1	8.08
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	12h	500	855	13.8	488.389	1.67	494.94	1.67
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	12h	750	845	21.7	734.807	1.58	743.57	1.50
AZ-01	Azuer	1699	0.001584	0.048	12h	1000	840	29.9	982.1	1.42	993.2	1.25
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	12h	500	860	13.3	487.804	1.75	489.68	2.00
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	12h	750	850	20.9	735.461	1.58	742.14	1.42
JA-01	Jabalón	2337	0.001771	0.056	12h	1000	845	28.8	983.6	1.42	990.7	1.25

Tabla E.2. Cálculos realizados en cauces naturales

E.3. RESÚMENES DE RESULTADOS

E.3.1. CAUCES PRISMÁTICOS

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_011-13	20.0	0.001	0.04	50	1000	20	3

Sección prismática

RESULTADOS

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	878.6	5.00	12.14	917.4	4.67	8.27
2000	375.0	42.4	1860.1	3.42	6.99	1887.4	3.33	5.63
4000	370.0	85.5	3813.3	2.42	4.67	3825.4	2.42	4.37

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_014-16	20.0	0.001	0.04	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	983.7	4.08	1.63	984.0	4.08	1.60
2000	1005.0	89.7	1975.9	3.25	1.21	1975.2	3.25	1.24
4000	1000.0	185.3	3962.6	2.25	0.93	3960.4	2.25	0.99

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_021-23	20.0	0.001	0.06	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	767.7	6.8	23.23	818.2	6.42	18.18
2000	375.0	42.4	1683.7	4.8	15.82	1728.3	4.67	13.59
4000	370.0	85.5	3563.4	3.3	10.92	3589.0	3.42	10.28

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_024-26	20.0	0.001	0.06	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	965.5	5.3	3.45	968.2	5.25	3.18
2000	1005.0	89.7	1950.3	4.1	2.49	1950.1	4.08	2.50
4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	1.91	3920.0	2.92	2.00

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_011-13	10.0	0.001	0.04	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	964.6	2.17	3.54	968.8	2.17	3.12
2000	375.0	42.4	1948.0	1.58	2.60	1949.3	1.58	2.54
4000	370.0	85.5	3915.9	1.17	2.10	3914.4	1.17	2.14

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_014-16	10.0	0.001	0.04	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	991.9	2.00	0.81	992.0	2.00	0.80
2000	1005.0	89.7	1988.0	1.75	0.60	1987.5	1.75	0.63
4000	1000.0	185.3	3980.9	1.08	0.48	3979.8	1.08	0.50

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_021-23	10.0	0.001	0.06	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	920.0	2.9	8.00	932.2	2.92	6.78
2000	375.0	42.4	1885.6	2.1	5.72	1893.4	2.08	5.33
4000	370.0	85.5	3820.3	1.5	4.49	3820.2	1.58	4.50

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_024-26	10.0	0.001	0.06	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	991.9	2.0	0.81	984.0	2.58	1.60
2000	1005.0	89.7	1975.0	2.2	1.25	1974.8	2.17	1.26
4000	1000.0	185.3	3923.5	2.8	1.91	3959.2	1.42	1.02

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_111-13	20.0	0.001	0.04	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	923.7	3.58	7.63	939.1	3.42	6.09
2000	375.0	42.4	1901.6	2.50	4.92	1907.9	2.50	4.61
4000	370.0	85.5	3853.6	1.83	3.66	3846.9	1.83	3.83

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_114-16	20.0	0.001%	0.04	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	986.2	3.08	1.38	986.0	3.08	1.40
2000	1005.0	89.7	1979.4	2.50	1.03	1978.2	2.50	1.09
4000	1000.0	185.3	3968.2	1.67	0.79	3964.6	1.75	0.89

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_121-23	20.0	0.001	0.06	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	838.3	4.83	16.17	862.6	4.75	13.74
2000	375.0	42.4	1775.9	3.42	11.21	1788.2	3.42	10.59
4000	370.0	85.5	3681.9	2.42	7.95	3660.5	2.50	8.49

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_124-26	20.0	0.001	0.06	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	972.0	3.92	2.80	972.0	4.00	2.80
2000	1005.0	89.7	1957.9	3.17	2.10	1955.4	3.17	2.23
4000	1000.0	185.3	3936.3	2.17	1.59	3927.7	2.25	1.81

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_111-13	10.0	0.001	0.04	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	971.5	1.67	2.85	972.9	1.67	2.71
2000	375.0	42.4	1955.7	1.17	2.21	1955.3	1.25	2.24
4000	370.0	85.5	3927.5	0.92	1.81	3923.1	0.92	1.92

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_114-16	10.0	0.001	0.04	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	993.1	1.50	0.69	993.0	1.50	0.70
2000	1005.0	89.7	1989.6	1.42	0.52	1978.2	2.50	1.09
4000	1000.0	185.3	3983.6	0.83	0.41	3964.6	1.75	0.89

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_121-23	10.0	0.001	0.06	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	939.0	2.17	6.10	943.2	2.17	5.68
2000	375.0	42.4	1906.8	1.58	4.66	1906.0	1.58	4.70
4000	370.0	85.5	3849.4	1.17	3.76	3839.1	1.17	4.02

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_124-26	10.0	0.001	0.06	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	986.1	1.92	1.39	985.8	1.92	1.42
2000	1005.0	89.7	1978.5	1.67	1.08	1977.3	1.67	1.14
4000	1000.0	185.3	3966.1	1.08	0.85	3963.3	1.08	0.92

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_211-13	20.0	0.001	0.04	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	947.2	2.58	5.28	949.5	2.58	5.05
2000	375.0	42.4	1923.9	1.83	3.81	1917.4	1.92	4.13
4000	370.0	85.5	3882.3	1.33	2.94	3855.5	1.42	3.61

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_214-16	20.0	0.001	0.04	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	988.4	2.33	1.16	987.5	2.33	1.25
2000	1005.0	89.7	1982.5	1.92	0.87	1980.0	2.00	1.00
4000	1000.0	185.3	3973.6	1.25	0.66	3966.7	1.33	0.83

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_221-23	20.0	0.001	0.06	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	885.1	3.42	11.49	888.0	3.50	11.20
2000	375.0	42.4	1836.0	2.42	8.20	1818.0	2.58	9.10
4000	370.0	85.5	3761.2	1.75	5.97	3686.4	1.92	7.84

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_224-26	20.0	0.001	0.06	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	976.7	2.92	2.33	974.9	3.00	2.51
2000	1005.0	89.7	1965.1	2.42	1.74	1958.8	2.50	2.06
4000	1000.0	185.3	3948.7	1.58	1.28	3930.4	1.75	1.74

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_211-13	10.0	0.001	0.04	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	976.4	1.25	2.36	975.7	1.25	2.43
2000	375.0	42.4	1962.5	0.92	1.88	1958.7	0.92	2.07
4000	370.0	85.5	3938.2	0.67	1.55	3927.9	0.75	1.80

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_214-16	10.0	0.001	0.04	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	994.1	1.17	0.59	993.7	1.17	0.63
2000	1005.0	89.7	1991.1	1.08	0.44	1989.9	1.08	0.50
4000	1000.0	185.3	3985.7	0.67	0.36	3983.2	0.67	0.42

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_221-23	10.0	0.001	0.06	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	951.1	1.58	4.89	949.5	1.67	5.05
2000	375.0	42.4	1922.4	1.17	3.88	1913.3	1.25	4.34
4000	370.0	85.5	3873.0	0.83	3.17	3845.8	0.92	3.86

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_224-26	10.0	0.001	0.06	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	988.1	1.42	1.19	987.2	1.50	1.28
2000	1005.0	89.7	1981.5	1.33	0.92	1979.0	1.33	1.05
4000	1000.0	185.3	3970.9	0.83	0.73	3964.8	0.83	0.88

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_311-13	20.0	0.002	0.04	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	972.4	3.67	2.76	982.2	3.42	1.78
2000	375.0	42.4	1972.5	2.50	1.38	1972.6	2.50	1.37
4000	370.0	85.5	3956.5	1.83	1.09	3954.2	1.83	1.15

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_314-16	20.0	0.002	0.04	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	995.5	3.33	0.45	995.4	3.33	0.46
2000	1005.0	89.7	1993.9	2.67	0.31	1993.3	2.67	0.34
4000	1000.0	185.3	3990.5	1.83	0.24	3989.0	1.83	0.28

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_321-23	20.0	0.002	0.06	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	920.4	5.0	7.96	952.8	4.67	4.72
2000	375.0	42.4	1925.1	3.4	3.74	1942.8	3.25	2.86
4000	370.0	85.5	3902.7	2.4	2.43	3906.0	2.42	2.35

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_324-26	20.0	0.002	0.06	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	991.1	4.2	0.89	991.2	4.17	0.89
2000	1005.0	89.7	1986.7	3.3	0.67	1986.3	3.33	0.69
4000	1000.0	185.3	3979.1	2.3	0.52	3977.7	2.33	0.56

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_311-13	10.0	0.002	0.04	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	991.1	1.75	0.89	991.3	1.67	0.88
2000	375.0	42.4	1986.7	1.25	0.66	1986.1	1.25	0.70
4000	370.0	85.5	3978.7	0.92	0.53	3977.1	0.92	0.57

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_314-16	10.0	0.002	0.04	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	997.9	1.67	0.21	997.7	1.67	0.23
2000	1005.0	89.7	1997.0	1.42	0.15	1996.6	1.42	0.17
4000	1000.0	185.3	3995.5	0.92	0.11	3994.3	0.92	0.14

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_321-23	10.0	0.002	0.06	50	1000	20	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	982.1	2.2	1.79	983.1	2.17	1.69
2000	375.0	42.4	1972.0	1.6	1.40	1972.2	1.58	1.39
4000	370.0	85.5	3953.7	1.2	1.16	3953.6	1.17	1.16

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_324-26	10.0	0.002	0.06	50	1000	20	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	995.7	2.1	0.43	995.5	2.08	0.45
2000	1005.0	89.7	1993.6	1.8	0.32	1993.1	1.75	0.35
4000	1000.0	185.3	3989.8	1.2	0.25	3988.9	1.17	0.28

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_411-13	20.0	0.002	0.04	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	984.0	2.58	1.60	985.0	2.58	1.50
2000	375.0	42.4	1976.9	1.92	1.15	1975.9	1.92	1.21
4000	370.0	85.5	3963.0	1.42	0.93	3959.6	1.42	1.01

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_414-16	20.0	0.002	0.04	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	996.3	2.50	0.37	996.0	2.50	0.40
2000	1005.0	89.7	1994.8	2.08	0.26	1994.0	2.08	0.30
4000	1000.0	185.3	3991.6	1.33	0.21	3990.1	1.42	0.25

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_421-23	20.0	0.002	0.06	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	959.3	3.50	4.07	968.6	3.33	3.14
2000	375.0	42.4	1948.7	2.50	2.56	1950.4	2.50	2.48
4000	370.0	85.5	3919.4	1.83	2.01	3916.8	1.83	2.08

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_424-26	20.0	0.002	0.06	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	992.4	3.17	0.76	992.2	3.17	0.78
2000	1005.0	89.7	1988.6	2.58	0.57	1987.8	2.58	0.61
4000	1000.0	185.3	3981.9	1.75	0.45	3980.2	1.75	0.50

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_411-13	10.0	0.002	0.04	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	992.6	1.33	0.74	992.4	1.33	0.76
2000	375.0	42.4	1988.4	1.00	0.58	1987.6	0.92	0.62
4000	370.0	85.5	3980.9	0.67	0.48	3978.7	0.67	0.53

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_414-16	10.0	0.002	0.04	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	998.2	1.25	0.18	998.0	1.25	0.20
2000	1005.0	89.7	1997.5	1.17	0.12	1997.0	1.17	0.15
4000	1000.0	185.3	3994.9	0.92	0.13	3995.0	0.67	0.13

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_421-23	10.0	0.002	0.06	50	500	10	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	985.0	1.67	1.50	985.2	1.67	1.48
2000	375.0	42.4	1975.8	1.25	1.21	1975.4	1.25	1.23
4000	370.0	85.5	3960.2	0.92	0.99	3958.7	0.92	1.03

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_424-26	10.0	0.002	0.06	50	500	10	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	996.3	1.58	0.37	996.1	1.58	0.39
2000	1005.0	89.7	1994.5	1.42	0.27	1993.8	1.42	0.31
4000	1000.0	185.3	3990.9	0.83	0.23	3989.9	0.92	0.25

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_511-13	20.0	0.002	0.04	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	987.2	1.92	1.28	986.9	2.00	1.32
2000	375.0	42.4	1980.5	1.42	0.98	1978.1	1.50	1.10
4000	370.0	85.5	3968.4	1.08	0.79	3962.2	1.08	0.95

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_514-16	20.0	0.002	0.04	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	996.8	1.83	0.32	996.5	1.92	0.35
2000	1005.0	89.7	1995.5	1.67	0.23	1994.6	1.67	0.27
4000	1000.0	185.3	3992.9	1.08	0.18	3990.9	1.08	0.23

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_521-23	20.0	0.002	0.06	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	972.9	2.50	2.71	973.3	2.50	2.67
2000	375.0	42.4	1958.3	1.83	2.08	1955.1	1.92	2.25
4000	370.0	85.5	3931.4	1.33	1.72	3920.4	1.42	1.99

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
P_524-26	20.0	0.002	0.06	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	993.5	2.33	0.65	993.0	2.42	0.70
2000	1005.0	89.7	1990.2	2.00	0.49	1988.8	2.08	0.56
4000	1000.0	185.3	3984.4	1.33	0.39	3980.9	1.33	0.48

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_511-13	10.0	0.002	0.04	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Volumen Hm^3	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	993.9	1.00	0.61	993.4	1.00	0.66
2000	375.0	42.4	1990.2	0.75	0.49	1988.9	0.75	0.55
4000	370.0	85.5	3983.7	0.50	0.41	3980.4	0.58	0.49

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_514-16	10.0	0.002	0.04	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	998.5	0.92	0.15	998.2	0.92	0.18
2000	1005.0	89.7	1997.9	0.92	0.11	1997.3	0.92	0.14
4000	1000.0	185.3	3996.6	0.50	0.09	3995.3	0.50	0.12

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_521-23	10.0	0.002	0.06	50	250	5	3

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	380.0	21.1	987.4	1.25	1.26	987.1	1.25	1.30
2000	375.0	42.4	1979.4	0.92	1.03	1977.6	0.92	1.12
4000	370.0	85.5	3965.5	0.67	0.86	3959.5	0.75	1.01

DATOS DEL CAUCE

Cauce	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Rugosidad "n"	Ancho cauce A.B.(m)	Ancho total (m)	Ancho total/A. cauce A.B.	Duración lluvia (horas)
Q_524-26	10.0	0.002	0.06	50	250	5	12

Sección prismática **RESULTADOS**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Volumen Hm³	Modelo 2D			HEC-HMS		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1040.0	43.4	996.9	1.17	0.31	996.5	1.17	0.35
2000	1005.0	89.7	1995.2	1.08	0.24	1994.5	1.17	0.28
4000	1000.0	185.3	3992.2	0.67	0.20	3990.3	0.67	0.24

E.3.2. CAUCES NATURALES**DATOS DEL CAUCE (AZ-01)****Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Río/ Arroyo
Guadiana	X	Y	X	Y	Río Azuer
	457139.84	4321977.78	450119.09	4323977.51	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
AZ-01	8.565	0.001584	0.04818

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	457139.84	4321977.78
P_02	456226.26	4322515.53
P_03	455335.30	4322674.23
P_04	454541.81	4322788.02
P_05	453600.87	4322848.54
P_06	452623.97	4322955.27
P_07	451649.35	4323321.43
P_08 (Final)	451123.46	4324056.37

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

			HEC-HMS			Modelo 2D		
Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	855	13.8	494.94	1.67	1.01%	488.389	1.67	2.32%
750	845	21.0	743.57	1.50	0.86%	734.807	1.58	2.03%
1000	840	29.2	993.2	1.25	0.68%	982.1	1.42	1.79%

DATOS DEL CAUCE (CI-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadiana	X	Y	X	Y	Gigüela
	504089.57	4404542.31	493004.42	4388062.35	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
CI-01	20.452	0.002500	0.0477

MDT

Secciones/ puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	504089.57	4404542.31
P_02	502519.22	4402915.30
P_03	500660.95	4401259.60
P_04	500072.32	4397711.94
P_05	498758.34	4394829.72
P_06	497571.34	4393052.11
P_07	496045.09	4390693.60
P_08	494816.18	4389178.17
P_09 (Final)	493004.42	4388062.35

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	1405	14.7	495.49	3.33	0.90	491.07	3.33	1.79
750	1355	23.1	744.6	2.83	0.72	738.63	2.92	1.52
1000	1350	31.8	993.79	2.50	0.62	985.97	2.67	1.40

DATOS DEL CAUCE (CI-02)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadiana	X	Y	X	Y	Gigüela
	487810.68	4383757.90	476000.82	4376846.37	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
CI-02	18.080	0.0008	0.055

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	487810.68	4383757.90
P_02	486470.07	4382243.38
P_03	485013.59	4381249.26
P_04	483666.93	4379764.72
P_05	482404.80	4378174.23
P_06	480693.49	4377079.51
P_07	479396.78	4376664.81
P_08	477808.57	4376860.45
P_09 (Final)	476000.82	4376846.37

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m³/s	50 m³/s	100 m³/s	200 m³/s	300 m³/s	400 m³/s	500m³/s	750 m³/s	1000 m³/s

Sección equivalente de ocho puntos **Resultados del tránsito:**

Gráfico de los resultados

Tabla de resultados

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Vol. (hm^3)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	630	14,7	307.43	9.66	0.39	128.527	11.58	0.74
750	625	23,1	493.96	9	0.34	246.334	9.583	0.67
1000	620	31,8	684.4	8.08	0.32	371.8	9.66	0.63

DATOS DEL CAUCE (CI-03)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadiana	X	Y	X	Y	Gigüela
	470515.43	4368967.71	471614.45	4355994.45	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
CI-03	17.662	0.0008	0.05277027

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	470515.43	4368967.71
P_02	469872.75	4367488.94
P_03	469641.87	4366032.64
P_04	470607.19	4364661.36
P_05	471591.39	4362750.21
P_06	471655.02	4361015.30
P_07	471980.18	4359403.98
P_08	472151.16	4357595.15
P_09 (Final)	471614.45	4355994.45

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos:

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	630	14,7	392.36	11.58	0.22	144.174	12.67	0.71
750	625	23,1	629.23	9.50	0.16	332.979	10.08	0.56
1000	620	31,8	875.1	8.08	0.12	550.0	8.50	0.45

DATOS DEL CAUCE (EB-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Ebro	X	Y	X	Y	Ebro
	680637	4609596	692761	4604444	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
EB-01	14.349	0.0009	0.066

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	681351.26	4609219.35
P_02	683059.98	4609554.25
P_03	686388.41	4606352.04
P_04	684989.41	4607320.61
P_05	683208.76	4608147.95
P_06	688290.19	4606381.51
P_07	688544.46	4604989.28
P_08	690179.13	4604717.28
P_09 (Final)	691937.76	4604794.81

Rugosidades

Cálculos hidráulicos:

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9	Caudal 10	Caudal 11
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s	2000 m ³ /s	4000 m ³ /s	6000 m ³ /s	10000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	8730	308.531	999.17	5.67	0.0008	991.849	5.83	0.0082
3000	8520	956.759	2997.8	4.42	0.0007	2997.87	3.42	0.0007
6000	8400	1955.118	5995.7	3.42	0.0007	5997.5	2.33	0.0004

DATOS DEL CAUCE (ES-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Duero	X	Y	X	Y	Río Esla
	287381.72	4671475.34	281775.07	4650655.09	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
ES-01	23.712	0.001078	0.0524

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	287381.72	4671475.34
P_02	287491.16	4668826.90
P_03	287215.37	4666359.31
P_04	286712.873	4661727.25
P_05	284724.25	4658221.68
P_06	284304.36	4654670.00
P_07	283929.26	4651928.04
P_08 (Final)	281775.07	4650655.09

Rugosidades: **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
10 m ³ /s	200 m ³ /s	445 m ³ /s	600 m ³ /s	800 m ³ /s	1000 m ³ /s	1500 m ³ /s	2000 m ³ /s	2500 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	1720	43.4	930.01	7.58	7.00	887.56	9.67	11.24
1500	1705	66.4	1409.6	7.67	6.03	1405.79	7.42	6.28
2000	1700	89.7	1900.9	6.92	4.96	1900.32	6.25	4.98

DATOS DEL CAUCE (GU-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadarrama	X	Y	X	Y	Guadarrama
	419110	4456388	418540	4448428	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
GU-01	7.670	0.001739	0.056

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	419090.55	4455972.82
P_02	419516.33	4452404.91
P_03	419265.72	4455060.33
P_04	419425.98	4454249.75
P_05	419550.95	4453195.34
P_06	419193.28	4451596.78
P_07	419165.15	4450659.77
P_08	419019.31	4449652.28
P_09 (Final)	418710.88	4448885.01

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos: **Resultados del tránsito:**

ANÁLISIS DEL EFECTO LAMINADOR DEL CAUCE UTILIZANDO MODELOS FLUVIALES BIDIMENSIONALES

Gráfico de los resultados

Tabla de resultados

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	855	13.813	494.38	1.33	0.01	495.393	1.08	0.01
750	845	21.706	744.45	1.08	0.01	741.844	1.00	0.01
1000	840	29.915	994.0	0.92	0.01	993.9	0.92	0.01

DATOS DEL CAUCE (GQ-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadalquivir	X	Y	X	Y	Guadalquivir
	451251	4200821	436097	4202683	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
GUA-01	16.353	0.001938	0.045

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	450421.12	4201064.53
P_02	448653.80	4201081.44
P_03	446808.26	4201084.08
P_04	445150.00	4200515.12
P_05	444267.63	4201706.54
P_06	443494.21	4200164.26
P_07	441252.33	4200389.41
P_08	439192.30	4201166.55
P_09 (Final)	437071.70	4202400.20

Rugosidades: **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9	Caudal 10	Caudal 11
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s	2000 m ³ /s	4000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos:

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m³/s)	T pico (m)	Vol. (hm³)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m³/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
1000	2535	121.661	999.59	1.58	0.0004	996.733	2.67	0.0033
2000	2490	246.863	1999.3	1.25	0.0004	1993.819	2.33	0.0031
4000	2445	501.028	3998.5	1.08	0.0004	3988.4	2.00	0.0029

DATOS DEL CAUCE (JA-01)

Situación:

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Río/ Arroyo
	X	Y	X	Y	
Guadiana	386653.58	4315668.78	377715.00	4315446.36	Río Jabalón

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
JA-01	10.65	0.001078	0.0524

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	386653.58	4315668.78
P_02	385490.72	4315972.48
P_03	384352.22	4316676.55
P_04	383387.76	4316138.85
P_05	382418.68	4315307.36
P_06	381262.03	4315798.34
P_07	379927.21	4315867.82
P_08	379005.95	4315288.13
P_09 (Final)	377715.00	4315446.36

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9	Caudal 10	Caudal 11
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500 m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s	2000 m ³ /s	4000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Vol. (hm^3)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	1720	14,7	489.68	2	2.06%	487.804	1.75	2.44%
750	1705	23,1	742.14	1.42	1.05%	735.461	1.58	1.94%
1000	1700	31,8	990.7	1.25	0.94%	983.6	1.42	1.64%

DATOS DEL CAUCE (ZA-01)**Situación:**

Cuenca Hidrográfica	Coordenadas UTM (Inicio)		Coordenadas UTM (Final)		Nombre Rio/ Arroyo
Guadiana	X	Y	X	Y	Záncara
	535721.42	4364720.28	536889.32	4368953.23	

Datos generales

Cauce	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Rugosidad media "n"
ZA-01	6.255	0.001918	0.05

MDT

Secciones/puntos de control	X (m)	Y (m)
P_01 (Inicio)	535721.42	4364720.28
P_02	535763.92	4365490.22
P_03	536140.00	4366096.44
P_04	536296.69	4366718.44
P_05	536368.78	4367401.95
P_06	536809.89	4370171.08
P_07	537128.80	4369684.88
P_08	536866.22	4367957.19
P_09 (Final)	536889.32	4368953.23

Rugosidades **Cálculos hidráulicos:**

Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5	Caudal 6	Caudal 7	Caudal 8	Caudal 9
5 m ³ /s	50 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s	300 m ³ /s	400 m ³ /s	500m ³ /s	750 m ³ /s	1000 m ³ /s

Sección equivalente de ocho puntos

Resultados del tránsito:**Gráfico de los resultados** **Tabla de resultados**

Q Inicio (m^3/s)	T pico (m)	Vol. (hm^3)	HEC-HMS			Modelo 2D		
			Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)	Salida (m^3/s)	Desfase (h)	Laminación (%)
500	845	14.7	498.49	1.08	0.30	498.17	1.00	0.37
750	835	23.1	748.10	0.92	0.25	747.90	0.83	0.28
1000	825	31.8	997.74	0.83	0.23	997.32	0.83	0.27