ANEXO 2. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA RURAL

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla-La Mancha.
Grupo de Ingeniería del Agua. Laboratorio de Hidráulica.

Índice

Parte primera: Obtención y validación de un Modelo digital de Elevaciones 7

Introducción 7

1. Metodología 8

Modelo 1: Red irregular de triángulos (TIN) 9

Modelo 2: Interpolación por el método de la distancia de Borgefors 10

Modelo 3: Interpolación por el método IDW 11

2. Análisis 12

2.1 Diferencias entre modelos 12

2.1.1 Modelo ($MDE_1 - MDE_2$) 13

2.1.2 Modelo ($MDE_1 - MDE_3$) 13

2.1.3 Modelo ($MDE_2 - MDE_3$) 14

2.2 Estadísticos de los modelos de diferencias 15

2.3 Fiabilidad de los modelos 15

3. Conclusiones 17

4. Referencias 19

Parte Segunda: Modelo hidrológico de la cuenca rural 20

Introducción 20

1. Modelo construido 20

Modelo HEC-HMS 20

Modelo de transformación lluvia-escorrentía 21

Propagación de hidrogramas en cauces 22

Modelo de infiltración Green-Ampt 22

Ensayos de infiltración y análisis granulométricos 25

Encostramiento del suelo 30

Parámetros del modelo 31

Esquematización de la cuenca con el modelo HEC-HMS 34

Especificaciones de control de la simulación 37

2. Modelo meteorológico 37

2.1 Escenario de no encostramiento del suelo 37

2.2 Escenario de encostramiento del suelo 38

3. Hidrogramas resultantes: Interpretación y discusión 40

3.1 Escenario de no encostramiento del suelo 40

3.2 Escenario de encostramiento del suelo 42

3.3 Conclusión 42

3.4 Otros hidrogramas 42

Índice de figuras

Figura 1: Curvas de nivel del área de estudio para la generación del MDE 8
Figura 2: Esquema de la distancia de Borgefors 10
Figura 3: Modelo (MDE_1-MDE_2) 13
Figura 4: Modelo (MDE_1-MDE_3) 14
Figura 5: Modelo (MDE_2-MDE_3) 14
Figura 6: Curvas de nivel y puntos de control disponibles 16
Figura 7: Vista 3d del MDE_2 (Interpolación por la distancia de Borgefors) 18
Figura 8: Composición 3d de la zona de estudio generada a partir de MDE_2 18
Figura 9: Esquema del modelo de onda cinemática 21
Figura 10:Descomposición de la cuenca en planos 21
Figura 11 Esquema del modelo Green-Ampt 23
Figura 12: Tríangulo de textura USDA /carga de succiódel frente mojado 25
Figura 13: Infiltrómetro de doble anillo utilizado en los ensayos 25
Figura 14: Esquema explicativo del funcionamiento del infiltrómetro de doble anillo 25
Figura 15: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº1 26
Figura 16: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº2 27
Figura 17: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº3 27
Figura 18: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 1 28
Figura 19: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 2 28
Figura 20: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 3 28
Figura 21: Ortofoto de la cuenca receptora con subcuencas y cauces principales 34
Figura 22: Vista 3d de la cuenca receptora con subcuencas y cauces principales 34
Figura 23: Esquema de la cuenca introducido en HEC-HMS 35
Figura 24: Obra de drenaje existente en la ctra. CM-3.109 35
Figura 25: Curva de gasto de la obra de drenaje existente en ctra. CM-3.109 36
Figura 26: Curva de elevación- superficie de la obra de drenaje existente en ctra. CM-3.109 36
Figura 27: Hietograma de diseño con precipitación bruta y neta (gráfico superior) 38
Figura 28: Hidrograma de la escorrentía resultante en la subcuenca W11(gráfico inferior) 38
Figura 29: Hietograma de diseño con precipitación bruta y neta (gráfico superior) 39
Figura 30: Hidrograma de la escorrentía resultante en la subcuenca W11(gráfico inferior) 39
Figura 31: Hidrograma (T10+T500) resultante en la cuenca receptora. No encostramiento 41
Figura 32: Hidrograma (T10+T500) resultante en la cuenca receptora. Encostramiento (HEC-HMS) .. 43
Figura 33: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T5(24h) 44
Figura 34: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T10(24h) 45

Figura 35: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T25(24h)..... 46
Figura 36: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T50(24h)..... 47
Figura 37:Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T100(24h)..... 48
Figura 38: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T200(24h)..... 49

Índice de tablas

Tabla 1: Puntos de control propuestos por Felicísimo *9*
Tabla 2: Resumen de los estadísticos de los modelos de diferencias *15*
Tabla 3: Resumen de estadísticos de fiabilidad de los modelos *16*
Tabla 1: Parámetros del modelo Green-Ampt *24*
Tabla 2: Resultados del ensayo de infiltración nº1 ..... *26*
Tabla 3: Resultados del ensayo de infiltración nº2 ..... *26*
Tabla 4: Resultados del ensayo de infiltración nº3 ..... *27*
Tabla 5: Resumen de análisis granulométricos y parámetros Green-Ampt *29*
Tabla 6: Características de los planos de las subcuencas *31*
Tabla 7: Características de los tramos de los cauces de la cuenca receptora *33*

Parte primera: Obtención y validación de un Modelo digital de Elevaciones

Introducción

La generación modelos digitales de elevaciones (MDE) y de datos derivados de los mismos es práctica común en la ingeniería civil para análisis geomorfológicos e hidrológicos. Su empleo por usuarios no expertos, puede conllevar que aunque las conclusiones de tales análisis sean coherentes con los datos del modelo, las operaciones realizadas a partir de ellos sean erróneas debido a que deriven de un modelo erróneo.

Este trabajo intenta aclarar algunos de los métodos disponibles para la interpolación y obtención de un MDE analizando su fiabilidad respecto de los datos considerados como reales. No cabe duda que la bonanza del método de interpolación dependerá en gran medida de los datos de partida y de la finalidad que le queramos dar al MDE y sus datos derivados. En este caso, los datos de partida son mapas topográficos a escala 1/25.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que en muchas ocasiones son los únicos que hay disponibles para la mayoría de los trabajos que normalmente desarrolla el ingeniero. En cuanto a la finalidad del MDE, en este caso, es la de obtener, mediante modelos derivados, la red de drenaje y las subcuencas hidrológicas que afectan a la población de Valdepeñas de la provincia de Ciudad Real (España) y se encuadra dentro de los trabajos llevados a cabo para evaluar el riesgo de inundación en dicha población.

El área de estudio abarca las cuatro hojas 1/25.000 de la original hoja 1/50.000 del IGME, siendo las coordenadas UTM de la esquina superior izquierda: (454.896,900; 4.298.629,000) e inferior derecha (483.791,2000; 4.280.022,3000), las cuales describen un rectángulo de 28,9 x 18,6 km2.

La cartografía base para este trabajo (hojas 1/25.000) se encuentra ya digitalizada en formato dwg por el IGN, con curvas de nivel cada 10 m, pero no tienen asignada la coordenada “z”, por lo que se ha tenido que introducir ésta manualmente a partir de la rotulación de las cotas del dibujo. También se han digitalizado manualmente la coordenada “z” de 390 puntos de cota conocida que da como información el conjunto de las cuatro hojas.

Dado que la cartografía del núcleo urbano de Valdepeñas se encuentra digitalizada a escala 1/1.000, como complemento a la cartografía base, se ha creído conveniente introducir 1.700

puntos como datos en la modelación que están localizados en las inmediaciones del casco urbano, sobre todo de las zonas por donde penetra en la ciudad la red de desagüe de las distintas subcuencas que la afectan. Estos puntos carecen de interés en el conjunto del área de estudio, pero si son importantes para el posprocesado y finalidad del MDE, ya que permiten una mejor definición del la red drenaje a su llegada a la ciudad pues será en el entorno de estos puntos donde se produzcan las inundaciones cuando se den episodios de avenidas.

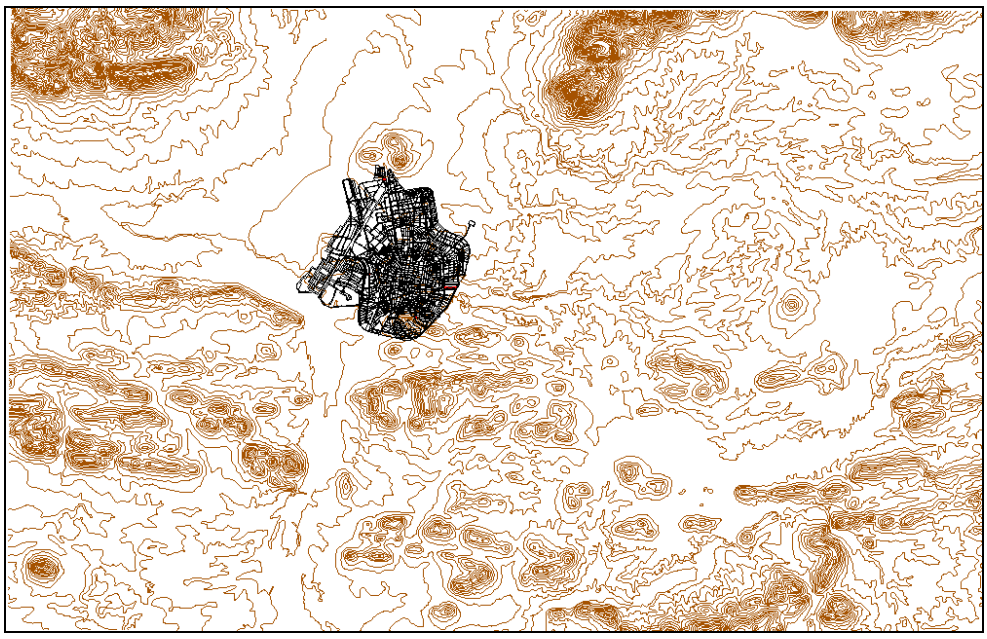

Figura 1: Curvas de nivel del área de estudio para la generación del MDE

1. *Metodología*

En todos los procedimientos de generación de MDE se ha partido de los mismos datos cartográficos; las curvas de nivel y los puntos de cota conocida que figuran en los mismos. Para valorar la fiabilidad de un modelo es preciso fijar un número de puntos de control mínimo representativos ya que el control de la calidad del mismo depende de la calidad y cantidad de estos puntos. Ley (1986) establece en general el uso de 150 puntos para garantizar que la medida del error tendrá una desviación estándar inferior al 10%. Li (1991) plantea la siguiente fórmula:

$$R(e) = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \times 100\%$$

en donde:

e: es la medida del error en términos de desviación estándar (equivalente al ECM cuando no hay sesgo)

R(e): es la fiabilidad de la medida del error, en términos de desviación estándar

n : es el número de puntos de control.

De acuerdo con esta fórmula para 150 puntos el valor de R(e) es del 5,8%, acorde con Ley (1986).

Sin embargo Felicísimo (1994), consideran un número diferente de puntos de control necesarios para calcular el error altimétrico de un MDE. Para este autor, el nº de puntos de control necesarios por cada 100 cm2 es el mostrado en el siguiente tabla en función del tipo de relieve y la escala del plano:

Escala	*Tipo de relieve*		
	Llano	*Alpino*	*General*
1:10.000	10	20	15
1:50.000	30	50	40

Tabla 1: Puntos de control propuestos por Felicísimo

Dado que la extensión de la cartografía del presente trabajo equivale a una hoja 1/50.000 con relieve llano y con una escala 1/25.000, siguiendo el cuadro anterior se puede adoptar una densidad de 20 puntos por cada 100 cm2 de mapa. Aplicando esta densidad a la superficie de una hoja 1:50.000 (2.164 cm2) resulta que hacen falta 433 puntos de control.

Ante la imposibilidad de obtener "in situ" puntos de control reales, se ha elegido de entre la base cartográfica 132 puntos de cota conocida (***R(e)***= 6,2%) uniformemente distribuidos como puntos de control y por tanto no intervienen en el proceso de cálculo del MDE. Estos puntos corresponden a zonas altas y zonas llanas para que sean lo mas representativos posible.

A continuación se describen los procedimientos de generación del MDE utilizados en este trabajo.

Modelo 1: Red irregular de triángulos (TIN)

La red irregular de triángulos se define como un conjunto de triángulos irregulares adyacentes y no superpuestos que se construye ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales. Este se adosa al terreno formando, junto a otros planos un mosaico. El grado de ajuste a la superficie difiere en detalle, en función de la complejidad del relieve (Márquez, 2004).

Se genera un modelo TIN (en adelante denominamos MDE_1) a partir de las curvas de nivel y los puntos de cota conocida con el programa informático ArcView 3.2. Las curvas de nivel se

introducen como líneas de ruptura suave (softbreaklines) de esta manera estamos obligando a que la estructura de triángulos conserve los vértices de estas líneas y por tanto los puntos de las curvas de nivel formarán parte del modelo con su cota original sin ningún tipo de interpolación. Los puntos de cota conocida se introducen como Mass-points. Aprovechando las posibilidades de este método, se introduce en el modelo un embalse como una polígono de altura constante y el muro de la presa como una línea de ruptura brusca (hardbreakline). El resultado de este procedimiento lo podemos observar en la figura 2. Una vez obtenido el TIN, para derivar modelos de él es preciso convertirlo a formato ráster, donde se ha utilizado un tamaño de píxel cuadrado de 5 metros de lado, acorde a la escala de entrada de datos (1/25.000).

Modelo 2: Interpolación por el método de la distancia de Borgefors

En este procedimiento se va a generar un MDT en formato ráster, utilizando el algoritmo de interpolación basado en el método de la distancia de Borgefors (MDE_2) implementado en programa ILWIS 3.3.

Este método, calcula para cada pixel sin valor de altura asignada y que se encuentra entre dos segmentos o líneas con valor de altura conocida, (por ejemplo: curvas de nivel) la distancia más corta entre las dos líneas más cercanas. El valor de altura (H) para cada pixel, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$H = H_2 + \frac{d_2}{d_1 + d_2}(H_1 - H_2)$ de acuerdo con el siguiente dibujo:

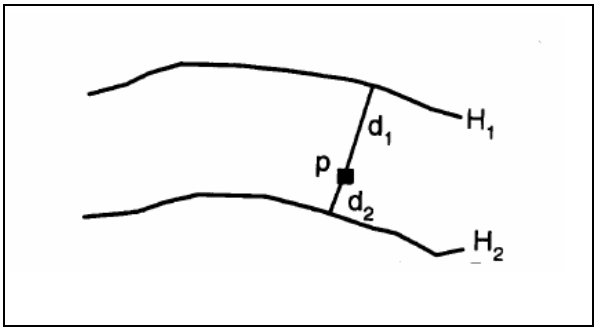

Figura 2: Esquema de la distancia de Borgefors

En donde H_1 y H_2 son los valores de altitud de las dos líneas más cercanas al pixel P cuya altura se desea interpolar, d_1 y d_2 son las distancias desde el pixel P hasta las curvas de nivel más alta y más baja respectivamente.

Para utilizar este método en el programa ILWIS 3.3 es preciso importar por separado el plano de curvas de nivel y el plano de puntos y convertirlos a formato ráster, para que una vez combinados convenientemente se pueda proceder a ejecutar la orden de interpolación. El tamaño de píxel elegido es también 5 m y se ha adoptado una precisión de 0,1m

Modelo 3: Interpolación por el método IDW

En el tercer procedimiento se realizará un modelo mediante una interpolación por el método IDW o Inverse Distance Weighing (xal que denominaremos MDE_3) implementado en el programa ArcView 3.2. Este método, estima cada punto a interpolar, realizando una asignación de pesos a los puntos "dato" del entorno de aquel. De esta forma, se acepta que los puntos más próximos intervienen de manera más relevante (mayor peso) en la construcción del valor definitivo del punto a interpolar.

La fórmula general del método es la siguiente:

$$\hat{Z}_{x,y} = \sum_{i=1}^{n} z_i \cdot d_i^k \Big/ \sum_{i=1}^{n} d_i^k$$

En la expresión anterior, $\boldsymbol{Z}_{x,y}$, representa la altitud estimada para el punto incógnita de coordenadas (x, y) a partir de los n puntos con altura $\boldsymbol{Z_i}$ seleccionados en su entorno y que distan de él una distancia $\boldsymbol{d_i}$. La variable $\boldsymbol{K}$ permite variar la ponderación de la distancia para los datos. Así, por ejemplo, cuando $\boldsymbol{K}$=2, la interpolación se realiza en función inversa del cuadrado de la distancia. La elección del exponente en la ponderación es determinante en la contribución de los puntos próximos al punto incógnita: cuanto mayor es el exponente, mayor es el peso en la contribución de los puntos próximos. Otro parámetro fundamental en este método es el número de puntos vecinos al punto incógnita que intervienen en el cálculo. Éste se puede determinar mediante un radio de búsqueda o mediante el establecimiento de un número fijo de puntos.

Para poder aplicar este método con el programa AccView 3.2, es preciso convertir todos los elementos "datos" que intervienen en la interpolación a puntos, para lo cual se ha utilizado el programa "topocal" (www.topocalc.com) que tiene la utilidad de convertir las polilíneas de las curvas de nivel en puntos. A estos puntos le sumaremos los puntos de cota conocida que se han estado incluyendo en los demás procedimientos. Se ha adoptado como valor 2 el

exponente del método de interpolación, 12 puntos vecinos para asignar pesos y el tamaño de la celda de salida también es de 5 m.

2. *Análisis*

Una vez obtenidos los MDE en formato ráster por los tres procedimientos descritos, se realiza a continuación distintos tipos de análisis para evaluar la fiabilidad de los modelos. En primer lugar se determinará la diferencia relativa existente entre dichos modelos restando las matrices dos a dos para analizar dónde residen las diferencias de mayor importancia. Después se procederá a comparar en cada uno de los tres modelos las diferencias entre las cotas reales (según datos del IGN) de los puntos de control que no han intervenido en el modelo y las cotas que arrojan los modelos en esos mismos puntos de control.

2.1 Diferencias entre modelos

Para realizar la diferencia de las matrices de cada modelo, se ha creado un marco interior a la extensión de los tres modelos, de forma que el análisis matricial sólo afecte a las celdas interiores a este marco retranqueado de los bordes del modelo. Con esto se pretende conseguir dos objetivos:

El primero es conseguir que las dimensiones de las matrices sean iguales en los tres casos, pues debido a la utilización de dos programas diferentes en la interpolación (Ilwis y Arcview), las matrices obtenidas no son del todo iguales en tamaño global (aunque si el tamaño de celda). El segundo, es que al alejarse de los límites del modelo estamos desestimando del análisis, los datos de los bordes en donde la interpolación obtiene resultados menos fiables.

2.1.1 Modelo ($MDE_1 - MDE_2$)

El resultado de esta operación matricial puede verse en la siguiente figura:

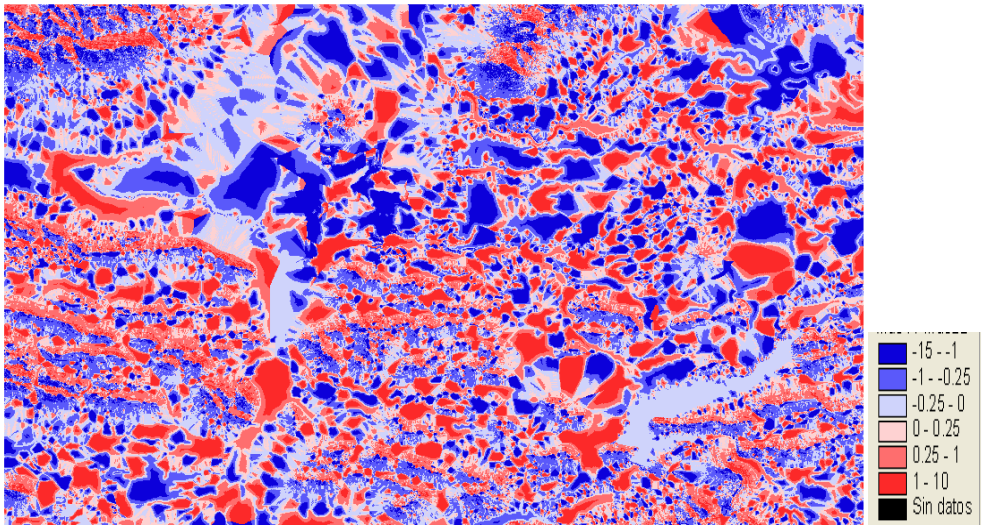

Figura 3: Modelo (MDE_1-MDE_2)

De acuerdo con la leyenda de diferencias expresadas en metros anexa a la figura, los tonos frios (azules) implican diferencias negativas y los cálidos (rojos) diferencias positivas. Del patrón de colores se deduce un error relativo aleatorio entre los dos modelos, pues las tonalidades azules y rojas se distribuyen uniformemente por toda la extensión del ráster, tanto en zonas llanas como en zonas de cumbres.

Como estimador del error (en esta primera parte se trata de el error relativo a dos modelos y no a un modelo y la realidad como veremos en la segunda parte del apartado de análisis) se ha adoptado el error cuadrático medio (*ECM)*, por ser el comúnmente utilizado en el análisis de error de los modelos digitales del terreno (Felicísimo,1994). La expresión del *ECM* es la siguiente:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

En donde $\boldsymbol{e_i}$ es la diferencia que se existe entre cada celda (píxel) de los modelos que se comparan y $\boldsymbol{n}$ es número total de celdas que existen en los modelos (la dimensión de los modelos generados tienen del orden de 20 millones de celdas)

Para calcular el *ECM* se ha hallado mediante operaciones de álgebra de mapas la raíz cuadrada del promedio del cuadrado de las diferencias entre dos modelos a comparar.

2.1.2 Modelo ($MDE_1 - MDE_3$)

En este caso el modelo de diferencias arroja los siguientes resultados:

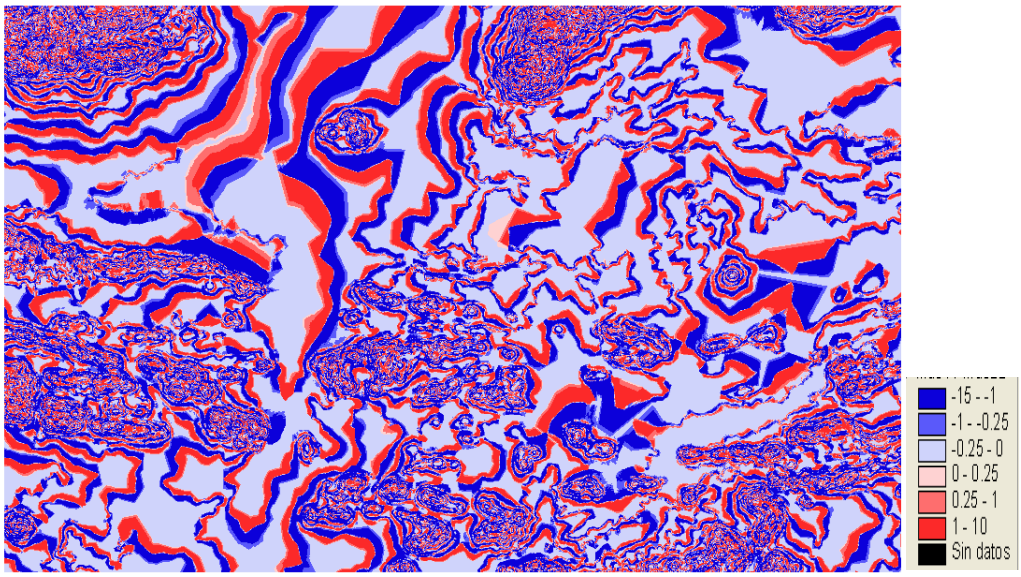

Figura 4: Modelo (MDE_1-MDE_3)

En este caso se puede apreciar a primera vista un patrón espacial de la distribución de las diferencias. Se observa que los valores mas altos de diferencias tanto positivas como negativas se sitúan siguiendo las direcciones de las curvas de nivel. También se aprecia que las diferencias positivas o negativas mayores se dan indistintamente en zonas llanas o con pendiente.

2.1.3 Modelo (MDE_2 – MDE_3)

En este caso el modelo de diferencias arroja los siguientes resultados:

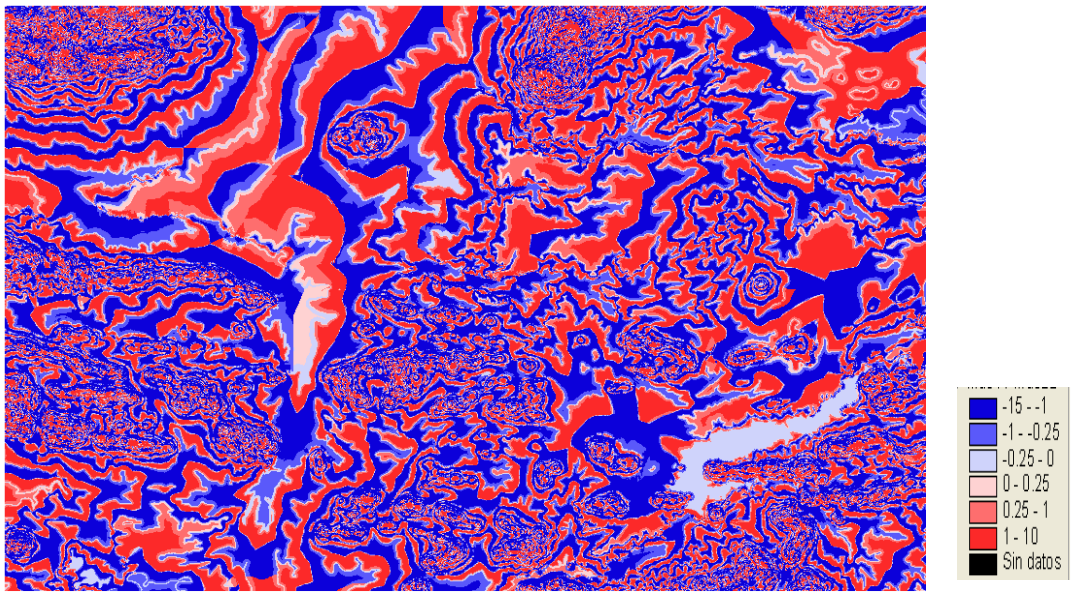

Figura 5: Modelo (MDE_2-MDE_3)

En este caso se observa visualmente un patrón de diferencias parecido al caso anterior pero con mayores diferencias localizadas en las zonas llanas y entre curvas de nivel con distancia entre ellas importante. La leyenda es la misma que en los casos anteriores.

2.2 Estadísticos de los modelos de diferencias

Observando el cuadro 1, puede llamar la atención el modelo MDE_1-MDE_2 el bajo valor del promedio que tiende a cero que es debido a que las diferencias positivas y negativas se anulan. Este valor sólo nos indica la aleatoriedad del error. Obsérvese también que en los tres casos, el *ECM* y la desviación estándar coinciden casi exactamente, lo que ocurre cuando la media tiende a cero y la distribución es normal.

Modelo de diferencias	Valor min.	Valor max.	Promedio	Desv. Std	*ECM*
MDE_1-MDE_2	-15 m	10 m	0,01 m	1,1 m	1,105m
MED_1-MDE_3	-21 m	13,18 m	0,13 m	1,68 m	1,685 m
MDE_2-MDE_3	-22,8 m	15,97 m	-0,14 m	2,03 m	2,031 m

Tabla 2: Resumen de los estadísticos de los modelos de diferencias

Este primer análisis sirve para poner de manifiesto que existen diferencias apreciables en los modelos dependiendo del método utilizado en su generación. En general se da una distribución normal de las diferencias, si bien, en los casos de MDE_1-MDE_3 y MDE_2-MDE_3 se aprecia un patrón espacial en la distribución de las mayores diferencias, que se localizan siguiendo las curvas de nivel y aumenta al aumentar la distancia a estas. En atención al error cuadrático medio (*ECM*), puede decirse que los modelos MDE_1 (TIN) y MDE_2 (Borgefors) son los mas parecidos al ser el *ECM* el mas bajo (1,105). En cambio, los modelos que más difieren son el MDE_2 y MDE_3 (IDW) al arrojar el mayor ECM (2,031).

2.3 Fiabilidad de los modelos

En este apartado se realiza un análisis de la fiabilidad de cada modelo respecto a los datos reales (en realidad son datos de la cartografía oficial del IGN, que para este trabajo suponemos que son los reales). Para ello se han seleccionado 132 puntos de control que no han intervenido en la generación de los modelos adoptándose como estimador, el error cuadrático medio (ECM). Mediante operaciones de álgebra de mapas, se modifican los modelos de elevaciones originales, sustituyendo en las celdas correspondientes a los puntos de control el valor estimado por su valor real. De esta forma, al restar matricialmente el modelo original y el modificado obtenemos un nuevo ráster en donde todas las celdas

distintas a los puntos de control tienen valor nulo, mientras que en las celdas correspondientes a los puntos de control se obtiene la diferencia entre el modelo y la realidad.

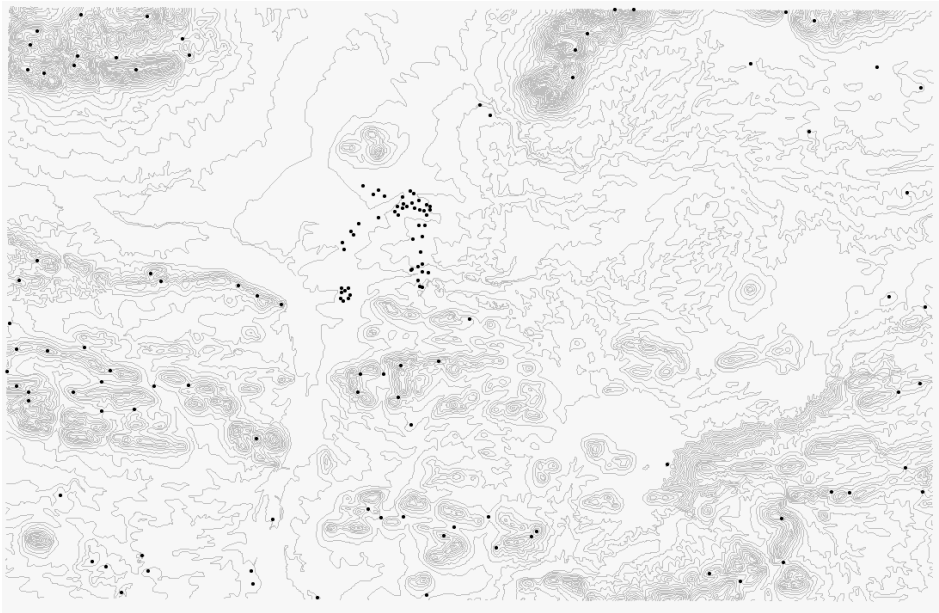

Figura 6: Curvas de nivel y puntos de control disponibles

En este apartado en la expresión del *ECM* es:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} e_i^2}$$

Donde ei es la diferencia que se existe entre el valor de la altitud real de los puntos de control y la estimada por el modelo en las coordenadas de los puntos de control (error del modelo). Ahora n es número de puntos de control.

En el siguiente cuadro se recogen los estadísticos de los errores hallados en cada modelo:

Modelo	Error mín.	Error max.	Rango	Sum[e_i^2]	n	ECM
MDE_1 (TIN)	-11,88 m	6,82 m	18,7 m	1477,58 m^2	132	3,35 m
MDE_2 (Borgefors)	-10 m	7,8 m	17,8 m	791,59 m^2	132	2,45 m
MDE_3 (IDW)	-16,5 m	5,63 m	22,13 m	1957,01 m^2	132	3,85 m

Tabla 3: Resumen de estadísticos de fiabilidad de los modelos

3. *Conclusiones*

Se ha sometido a un control de calidad los tres MDE generados por distintos métodos en modo vectorial y ráster adoptando como parámetro de fiabilidad el ECM y eligiendo 132 puntos de control representativos de la variabilidad altimétrica de la zona de estudio.

El análisis del ECM (error medio cuadrático) concluye que la interpolación por el método de la distancia de Borgefors es el que mejor resultado obtiene en este estudio comparativo. Este resultado no se debe interpretar como una norma general ya que los resultados están condicionados por los datos de la cartografía base, pero si puede hacerse extensivo a los casos en que la cartografía disponible conste de las curvas de nivel con equidistancias medias y puntos de cota conocida escasos.

En cuanto a la disponibilidad de los diferentes métodos de interpolación hay que señalar que el método TIN y IDW, están implementados en la mayoría del software de aplicaciones GIS (Geographic Information Systems), mientras que el método de la distancia de Borgefors sólo está implementado en una de las tres aplicaciones informáticas consultadas.

Queda para un desarrollo posterior de este trabajo un análisis mas exhaustivo de la variabilidad del error en relación con las posibles variables que intervienen en el modelado: tamaño de píxel o paso de malla del formato ráster, altitud de los puntos de control, etc, así como de la propagación del error cuando se obtienen modelos derivados: pendientes, área de acumulación de cada celda (muy importante en estudios hidrológicos), insolación, etc.

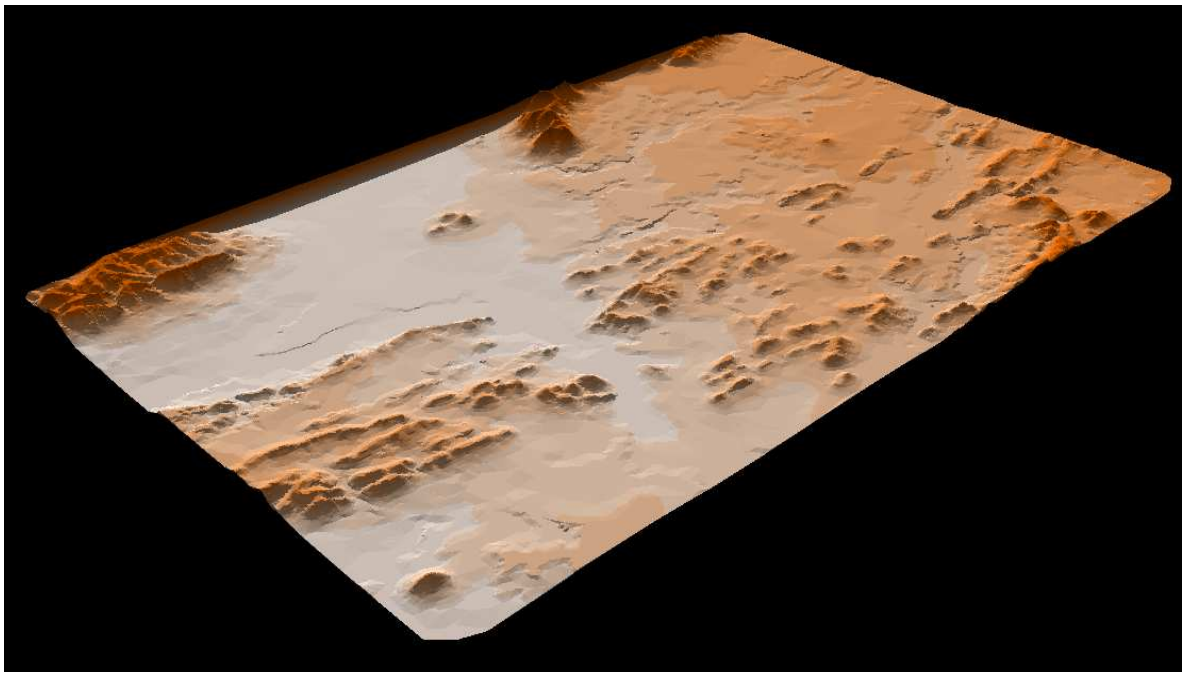

Figura 7: Vista 3d del MDE_2 (Interpolación por la distancia de Borgefors)

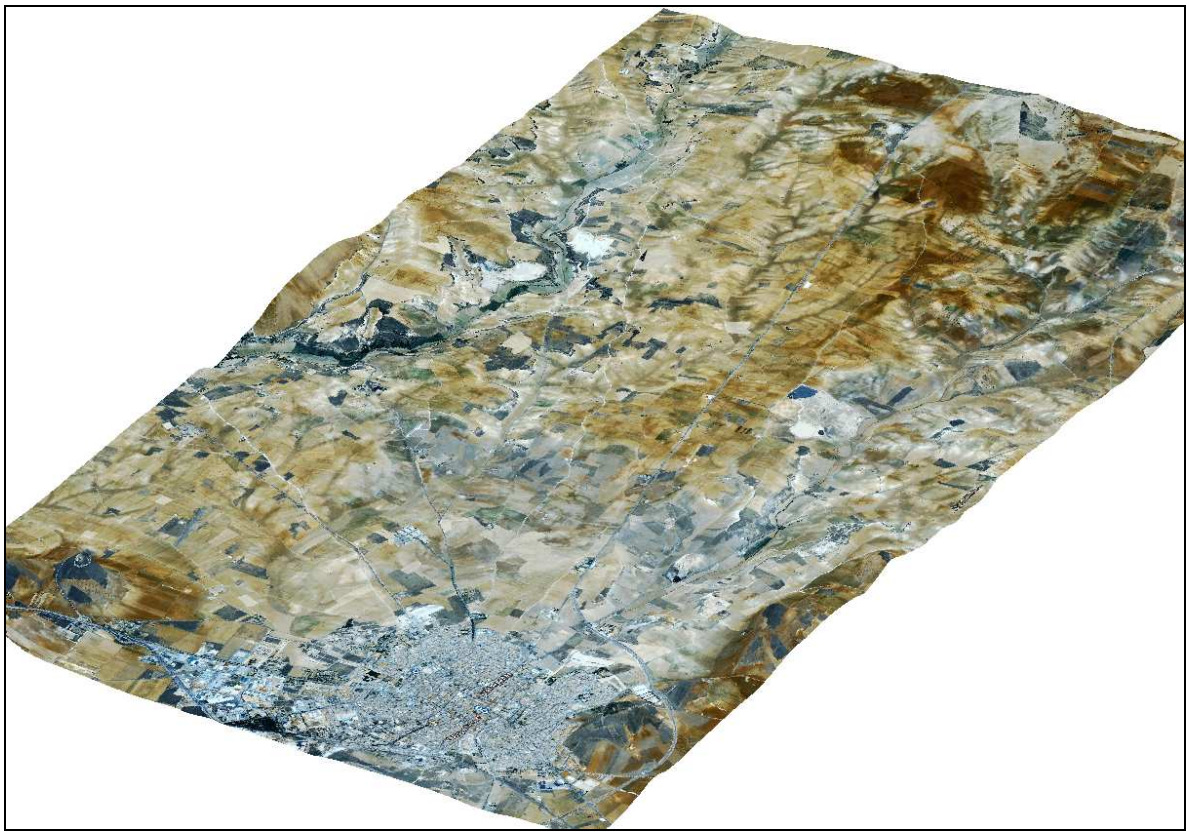

Figura 8: Composición 3d de la zona de estudio generada a partir de MDE_2

4. Referencias

Márquez, J. (2004): Modelos Digitales de Elevaciones, Métodos de Interpolación y Parámetros Morfológicos del Relieve. Tesis Doctoral Universidad de Sevilla

Li, Z. (1991): "Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtanied from experimental tests". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57(10): 1333-1340.

Ley, R. (1986): Accuracy assessment of digital terrain models

Felicísimo, A.M. (1994): Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Biblioteca de Historia Natural Pentalfa Ediciones, Oviedo. 3. 220 p.

Parte Segunda: Modelo hidrológico de la cuenca rural

Introducción

La modelación hidrológica tiene por objeto simular la respuesta hidrológica de la cuenca receptora ante un episodio de lluvia. Dicha respuesta es hallada a través de una combinación de mecanismos hidráulicos e hidrológicos interconectados introducidos en el modelo. El resultado del proceso de modelación es la determinación de los hidrogramas de los caudales circulantes en los puntos deseado, para ello, es necesario establecer un modelo que tenga en cuenta la morfología y las características físicas de la cuenca y que incluya la representación de los procesos hidrológicos que tienen lugar en su seno.

1. Modelo construido

Modelo HEC-HMS

El programa HEC-HMS constituye un modelo hidrometeorológico de simulación, desarrollado por el U.S.Army Corps of Engineers, que es capaz de simular eventos aislados o procesos continuos. Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca HEC-HMS utiliza los siguientes componentes:

- modelos de cuenca
- modelos meteorológicos
- especificaciones de control
- datos de entrada

Una simulación calcula la transformación de lluvia en caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada de la lluvia del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realiza la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar en la computación. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

Para facilitar la entrada del modelo de cuenca el U.S.Army Corps of Engineers ha desarrollado la extensión HEC-GeoHMS. Dicha extensión permite visualizar información espacial, extraer las características físicas de la cuenca, realizar análisis espaciales, delinear las subcuencas y la red de drenaje superficial y construir de manera automática las entradas

para el modelo HEC-HMS. La información espacial necesaria para trabajar con HEC-GeoHMS es:

- Un modelo digital de elevaciones (MDE)
- La localización espacial de los cauces

Cuando esta información es suministrada HEC-GeoHMS, procesa el terreno y la información espacial para generar una serie de modelos digitales derivados del MDE original (Pendientes, Dirección del flujo, Acumulación del Flujo, Subcuencas, Red de drenaje …, etc) que concluye con un modelo inicial de la cuenca listo para ser leído por el programa HEC-HMS.

Modelo de transformación lluvia-escorrentía

Para modelar el proceso de transformación lluvia-escorrentía se utilizado el modelo de onda cinemática que consiste en una descripción del comportamiento del flujo no permanente a través de las ecuaciones de Saint-Venant considerando que sólo las fuerzas de gravedad y de fricción son relevantes en la descripción del flujo.

Para ello la superficie de la cuenca es simulada a través de dos porciones de plano inclinado, definidos por una rugosidad, una longitud, un ancho y una pendiente (ver figuras siguientes).

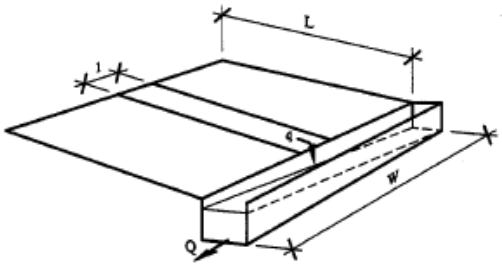

Figura 9: Esquema del modelo de onda cinemática

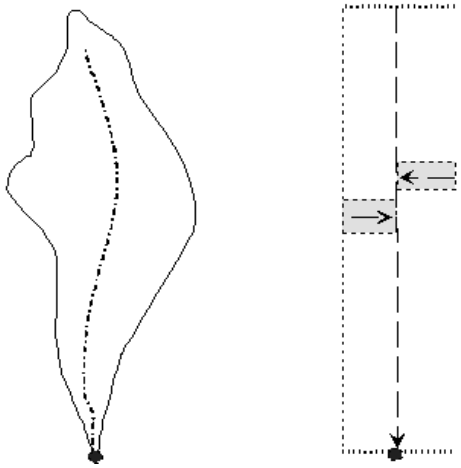

Figura 10:Descomposición de la cuenca en planos

La ecuación diferencial resultante de tal simplificación es,

$$\frac{dq}{dt} = c(i - f)$$

Donde:

q es el caudal unitario

i es la intensidad de lluvia uniforme

f es la tasa de infiltración uniforme a través del plano

c es la celeridad de la onda

El programa HEC-HMS resuelve esta ecuación diferencial mediante diferencias finitas.

Se ha utilizado el modelo cinemática debido a que en el modelo tradicional del hidrograma unitario es preciso estimar parámetros tales como el tiempo de concentración y el tiempo de desfase que debido a la escasa entidad de la cuenca los parámetros que se obtienen empleando una u otra fórmula difieren notablemente y confieren a los resultados un alto grado de incertidumbre. En cambio, empleando el modelo de onda cinemática los únicos parámetros a introducir son, la tasa de infiltración que ha sido estimada mediante ensayos y la rugosidad que se ha obtenido por aplicación de una formulación basada en la inspección visual de la cuenca.

En el modelo de transformación lluvia-escorrentía no se ha tenido en cuenta los caudales provenientes de la infiltración devuelta al cauce para el cálculo de los hidrogramas ni tampoco se ha considerado las pérdidas por evapotranspiración en la obtención de la lluvia neta. Estas simplificaciones son asumibles dado que el tiempo de simulación es suficientemente corto para que estos aspectos no influyan el resultado final.

Propagación de hidrogramas en cauces

Al igual que en el modelo de transformación lluvia-escorrentía se ha evitado emplear modelos que precisen parámetros de difícil estimación (Muskingum) y se ha optado por modelar la propagación de los hidrogramas en el cauce mediante el modelo de onda cinemática.

Modelo de infiltración Green-Ampt

Para simular el proceso de infiltración se ha optado por el modelo de infiltración de Green-Ampt. Se asume que el frente de mojado está determinado por una transición brusca que separa el suelo inferior con humedad θ_i, del suelo superior (saturado) con contenido de humedad θ_0=n, donde n es la porosidad. El frente de mojado ha penetrado hasta una

profundidad L(t). En la superficie (z=0), el suelo se encuentra encharcado con superficie libre en $z=h_0$.

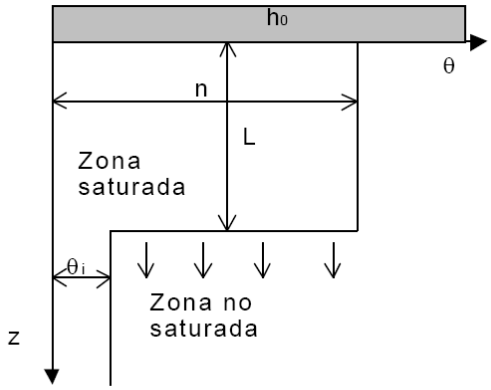

Figura 11 Esquema del modelo Green-Ampt

Las suposiciones básicas de este modelo son:

- Existe un frente de humedecimiento muy bien definido para el cual la carga de presión del agua h0 permanece constante en el tiempo y posición
- Debajo de dicho frente de humedecimiento, el perfil del suelo se encuentra uniformemente húmedo con una conductividad hidráulica constante K.

A partir de este esquema Green y Ampt (1911) aplicaron la ley de Darcy entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento encontrando la siguiente ecuación:

$$f = K\left(\frac{\psi \Delta\theta}{F} + 1\right)$$

Donde:

f : Velocidad de infiltración en mm/h

$\Delta\theta$ = n-θi déficit de humedad inicial o porosidad efectiva θe

$\Psi = h_0 + S$: carga de succión de suelo en el frente mojado en mm

S : Potencial del frente de humedecimiento en mm

K : Conductividad hidráulica en saturación en mm/h

F : Lámina infiltrada acumulada en mm.

La aplicación del modelo de Green-Ampt requiere estimaciones de la conductividad hidráulica K, de la porosidad n y de la carga de succión de suelo en el frente de mojado, ψ. La siguiente tabla muestra los rangos típicos para n, θe, Ψ y K. A medida que el suelo se vuelve más fino cuando pasa de arena a arcilla, la cargo de succión del frente de mojado (Ψ) se

incrementa mientras que la conductividad hidráulica decrece *(k)* . Los rangos típicos de n y θe no son muy grandes, pero Ψ puede variar en un amplio rango para un suelo dado.

TABLE 5.5.5 USDA Soil Texture Green-Ampt Infiltration Parameters

Soil texture class	Porosity ϕ	Wetting front soil suction head S_f, cm	Saturated hydraulic conductivity K_s,* cm/h
Sand	0.437 (0.374–0.500)	4.95 (0.97–25.36)	23.56
Loamy sand	0.437 (0.363–0.506)	6.13 (1.35–27.94)	5.98
Sandy loam	0.453 (0.351–0.555)	11.01 (2.67–45.47)	2.18
Loam	0.463 (0.375–0.551)	8.89 (1.33–59.38)	1.32
Silt loam	0.501 (0.420–0.582)	16.68 (2.92–95.39)	0.68
Sandy clay loam	0.398 (0.332–0.464)	21.85 (4.42–108.0)	0.30
Clay loam	0.464 (0.409–0.519)	20.88 (4.79–91.10)	0.20
Silty clay loam	0.471 (0.418–0.524)	27.30 (5.67–131.50)	0.20
Sandy clay	0.430 (0.370–0.490)	23.90 (4.08–140.2)	0.12
Silty clay	0.479 (0.425–0.533)	29.22 (6.13–139.4)	0.10
Clay	0.475 (0.427–0.523)	31.63 (6.39–156.5)	0.06

* A method for determining the Green-Ampt K from K_s is given following Eq. (5.5.16). For bare ground conditions K can be taken as $K_s/2$.
Source: Reproduced from Ref. 81 with permission.

Tabla 4: Parámetros del modelo Green-Ampt para distintos tipos de suelos (Handbook of Hydrology)

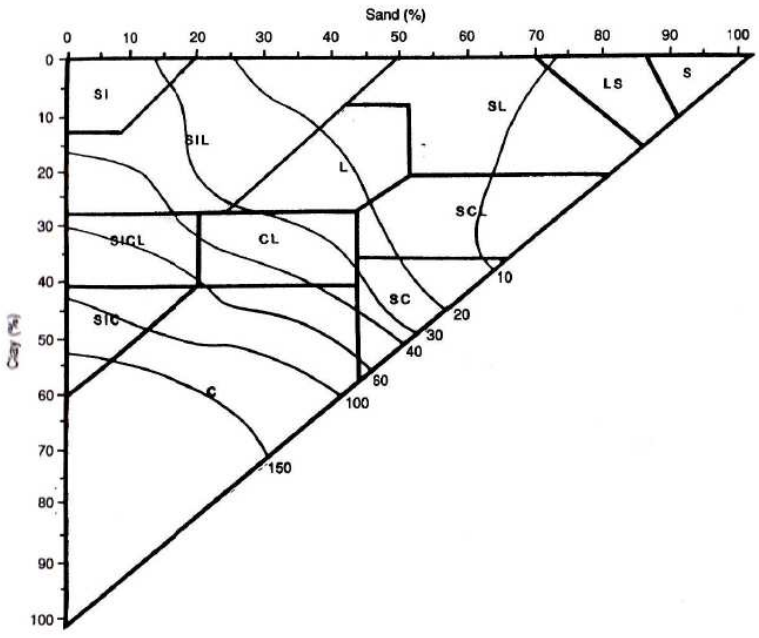

Figura 12: Tríangulo de textura USDA /carga de succiódel frente mojado (Handbook of Hydrology)

Ensayos de infiltración y análisis granulométricos

Con el objetivo de ajustar los parámetros del modelo de infiltración se han realizado "in situ" tres ensayos de infiltración con un infiltrómetro de doble anillo el cual se muestra y se explica su funcionamiento en la siguiente fotografía y dibujo respectivamente:

Figura 13: Infiltrómetro de doble anillo utilizado en los ensayos

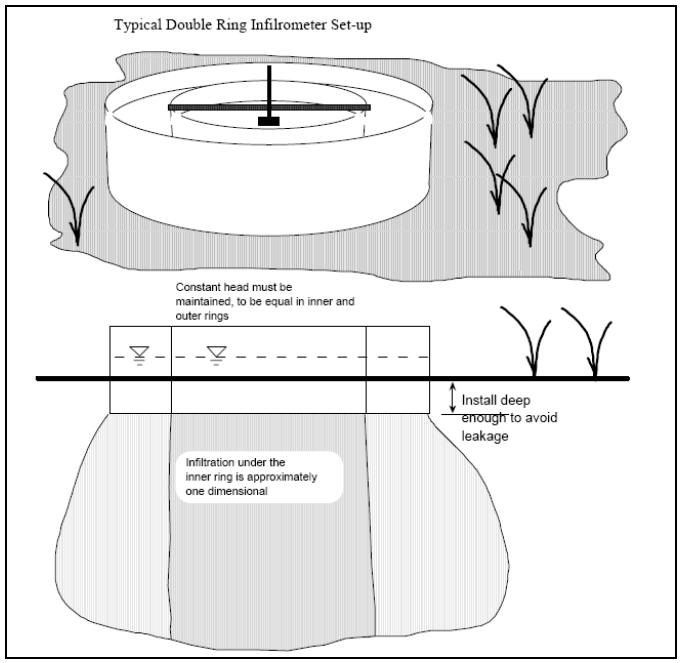

Figura 14: Esquema explicativo del funcionamiento del infiltrómetro de doble anillo

En las tablas y gráficos siguientes se muestran los resultados de los tres ensayos de infiltración realizados en la cuenca:

RESULTADO DEL ENSAYO DE INFILTRACIÓN Nº1

Tiempo (min)	Enrase (mm)	Lectura (mm)	Δt (min)	Lamina parcial(mm)	Tiempo acum.(mim)	Lamina acum.(mm)	Infiltración (mm/h)
0		342	5	0.00	0	0.0	
5		371	5	2.32	5	2.3	27.83
10		400	5	2.32	10	4.6	27.83
15		431.5	5	2.52	15	7.2	28.63
20		457.5	5	2.08	20	9.2	27.71
25		478	5	1.64	25	10.9	26.10
30		504	5	2.08	30	13.0	25.91
35		519	5	1.20	35	14.2	24.26
40		541	5	1.76	40	15.9	**23.87**

Tabla 5: Resultados del ensayo de infiltración nº1

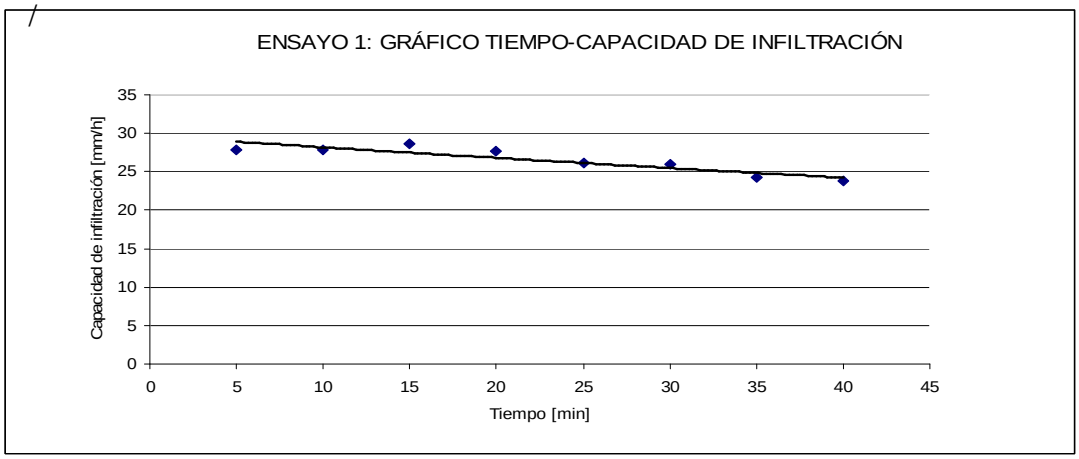

Figura 15: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº1

RESULTADO DEL ENSAYO DE INFILTRACIÓN Nº2

Tiempo (min)	Enrase (mm)	Lectura (mm)	Δt (min)	Lamina parcial(mm)	Tiempo acum.(min)	Lamina acum.(mm)	Infiltración (mm/h)
0	150	150	5	0	0	0.0	
5		144	5	6	5	6.0	72.00
10		136	5	8	10	14.0	84.00
15		130	5	6	15	20.0	80.00
20		125	5	5	20	25.0	75.00
30		110	10	15	30	40.0	80.00
35	145	145	5	0	35	40.0	68.57
40		138	5	7	40	47.0	70.50
45		131	5	7	45	54.0	72.00
50		126	5	5	50	59.0	70.80
55		120	5	6	55	65.0	70.91
60		114.5	5	5.5	60	70.5	70.50
65		109	5	5.5	65	76.0	70.15
70		105	5	4	70	80.0	68.57
75		100	5	5	75	85.0	68.00
80		95.5	5	4.5	80	89.5	**67.13**

Tabla 6: Resultados del ensayo de infiltración nº2

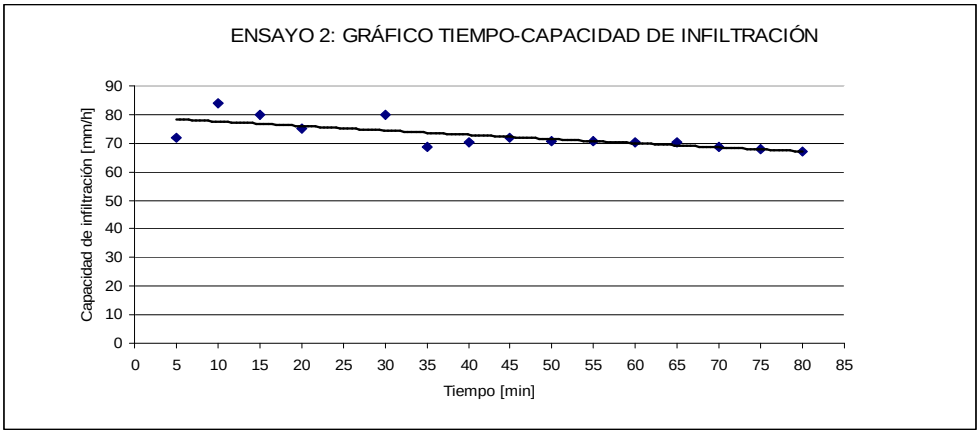

Figura 16: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº2

RESULTADO DEL ENSAYO DE INFILTRACIÓN Nº3

Tiempo (min)	Enrase (mm)	Lectura (mm)	Δt (min)	Lamina parcial(mm)	Tiempo acum.(min)	Lamina acum.(mm)	Infiltración (mm/h)
0		595	0	0.00	0	0.0	
3		620	3	2.00	3	2.0	39.98
7		647	4	2.16	7	4.2	35.64
11		683	4	2.88	11	7.0	38.38
16		721	5	3.04	16	10.1	37.79
20		757	4	2.88	20	13.0	38.86
25		794	5	2.96	25	15.9	38.19
30		838	5	3.52	30	19.4	38.86
35		883	5	3.60	35	23.0	39.48
40		923	5	3.20	40	26.2	**39.34**

Tabla 7: Resultados del ensayo de infiltración nº3

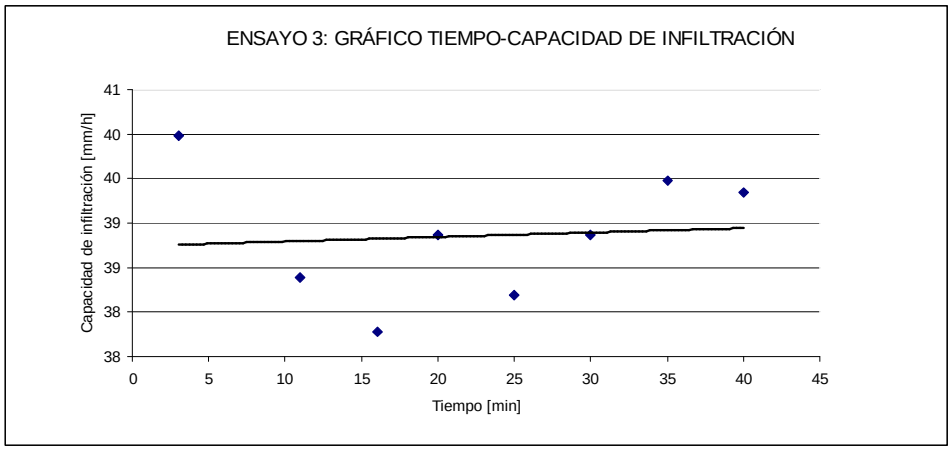

Figura 17: Gráfico del resultado del ensayo de infiltración nº3

A partir de los resultados de los ensayos de infiltración se procedió a realizar el ajuste de la ecuación de Green-Ampt dado que ésta representa una recta cuado en ordenadas se representa la capacidad de infiltración *f* y en abscisas la inversa de la lámina infiltrada acumulada 1/*F*. Es decir:

$$f = K\left(\frac{\Psi\Delta\theta}{F}+1\right) = K\left(\frac{\Psi\Delta\theta}{F}\right)+K = K\Psi\Delta\theta\frac{1}{F}+K$$

La recta de regresión obtenida para los tres ensayos de infiltración se puede observar en los gráficos siguientes:

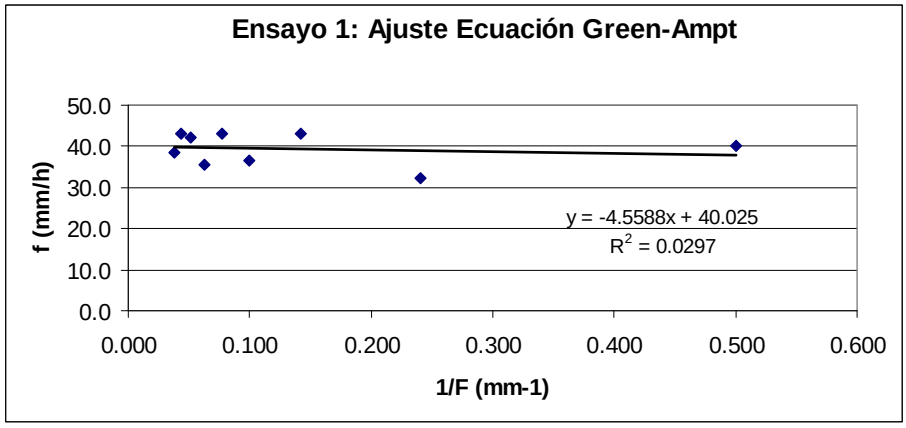

Figura 18: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 1

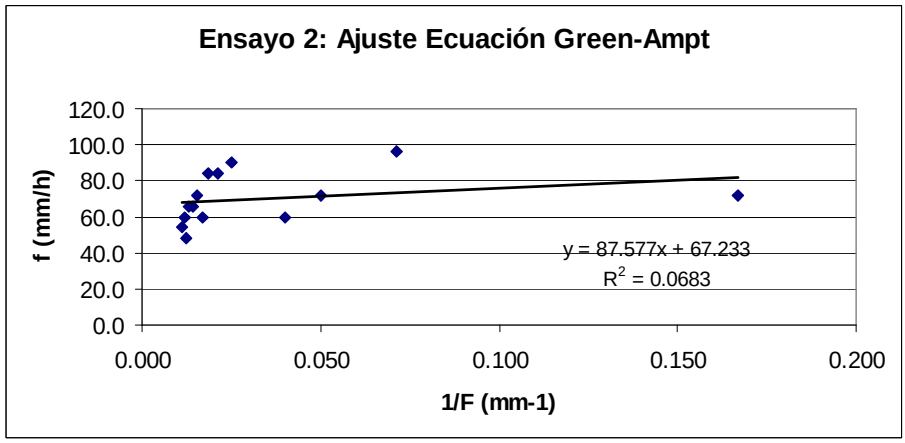

Figura 19: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 2

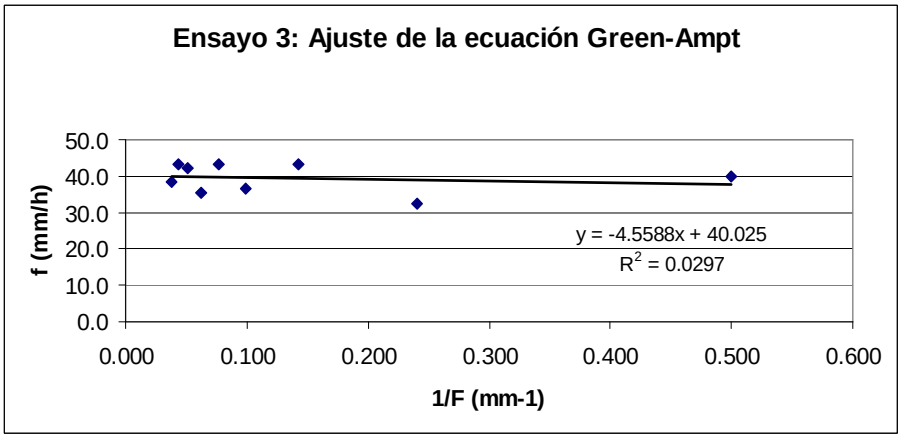

Figura 20: Ajuste de la ecuación Green-Ampt en el ensayo nº 3

Como puede observarse no se puede establecer una correlación entre los datos de los ensayos y el comportamiento teórico del modelo Green-Ampt. Esto puede ser debido en parte a que en los ensayos realizados la medición de la lámina infiltrada acumulada *F* se mide en intervalos de tiempo de 5 minutos por lo que no se ha considerado valores de *F* pequeños (o valores de 1/*F* elevados).

Dada la imposibilidad de calibrar el modelo de infiltración para obtener los parámetros de Green-Ampt es preciso realizar una clasificación del suelo ensayado para estimar mediante tablas la conductividad hidráulica K, la porosidad n y de la carga de succión de suelo en el frente de mojado, ψ.

Para obtener la clasificación del suelo ensayado se procedió a realizar un análisis granulométrico de cada una de las tres muestras de suelo.. El análisis granulométrico y demás ensayos realizados a las muestras (carbonatos, plasticidad, materia orgánica…) están recogidos en el Anexo IV, no obstante en la siguiente tabla se recogen los datos de interés para obtener los parámetros del modelo Green-Ampt:

RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
Ensayo nº	**1**	**2**	**3**
% Arcilla	14.9	14.35	13.67
% Arena	41.7	53.45	56.45
Clasificación	Loam	Sandy Loam	Sandy Loam
PARÁMETROS DEL MODELO GREE-AMPT			
n	0.463	0.453	0.453
ψ (mm)	64.18	92.92	104.78
Δθ(mm)	0.403	0.393	0.393
K (mm/h)	13.2	21.8	21.8

Tabla 8: Resumen de análisis granulométricos y parámetros Green-Ampt

Los parámetros que se han introducido en el modelo HEC-HMS relativos a la infiltración Green-Ampt son los correspondientes a un suelo sandy loam (marga arenosa) por considerarse el tipo de suelo representativo de toda la cuenca receptora (ensayos 2 y 3), siendo el valor de conductividad hidráulica introducida en HEC-HMS (21,8 mm/h) inferior a la obtenida en los tres ensayos de infiltración realizados quedando de este modo del lado de la seguridad.

Encostramiento del suelo

Como se ha comentado en el apartado 2.1 del Anexo I, el principal proceso responsable del encostramiento es el impacto de las gotas de lluvia contra el suelo. Dicho impacto produce la erosión por salpicadura o splash al romper los agregados superficiales y la consiguiente redistribución de las partículas disgregadas que una vez depositadas rellenan los macroporos.

Debido a sucesivos eventos de splash el grosor de la capa deposicional o costra se incrementa de forma progresiva a medida que se acumula la energía cinética de impacto produciendo una disminución de la macroporosidad superficial con los siguientes efectos sobre las propiedades hidráulicas del suelo:

- Disminución de la velocidad de infiltración al estar esta regulada por el porcentaje de macroporos de la superficie del suelo que conlleva una reducción de la capacidad de infiltración
- Disminución de la rugosidad superficial y por consiguiente la rugosidad hidráulica

como consecuencia de lo anterior se producirá una mayor escorrentía al disminuir las pérdidas por infiltración, con una velocidad de flujo superior al disminuir la rugosidad hidráulica.

Ensayos realizados para comprobar los efectos de la energía cinética sobre la dinámica de las propiedades del suelo (D.Regües y D.Torri, 2002) concluyen que "*las condiciones optimas para el encostramiento de un suelo agrícola, arcilloso y sin vegetación parecen estar relacionadas con una combinación entre periodos de sequedad y tormentas de alta intensidad o elevada energía*".

Teniendo en cuenta que en el suelo de la cuenca receptora objeto de este estudio se cumplen dichas condiciones respecto a su composición, uso, cobertura y periodos de sequedad, se ha estimado conveniente tener en cuenta el efecto que el encostramiento puede tener sobre la respuesta hidrológica.

El principal problema a la hora de abordar éste efecto es la falta de información en la bibliografía respecto a la disminución de la capacidad de infiltración por este fenómeno. Tampoco ha sido posible realizar ensayos de simulación de lluvia pues no se dispone del costoso equipo necesaria para tal ensayo. **Por tanto el estudio del encostramiento se realiza como análisis de la robustez de los resultado adoptando como capacidad de infiltración del suelo encostrado, la menor conductividad hidráulica estimada a partir de los ensayos de las muestras recogidas "in situ", es decir 13,2 mm/h siendo este valor del mismo**

orden que la velocidad de infiltración citada en la bibliografía especializada para un suelo encostrado similar al que es objeto de este estudio y quedando con este valor del lado de la seguridad.

Parámetros del modelo

Como ya se ha indicado, la aplicación del modelo de onda cinemática tiene la ventaja sobre otros modelos de requerir tan sólo como parámetro la rugosidad superficial la cual de ha estimado a partir de la inspección visual y fotointerpretación mediante la formulación de Cowan 1956 resultando un coeficiente de rugosidad **n = 0,045**.

Como contra partida, el modelo de onda cinemática exige disponer de un modelo digital de elevaciones con suficiente exactitud para que la definición de los planos inclinados que configuran el esquema del modelo representen fielmente la realidad del terreno. A este respecto, en este trabajo se ha dedicado un especial esfuerzo para obtener un modelo digital de elevaciones adecuado a la escala de trabajo (ver Anexo IV). Para ello ha sido preciso realizar un levantamiento topográfico in situ realizado con GPS diferencial encaminado a completar la cartografía base obtenida de las hojas 1/25.000 del IGN. A partir de estos datos se ha determinado mediante validación el procedimiento de interpolación mas adecuado a las características topográficas de la zona de estudio.

A partir del MDE validado y mediante aplicaciones basadas en Sistemas de Información Geográfica se ha obtenido la definición de la cuenca receptora y la red de drenaje de la misma la cual se ha dividido en 68 planos con una superficie media de cada plano de 0,29 Has de las cuales se han obtenido las características medias necesarias en el modelo de onda cinemática. De acuerdo con el

El resumen de las características morfológicas de la cuenca receptora es el siguiente:

Superficie total de la cuenca ..... 20 km^2

Pendiente promediada de la cuenca .....2,04 %

Nº de planos del modelo de onda cinemática.....68

Longitud total de los cauces .....18,6 km

Pendiente promedio de los cauces .....0,71 %

A continuación se muestra una tabla con las características de los planos en los que se ha dividido cada subcuenca de la cuenca receptora:

Tabla 9: Características de los planos de las subcuencas

Nombre Subcuenca	WIDTH	LENGTH	Pendiente del Plano	Área del Plano (km^2)	Área sub-cuenca (km^2)	% AREA
11			0.0215	0.000	0.912	0%
11	1125.96	809.88	0.0215	0.912		100%
12	295.21	1741.8	0.0111	0.514	0.605	85%
13	51.97	1741.8	0.0134	0.091		15%
21			0.0192	0.000	0.682	0%
21	904.89	753.7	0.0192	0.682		100%
22	353.00	1573.78	0.0178	0.556	1.044	53%
23	310.45	1573.78	0.0268	0.489		47%
32	151.76	606.89	0.0211	0.092	0.403	23%
33	511.83	606.89	0.0189	0.311		77%
42	25.84	382.75	0.0110	0.010	0.158	6%
43	385.93	382.75	0.0214	0.148		94%
51			0.0145	0.000	0.613	0%
51	1375.58	445.89	0.0145	0.613		100%
52	95.97	82.02	0.0128	0.008	0.046	17%
53	469.9	82.02	0.0132	0.039		83%
62	507.58	865.66	0.0222	0.439	0.768	57%
63	380.14	865.66	0.02	0.329		43%
71			0.0103	0.000	0.602	0%
71	1396.97	430.9	0.0103	0.602		100%
72	74.81	109.83	0.0038	0.008	0.017	49%
73	79.34	109.83	0.0038	0.009		51%
82	1334.01	237.99	0.0175	0.317	0.491	65%
83	730.2	237.99	0.0235	0.174		35%
91			0.0216	0.000	0.656	0%
91	751.32	873.77	0.0216	0.656		100%
92	133.36	1519.14	0.0108	0.203	0.443	46%
93	158.01	1519.14	0.0158	0.240		54%
102	102.34	832.81	0.0209	0.085	0.739	12%
103	784.52	832.81	0.0206	0.653		88%
111			0.021	0.000	0.600	0%
111	906.72	662.06	0.021	0.600		100%
112	520.27	609.52	0.0261	0.317	0.601	53%
113	465.68	609.52	0.0199	0.284		47%
121			0.0132	0.000	0.603	0%
121	1100.99	547.42	0.0132	0.603		100%
122	237.41	1287.63	0.0138	0.306	0.728	42%
123	327.67	1287.63	0.0117	0.422		58%
132	670.51	659.08	0.016	0.442	0.687	64%
133	372.44	659.08	0.0178	0.245		36%
142	1088.9	403.15	0.0227	0.439	0.607	72%
143	415.66	403.15	0.0177	0.168		28%
152	1323.69	425.95	0.0191	0.564	0.603	93%
153	93.12	425.95	0.0107	0.040		7%
162	923.37	386.94	0.0202	0.357	0.447	80%
163	232.76	386.94	0.027	0.090		20%
172	1054.85	393.64	0.0332	0.415	0.839	50%
173	1076.07	393.64	0.0209	0.424		50%
182	551.66	486.76	0.037	0.269	0.622	43%
183	726.67	486.76	0.0316	0.354		57%
192	360.8	362.91	0.0355	0.131	0.215	61%
193	231.5	362.91	0.0181	0.084		39%
202	308.57	762.34	0.0476	0.235	1.027	23%
203	1038.03	762.34	0.0327	0.791		77%
222	500.37	1399.18	0.0119	0.700	0.954	73%
223	181.7	1399.18	0.0199	0.254		27%
232	134.44	440.22	0.048	0.059	0.260	23%

Nombre Subcuenca	WIDTH	LENGTH	Pendiente del Plano	Área del Plano (km^2)	Área sub-cuenca (km^2)	% AREA
233	455.87	440.22	0.0321	0.201		77%
242	404.19	151.88	0.0167	0.061	0.093	66%
243	205.35	151.88	0.0092	0.031		34%
252	254.5	542.19	0.0386	0.138	0.620	22%
253	889.77	542.19	0.0215	0.482		78%
262	406.29	619.91	0.0315	0.252	0.630	40%
263	610.34	619.91	0.0192	0.378		60%
272	269.06	1536.91	0.0213	0.414	0.748	55%
273	217.41	1536.91	0.0112	0.334		45%
282	181.2	198.73	0.0318	0.036	0.602	55%
283	2849.74	198.73	0.0095	0.566		45%

A continuación se muestran las características de los tramos de cauce comprendidos en cada subcuenca:

Nombre del cauce	Longitud (m)	Pendiente
14	1,742	0.01
24	1,574	0.007
34	607	0.007
44	383	0.005
54	82	0.001
64	866	0.006
74	110	0.002
84	238	0.006
94	1,519	0.007
104	833	0.008
114	610	0.014
124	1,288	0.008
134	659	0.007
144	403	0.002
154	426	0.001
164	387	0.005
174	394	0.009
184	487	0.007
194	363	0.007
204	762	0.014
224	1,399	0.004
234	440	0.001
244	152	0.001
254	542	0.008
264	620	0.01
274	1,537	0.006
284	199	0.003

Tabla 10: Características de los tramos de los cauces de la cuenca receptora

En la siguiente composición se puede observar los planos en que se ha dividido la cuenca receptora y los cauces de los arroyos principales que recogen la escorrentía de la cuenca. Como puede observarse los tres arroyos principales confluyen al Norte del núcleo urbano de Valdepeñas en el punto denominado “J1” . El punto denominado como “J2” representa la confluencia del Arroyo 3 y el Arroyo 1:

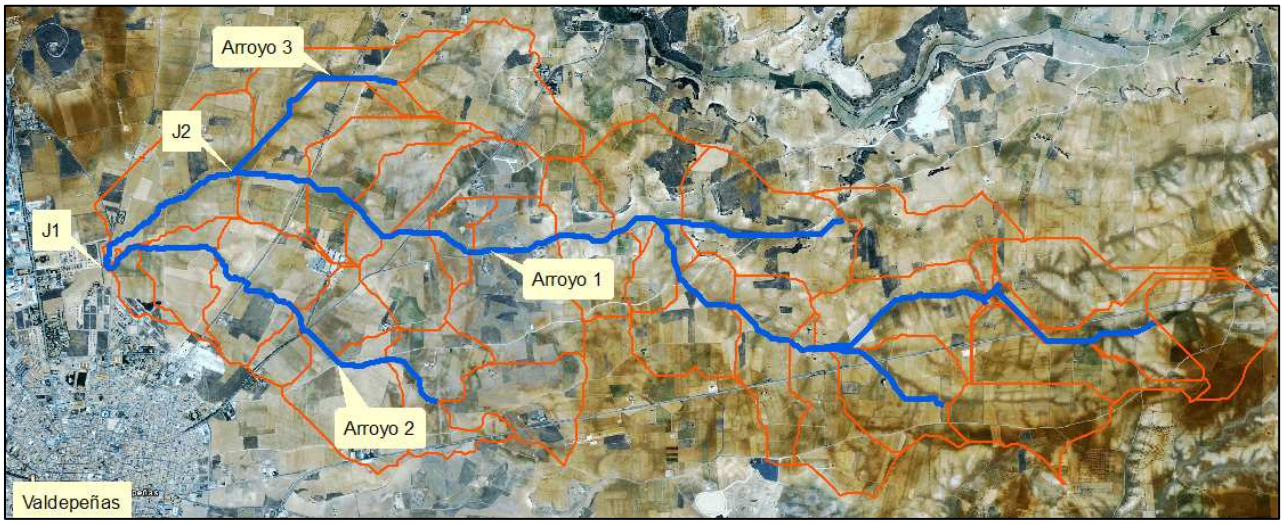

Figura 21: Ortofoto de la cuenca receptora con subcuencas y cauces principales

En la siguiente figura se puede observar una vista 3d compuesta por el MDE al que se le ha añadido una ortofoto de la zona así como la delimitación de las subcuencas y la red de drenaje generada con HEC-RAS:

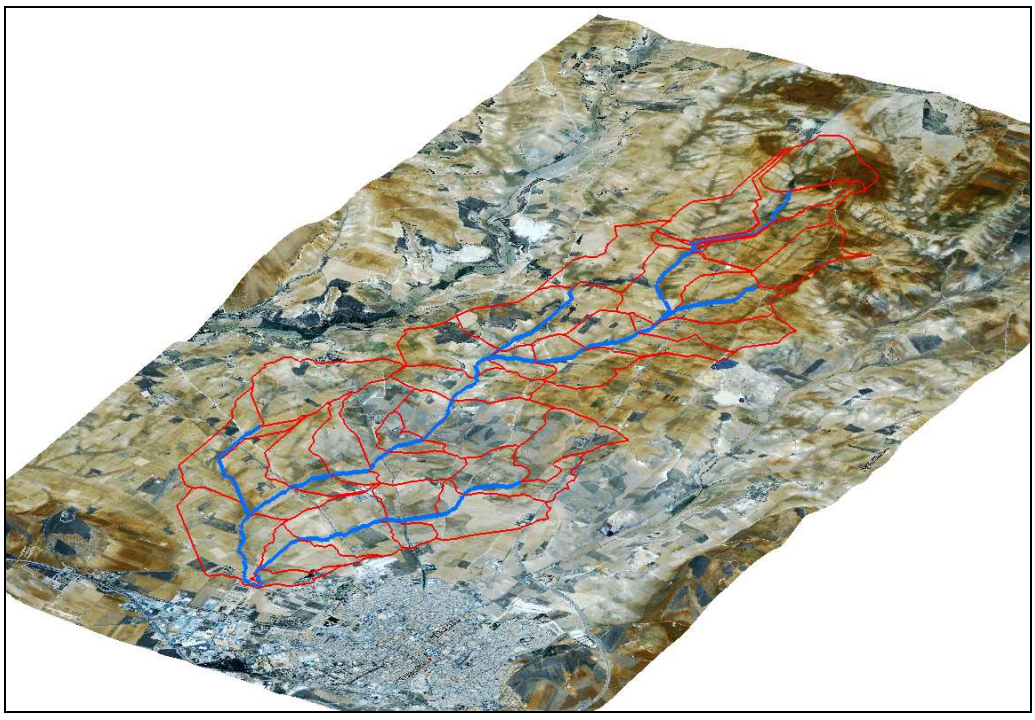

Figura 22: Vista 3d de la cuenca receptora con subcuencas y cauces principales

Esquematización de la cuenca con el modelo HEC-HMS

En la siguiente figura se puede observar el modelo de cuenca que se ha introducido en el programa HEC-HMS para la obtención del hidrograma de diseño:

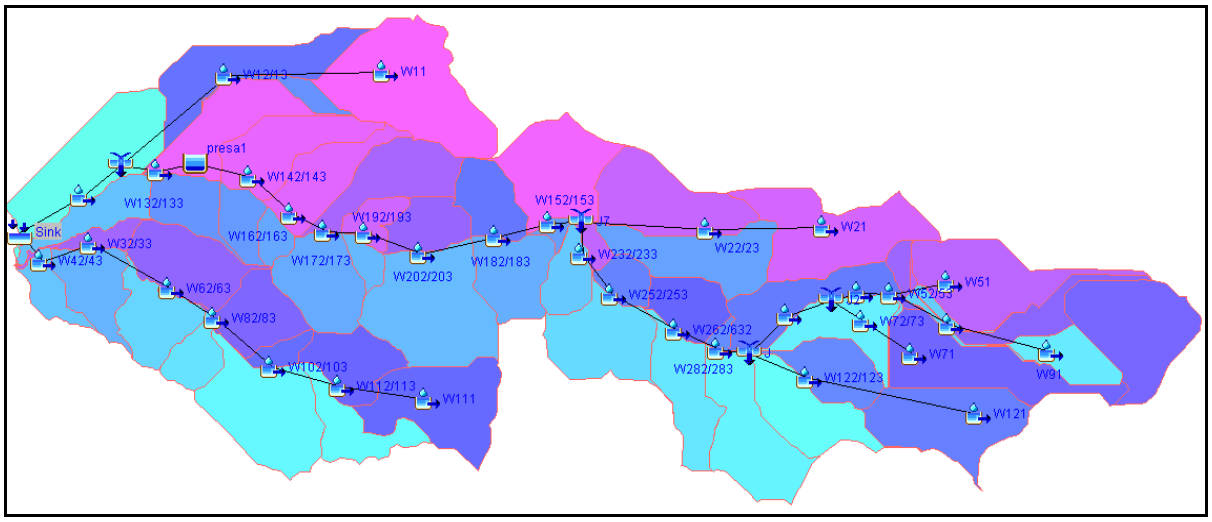

Figura 23: Esquema de la cuenca introducido en HEC-HMS

La nomenclatura de las subcuencas está definida por la letra W (watershed) seguida de uno o dos números que corresponden a los número de los planos inclinados en los que se ha modelizado la subcuenca. La letra "J" (junction) indica la confluencia de dos cauces y "sink" indica el punto de desagüe de toda la cuenca receptora.

Por su importancia en el resultado final, hay que destacar que en dicho esquema se ha simulado el represamiento que se produce en el cauce principal (Arroyo 1) debido a una obra de drenaje existente en la carretera CM-3.109 que lo intercepta. Esta obra de drenaje está constituida por tres marcos de sección aproximadamente rectangular de 80x80 cm. En la fotografía siguiente se puede observar dicha obra de drenaje:

Figura 24: Obra de drenaje existente en la ctra. CM-3.109

La rasante de dicha carretera en las proximidades de este punto está elevada 1,60 m sobre el terreno, lo cual, unido a la insuficiente capacidad de desagüe de la obra de drenaje produce un represamiento del flujo del cauce principal a su paso por este punto. Este represamiento se ha simulado en el modelo hidrológico con el elemento denominado "presa 1" aportando para ello la curva de gasto de la obra de desagüe antes y después del desbordamiento de la represa así como la capacidad de almacenamiento aguas arriba. En las figuras siguientes se muestran las gráficas correspondientes introducidas en el modelo:

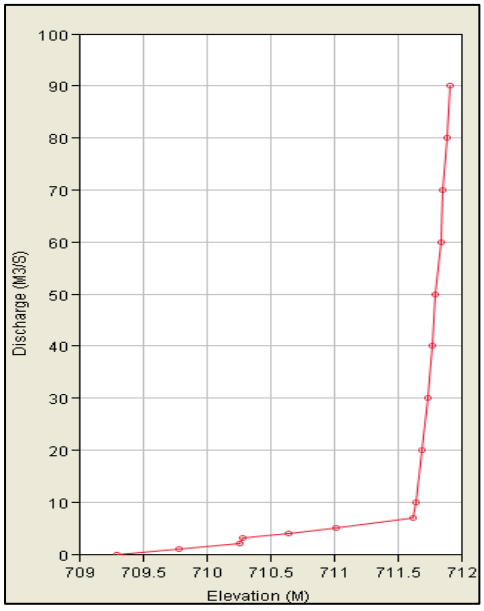

Figura 25: Curva de gasto de la obra de drenaje existente en ctra. CM-3.109

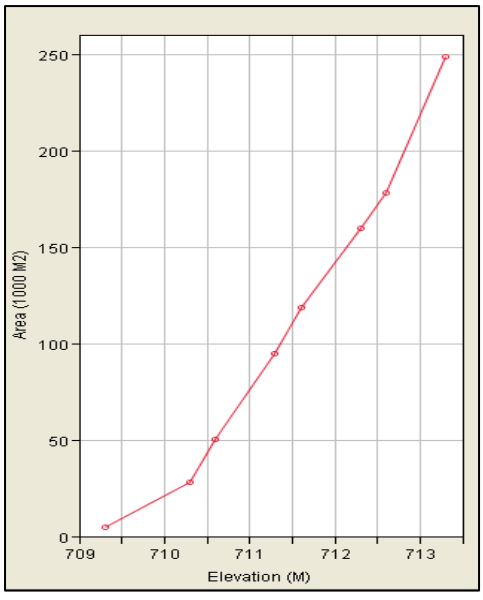

Figura 26: Curva de elevación- superficie de la obra de drenaje existente en ctra. CM-3.109

Especificaciones de control de la simulación

Las especificaciones de control establecen la duración de la simulación y el intervalo de tiempo de cálculo. En las simulaciones efectuadas se ha establecido las siguientes especificaciones de control:

- Fecha de comienzo: 01 jan 2000
- Hora de comienzo : 00:00
- Fecha de finalización: 04 jan 2000
- Hora de finalización: 00:00
- Intervalo de tiempo de cálculo: 5 minutos

Se ha dado un tiempo de simulación de finalización lo suficientemente amplio para asegurar el paso completo del hidrograma.

2. *Modelo meteorológico*

2.1 Escenario de no encostramiento del suelo

Se basa en la precipitación diaria máxima (P24h) obtenida a partir de las series de lluvias máximas diarias anuales y en el modelo de infiltración Green-Ampt (implementado en el programa HEC-HMS) cuyos parámetros se han estimado a partir los resultados de los ensayos de infiltración y análisis granulométricos. Con el fin de asegurar un escenario de suelo húmedo se ha considerado que previamente a la precipitación de 500 años de periodo de retorno (T500) sucede una lluvia de periodo de retorno 10 años (T10) que no va a producir escorrentía pero asegura condiciones de suelo húmedo cuando suceda la lluvia de cálculo o T500. Para distribuir la precipitación en el tiempo se ha utilizado hietogramas tipo "Frecuency Storm" del módulo meteorológico del programa HMS. Para ello, se le ha suministrado las alturas de lluvia caída para distintas duraciones de acuerdo con los cálculos efectuados en el anexo de pluviometría (Anexo I). Los hietogramas, tanto el de T10 como el de T500, se han diseñado para un hietograma de duración 24 horas, intervalos de tiempo de 15 minutos y con el pico de intensidad máxima situado en segundo tercio de la duración del aguacero (pico 67%) por ser ésta la situación mas desfavorable. De acuerdo con lo anterior y con el modelo de infiltración adoptado, la siguiente figura muestra en la zona superior el hietograma de diseño de precipitación bruta y el gráfico de pérdidas por infiltración

(comunes a todas las subcuencas) y en la zona inferior de la figura el hidrograma de la escorrentía resultante en la subcuenca W11:

Figura 27: Hietograma de diseño con precipitación bruta y neta (gráfico superior)

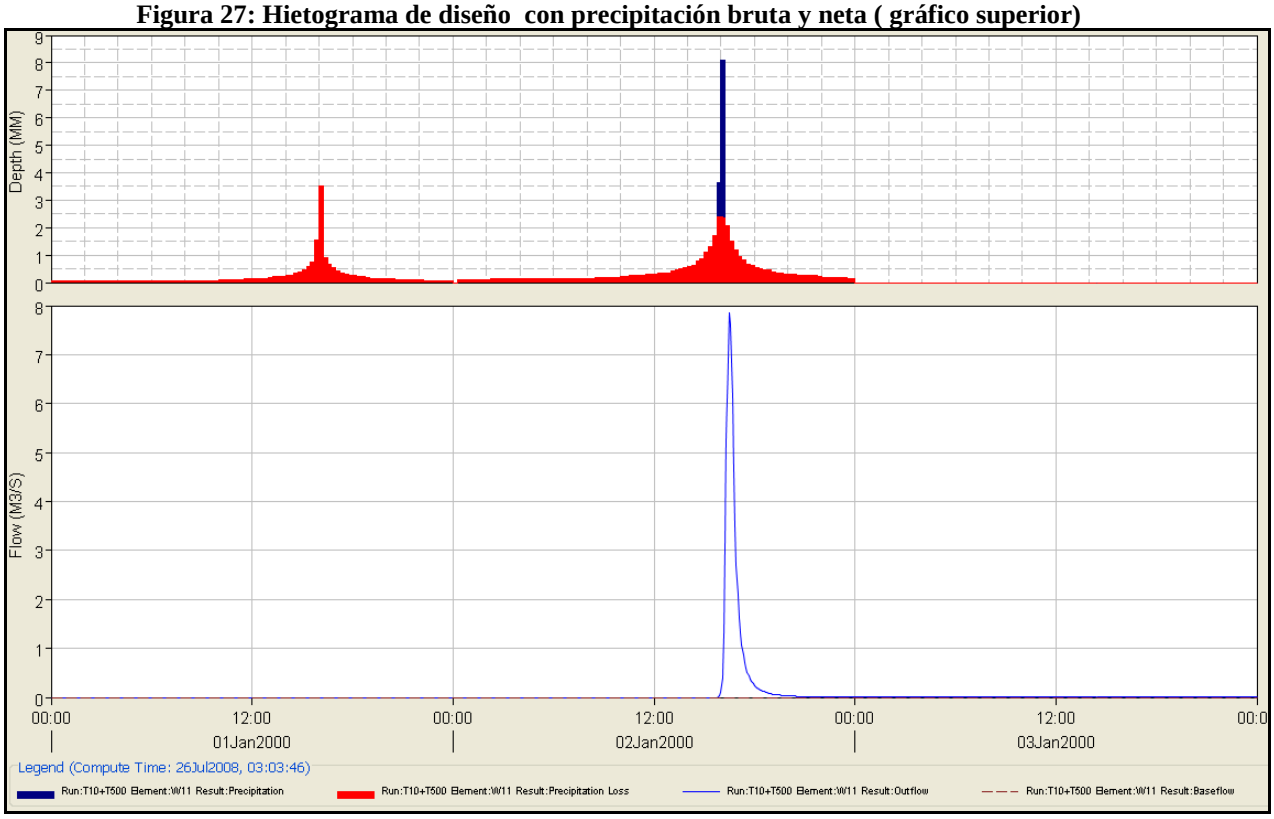

Figura 28: Hidrograma de la escorrentía resultante en la subcuenca W11(gráfico inferior)

2.2 Escenario de encostramiento del suelo

Se basa en la precipitación de origen tormentoso máxima (P_{TOR}) y para su obtención sólo se han considerado los posibles episodios lluviosos de carácter tormentoso (ver apartado *2.6* del anexo I). Se aplicará a un escenario de encostramiento del suelo cuya infiltración al igual que en el caso anterior está gobernada por el modelo Green-Ampt pero reduciendo la conductividad hidráulica hasta 13,2 mm/h. En este caso no se ha considerado la preexistencia

de suelo húmedo ya que las precipitaciones tormentosas ocurren ocasionalmente en los meses mas secos del año.

Al igual que en el escenario anterior para distribuir la precipitación en el tiempo se ha utilizado hietogramas tipo “Frecuency Storm” del módulo meteorológico del programa HMS. El hietograma de la precipitación tormentosa se han diseñado para un periodo de retorno de 500 años (T500), un hietograma de duración 24 horas, intervalos de tiempo de 5 minutos y con el pico de intensidad máxima situado en segundo tercio de la duración del aguacero (pico al 67%). De acuerdo con lo anterior y con el modelo de infiltración adoptado, la siguientes figuras muestran en la zona superior el hietograma de diseño de precipitación bruta y el gráfico de pérdidas por infiltración (comunes a todas las subcuencas) y en la zona inferior de la figura el hidrograma de escorrentía resultante para la subcuenca W11 :

Figura 29: Hietograma de diseño con precipitación bruta y neta (gráfico superior)

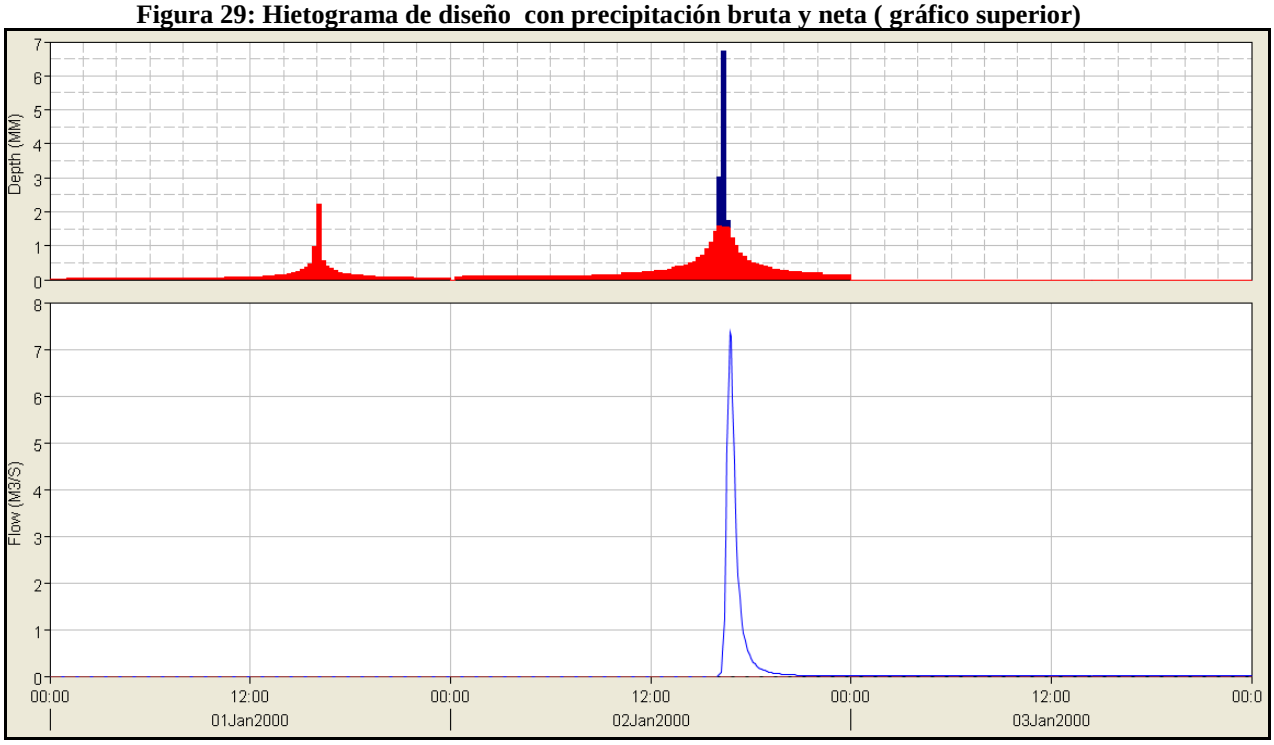

Figura 30: Hidrograma de la escorrentía resultante en la subcuenca W11(gráfico inferior)

3. *Hidrogramas resultantes: Interpretación y discusión*

3.1 Escenario de no encostramiento del suelo

A continuación en la Figura 31, se muestran los hidrogramas (T10+T500) obtenidos con el programa HEC-HMS una vez procesada la simulación en el punto de desagüe de toda la cuenca "J1" o "sink". Como puede observarse los hidrogramas sólo abarcan el periodo donde se producen los máximos caudales por motivo de claridad en la representación gráfica.

El hidrograma en color verde es resultado de la suma de los hidrogramas del Arroyo 1 y el Arroyo 3. El hidrograma en color rojo corresponde al Arroyo 2 y el hidrograma en color azul es la suma de los dos anteriores.

Como puede observarse, el hidrograma total, presenta dos picos bien diferenciados. El primer pico de 25 m^3/s, se produce a las 17:05 del 02-jan (el hietograma T10+T500 comienza el 01-jan a las 00:00) por la confluencia del pico del hidrograma del Arroyo 2 con el caudal circulante por el cauce principal o Arroyo 1. Mientras que el segundo pico de 18,05 m^3/s se produce a las 19:30 del mismo día debido al desbordamiento del represamiento ocasionado por la obra de drenaje de la carretera CM-3.109.

A la vista de los resultados, se comprueba que la obra de drenaje de la carretera CM-3.109 puede ser decisiva en el resultado final del hidrograma total si se diseña de manera que consiga laminar el segundo pico de la avenida. Para ello es preciso que el caudal de desagüe en la misma no se incremente notablemente al funcionar como vertedero de pared gruesa, es decir, no debe desbordar.

Sin embargo, aún consiguiendo laminar el segundo pico de la avenida, se observa que el primer pico de 25 m^3/s se mantiene invariable puesto que es debido a la confluencia de los hidrogramas del Arroyo 2 y Arroyo 1 aguas abajo de la obra de drenaje de la carretera CM-3.109.

Para analizar las consecuencias que las posibles actuaciones tendrían en el sistema y para poder tomar decisiones al respecto, es preciso realizar una modelación hidráulica del sistema. A ello se dedica el Anexo 3 de este trabajo.

HIDROGRAMA DE LA CUENCA. ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T500)/(24+24) horas

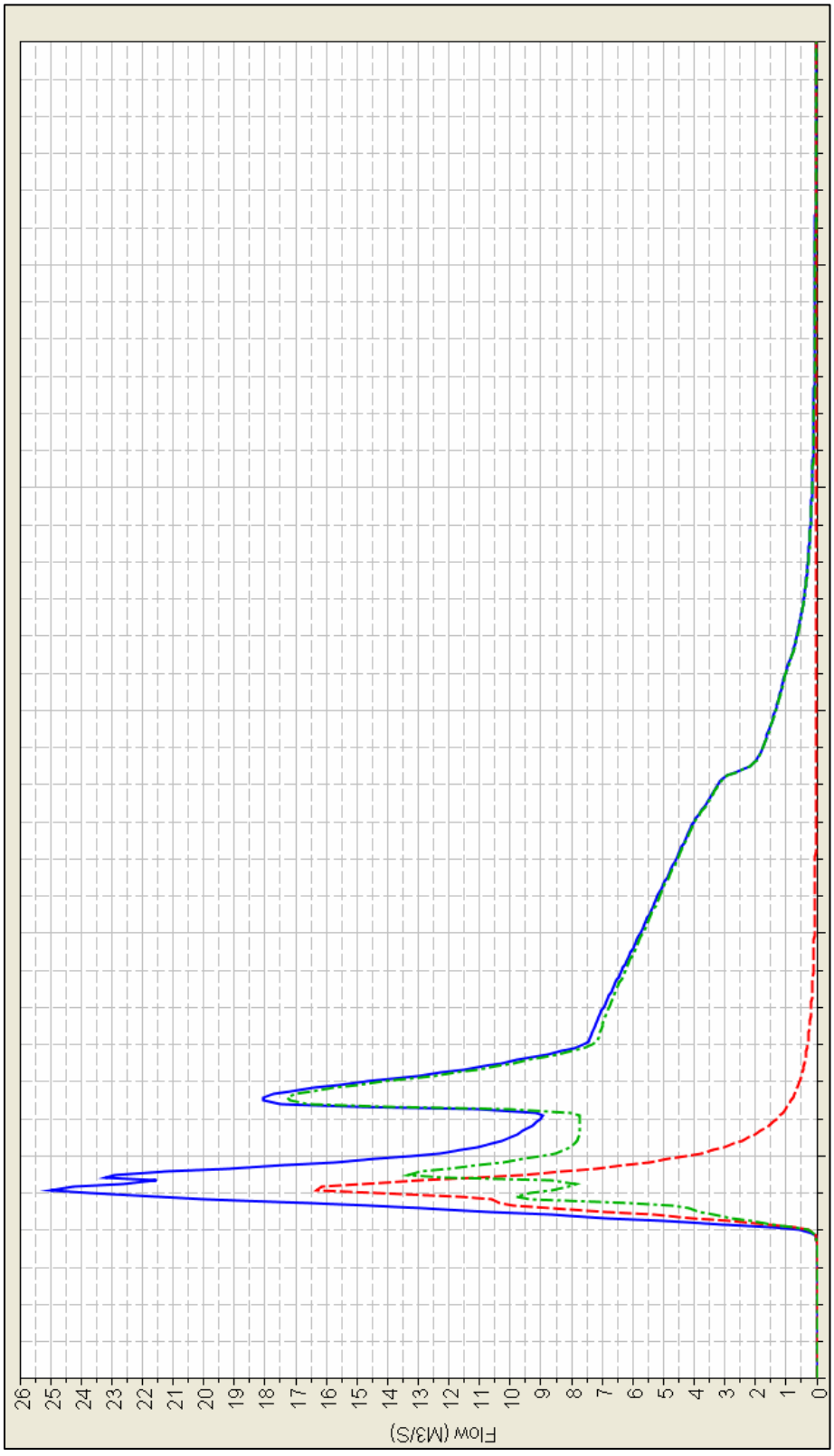

Figura 31: Hidrograma (T10+T500) resultante en la cuenca receptora. No encostramiento

3.2 Escenario de encostramiento del suelo

De igual forma que en el escenario anterior en la Figura 32 se muestran los hidrogramas (T10+T500) obtenidos con el programa HEC-HMS. Como puede observarse, el hidrograma total, es muy similar al del escenario de no encostramiento. El primer pico de 24 m^3/s, se produce a las 17:30 del 02-jan. (el hietograma comienza el 01-jan a las 00:00). El segundo pico de 17 m^3/s se produce a las 20:00 del mismo día. debido al desbordamiento del represamiento ocasionado por la obra de drenaje de la carretera CM-3.109.

3.3 Conclusión

Dado que el escenario de encostramiento tiene un alto grado de incertidumbre debido a la escasa disponibilidad tanto de los datos pluviométricos de tormentas como de la respuesta del suelo ante estas lluvias de alta energía y habiendo comprobado que arroja resultados muy similares al escenario de no encostramiento, **se adopta como hidrograma de diseño el resultante del escenario de no encostramiento (T10+T500).**

3.4 Otros hidrogramas

Como complemento a este anexo en las Figuras 33 a 38 se muestran los hidrogramas resultantes en la cuenca cuando se aplican al modelo hietogramas confeccionados con la precipitación de periodo de retorno de 10 años y duración 24 horas para asegurar condiciones iniciales de suelo mojado seguidos de la precipitación con periodo de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años también de duración 24 horas, es decir: T10+T5, T10+T10, T10+T25, T10+T50, T10+T100 y T10+T200. El hidrograma T10+T2 no se muestra pues no arroja caudal.

HIDROGRAMA DE LA CUENCA. ESCENARIO DE ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA P_{TOR} (T10+T500)/ (24+24) horas

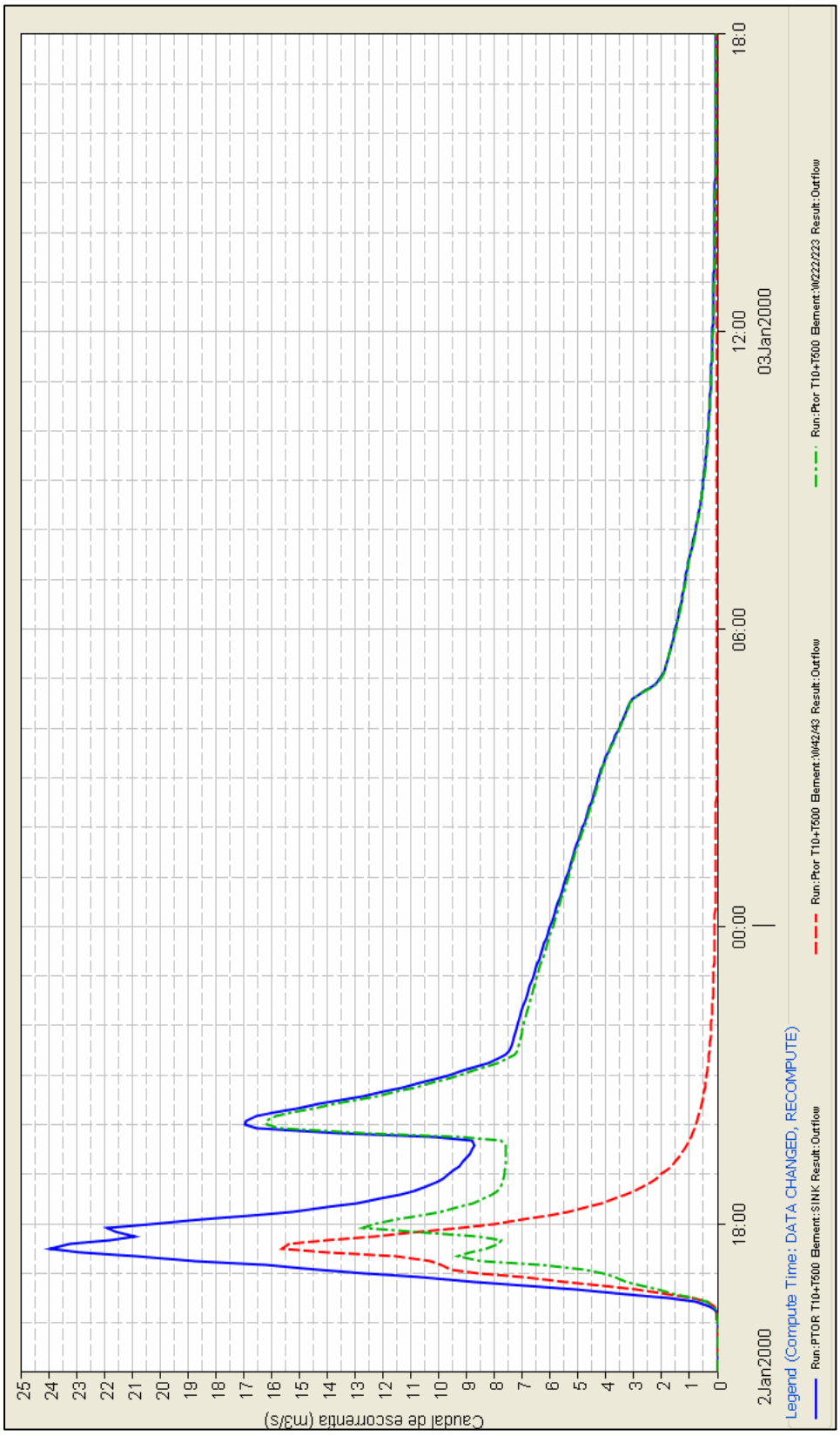

Figura 32: Hidrograma (T10+T500) resultante en la cuenca receptora. Encostramiento (HEC-HMS)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA: ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T5)/(24+24) horas

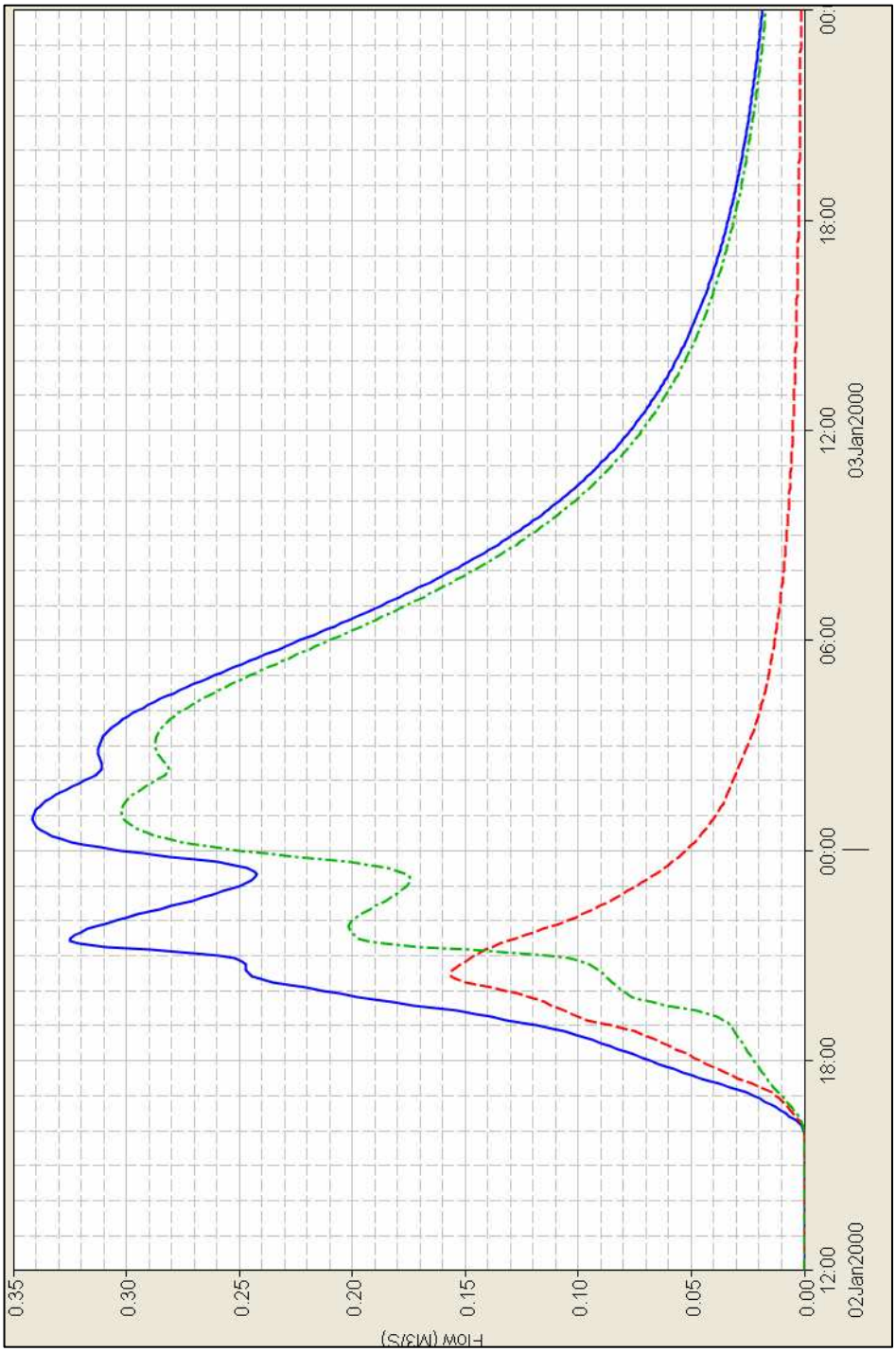

Figura 33: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T5(24h)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA: ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T10)/(24+24) horas

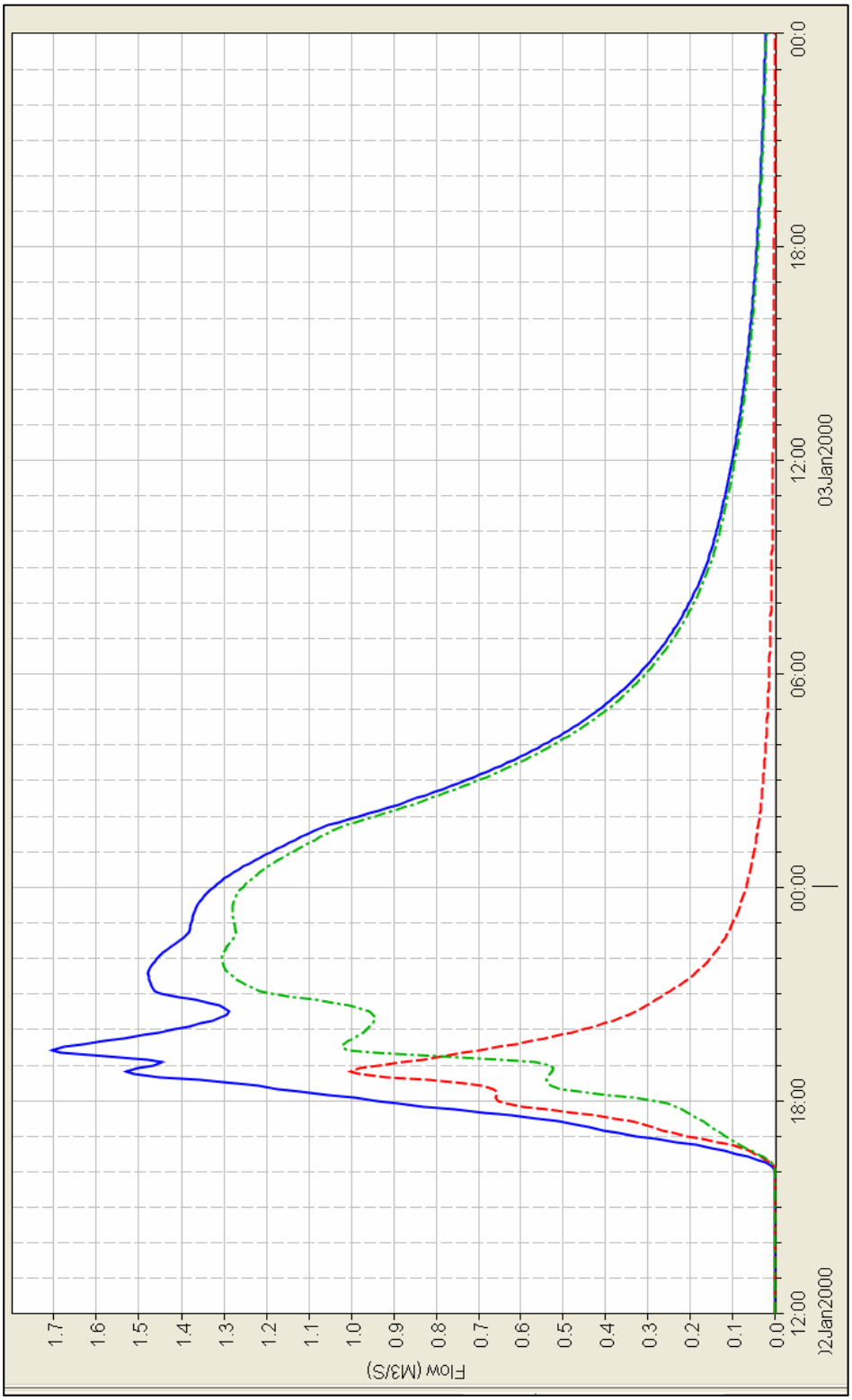

Figura 34: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T10(24h)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA. ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T25)/(24+24) horas

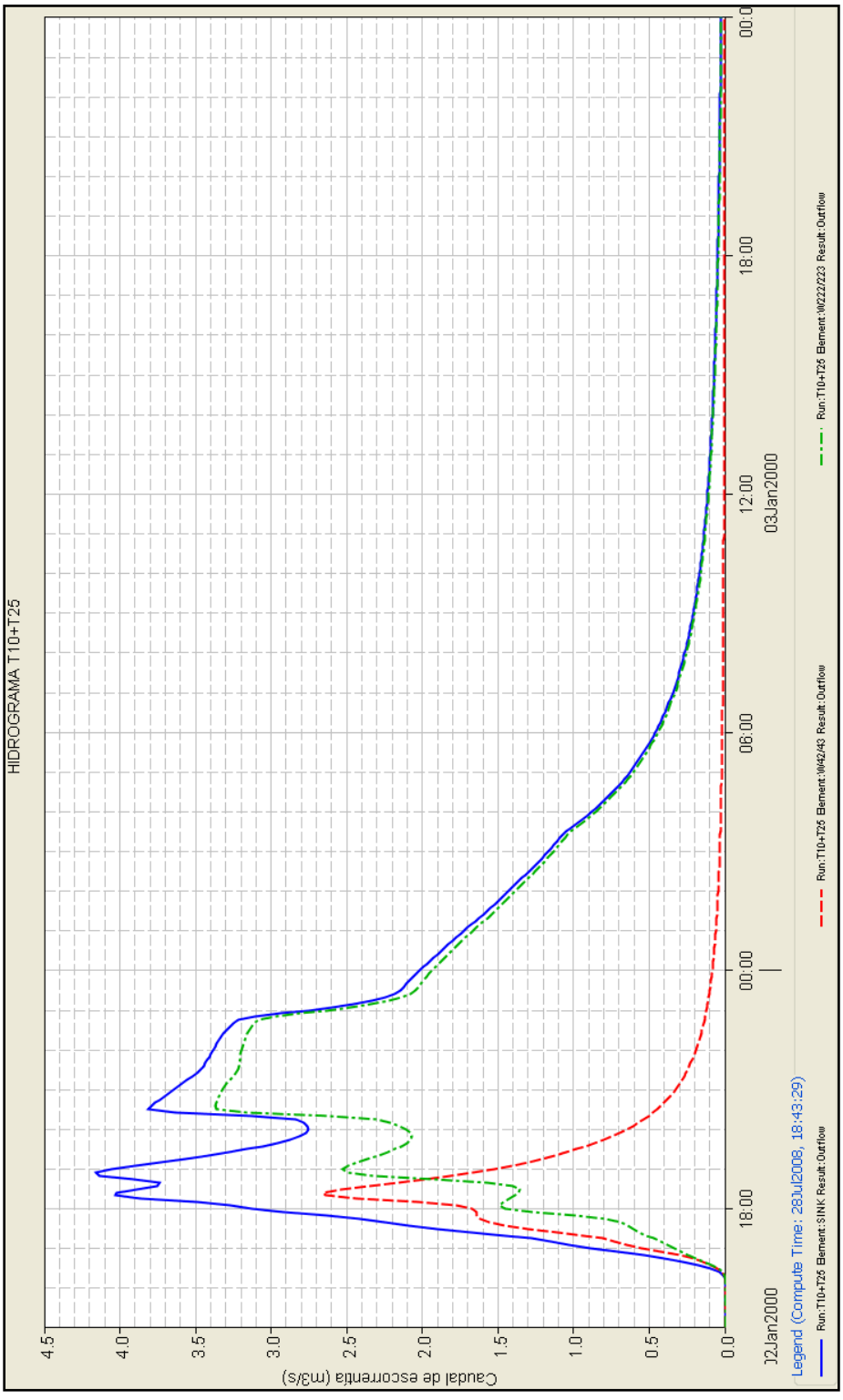

Figura 35: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T25(24h)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA. ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T50)/(24+24) horas

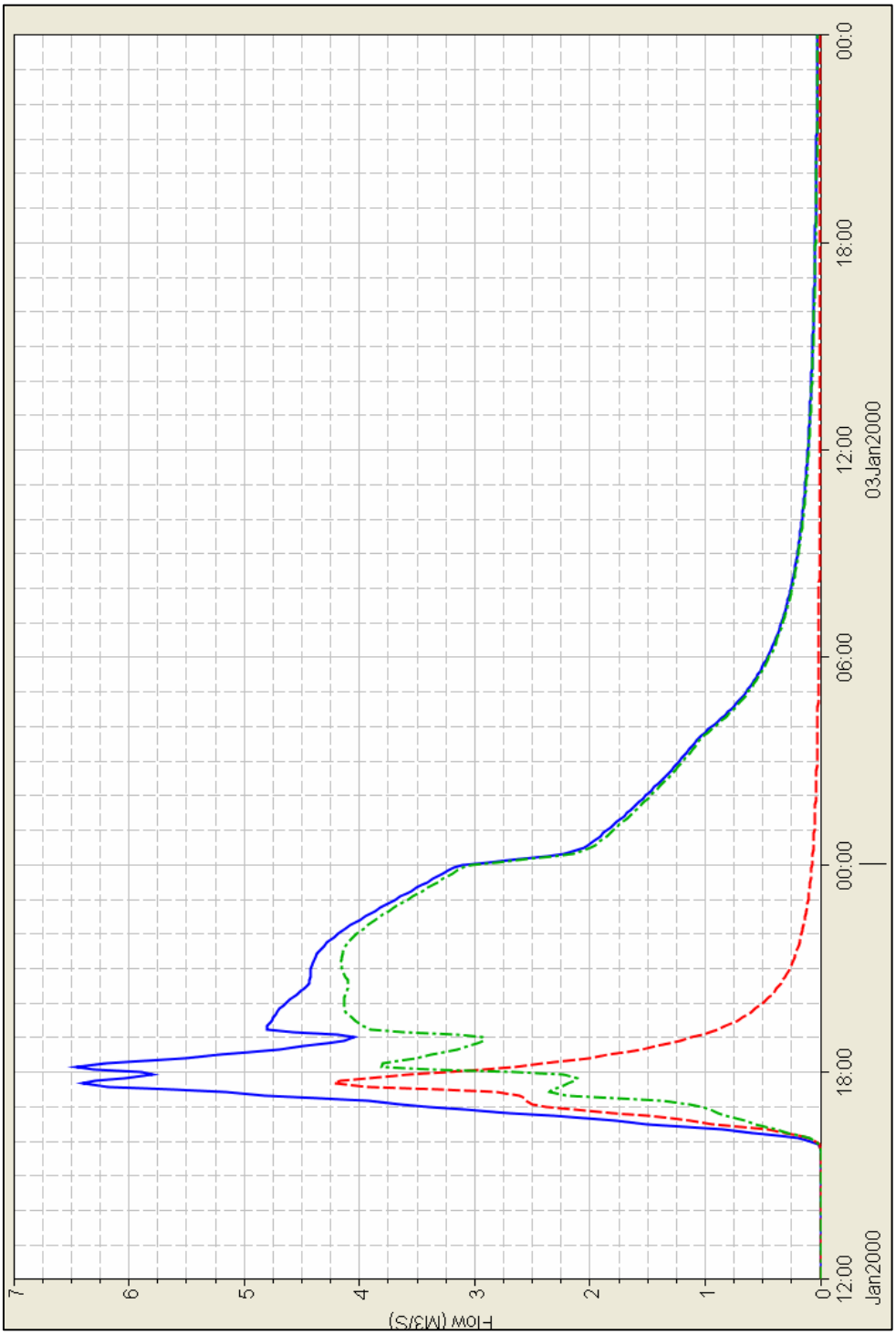

Figura 36: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T50(24h)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA: ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T100)/(24+24) horas

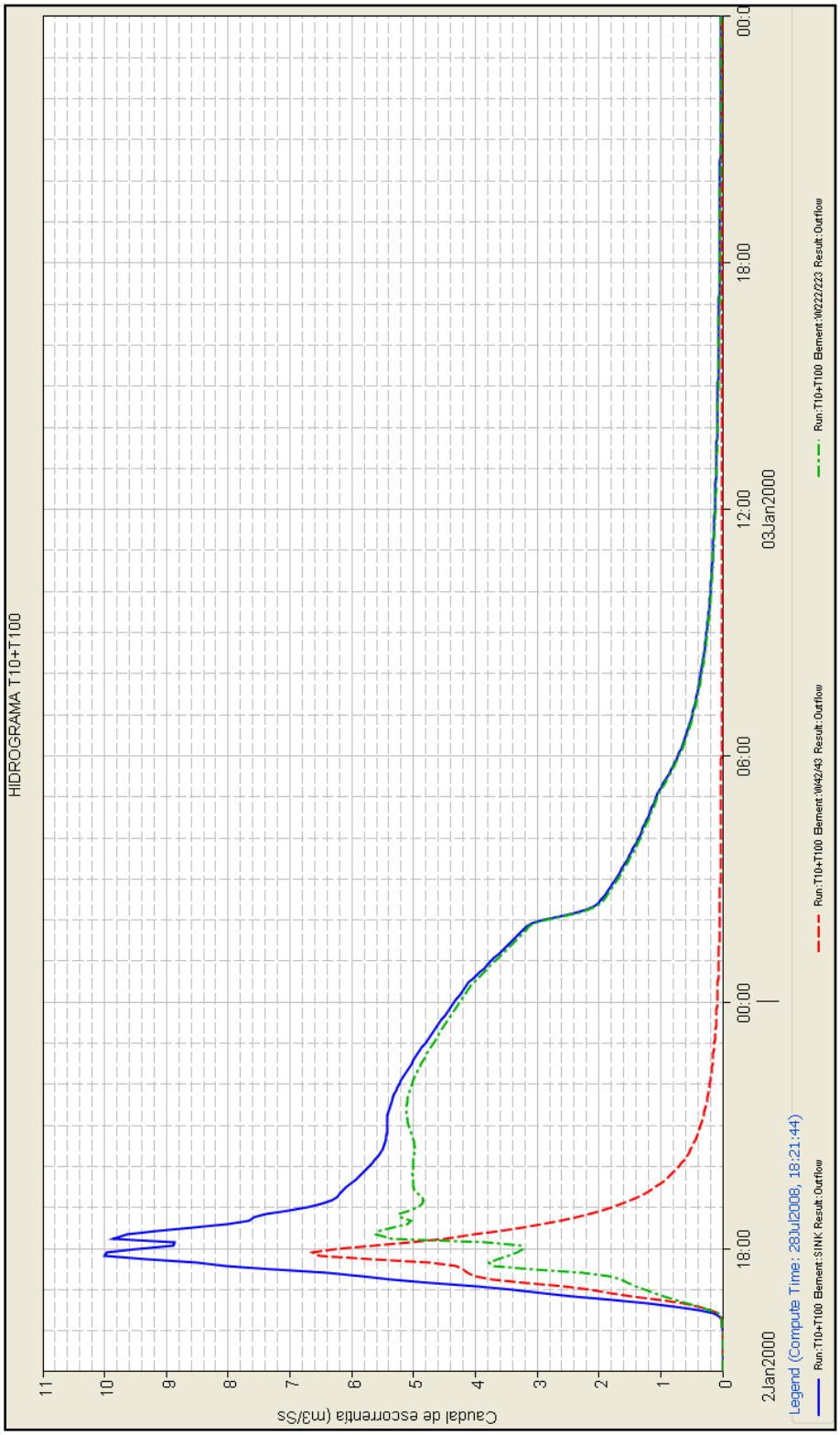

Figura 37:Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T100(24h)

OTROS HIDROGRAMAS DE LA CUENCA: ESCENARIO DE NO ENCOSTRAMIENTO.

HIETOGRAMA (T10+T200)/(24+24) horas

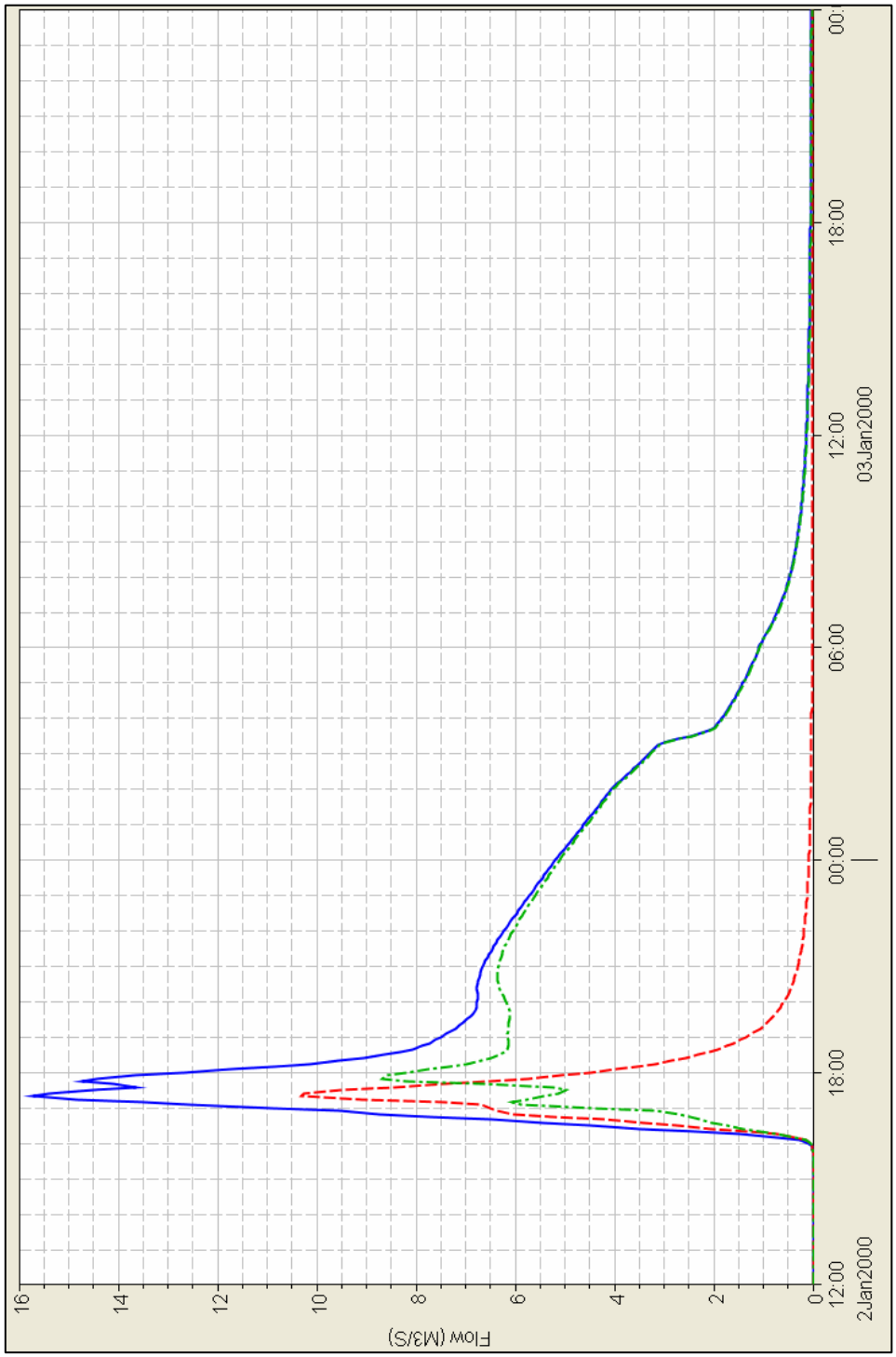

Figura 38: Otros hidrogramas: No encostramiento con hietograma T10 (24h) +T200(24h)