



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cuantificación de la infiltración durante una inundación en el tramo Castejón de Ebro – Zaragoza del río Ebro mediante simulación numérica.

Infiltration rate in the Castejón de Ebro – Zaragoza part of the Ebro river during a flood obtained by numerical simulation.

Autor

Alejandro Solano Campo

Directora

Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

Resumen

Las inundaciones constituyen uno de los riesgos medioambientales que con más frecuencia y severidad ocurre actualmente debido al cambio climático. Para ayudar en la prevención de las mismas y asesorar a los organismos públicos y privados en la elaboración de los planes de emergencia por inundaciones es necesario el uso de modelos de simulación precisos. Hasta ahora la simulación de inundaciones en ríos siempre se ha realizado sobre lecho impermeable, dejando abierta la cuestión de si la infiltración de agua en el suelo supone una cantidad relevante a tener en cuenta en este proceso. Para responder a esta cuestión, en este trabajo, se va a modelizar no sólo el comportamiento del flujo de agua sobre la superficie del terreno, sino que también se va a cuantificar la cantidad de agua infiltrada bajo el suelo, con el fin de conocer el volumen de agua que se transporta aguas abajo en un evento de avenida en un caso real en el que se dispone de medidas para poder calibrar los resultados numéricos. Por proximidad, y disponibilidad de medidas, se ha elegido como caso real de prueba un tramo del río Ebro que discurre entre Castejón de Ebro y Zaragoza. Con este objetivo, y bajo la hipótesis del modelo de aguas poco profundas que describe el movimiento del flujo de agua en un río, se ha usado un modelo de simulación 2D (Riverflow2D) que resuelve, mediante un método de volúmenes finitos de primer orden en tiempo y espacio, todas las variables del flujo en cada punto y en cada tiempo de simulación. Este programa además incorpora dos modelos de infiltración (Horton y Green - Ampt) que van a ser explorados. Se han analizado algunos eventos de avenida, con características diferentes en cuanto a duración de hidrograma y caudal máximo alcanzado, sucedidos en los años 2003, 2008, 2013, 2015 y 2018. A la vista de los resultados numéricos obtenidos, podemos afirmar que la infiltración es un proceso relevante a tener en cuenta en la simulación de inundaciones. Las simulaciones realizadas con modelo de infiltración se ajustan mejor a las medidas observadas en las estaciones de aforo. Entre los dos modelos de infiltración explorados consideramos que el modelo de Green - Ampt es el más preciso; aunque en este caso en concreto las diferencias entre los dos modelos de infiltración son casi inapreciables.

Abstract

Floods are one of the most frequent and severe environmental risks currently occurring due to climate change. Accurate simulation models are needed to assist in the prevention of floods and to advise public and private companies in the preparation of flood emergency plans. Until now, flood simulation in rivers has always been carried out on waterproof bed, leaving open the question of whether the infiltration of water into the soil involves a significant amount to be taken into account in this process. In order to answer this question, in this work, not only the behavior of the water flow going over the soil will be modelled, but the quantity of infiltrated water will also be quantified. The volume of water that is transported downstream in a flood event will be known in a real case in which measures are available. Hence, numerical results are validated with observed data. The test chosen for that purpose is a reach of the Ebro River from Castejón de Ebro to Zaragoza. With this objective, and under the hypothesis of the shallow water model that describes the movement of the flow of water in a river, a 2D simulation software (Riverflow2D) has been used that solves, through a finite volume first order method all the flow variables at each point and in every simulation time. This program also incorporates two infiltration models (Horton and Green - Ampt) that are explored. Some past flood events have been analyzed, with different characteristics in terms of the duration of the hydrograph and maximum flow achieved, which occurred in the years 2003, 2008, 2013, 2015 and 2018. Looking at the numerical results obtained, we can say that infiltration is a relevant process to be considered in flood simulation. The simulations carried out with infiltration models are better suited to the measurements observed at the gauging stations. Between the two infiltration models explored, we consider that the Green - Ampt model is the most accurate; although in this case the differences between the two infiltration models are almost imperceptible.

Contenido

Índice de figuras	4
1. Introducción	7
2. Modelo de flujo de superficie libre 2D.....	11
3. Modelos de infiltración	14
3.1. Modelo de Horton.....	14
3.2. Modelo de Green – Ampt.....	16
4. Descripción del caso.....	19
4.1. Datos de partida.....	21
4.1.1. Hidrogramas de avenida	21
4.1.2. Modelo Digital del Terreno	22
4.1.3. Malla de cálculo.....	25
4.1.4. Condiciones iniciales	27
5. Resultados numéricos	28
Año 2008	29
6. Conclusiones y trabajo futuro	41
Bibliografía	43
Anexo I, Hidrogramas de avenida	45
2003.....	45
2008.....	46
2013.....	46
2015.....	47
2018.....	47
Anexo II, Resultados numéricos	49
Año 2003	49
Año 2013	57
Año 2015	65
Año 2018:	74
Anexo III, Preparación de datos en QGIS	84
Anexo IV, RiverFlow2D	92
Anexo V, Paraview.....	96

Índice de figuras

Figura 1: Vista aérea de la inundación del Ebro en el año 2015 a su paso por Zaragoza.	8
Figura 2: Vista aérea de la inundación del Ebro en el año 2015 en la zona de meandros antes de llegar a Zaragoza.	8
Figura 3. Parámetros del modelo de Green Ampt. (Philip B. Bedient, 2008)	17
Figura 4. Localización de la cuenca del Ebro. (CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2019)	19
Figura 5. Mapa de la cuenca del Ebro. (CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2019).....	19
Figura 6. Hidrograma de la avenida del 2013 en Castejón de Ebro.	22
Figura 7. Vista 2D del modelo digital de terreno del tramo Castejón – Zaragoza.	23
Figura 8. Vista 3D del MDT del tramo Castejón - Zaragoza. Cotas “z” en metros.	23
Figura 9. Detalle del MDT del tramo Castejón – Zaragoza en tres poblaciones de interés: Tudela, Novillas, Alagón.	24
Figura 10. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el caso 1.	26
Figura 11. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el caso 0.	26
Figura 12. Hidrograma de avenida del 2008.	29
Figura 13. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2008.....	29
Figura 14. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2008.....	30
Figura 15. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2008.....	31
Figura 16. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2008.	31
Figura 17. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2008.....	32
Figura 18. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2008.....	33
Figura 19. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo lecho impermeable.	34
Figura 20. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo el modelo de Horton.	35
Figura 21. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo el modelo de Green - Ampt.....	36
Figura 22. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso de lecho impermeable.	37
Figura 23. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso del modelo de Horton.	38
Figura 24. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso del modelo de Green – Ampt.	38
Figura 25. Mapa de vectores de velocidad junto a valores del módulo de la velocidad en la avenida de 2008.	39
Figura 26. Detalle de la representación vectorial de la velocidad en la avenida de 2008.	40
Figura 27. Hidrograma de avenida del 2003.	45
Figura 28. Hidrograma de avenida del 2008.	46
Figura 29. Hidrograma de avenida del 2013.	46
Figura 30. Hidrograma de avenida del 2015.	47
Figura 31. Hidrograma de avenida del 2018.	47
Figura 32. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2003.....	50
Figura 33. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2003.....	50
Figura 34. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2003.....	51
Figura 35. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2003.	51

Figura 36. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2003.....	52
Figura 37. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2003.....	52
Figura 38. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo lecho impermeable.	53
Figura 39. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo el modelo de Horton.	54
Figura 40. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo el modelo de Green – Ampt.....	55
Figura 41. Vista 3D de la huella de máxima inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso de lecho impermeable.	55
Figura 42. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso del modelo de Horton.	56
Figura 43. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso del modelo de Green - Ampt.....	56
Figura 44. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2013.....	57
Figura 45. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2013.....	57
Figura 46. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2013.	58
Figura 47. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2013.	58
Figura 48. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2013.....	59
Figura 49. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2013.....	59
Figura 50. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo lecho impermeable.	61
Figura 51. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo el modelo de Horton.	62
Figura 52. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo el modelo de Green - Ampt.....	63
Figura 53. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso de lecho impermeable.	64
Figura 54. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso del modelo de Horton.	65
Figura 55. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso del modelo de Green – Ampt.	65
Figura 56. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2015.....	66
Figura 57. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2015.....	66
Figura 58. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2015.	67
Figura 59. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2015.	67
Figura 60. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2015.....	68
Figura 61. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2015.....	68
Figura 62. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo lecho impermeable.	70
Figura 63. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo el modelo de Horton.	71
Figura 64. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo el modelo de Green - Ampt.....	72
Figura 65. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso de lecho impermeable.	73
Figura 66. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso del modelo de Horton.	74

Figura 67. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso del modelo de Green – Ampt.	74
Figura 68. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2018.	75
Figura 69. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2018.	75
Figura 70. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2018.	76
Figura 71. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2018.	76
Figura 72. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2018.	77
Figura 73. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2018.	77
Figura 74. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo lecho impermeable.	79
Figura 75. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo el modelo de Horton.	80
Figura 76. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo el modelo de Green - Ampt.	81
Figura 77. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso de lecho impermeable.	82
Figura 78. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso del modelo de Horton.	83
Figura 79. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso del modelo de Green – Ampt.	83
Figura 80. Diagrama de flujo, secuenciación de trabajo.	84
Figura 81. MDT con renderizador en escala de grises.	85
Figura 82. MDT con renderizador en unibanda pseudocolor.	85
Figura 83. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el cálculo.	86
Figura 84. Línea de refinamiento de la malla en el centro del cauce.	87
Figura 85. Polígono que contiene a las celdas donde se imponen las condiciones de contorno de entrada (azul).	88
Figura 86. Ejemplo del fichero de datos de la condición de contorno a imponer (hidrograma) en las celdas de entrada.	89
Figura 87. Localización de las secciones transversales y puntos de observación en el tramo estudiado.	90
Figura 88. Ejemplo del fichero de introducción de parámetros en los modelos de infiltración.	91
Figura 89. Árbol de capas del programa QGIS en el pre-procesado de datos.	91
Figura 90. Ventana de control RiverFlow2D.	92
Figura 91. Aspecto del subapartado infiltración.	94
Figura 92. Aspecto del subapartado Opciones de Salida Gráfica.	95
Figura 93. Coordenadas de los puntos que delimitan las secciones transversales definidas en QGIS.	95
Figura 94. Coordenadas de los puntos de observación definidos en QGIS.	95

1. Introducción

Desde el principio de los tiempos los ríos han sido impulsores fundamentales del desarrollo de la vida tanto para la especie humana como para el resto de los seres vivos. En lo que concierne a la especie humana, tal ha sido la importancia de estos fenómenos naturales que desde el origen de los tiempos hasta nuestros días muchas poblaciones se encuentran situadas junto a los ríos, pudiendo estar en otra ubicación bien alejada de estos. Este hecho es debido a la riqueza natural que proporciona un río, así como las múltiples funciones y usos derivados que se pueden desarrollar gracias a este.

Igual que los ríos presentan un sinfín de ventajas o situaciones positivas para la población y el desarrollo de sus actividades, estos también presentan la otra cara de la moneda, las avenidas o crecidas.

Las avenidas o crecidas son fenómenos naturales que se dan en los ríos, arroyos, riachuelos o barrancos entre otros, provocando un aumento del caudal sobre el nivel medio circulante por el cauce. Dependiendo de la magnitud de dicha avenida o riada se puede producir el desbordamiento del río si el lecho resulta insuficiente para abarcar el volumen de agua circulante por este en un instante determinado.

Dependiendo de la severidad de las avenidas o crecidas, pueden desarrollarse una serie de consecuencias fatales para la población, desde la anegación de las tierras de cultivo u otras cercanas al cauce del río, hasta la inundación de núcleos urbanos, industrias o infraestructuras que se organizan entorno al río, pudiendo causar en el peor de los casos la muerte de personas. Según la NASA (Phillips, 2015), en la escala de las catástrofes naturales, las avenidas o crecidas se encuentran entre las peores junto con los terremotos, los huracanes y los tsunamis.

Estas avenidas o crecidas pueden causar también graves perjuicios económicos, sociales o medioambientales. Como ejemplo de perjuicio económico podemos encontrar diversas situaciones, entre las que figuran la reparación, desinfección, limpieza o rehabilitación de las zonas o infraestructuras anegadas o destruidas por el agua. En el ámbito social encontramos a modo de ejemplo entre otros muchos, un hecho que nos sacudió a todos los zaragozanos en el año 2015 como fue la suspensión de los actos de la fiesta popular "*La cincomarzada*" debido a una crecida del río Ebro que supuso una situación de inseguridad para la población zaragozana. En lo que se refiere al ámbito medioambiental, conocidas son las terroríficas consecuencias de las avenidas o riadas causando modificaciones o alteraciones de los parajes naturales.

Ejemplo de ello fue una de las mayores avenidas que se recuerdan del río Ebro, la del año 2003, en la que tal y como relatan los medios de información de dicha fecha, alrededor de 1500 vecinos de las localidades que transcurren cerca del río (Novillas, Gallur, Pradilla, Boquiñeni, Alcalá de Ebro y Cabañas) sufrieron la alerta de máximo riesgo por inundaciones, teniendo que ser desalojados de sus domicilios. En dicha

avenida, el río Ebro a la altura de la localidad de Zaragoza alcanzó una cota de 5,73 metros siendo la cota media de 1,5 metros aproximadamente.

A principios de abril de 2007 otra gran riada del Ebro causó grandes daños materiales y monetarios, ya que más de 11000 hectáreas de cultivos resultaron afectadas y las pérdidas fueron de más de 40 millones de euros. En aquel entonces las localidades de Novillas (aguas arriba de Zaragoza) y Pina de Ebro (aguas abajo de Zaragoza) fueron las más afectadas (Marco, 2018).



Figura 1: Vista aérea de la inundación del Ebro en el año 2015 a su paso por Zaragoza.



Figura 2: Vista aérea de la inundación del Ebro en el año 2015 en la zona de meandros antes de llegar a Zaragoza.

En la actualidad existen diversos métodos que nos ayudan a predecir el alcance de las avenidas.

Una de estas herramientas es el conocido como Sistema de Monitorización Global de Inundaciones (Global Flood Monitoring System o GFMS) (GFMS, 2019), que confecciona mapas de inundaciones en todo el mundo. Es una herramienta que se encuentra disponible en línea y cualquier tipo de usuario tiene acceso a ella ya que trabaja 24 horas al día y 7 días a la semana. Esta herramienta permite mediante un mapa interactivo global visualizar la cantidad de agua que hay en una zona determinada, considerando si se trata de una inundación o no. También permite buscar en áreas cercanas a la zona deseada para ver si hay lluvias aguas arriba, si las lluvias han cesado o para visualizar cómo está evolucionando el río aguas abajo.

Otro ejemplo de estas herramientas de predicción es el modelo matemático que fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Castilla – La Mancha, que permite predecir las crecidas del río Ebro en Zaragoza, a partir del flujo de agua registrado en Castejón (Navarra, aguas arriba). Sus impulsores aseguran que proporciona una predicción a 20 horas vista y que el sistema acierta en el 97,5% de los casos (Pedregal, 2019). El funcionamiento de esta herramienta se basa en el desarrollo de una función matemática de “transferencia” para dimensionar el modelo y calcular aproximadamente el retardo con el que el agua de Castejón afecta al nivel del agua en Zaragoza. Como uno de los propios profesores de dicha universidad apunta *“La dinámica del río no se comporta de forma lineal”* D. Diego Pedregal. Dicho profesor también señala que las tormentas no afectan igual a un lecho seco, que a uno húmedo; hecho que quiere comprobarse con este trabajo.

La mayoría de estas herramientas utilizadas para la prevención y el estudio de avenidas descuidan algunos fenómenos como puede ser el de la infiltración de agua, entre otros. La infiltración se entiende por el proceso mediante el cual el agua que transcurre por el lecho del río “entra” en el subsuelo, desapareciendo así del lecho del río y acumulándose en el interior de la tierra.

La modelización de la infiltración se puede llevar a cabo de diferentes formas (Fernández-Pato, Caviedes-Voullième, & García-Navarro, 2016). Si se pone el punto de mira en el sub - suelo se puede usar la ecuación de Richards (Richards, 1931) en la que se tiene en cuenta el intercambio de agua entre la superficie y el sub - suelo. Por otro lado, si el punto de mira se pone en la superficie, la infiltración participa como una pérdida de volumen de agua respecto a la que circula por la superficie, que a su vez puede ser formulada usando leyes empíricas. En este trabajo nos vamos a centrar en este último punto de vista. Los métodos de infiltración más usados en Hidrología son: el SCS o también llamado número de curva (USDA, 1986), Philip (Philip, 1969), Horton (Horton, 1933) y Green - Ampt (Green & Ampt, 1911). El primero de ellos (SCS) es una aproximación empírica que usa una función matemática cuya evolución temporal coincide con las características observadas de la tasa de infiltración. Este modelo ha demostrado ser inadecuado en procesos de lluvia/escorrentía en cuencas reales (Caviedes-Voullième, García-Navarro, & Murillo, 2012). El segundo modelo (Philip) se

basa en la solución de una serie de potencias truncada desarrollada por el autor. Este modelo contiene dos términos y es útil en los primeros instantes de tiempo cuando se produce la infiltración, pero no en tiempos largos que es lo que ocurre cuando se tiene una avenida. Por ello nos vamos a centrar en los dos últimos modelos de infiltración. Ambas aproximaciones necesitan parámetros de caracterización del suelo, los cuales se obtienen tras una buena calibración (Van den Putte, y otros, 2013). La ventaja principal del modelo de Green – Ampt es que se apoya en una base física. El modelo original fue retomado y mejorado por Mein y Larson (Mein & Larson, 1973) que considera el tiempo que el suelo permanece mojado después de una lluvia estacionaria. Eventos de precipitación no estacionarios fueron considerados más adelante por Chu (Chu, 1978) para predecir la escorrentía superficial. Más adelante, el modelo de Green - Ampt fue usado con éxito en modelos hidrológicos sobre cuencas naturales (Esteves, Faucher, Galle, & Vauclin, 2000). Por otro lado, el modelo de Horton hace uso de parámetros deducidos empíricamente para caracterizar la infiltración en el suelo; por tanto, no están relacionados directamente con las características del suelo. Una revisión de los avances significativos de este modelo se puede encontrar en Migliaccio y Srivastav (Srivastava, Migliaccio, & Šimůnek, 2007).

El grupo de Hidráulica Computacional (www.ghc.unizar.es) del área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza en el que se enmarca este trabajo desarrolla tecnología propia hidro-informática para modelizar el movimiento del flujo de agua en procesos de avenida. En particular, se ha transferido a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) el modelo del tramo medio del río Ebro, desde Castejón de Ebro a Zaragoza para que puedan anticiparse a los eventos de avenida y poner en marcha los planes de emergencia de una forma más precisa a como se hacían hasta hace un par de años. El modelo de cálculo resuelve las ecuaciones de flujo de superficie libre de masa y cantidad de movimiento mediante una técnica de volúmenes finitos explícita de primer orden en tiempo y espacio; programado sobre GPU (unidad de procesamiento gráfico) para acelerar el cálculo y así poder realizar una predicción on-line. Con el fin de mejorar la precisión en el volumen de agua que llega tras una avenida a las poblaciones aguas abajo; se han programado e incorporado al modelo de flujo de agua superficial dos modelos de infiltración (Horton y Green - Ampt). En este trabajo se realizan simulaciones numéricas de diferentes avenidas ocurridas en el pasado bajo lecho impermeable y con infiltración (usando los dos métodos) para calibrar la importancia de este proceso, comparando los resultados numéricos con las huellas de inundación máxima observada en eventos de avenida, así como la evolución temporal de la cota del nivel superficial en diferentes poblaciones en las que se tienen estaciones de aforo de medida. También se cuantifica y compara el volumen de agua perdido por infiltración en cada uno de los casos.

2. Modelo de flujo de superficie libre 2D

El modelo adoptado para la realización del presente trabajo es el de aguas poco profundas (Brufau & García-Navarro, 2000; Chow, 1959; Henderson, 1966; Chanson, 2004). Dicho modelo se sustenta en las siguientes hipótesis fundamentales:

- La altura de agua es mucho menor que la longitud del tramo de cauce a estudiar.
- Las ondas que se producen en la superficie varían suavemente, lo que se traduce en que la distribución de presiones en la vertical es hidrostática o que la aceleración en la vertical es pequeña.
- Las pérdidas por fricción en flujo transitorio no difieren de las mismas pérdidas en flujo estacionario.
- La pendiente promedio del fondo del cauce es tan pequeña que la tangente se puede aproximar por el ángulo.

Dichas hipótesis son válidas en la mayor parte del dominio exceptuando regiones donde pueden no cumplirse como en los saltos hidráulicos. Este problema discreto se resuelve para estas regiones buscando una solución que satisfaga las leyes físicas en esa zona y que logre conectar con las zonas que si cumplen las hipótesis.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Ecuación 1.

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + c_f u \sqrt{u^2 + v^2} + h v_T \nabla^2 u$$

Ecuación 2.

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + c_f v \sqrt{u^2 + v^2} + h v_T \nabla^2 v$$

Ecuación 3.

Las variables que aparecen en las ecuaciones anteriores y que hay que resolver en cada punto del espacio y en cada tiempo son:

- h: Profundidad de agua.
- u: Componente del vector velocidad en la dirección "x".
- v: Componente del vector velocidad en la dirección "y".
- H: Suma de la profundidad de agua (h) y la cota de fondo (z_b) sobre un nivel referencia, $z = 0$.

Los términos $c_f u \sqrt{u^2 + v^2}$ y $c_f v \sqrt{u^2 + v^2}$ corresponden con el término de pérdida de energía por fricción en “x” y en “y” respectivamente, que en este trabajo se ha optado por modelizarlos mediante el coeficiente de rugosidad de Manning n (Chanson, 2004; Chow, 1959).

Los términos $h v_T \nabla^2 u$ y $h v_T \nabla^2 v$ corresponden con la viscosidad turbulenta del fluido en cada una de las dos direcciones coordenadas. En el presente trabajo los hemos despreciado debido a que se considera que el flujo es totalmente turbulento, se encuentra completamente desarrollado y ya están incluidos estos efectos en el coeficiente de rozamiento n .

El término que proviene de promediar en la vertical el gradiente de presión da lugar a los términos $g \frac{\partial H}{\partial x}$ y $g \frac{\partial H}{\partial y}$, que a su vez se pueden descomponer, sabiendo que: $H = h + z_b$.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} = g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

Ecuación 4.

$$g \frac{\partial H}{\partial y} = g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial z_b}{\partial y}$$

Ecuación 5.

Las variaciones de la cota del fondo del cauce en cada una de las direcciones coordenadas, o lo que es lo mismo, las pendientes se expresan en la forma:

$$S_{0x} = - \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

Ecuación 6.

$$S_{0y} = - \frac{\partial z_b}{\partial y}$$

Ecuación 7.

Los términos de fricción del agua con el fondo del cauce se representan mediante $S_f = (S_{fx}, S_{fy})$:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh * h^{4/3}}$$

Ecuación 8.

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh * h^{4/3}}$$

Ecuación 9.

La combinación de todos estos términos da lugar al siguiente sistema de ecuaciones, que es la forma más conocida de representación del modelo de aguas poco profundas 2D.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Ecuación 10.

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

Ecuación 11.

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

Ecuación 12.

3. Modelos de infiltración

La infiltración es un proceso por el cual el agua que discurre por la superficie del suelo penetra en él. Este proceso viene gobernado principalmente por dos fuerzas: la gravedad y la capilaridad.

Los factores más influyentes son las características del suelo como la capacidad de almacenaje, la facilidad de entrada o la tasa de transmisión por el suelo.

También resulta determinante la textura y la estructura del suelo, los tipos de vegetación (si la hubiera) y la temperatura del suelo. Estos factores se pueden observar en los distintos tipos de suelo, ya que, si por ejemplo el suelo es de arenas gruesas (se cuenta con “un gran espacio” entre cada partícula de arena, gran porosidad) se ve favorecida una infiltración más rápida que en un suelo arcilloso, ya que el suelo es mucho más compacto (menos espacio entre las partículas, baja porosidad) y favorece que la infiltración sea más lenta e infiltre un menor volumen de agua.

Como se ha comentado en el párrafo anterior, la vegetación también influye en la infiltración ya que ésta favorece la creación de más poros en el suelo y por tanto una mayor tasa de infiltración. La acción de las raíces sobre la tierra también resulta determinante, ya que, en ciertas ocasiones crean grietas o agujeros en el suelo, favoreciendo también la infiltración. A esto se debe que las áreas arboladas cuenten con las tasas de infiltración más elevadas de todos los tipos de vegetación.

De igual forma que la vegetación puede favorecer al proceso de infiltración, también lo puede perjudicar; ya que si sobre el suelo se encuentra una capa de hojas o restos de plantas secas entre otras, se puede producir una saturación u obstrucción del suelo, impidiendo así la infiltración.

En la introducción ya se avanzó que existen varios modelos de infiltración, pero en este trabajo nos vamos a centrar en dos de ellos, que son los que consideramos más adecuados para representar fenómenos de infiltración en cuencas cuando se producen avenidas, y que vamos a detallar a continuación.

3.1. Modelo de Horton

El modelo de infiltración de Horton (Horton, 1933) proporciona una ecuación exponencial para aproximar la capacidad máxima de infiltración del suelo, f_p (m/s) (Fernández Pato, 2016)

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

Ecuación 13.

Los parámetros f_0 y f_c son las capacidades de infiltración inicial y final respectivamente, ambas medidas en m/s ; y el parámetro k es la tasa de disminución de la capacidad de infiltración en $1/s$. Dichos parámetros no poseen una base física sustentada, sino que se determinan mediante experimentos. Se pueden encontrar valores de estos parámetros en (RF2D_QGIS_Tutoriales, 2018). La experiencia de estos procesos indica que si no existe una correlación entre el tipo de suelo deseado y las aproximaciones que proporciona k a los distintos tipos de suelo, debe tomarse un valor de $k = 4.14 \text{ hr}^{-1} = 1.15 * 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

La ecuación 13 supone un aporte ilimitado de agua desde la superficie; lo cual significa que partimos de la suposición de que siempre hay agua por encima. Si suponemos una precipitación (R) que comienza de forma débil ($R < f_p$), toda ella se va infiltrando en el suelo y la tasa de infiltración (f_p) es la propia lluvia. Cuando la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo (f_p), la zona se encontraría saturada del agua de lluvia anterior y el modelo de Horton empieza a ponerse en marcha.

La infiltración acumulada F se calcula integrando la capacidad de infiltración f_p como:

$$F = \int_0^t f_p(t)dt = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt})$$

Ecuación 14.

Una vez que la intensidad de lluvia ha excedido la capacidad de infiltración del suelo se debe calcular el tiempo de saturación t_p resolviendo la siguiente ecuación mediante un proceso iterativo como el método de *Newton - Raphson*:

$$F = \int_0^{t_p} f_p(t)dt = f_c t_p + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt_p})$$

Ecuación 15.

Ahora la capacidad de infiltración no solo es función del tiempo, ya que también depende el agua que ya se ha infiltrado en el suelo, lo que requiere calcular otra vez la capacidad de infiltración del suelo f_p .

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt_p}$$

Ecuación 16.

Por último, debe establecerse un límite en el recálculo de la capacidad de infiltración, ya que, es posible que la capacidad de infiltración recalculada sea mayor que la intensidad de la lluvia, lo que conduciría a una incongruencia física. Esto obliga a imponer un límite.

$$f_p \leq R$$

Ecuación 17.

3.2. Modelo de Green – Ampt

El modelo de infiltración de Green – Ampt (Philip B. Bedient, 2008) es un modelo simple con una base teórica sustentada en la ley de Darcy, lo que se traduce en que no es estrictamente empírico. Sus parámetros tienen un significado físico que puede relacionarse con los distintos parámetros del suelo. La gravedad y la fricción son las únicas fuerzas presentes en un flujo saturado, sin embargo para un flujo no saturado debe incluirse una fuerza extra, la de succión.

La ecuación de Richards para el flujo no saturado en medios porosos aplica la ecuación de continuidad a la ley de Darcy para tener en cuenta la presencia de una fase gaseosa en el subsuelo (Philip B. Bedient, 2008). La ecuación de Richards toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \Psi(\theta)}{\partial z} \right]$$

Ecuación 18.

Donde:

- θ : Contenido volumétrico de humedad (cm^3/cm^3).
- z : Distancia por debajo de la superficie (cm).
- $\Psi(\theta)$: Posición del frente mojado de succión por capilaridad (cm).
- $K(\theta)$: Conductividad hidráulica (cm/s).

Cabe destacar que la altura de agua sobre el lecho del río (h) se puede expresar en función de la posición del frente mojado de succión por capilaridad y la distancia por debajo de la superficie mediante la fórmula:

$$h = \Psi + z$$

Ecuación 19.

El modelo de infiltración de Green – Ampt trabaja bajo cinco suposiciones principales, que son:

- El suelo considerado es homogéneo y estable, lo que implica que los macroporos y las rutas de migración preferentes no deben considerarse.
- El suministro de agua estancada en la superficie no está limitado.
- Existe un frente de humedecimiento distinto y definible con precisión, y a medida que el agua continúa infiltrándose, el frente de humedecimiento avanza al mismo ritmo con la profundidad.
- La succión capilar justo debajo del frente de mojado es uniforme en todo el perfil y constante en el tiempo durante el evento de infiltración.
- El suelo está saturado uniformemente sobre el frente de humedecimiento, y los contenidos volumétricos de agua permanecen constantes por encima y por debajo del frente de humedecimiento que avanza.

En el frente de humedecimiento, el promedio de la succión capilar se utiliza para representar la curva característica.

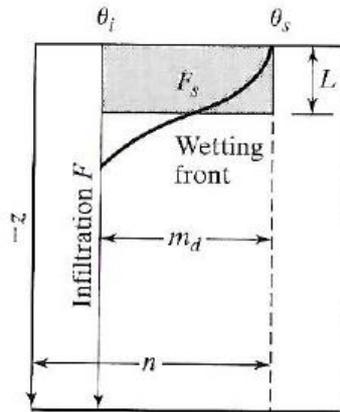


Figura 3. Parámetros del modelo de Green Ampt. (Philip B. Bedient, 2008)

El área sobre el perfil de humedad es la cantidad de infiltración hasta la saturación de la superficie F y está representada por el área sombreada de profundidad L . Así $F = (\theta_s - \theta_i)L = M_d L$, donde θ_i es el contenido inicial de humedad, θ_s es el contenido de humedad saturada y $M_d = \theta_s - \theta_i$ es el déficit inicial de humedad.

La conductividad hidráulica puede ser sustituida en la ley de Darcy:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z}$$

Ecuación 20.

Donde:

- q : Velocidad de infiltración de Darcy (cm/s).
- z : Profundidad debajo de la superficie (cm).
- h : Altura de agua, $\Psi + z$ (cm).
- $\Psi(\theta)$: Succión ($-cm$).
- $K(\theta)$: Conductividad hidráulica (cm/s).
- θ : Contenido volumétrico de humedad.

La ecuación 20 se aplica como una aproximación a las condiciones saturadas entre la superficie del suelo y el frente de humedecimiento.

$$q = -f = -K \frac{\partial h}{\partial z} = -K \frac{\Delta h}{\Delta z} = -K_s \frac{(h_{superficie} - h_{frente mojado})}{(z_{superficie} - z_{frente mojado})}$$

Ecuación 21.

En la que se supone que la velocidad de Darcy en la superficie del suelo es igual a la tasa de infiltración descendente, $-f$.

La profundidad del frente de humedecimiento es L . Por lo tanto, con la coordenada z positiva hacia arriba, $z_{frente\ mojado} = -L$. Usando el promedio de succión capilar en el frente de humedecimiento, tenemos:

$$h_{frente\ mojado} = z + \Psi = -L + \Psi$$

Ecuación 22.

Con $h = 0$ en la superficie:

$$f = K_s \left(1 - \frac{\Psi}{L} \right)$$

Ecuación 23.

El volumen de infiltración hasta la profundidad L está dado por:

$$F = L(\theta_s - \theta_i) = LM_d$$

Ecuación 24.

Sustituyendo L en la ecuación 23 obtenemos la forma original del modelo de infiltración de Green – Ampt.

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

Ecuación 25.

4. Descripción del caso

La cuenca del Ebro está situada en el Nor-Este de la Península Ibérica, ocupando una superficie total de 85660 Km^2 y siendo así la cuenca hidrográfica más extensa de España. Los límites naturales de esta cuenca son por el Norte los montes Cantábricos y los Pirineos, por el Sur-Este el Sistema Ibérico y por el Este la cadena montañosa Costero-Catalana.

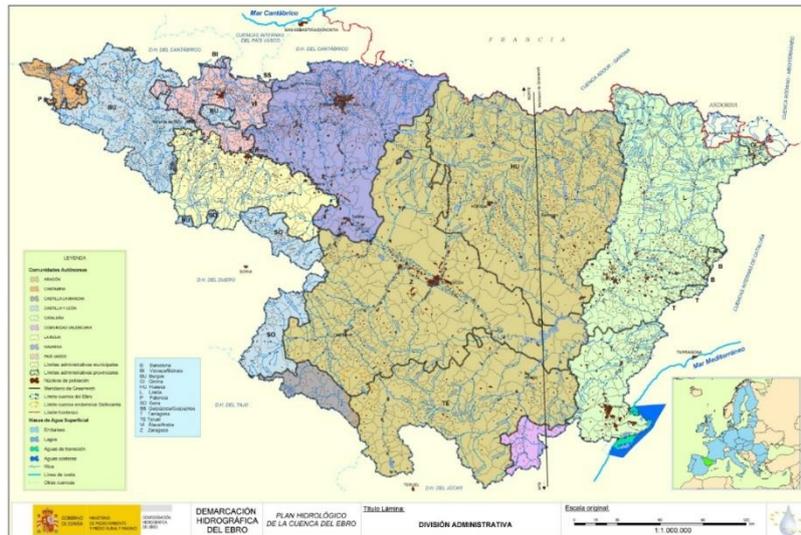


Figura 4. Localización de la cuenca del Ebro. (CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2019)

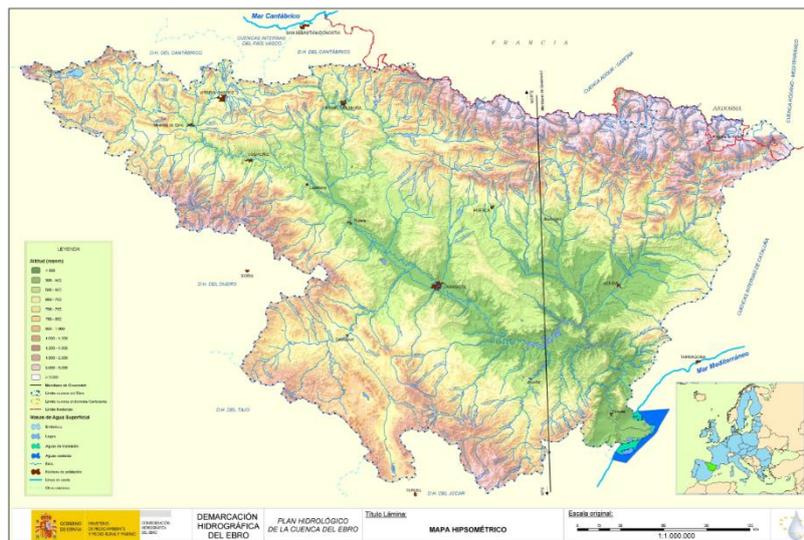


Figura 5. Mapa de la cuenca del Ebro. (CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2019)

El río Ebro, en el cual se enmarca el presente trabajo, transcurre desde las montañas Cantábricas (Nor-Este) hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo (Sur-Este) con una longitud total de 930 *Km*. Este se divide según su localización en tres cursos principales, el alto, el medio y el bajo. (CHE, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2004)

El material de análisis seleccionado para este trabajo coincide con un tramo del río Ebro a su paso por el curso medio (desde Haro hasta Mequinenza, atravesando tierras de La Rioja, Euskadi, Navarra y Aragón), concretamente desde la población navarra de Castejón hasta Zaragoza, capital aragonesa. A su paso por el curso medio, el río Ebro incrementa progresivamente el caudal respecto al curso alto, debido a las aportaciones de numerosos afluentes que le aportan agua por ambos márgenes, el Sur y el Norte. La distancia en línea recta entre Haro y Mequinenza es de 300 *Km*, mientras que la longitud total del cauce en este tramo es de 565 *Km*. Este dato da una idea de la sinuosidad del curso fluvial debido a una bajísima pendiente media del 0,66 por mil.

El valle en el cual se enmarca el citado curso medio no es homogéneo, sino que se adapta a los materiales geológicos que constituyen la Depresión. Tanto en La Rioja Alta como en el Bajo Aragón, sectores superior e inferior del Ebro Medio, valle y cauce se encajan en formaciones de borde de cuenca con predominio de areniscas. Por el contrario, entre Logroño y La Zaida, a lo largo de todo el sector central de la Depresión, los materiales más blandos (margas, arcillas, yesos) han propiciado el ensanchamiento de la llanura aluvial del Ebro, describiendo así un menor cauce libre pero incrementando a la vez la llanura de inundación.

En el tramo que resulta de interés para el trabajo, el río describe meandros muy pronunciados y encajados en el sustrato margo-arenoso, con escarpes que superan los 50 m en algunas márgenes, dando lugar a unas condiciones idóneas para ubicar encima de estos huertas. Los meandros destacan por su elevada amplitud de onda y por el predominio de vértices muy pronunciados de diseño irregular.

Las características generales de la zona de meandros del Ebro medio son las siguientes:

- Encontramos a lo largo de todo el tramo una extensa llanura inundable cuya anchura media es de 3,2 km, llegando a alcanzar puntualmente los 6 km, sobre la que el río se desborda en períodos de crecida.
- Se registran cambios del trazado en el cauce, bien bruscos (producidos en crecidas) o bien progresivos (erosión de márgenes).
- Se realizan obras de defensa que tratan de impedir el desbordamiento del río o la erosión de sus orillas.
- La mayor parte de los núcleos de población no se asientan en la orilla del cauce menor sino en el límite de la llanura de inundación, sobre terrazas altas o conos de deyección de barrancos afluentes. Sin embargo, unas 150.000 personas habitan dentro del terreno inundable. (Ollero, 1996)

Analizando el tramo que resulta de interés para el marco del trabajo, entre Castejón y Zaragoza, el Ebro no recibe aportes importantes (Queiles, Huecha, Arba y Jalón apenas contribuyen en conjunto con $30 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras se derivan considerables volúmenes a diversos canales utilizados para el riego de las parcelas colindantes a estos (canales de Tauste $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ e Imperial de Aragón $23 \text{ m}^3/\text{s}$). Como consecuencia de esta diferencia entre el aporte y las derivaciones, en Zaragoza el caudal medio anual es más bajo que el de Castejón, $266,76 \text{ m}^3/\text{s}$ y $270,49 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. (Ollero, 1996).

La longitud del Ebro entre Castejón y Zaragoza es de aproximadamente 160 km (Visor SigPac V 3.5, 2019), frente a los 565 km totales que tiene el tramo medio entero (Haro - Mequinenza).

4.1. Datos de partida

Para poder realizar una simulación numérica de una avenida en un tramo de cauce del río Ebro necesitamos conocer unos datos de partida: los hidrogramas de avenida (condiciones de contorno aguas arriba del modelo), el modelo digital de terreno (MDT, mapa de elevaciones que definen la superficie del suelo sobre la cual transcurre el flujo de agua), malla de cálculo (discretización del dominio de cálculo en celdas en las que se calcularán las variables del flujo) y las condiciones iniciales (estado en el que se encuentra el flujo de agua en $t=0s$).

4.1.1. Hidrogramas de avenida

En este trabajo se van a simular las avenidas más significativas desde el año 2000 hasta nuestros días, el año 2019. En concreto, las de los años 2003, 2008, 2013, 2015 y 2018. Para poder simular una avenida necesitamos conocer la evolución temporal del caudal durante un episodio en un punto, también llamado hidrograma. Este dato se recoge en las estaciones de aforo de control que posee la CHE y que cede a la Universidad de Zaragoza para realizar investigaciones. En particular se va a usar la de Castejón de Ebro, y en el modelo se implementa como condición de contorno aguas arriba. A modo de ejemplo se presenta el hidrograma recogido en Castejón para la avenida del año 2013. En el anexo I se pueden encontrar los datos de todas las avenidas simuladas en este trabajo.



Figura 6. Hidrograma de la avenida del 2013 en Castejón de Ebro.

En la gráfica puede observarse cómo el río en $t=0s$ transportaba un caudal inicial de unos $200 \text{ m}^3/s$, en $t=50h$ alcanzó un caudal de $1600 \text{ m}^3/s$ que podría catalogarse como una avenida. Este valor se mantuvo en el tiempo durante unas $60h$ para posteriormente verse incrementado hasta los $2200 \text{ m}^3/s$ en $t=150h$ cuando se alcanzó el pico máximo de la avenida. Después de este máximo, los valores de caudal volvieron a descender hasta alcanzar un valor de unos $700 \text{ m}^3/s$. El modelo de simulación lo que hace es resolver en cada instante de tiempo y posición cómo va evolucionando este frente de onda por el modelo de terreno que se encuentra, debido a la gravedad y a la fricción que va encontrando a su paso.

4.1.2. Modelo Digital del Terreno

El segundo dato de partida básico es el modelo digital de terreno (MDT, dominio en el cual se van a realizar las simulaciones). Como se ha comentado con anterioridad, el dominio a calcular transcurre desde Castejón de Ebro a Zaragoza. Los datos del modelo de elevaciones del terreno se obtienen del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en formato .TIF. Existen varias resoluciones para estos mapas. Se ha elegido la más fina que corresponde a $5m \times 5m$. Esto significa que dentro de nuestro dominio a calcular tenemos un dato de elevación de terreno cada $5m$ en las dos direcciones espaciales.

En el portal informático del IGN aparece un apartado denominado *centro de descargas* en el cual se pueden descargar diversos tipos de modelos, en el presente trabajo únicamente resulta de interés la opción *Modelos Digitales de Elevaciones* que es lo mismo que *Modelo Digital del Terreno (MDT)*.

Para elaborar el MDT del caso que nos ocupa simplemente se han seleccionado las zonas que incluyen el tramo del río Ebro a modelizar, las cuales se han unido en un único MDT, obteniendo así el resultado mostrado en la imagen siguiente (Figura 7).

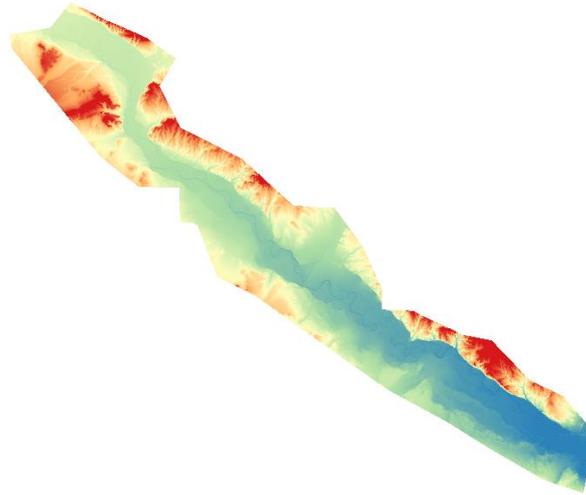


Figura 7. Vista 2D del modelo digital de terreno del tramo Castejón - Zaragoza.

La misma imagen la podemos visualizar también en 3D (Figura 8) para ver mejor el relieve del fondo del terreno. Con la escala de colores observamos que el rojo se encuentra destinado a zonas altas mientras que la gama de los azules representa las cotas más bajas del terreno que corresponden a la zona por donde se encuentra el cauce del río. En la Figura 8 también se muestra la localización de algunas poblaciones que cuentan con medidas del tramo que se ha elegido.

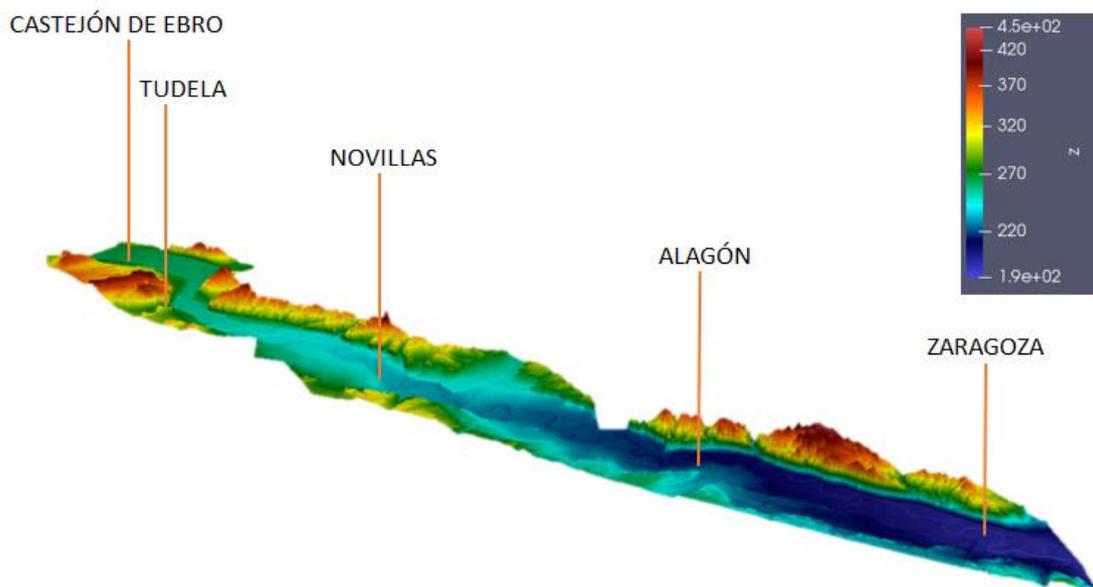


Figura 8. Vista 3D del MDT del tramo Castejón - Zaragoza. Cotitas "z" en metros.

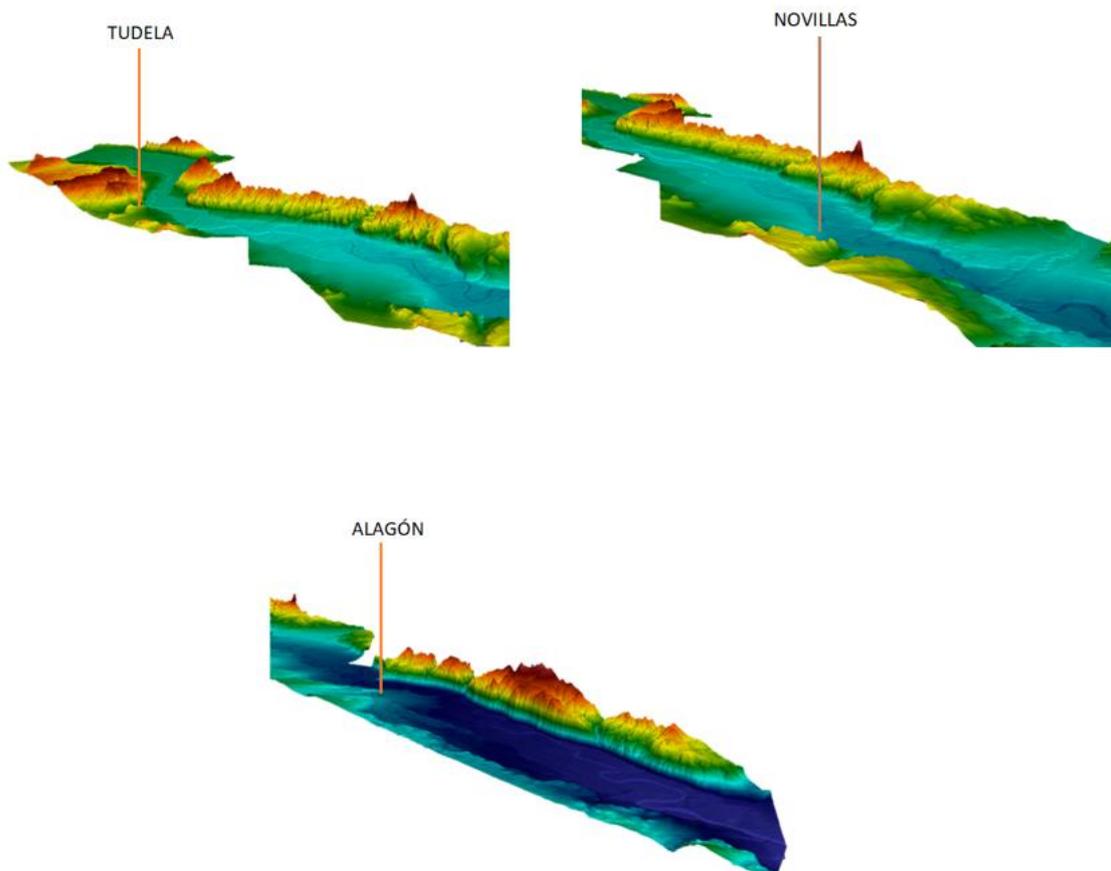


Figura 9. Detalle del MDT del tramo Castejón – Zaragoza en tres poblaciones de interés: Tudela, Novillas, Alagón.

Con el objetivo de comparar los resultados numéricos de evolución temporal de la cota de la superficie libre en algunos puntos y compararla con las medidas tomadas en las estaciones de aforo disponibles, se han creado en el modelo de simulación secciones transversales y puntos de observación en las localidades de Tudela, Novillas y Alagón. El MDT que rodea a estas poblaciones se detalla en la Figura 9.

Las secciones transversales proporcionan información acerca del caudal de flujo que atraviesa estas secciones en cada instante de tiempo. Los puntos de observación proporcionan información sobre las variables del flujo en ese punto en cada instante de tiempo:

- Componentes de la velocidad en el eje “x” (u) y en el eje “y” (v)
- Módulo de la velocidad
- Profundidad del agua (h)
- Cota de la superficie libre ($h + z_b$)
- Cota del fondo del terreno (z_b)
- Número de Froude: parámetro adimensional que compara la velocidad del flujo con la velocidad de pequeñas perturbaciones en la superficie del agua.

4.1.3. Malla de cálculo

El tercer dato de partida que necesitamos para poder realizar los cálculos es la malla. Sobre el MDT necesitamos calcular las variables de flujo y para ello resolver las ecuaciones del modelo de aguas poco profundas. Esto requiere de una discretización en volúmenes finitos; es decir dividir el dominio de cálculo en celdas. El conjunto de celdas es lo que llamamos malla de cálculo. Se pueden elegir mallas cuadradas, triangulares, estructuradas, no estructuradas, etc. En nuestro caso se ha usado el mallador GMSH incluido en el paquete QGIS (Anexo III) que genera mallas triangulares no estructuradas. Estas mallas han demostrado ser las mejores en el caso de la simulación de flujo de avenidas ya que no presentan una dirección privilegiada de avance del flujo.

En el trabajo que nos ocupa como se ha venido comentando con anterioridad se van a realizar dos tipos de simulaciones, la primera de ellas sobre lecho impermeable sin ningún parámetro de infiltración (caso 0) y la segunda teniendo en cuenta el proceso de infiltración (caso 1). En ambos casos los mallados están formados sobre el mismo MDT (dominio) y refinados en el cauce del río (dotado de un mayor número de celdas en la zona por la que discurre el agua en su trayecto natural) para obtener una mayor precisión, ya que, cuanto menor sea el tamaño de las celdas (mayor número de celdas habrá) mayor será la precisión en los cálculos. La única salvedad entre los mallados del caso 0 y del caso 1 son el número de nodos y el número de celdas, ya que la malla utilizada para el caso 1 es levemente más fina que la utilizada en el caso 0. Esto se ha determinado así ya que para el contexto del trabajo resulta de mayor interés obtener una precisión mayor en el caso 1 que en el caso 0, para resolver bien la infiltración.

El hecho de realizar un refinamiento sólo en el cauce del río se debe al tiempo de cálculo requerido, ya que, el grado de refinamiento y el tiempo de cálculo son directamente proporcionales y si hubiéramos dotado a todo el dominio de un mallado extremadamente fino, la simulación se alargaría durante horas y horas. La solución adoptada ha sido dotar las zonas que no son de interés de un mallado más grueso y refinar el cauce, que se corresponde con nuestra zona de interés y disminuir así este hipotético tiempo de cálculo, buscando siempre su optimización.

Aparte de lo comentado anteriormente respecto a las mallas triangulares no estructuradas y el por qué la hemos elegido, la malla triangular se adapta mejor a las irregularidades del terreno ya que puede adoptar formas desordenadas e irregulares.

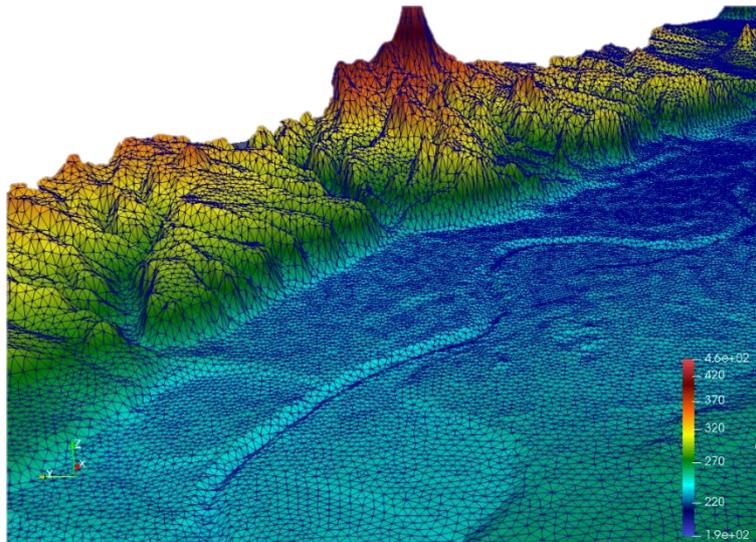


Figura 10. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el caso 1.

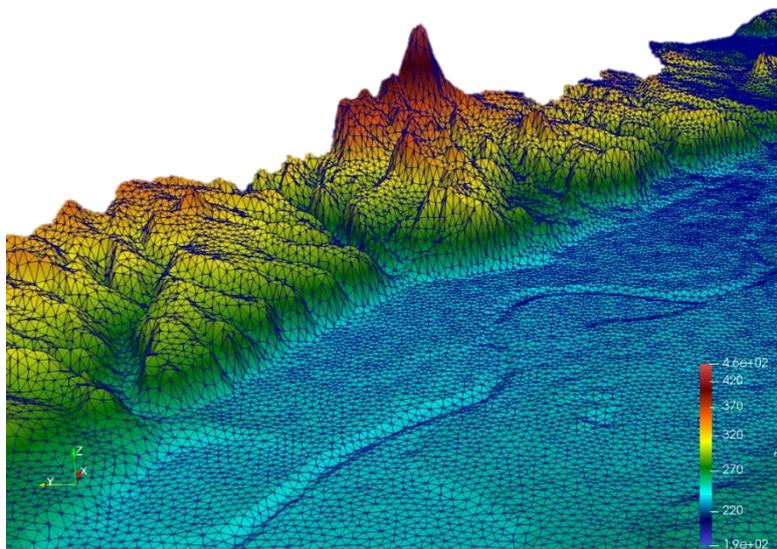


Figura 11. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el caso 0.

Las dos imágenes superiores corresponden con el mallado del caso 1 y caso 0 respectivamente, a simple vista resultan prácticamente idénticas, pero entrando en detalle puede apreciarse que el mallado del caso 1 es más fino. Observando la parte superior derecha de las imágenes (en el lecho justo al lado de las montañas) puede contrastarse la diferencia de tonalidades del color azul, siendo más oscuro el del caso 1 que el del caso 0 indicando así un mayor número de celdas.

A continuación se exponen algunos de los parámetros más importantes de los dos tipos de malla.

Malla del caso 0:

- 319887 celdas y 161124 nodos
- Área de malla total: 1020 Km^2
- Área de la celda promedio: 3200 m^2
- Tamaño medio de la celda (altura o anchura): 80 m
- Área de la celda más pequeña: 613.97 m^2
- Área de la celda más grande: 7708.78 m^2

Malla del caso 1:

- 410776 celdas y 206581 nodos
- Área de malla total: 1020 Km^2
- Área de la celda promedio: 2490 m^2
- Tamaño medio de la celda (altura o anchura): 70.6 m
- Área de la celda más pequeña: 772.55 m^2
- Área de la celda más grande: 7543.01 m^2

4.1.4. Condiciones iniciales

El modelo numérico que resuelve las ecuaciones del flujo es un método explícito, por tanto, para conocer todas las variables en todos los puntos en cada paso de tiempo, necesita conocer las variables en el tiempo anterior. Se hace necesario empezar con los valores de las variables conocidos a tiempo $t=0s$; en cada uno de los puntos del dominio espacial. Esto es lo que se conoce como condición inicial. En nuestro caso se ha partido de lecho seco; es decir que no hay ni velocidad ni altura de agua en ningún punto del dominio de cálculo.

5. Resultados numéricos

En el presente apartado se busca establecer una comparativa de los resultados obtenidos mediante el programa de simulación RiverFlow2D y los datos observados en las estaciones de aforo en diferentes eventos de avenida (2003, 2008, 2013, 2015 y 2018) cuando se considera el lecho impermeable (caso 0) o cuando se tiene en cuenta la infiltración (caso 1). Se compara la evolución temporal del caudal y la altura de agua frente al tiempo en las poblaciones que poseen estación de aforo: Tudela, Novillas y Alagón (ver Figura 8).

En primer lugar hay que analizar el tipo de suelo del tramo del Ebro que resulta de nuestro interés para el análisis, ya que en función de este tipo de suelo se elegirán los parámetros para los dos modelos de infiltración (Horton y Green - Ampt). Como se ha comentado con anterioridad existe un predominio de areniscas junto con un conjunto de materiales más blandos como margas, arcillas y yesos. (Ollero, 1996)

Atendiendo al tipo de suelo, los parámetros de los dos modelos de infiltración seleccionados son los siguientes:

Horton:

Tasa de decaimiento (K)	$2.333 * 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$
Tasa final (f_c)	$5.555 * 10^{-6} \text{ m/s}$
Tasa inicial (f_0)	$1.8611 * 10^{-4} \text{ m/s}$

Fuente: (Aparicio, 2012)

Green – Ampt:

Conductividad hidráulica	$3.02778 * 10^{-6} \text{ m/s}$
Carga de succión en frente mojado	$1.101 * 10^{-1} \text{ m}$
Delta Theta	0.453

Fuente: (Philip B. Bedient, 2008)

Antes de proceder al análisis de los resultados obtenidos cabe destacar que los episodios de avenidas que no se exponen en este apartado de la memoria se exponen en el Anexo II, por limitación de la memoria. Aquí se presenta el análisis del evento ocurrido en el año 2008.

La simulación del episodio del año 2008 corresponde al hidrograma que se muestra en la Figura 12 y se ha realizado para un total de 340 horas de simulación, tiempo suficiente para observar los picos de caudales más importantes de dicha avenida, partiendo de lecho seco.

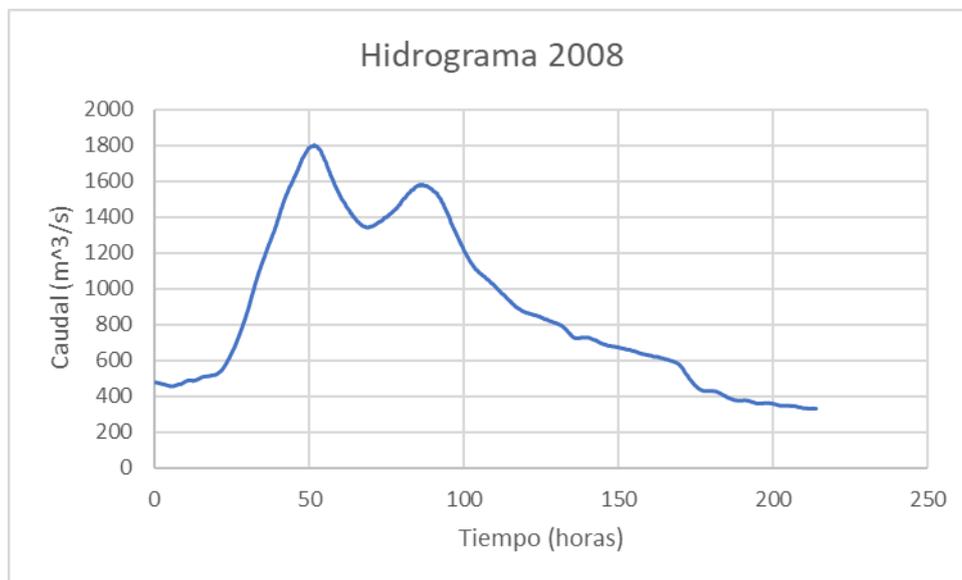


Figura 12. Hidrograma de avenida del 2008.

En primer lugar se lleva a cabo la simulación del caso 0 (fondo impermeable). Después se realiza la simulación del caso 1 con el modelo de Horton y con el modelo de Green – Ampt. Para la avenida del año 2008 se dispone de datos observados en la estaciones de aforo de Tudela, Novillas y Alagón de caudal y alturas de agua.

A continuación se presentan las gráficas del caudal frente al tiempo y de la altura frente al tiempo de las tres poblaciones, obtenidas mediante las simulaciones numéricas con Riverflow2D comparadas con los datos observados donde ha sido posible. En primer lugar se presenta la de Tudela (Figuras 13 y 14).

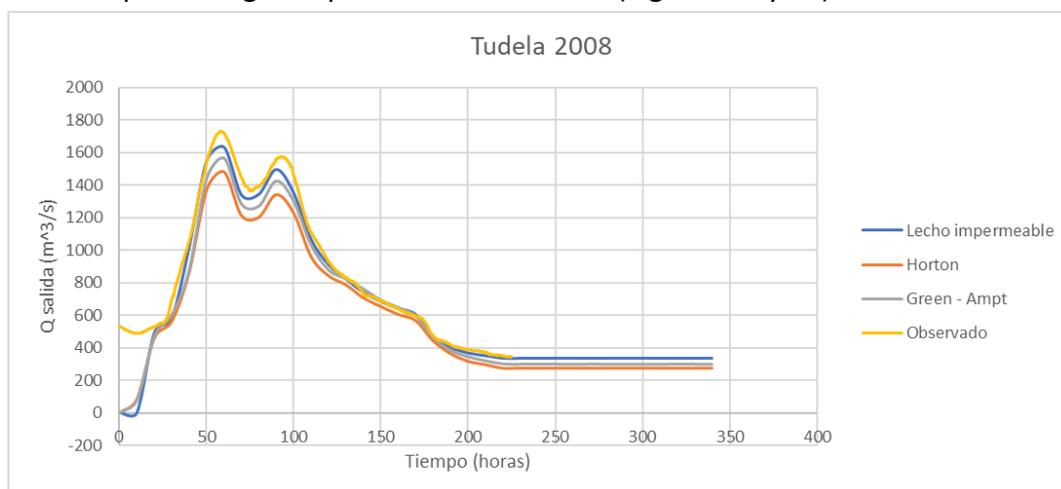


Figura 13. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2008.

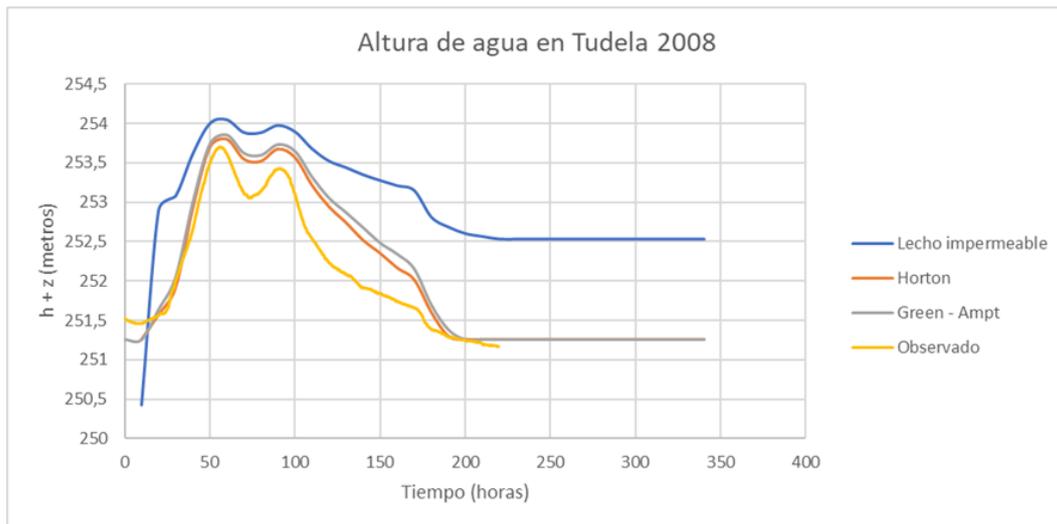


Figura 14. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2008.

En la Figura 13 podemos observar cómo la evolución temporal del caudal en Tudela es muy similar al hidrograma de avenida de entrada del propio año 2008 en Castejón; al estar estas dos poblaciones muy cercanas en distancia.

En la Figura 14 se representa la evolución temporal de la altura de agua en la población de Tudela. Se comparan los resultados obtenidos con la simulación numérica en el caso 0 y en el caso 1 con los dos modelos de infiltración. El modelo de Horton es el que presenta los resultados más cercanos a los datos observados en este caso. Hay que tener en cuenta que estos datos se han medido en el cauce del río donde el suelo se encuentra durante más tiempo con una altura de agua relevante por encima. Por tanto, vemos que en el caso 0 la lámina de agua se encuentra muy por encima de la lámina observada (en torno a 1m de diferencia en algunos tiempos). Al modelizar el flujo de agua teniendo en cuenta la infiltración esta altura de agua se reduce; y en particular, con el modelo de Horton se obtienen diferencias aproximadas de medio metro.

Las diferencias entre los dos modelos de infiltración se deben a los distintos parámetros impuestos, y la dificultad de calibración de éstos para hacer ambos modelos exactamente coincidentes, teniendo en cuenta que dichos parámetros han sido seleccionados para el mismo tipo de suelo en ambos casos.

Si nos fijamos en el volumen de agua bajo la curva, tenemos la cantidad de agua que desaparece bajo el suelo con ambos modelos de infiltración:

- Horton vs lecho impermeable: 22885 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: 10972 m^3

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y altura para la siguiente localidad, Novillas; que se encuentra en una posición intermedia del tramo de estudio.

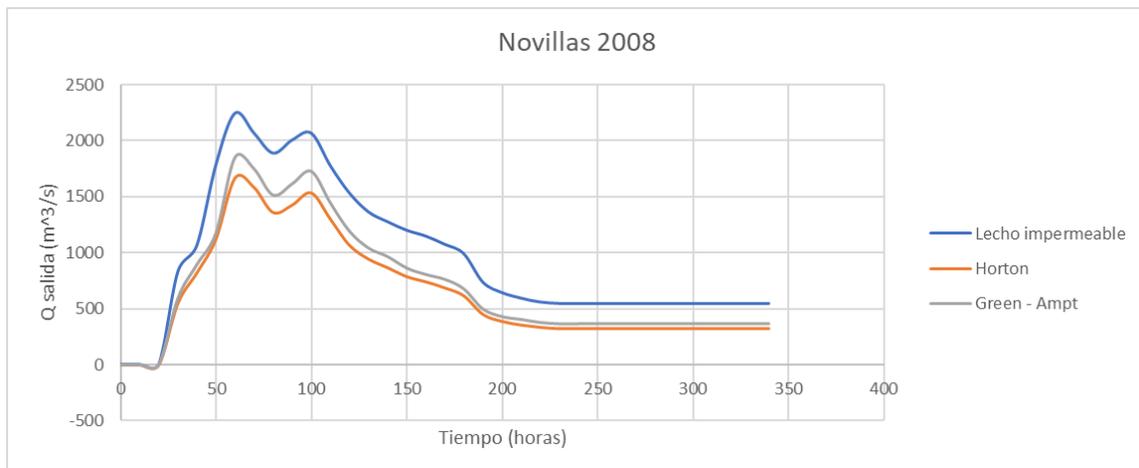


Figura 15. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2008.

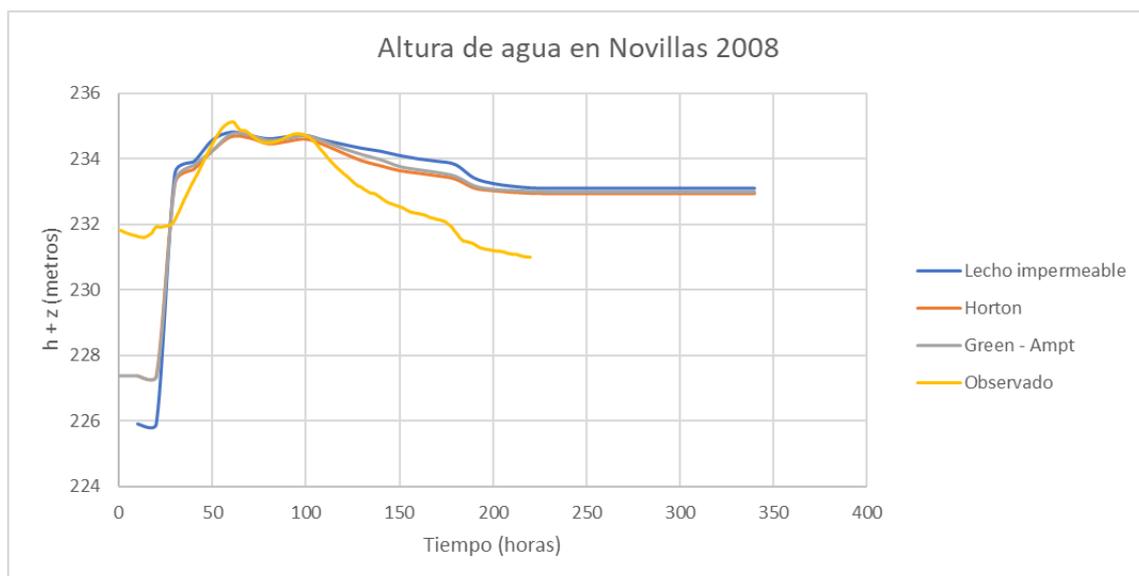


Figura 16. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2008.

Comparando la gráfica de Novillas con la de Tudela de la evolución temporal del caudal, puede observarse que los picos ya se han laminado un poco. No se tienen medidas de caudal en esta estación, con lo cual no podemos comparar con lo observado, en términos de caudal; pero sí lo podemos hacer en términos de altura de agua (Figura 16). En esta figura observamos que el uso de modelos de infiltración o lecho impermeable da resultados muy similares y aunque ajusta bien el pico máximo de la avenida en todos los casos, al comparar con la altura observada, no es capaz de reproducir la laminación de agua en el periodo de descenso de la onda. En esta localidad, la altura de agua desaparece de una forma más rápida que lo que se

consigue con los modelos de infiltración. Quizás es una zona que posee mucha vegetación y esto no se ha tenido en cuenta en los modelos de simulación. Cuanto mayor es la vegetación, mayor es la cantidad de agua infiltrada y de esta forma la lámina de agua desaparecería de la superficie de una forma más rápida. De momento, con los modelos existentes en Riverflow2D este fenómeno no ha podido ser captado.

El volumen de agua infiltrado con ambos modelos es el siguiente:

- Horton vs lecho impermeable: 106934 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 83246 m^3

Una vez más puede apreciarse que el modelo de Horton es el que más agua infiltra en el interior de la tierra frente a lecho impermeable; y a su vez más que en Tudela.

Presentamos a continuación los resultados de la evolución temporal de caudal y de altura en la siguiente población que es la de Alagón, aguas abajo del tramo de estudio.



Figura 17. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2008.

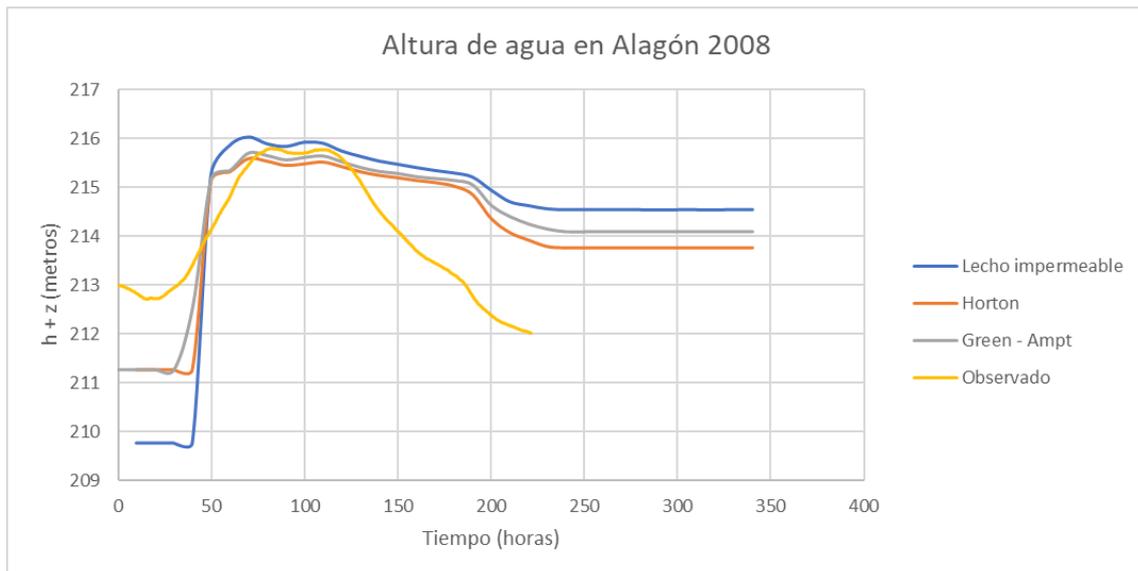


Figura 18. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2008.

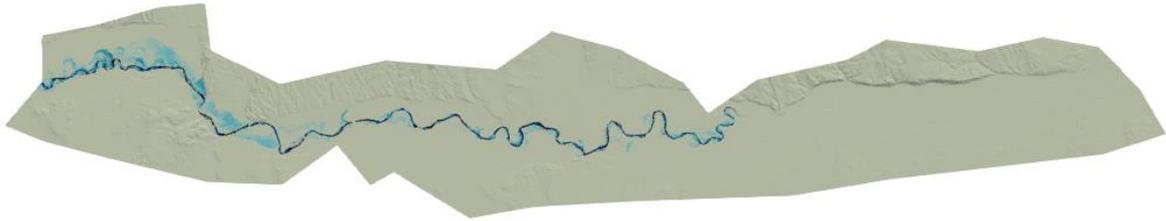
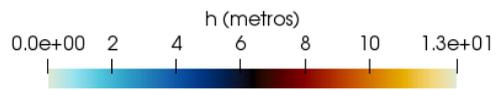
En el caso de Alagón volvemos a reproducir lo que ocurre en Novillas. Tanto con lecho impermeable como con modelos de infiltración se tienen unos resultados numéricos similares, que reflejan bien el pico máximo, con lo cual cualquiera de los tres nos serviría para elaborar los planes de emergencia de estas poblaciones, pero seguimos sin poder ajustar el descenso de agua superficial de forma rápida. Esto puede ser debido, como hemos dicho antes a la vegetación, a la calibración de los parámetros de infiltración o al estado de humedad del suelo. En las simulaciones hemos partido de lecho seco en todos los sentidos.

El volumen de agua infiltrado estimado por ambos modelos es:

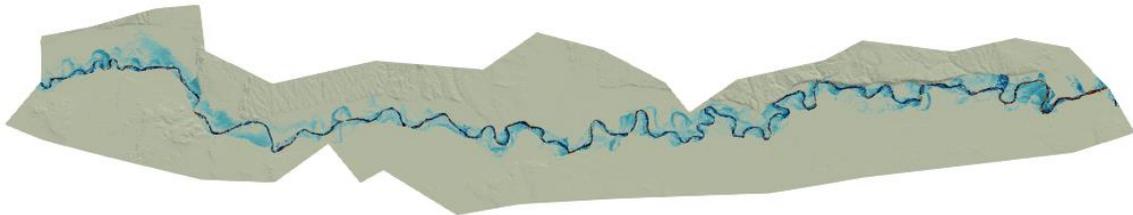
- Horton vs lecho impermeable: 51320 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 19728 m^3

A continuación se muestran las imágenes de extensión 2D de la lámina de agua sobre el terreno obtenido mediante la simulación numérica en el caso 0 (Figura 19) y en el caso 1 con el modelo de Horton (Figura 20) y con el modelo de Green - Ampt (Figura 21) para $t=40, 80, 120, 160$ y 200h . En estas imágenes se puede comparar la extensión de la lámina de agua, evaluando las distintas manchas de inundación en los casos 0 y 1.

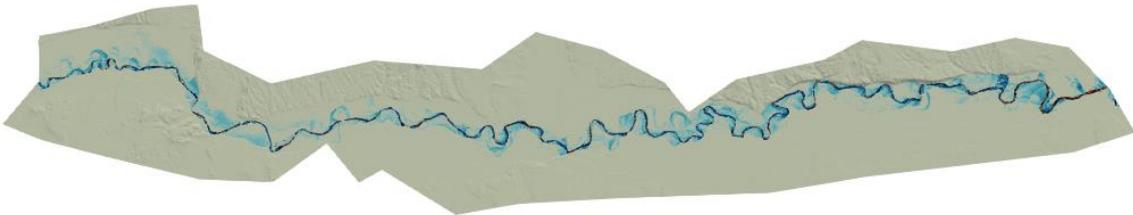
Lecho impermeable:



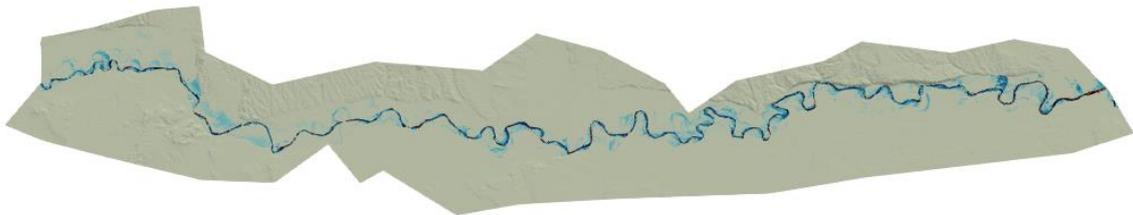
t = 40 horas



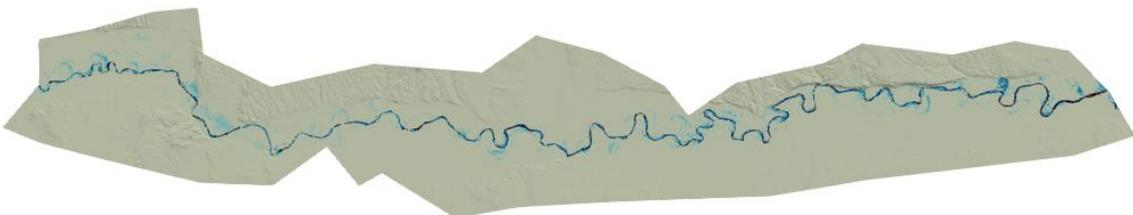
t = 80 horas



t = 120 horas



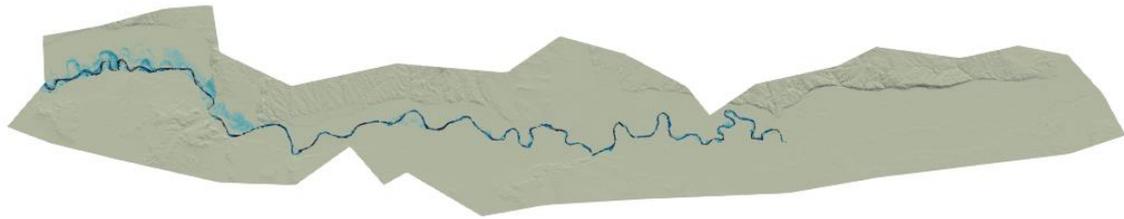
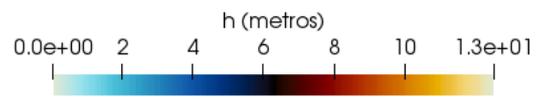
t = 160 horas



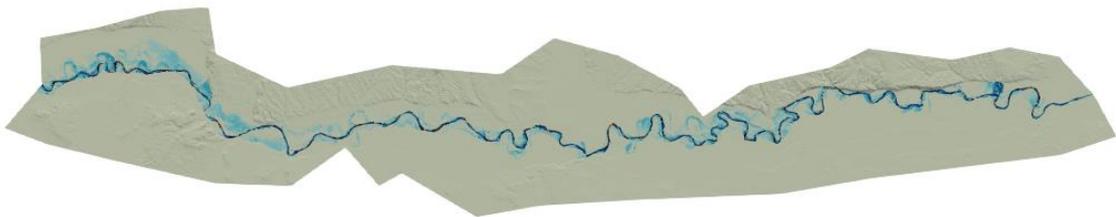
t = 200 horas

Figura 19. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo lecho impermeable.

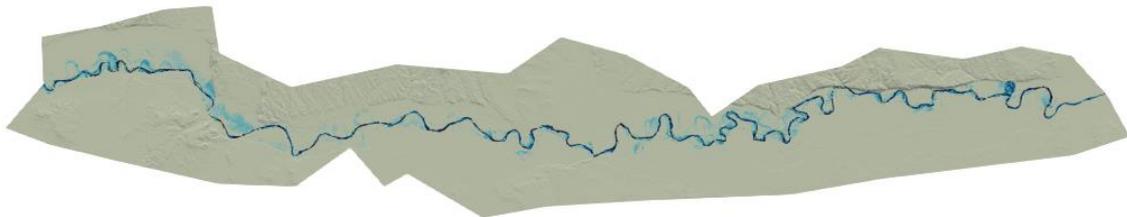
Modelo de Horton:



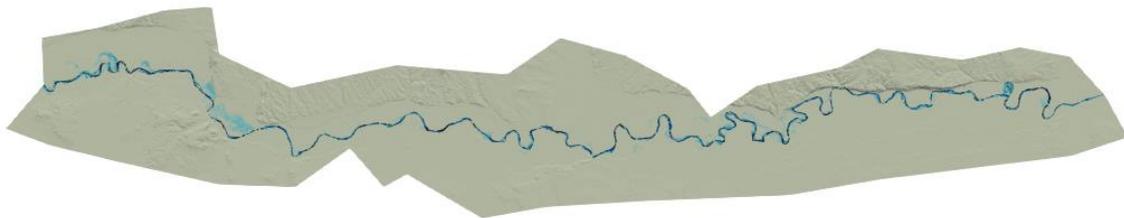
$t = 40$ horas



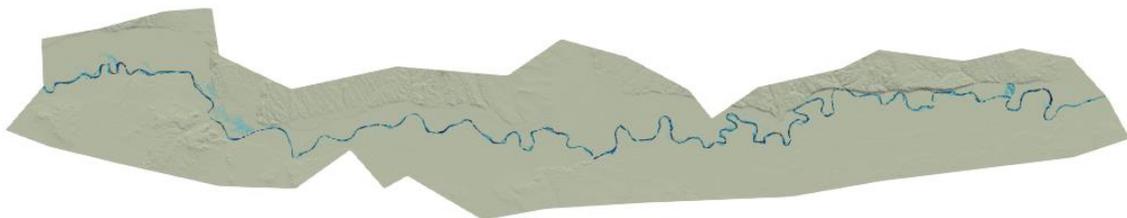
$t = 80$ horas



$t = 120$ horas



$t = 160$ horas



$t = 200$ horas

Figura 20. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo el modelo de Horton.

Modelo de Green - Ampt:

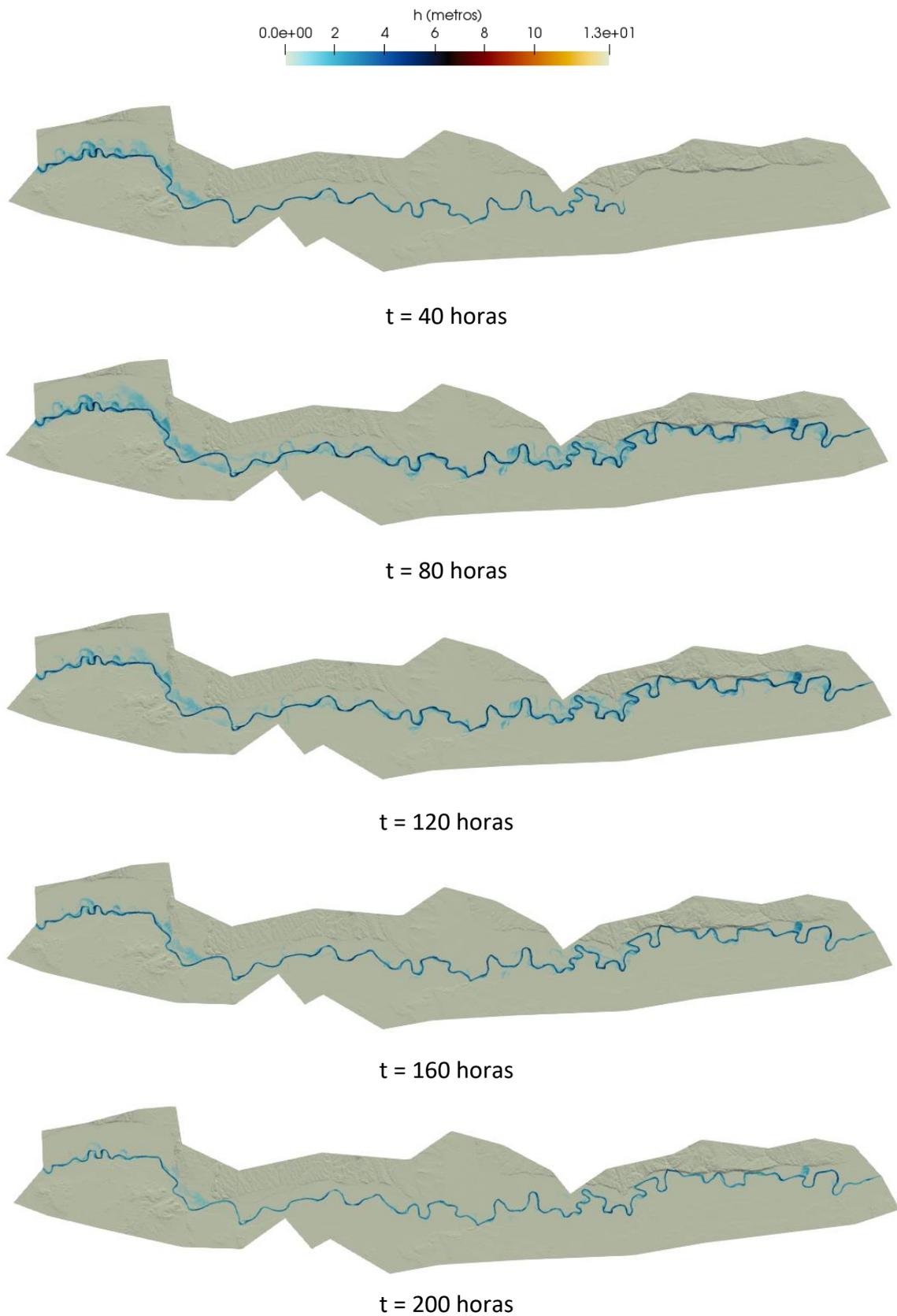


Figura 21. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2008 bajo el modelo de Green - Ampt.

De las figuras anteriores podemos observar que en $t=40h$ el río desborda el cauce en el caso de lecho impermeable mientras que con el modelo de infiltración de Horton y de Green - Ampt esto sólo ocurre en zonas puntuales y aguas arriba. Esto puede ser debido a que el agua se está infiltrando y durante las primeras horas no se produce apenas desbordamiento porque no hay suficiente volumen de agua de escorrentía. En $t=80h$ el pico de caudal máximo se encuentra entrando en el dominio de cálculo y el comportamiento es similar. En $t=120h$ nos encontramos ya en la fase de descenso del hidrograma de avenida, aún con zonas inundadas. En $t=160h$ se aprecia como en el caso 0 aún hay zonas inundadas, mientras que en el caso de que se usen modelos de infiltración en la simulación el río ya sigue su cauce natural.

A continuación se presentan tres imágenes en 3D donde se representa el MDT en color gris claro y sobre el la mancha de inundación máxima correspondiente a la simulación con lecho impermeable, con el modelo de Horton y con el modelo de Green - Ampt.

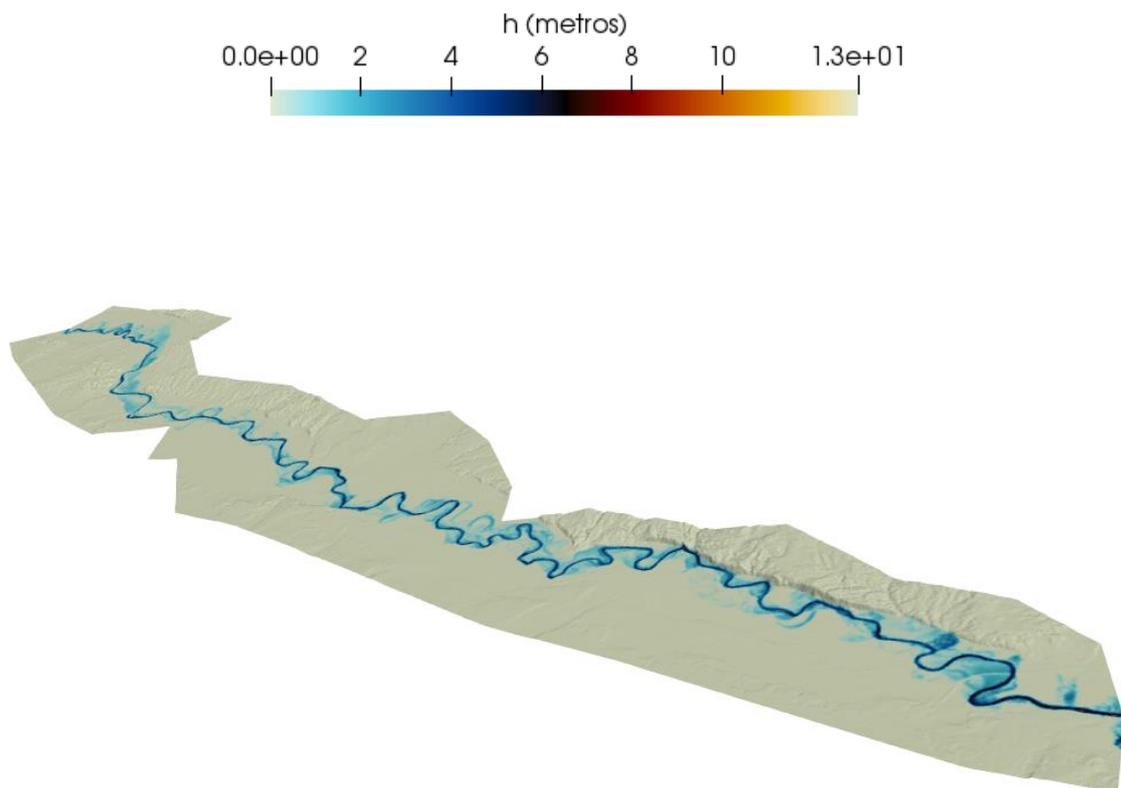


Figura 22. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso de lecho impermeable.

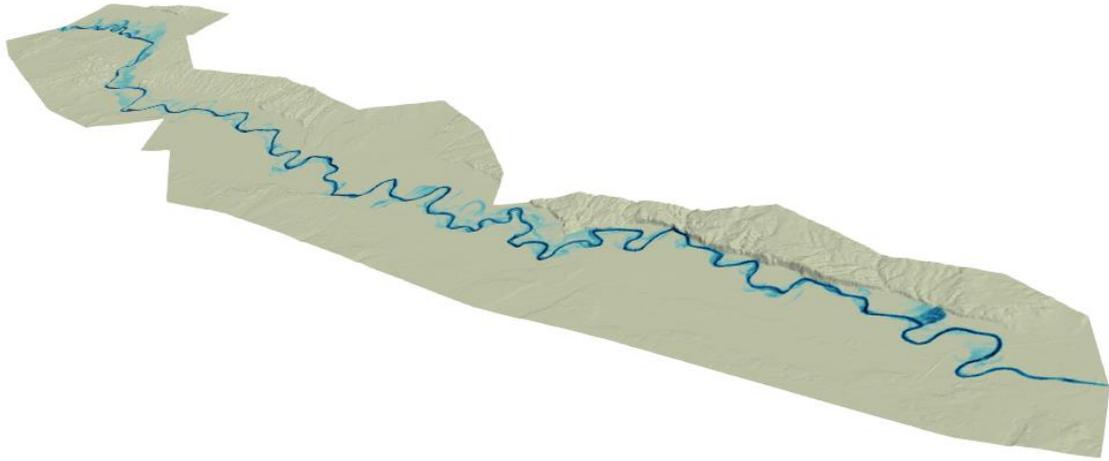


Figura 23. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso del modelo de Horton.

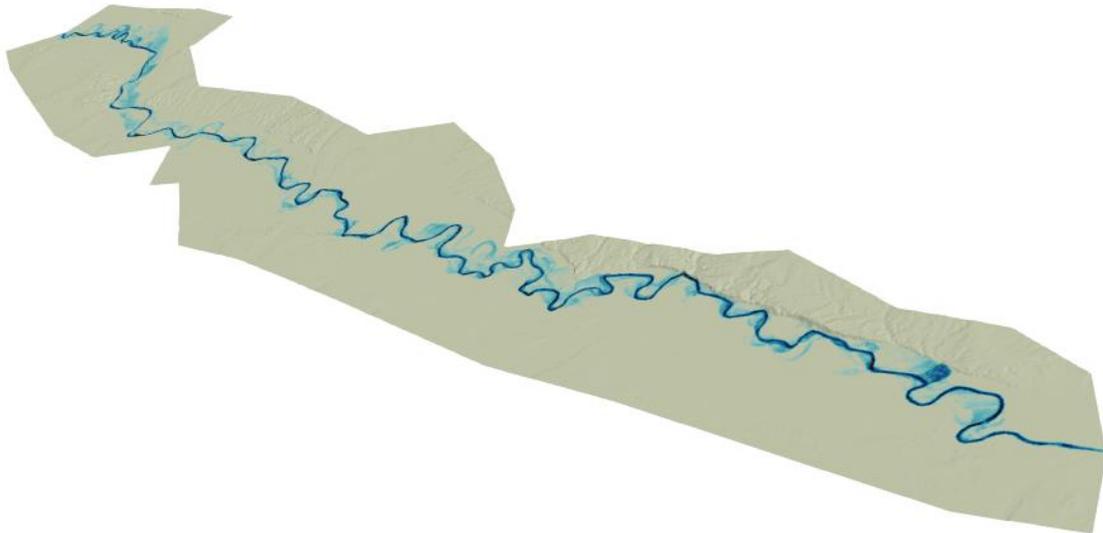


Figura 24. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2008 en el caso del modelo de Green – Ampt.

A continuación se muestra una imagen de los vectores de velocidad sobre el MDT junto a la representación del módulo de la velocidad con un rango de colores entre la velocidad mínima y la velocidad máxima. La imagen corresponde al momento de máximo caudal con el modelo de simulación de lecho impermeable.

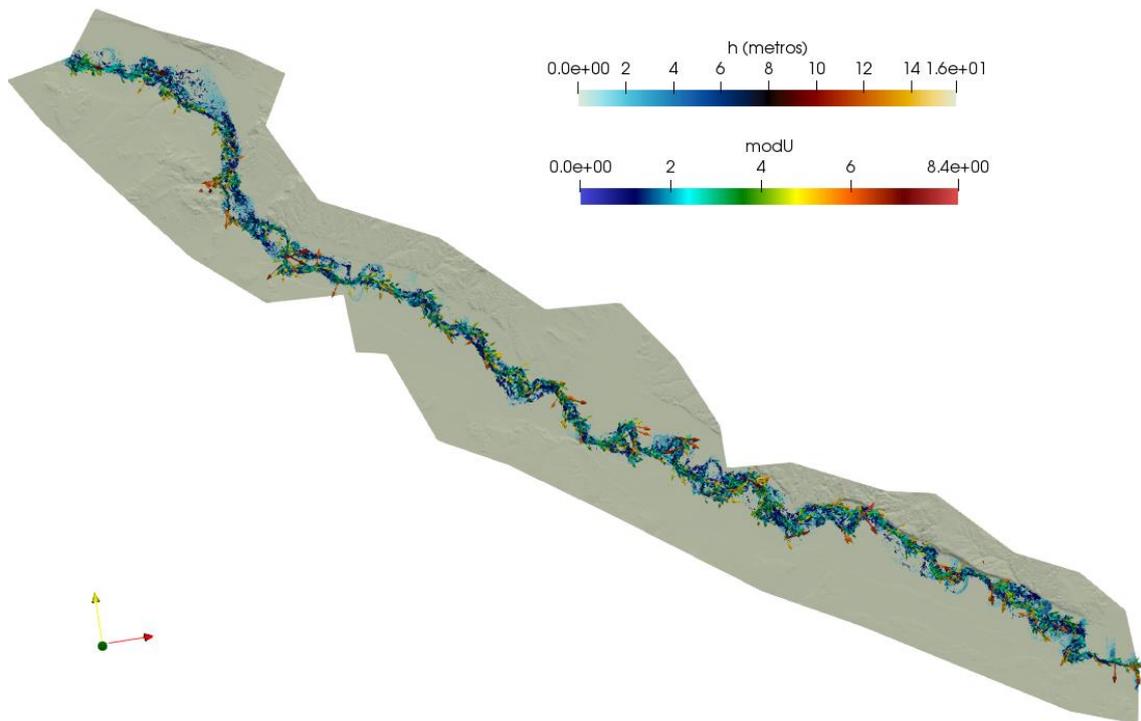


Figura 25. Mapa de vectores de velocidad junto a valores del módulo de la velocidad en la avenida de 2008.

A continuación se muestra un detalle de la figura anterior en una zona concreta para poder apreciar con mayor precisión esta representación vectorial. Colores rojos indican velocidades mayores en módulo y colores azules velocidad más baja. Además la longitud de los vectores nos indica si la velocidad es mayor o menor. Como cabe esperar, en el cauce es donde se obtienen velocidades mayores, mientras que en las llanuras de inundación es donde tenemos velocidades menores. Esto indica que el agua desbordada en estas llanuras puede permanecer estancada un mayor tiempo; lo cual influiría en la infiltración. En estos puntos no tenemos medidas observadas y por tanto no podemos comparar. Quizás también podemos intuir que si el agua desbordada no se infiltra puede volver al cauce y de ahí que las láminas no bajen tan rápidamente.

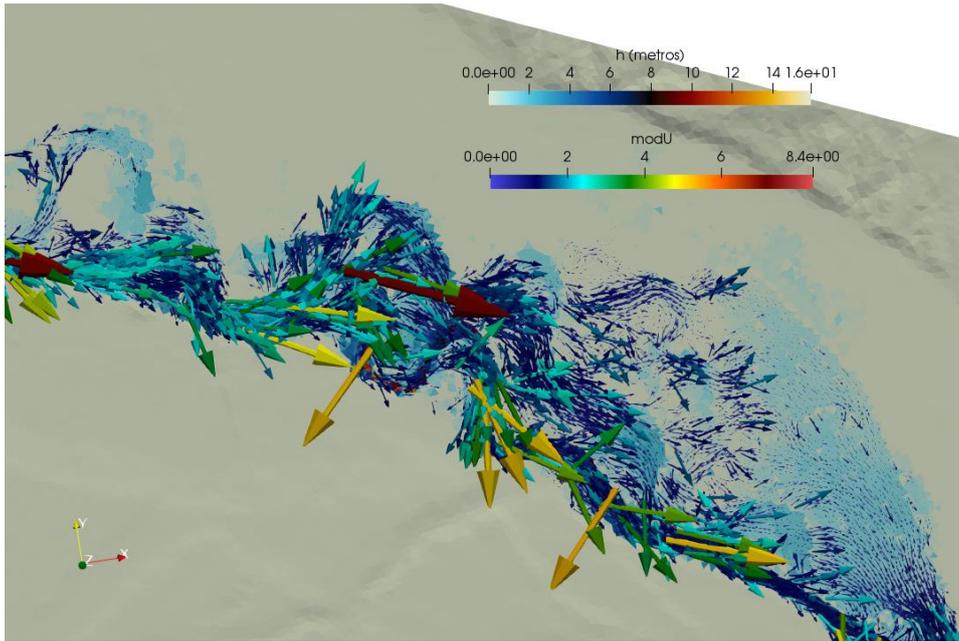


Figura 26. Detalle de la representación vectorial de la velocidad en la avenida de 2008.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Con el objetivo de esclarecer si el fenómeno de infiltración es relevante a la hora de predecir inundaciones mediante simulación numérica se presenta este trabajo. Con el software de cálculo del flujo en ríos Riverflow2D se han llevado a cabo las simulaciones numéricas de diferentes eventos de avenida ocurridos en el pasado: años 2003, 2008, 2013, 2015 y 2018 en el tramo Castejón de Ebro-Zaragoza del río Ebro, en el que se dispone de medidas en tres estaciones de aforo (Tudela, Novillas y Alagón).

Las simulaciones se han realizado bajo la hipótesis de lecho impermeable o poroso teniendo en cuenta la infiltración. Además, no sólo se ha analizado un modelo de infiltración sino que se han llevado a cabo análisis bajo dos de estos modelos por si alguno de ellos mostraba alguna diferencia. A la vista de los resultados podemos afirmar que la infiltración supone un proceso relevante cuando se produce una inundación, sobre todo en las zonas aguas arriba o más altas en cota. La comparación de los resultados numéricos con los datos observados en las estaciones de aforo en cuanto a evolución temporal de alturas y caudales no muestran una gran diferencia entre modelos de infiltración cuando nos encontramos más aguas abajo; pero aguas arriba el modelo de Green – Ampt presenta mayor similitud a los datos observados. También hemos observado que en el cauce del río Ebro analizado la velocidad del flujo es mayor y favorece el transporte de agua hacia abajo (Zaragoza) siendo esta dirección predominante frente a la velocidad vertical de infiltración de agua en el suelo.

En las llanuras de inundación, donde el agua es retenida durante más tiempo y se encuentra prácticamente en reposo o con velocidades pequeñas no disponemos de medidas de evolución temporal de altura de agua o caudal. Creemos que sería necesario llevar a cabo una campaña de medidas cuando se producen eventos en estas zonas.

En cuanto a los modelos de infiltración, bajo mi punto de vista, el modelo de Green – Ampt es el que mejor puede reproducir el fenómeno de infiltración, ya que los parámetros que lo caracterizan tienen un significado físico que permiten relacionarlos con los distintos parámetros del suelo y de esta forma reproducir más fielmente lo observado en la realidad. Sin embargo, también hay que decir que la calibración de estos parámetros según el tipo de suelo es complicada. Por contra, el modelo de Horton se basa en la experiencia generada a base de ensayos realizados y por tanto sus parámetros, como se ha comentado con anterioridad, tienen una base empírica y no física. Esto no quiere decir que este modelo de infiltración no sea fiable, ya que, como se ha podido observar en el trabajo sus resultados se aproximan bastante bien a los obtenidos en el modelo de Green – Ampt, existiendo muy poca diferencia entre uno y otro.

En cuanto a trabajo futuro a desarrollar para continuar con éste, habría que realizar un análisis de sensibilidad de los distintos parámetros para ambos modelos de infiltración y observar el comportamiento de la simulación del río, ya que estos

parámetros, en función de la fuente que se consulte para su utilización, varían de unos a otros (conservando siempre el mismo orden de magnitud). También ayudaría a comprender los límites de variación de estos parámetros. Otro factor a tener en cuenta es el contenido de humedad del suelo que se usa como condición inicial. En este caso no se ha tenido en cuenta ya que no se dispone de ningún dato en este sentido. Se considera que no es lo mismo que la avenida discurra por un suelo ya saturado de agua, como puede ser un evento en otoño o primavera; o con el suelo muy seco, por ejemplo, después del verano, eventos que tengan lugar en septiembre – octubre. Por otro lado, realizaría un análisis de la vegetación. La vegetación juega un papel trascendental en la infiltración del agua. El estudio de ésta podría determinar si resultaría eficaz o no por ejemplo replantar en las orillas del río árboles, para que en un futuro estos facilitaran la infiltración y así reducir el desbordamiento en periodos de crecida.

Bibliografía

- Aparicio, F. J. (23 de Diciembre de 2012). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Obtenido de Medición del Potencial de Infiltración: https://bjalmonete.files.wordpress.com/2012/12/semana-6_upload1.pdf
- Brufau, P., & García-Navarro, P. (2000). *Conceptos básicos de hidrodinámica de superficie*. Zaragoza: Copycenter.
- Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., & Murillo, J. (2012). Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and scs curve number simulation of rainfall/runoff events. *Journal of hydrology*, vol 448, 39-59.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Oxford: Elsevier.
- CHE. (2004). *Confederación Hidrográfica del Ebro*. Obtenido de Descripción de la cuenca: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2001&idMenu=2004>
- CHE. (2019). *Confederación Hidrográfica del Ebro*. Obtenido de <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=31861&idMenu=4182>
- Chow, V. (1959). *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Chu, S.-T. (1978). Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research branding banner*.
- Esteves, M., Faucher, X., Galle, S., & Vauclin, M. (2000). Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain. *Journal of Hydrology*, vol 228, 265-288.
- Fernández Pato, J. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations. *Journal of Hydrology*, vol 536, 496-513.
- Fernández-Pato, J., Caviedes-Voullième, D., & García-Navarro, P. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 496-513.
- GFMS. (3 de Junio de 2019). Obtenido de <http://flood.umd.edu/>
- Green, W., & Ampt, G. (1911). *Studies of soil physics*. Obtenido de Physical Hydrology for Ecosystems: <http://www.hydrology.bee.cornell.edu/BEE3710Handouts/GreenAmpt.pdf>
- Henderson, F. (1966). *Open channel flow*. Nueva York: MacMillan Series in Civil Engineering.
- Horton, R. E. (1933). *The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle*. American Geophysical Union.
- Marco, J. M. (12 de Abril de 2018). *Heraldo de Aragón*. Obtenido de Las grandes crecidas del Ebro en Aragón: <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2018/04/12/crecidas-del-ebro-las-ultimas-riadas-aragon-1234800-300.html>
- Mein, R., & Larson, C. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 384-394.

- Ollero, A. (1996). *El curso medio del Ebro: geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Zaragoza: Consejo de protección de la naturaleza de Aragón.
- Pedregal, D. (3 de Junio de 2019). *Crecidas del río Ebro*. Obtenido de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Un-metodo-sencillo-predice-las-crecidas-del-rio-Ebro>
- Philip B. Bedient, W. C. (2008). Hydrology and floodplain analysis. En W. C. Philip B. Bedient, *Hydrology and floodplain analysis* (págs. 70-80). Prentice Hall.
- Philip, J. R. (1969). *Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soils*.
- Phillips, D. T. (28 de Julio de 2015). NASA. Obtenido de La predicción de inundaciones: https://ciencia.nasa.gov/ciencias-tierra/22jul_floods
- RF2D_QGIS_Tutoriales. (2018). *Modelo Bidimensional de Inundaciones y Dinámica de Ríos*. Hydronia.
- Richards, L. A. (1931). *Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums*.
- Srivastava, P., Migliaccio, K. W., & Šimůnek, J. (2007). *Landscape models for simulating water quality point, field, and watershed scales*. Asabe.
- USDA. (1986). *Natural Resources Conservation Service*.
- Van den Putte, A., Govers, G., Leys, A., Langhans, C., Clymans, W., & Diels, J. (2013). Estimating the parameters of the Green–Ampt infiltration equation from rainfall simulation data. *Journal of Hydrology*, vol 476, 332-344.
- Visor SigPac V 3.5. (4 de Junio de 2019). Obtenido de <http://sigpac.mapa.es/feqa/visor/#>

Anexo I, Hidrogramas de avenida

En el presente apartado se presentan los hidrogramas de avenida de los distintos años utilizados en el trabajo para la simulación de eventos ocurridos en el pasado. Como ya se sabe, estos hidrogramas de avenida son las condiciones de contorno impuestas a la entrada del dominio y representan los caudales registrados en la estación de aforo de Castejón de Ebro. Estos datos se recogen cada 15 minutos y de este registro se han seleccionado los que presentaban un pico significativo que corresponden a un evento, poniendo la fecha y tiempo de inicio en el que ocurrieron a cero para sincronizar los datos con el programa de simulación. Se han elegido los más representativos durante los últimos 10 años.

2003

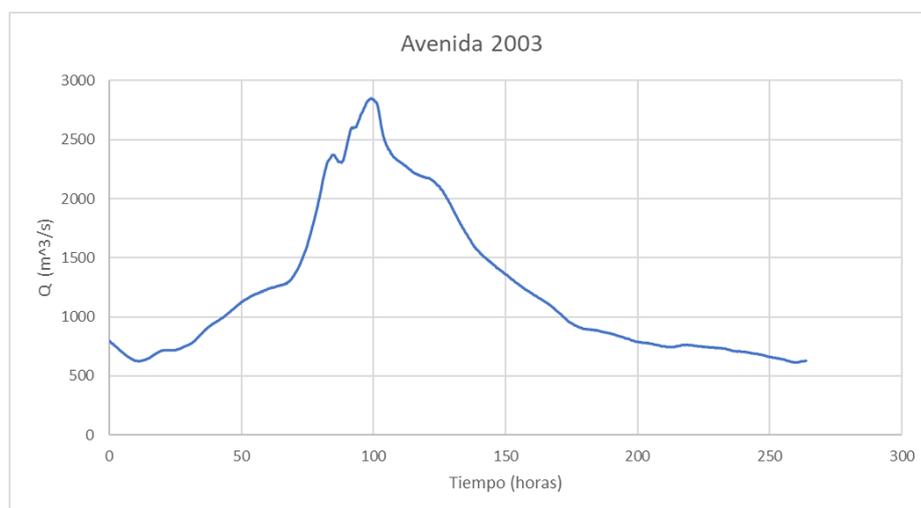


Figura 27. Hidrograma de avenida del 2003.

En la gráfica correspondiente a la avenida de 2003 puede observarse cómo el río en $t=0s$ transporta un caudal inicial de unos $760 \text{ m}^3/s$ y a partir de ese instante de tiempo aumenta progresivamente y sin mantenerse constante en ningún periodo de tiempo, hasta alcanzar el pico máximo de la avenida en $t=100h$ con un caudal de $2800 \text{ m}^3/s$ aproximadamente. Después de este máximo, los valores de caudal vuelven a descender paulatinamente hasta alcanzar su caudal nominal. Para volver a alcanzar este caudal nominal tras esta avenida se tardó aproximadamente 150 horas. El caudal nominal se sitúa en torno a los $700 \text{ m}^3/s$.

2008



Figura 28. Hidrograma de avenida del 2008.

En la gráfica correspondiente a la avenida de 2008 puede observarse cómo el río en $t=0s$ transporta un caudal inicial de unos $500 \text{ m}^3/s$, tras esto alcanza rápidamente (en comparación con el caso anterior ya que tarda la mitad del tiempo) su pico máximo de avenida en $t=50h$ con un caudal de $1800 \text{ m}^3/s$ aproximadamente. Este valor desciende levemente durante las 25 horas siguientes para volver a verse incrementado en un segundo pico de avenida hasta los $1600 \text{ m}^3/s$ en $t=85h$ aproximadamente. Después de este segundo pico, los valores de caudal vuelven a descender hasta alcanzar un valor de unos $390 \text{ m}^3/s$, valor que se alcanza tras unas 130 horas aproximadamente.

2013



Figura 29. Hidrograma de avenida del 2013.

En la gráfica correspondiente a la avenida de 2013 puede observarse cómo el río en $t=0s$ transporta un caudal inicial de unos $200 \text{ m}^3/s$, en $t=50h$ alcanza un caudal

de 1600 m³/s que podría catalogarse como una avenida. Este valor se mantiene en el tiempo durante unas 60h para posteriormente verse incrementado hasta los 2200 m³/s en t=150h cuando se alcanza el pico máximo de la avenida. Después de este máximo, los valores de caudal vuelven a descender hasta alcanzar un valor de unos 700 m³/s.

2015



Figura 30. Hidrograma de avenida del 2015.

En la gráfica correspondiente a la avenida de 2015 puede observarse cómo el río en t=0s transporta un caudal inicial de 500 m³/s, en t=85h alcanza un caudal de 1700 m³/s que podría catalogarse como el inicio de una avenida. Este tiene un pequeño decaimiento desde t=85h hasta t=150h con un caudal mínimo de 800 m³/s para posteriormente verse incrementado hasta los 2700 m³/s en t=290h cuando se alcanza el pico máximo de la avenida. Después de este máximo, los valores de caudal vuelven a descender hasta alcanzar un valor de unos 900 m³/s.

2018



Figura 31. Hidrograma de avenida del 2018.

En la gráfica correspondiente a la avenida de 2018 puede observarse cómo el río en $t=0s$ transporta un caudal inicial de unos $400 \text{ m}^3/s$, en $t=105h$ alcanza un caudal de $1500 \text{ m}^3/s$ aproximadamente, que como en el hidrograma anterior podría decirse que es el inicio de la avenida. Este valor tiene un pequeño decaimiento en $t=125h$ con un caudal de $2200 \text{ m}^3/s$, posteriormente se ve incrementado hasta los $2650 \text{ m}^3/s$ en $t=2000h$ alcanzándose así el pico máximo de la avenida. Después de este máximo, los valores de caudal vuelven a descender hasta alcanzar un valor de unos $500 \text{ m}^3/s$.

Como colofón podemos concluir que las avenidas más significativas en cuanto a caudal pico alcanzado son en primer lugar la de 2003 y en segundo y tercer lugar la de 2015 y 2018 respectivamente.

Como se expone en la introducción, la avenida de 2003 fue de las peores que se recuerdan debido a su gran pico de caudal máximo alcanzado y el escaso tiempo que se tardó en alcanzar estas cifras.

Anexo II, Resultados numéricos

En el presente apartado se presentan todos los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones de las avenidas que no han sido incluidas en el punto 5 de la memoria principal.

De igual forma que en el caso expuesto en la memoria principal, en el suelo existe un predominio de areniscas junto con un conjunto de materiales más blandos como margas, arcillas y yesos. (Ollero, 1996)

Como consiguiente los parámetros de infiltración son los siguientes:

Horton:

Tasa de decaimiento (K)	$2.333 * 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$
Tasa final (f_c)	$5.555 * 10^{-6} \text{ m/s}$
Tasa inicial (f_0)	$1.8611 * 10^{-4} \text{ m/s}$

Fuente: (Aparicio, 2012)

Green – Ampt:

Conductividad hidráulica	$3.02778 * 10^{-6} \text{ m/s}$
Carga de succión en frente mojado	$1.101 * 10^{-1} \text{ m}$
Delta Theta	0.453

Fuente: (Philip B. Bedient, 2008)

Año 2003

La simulación del episodio del año 2003 se ha realizado para un total de 380 horas de simulación, tiempo suficiente para observar el pico de caudal máximo.

Para este año no se disponen de datos en las poblaciones sonda de Tudela, Novillas y Alagón.

A continuación se presentan las gráficas del caudal frente al tiempo y de la altura frente al tiempo de las tres poblaciones, obtenidas mediante las simulaciones con Riverflow2D. En primer lugar se presenta la de Tudela.



Figura 32. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2003.

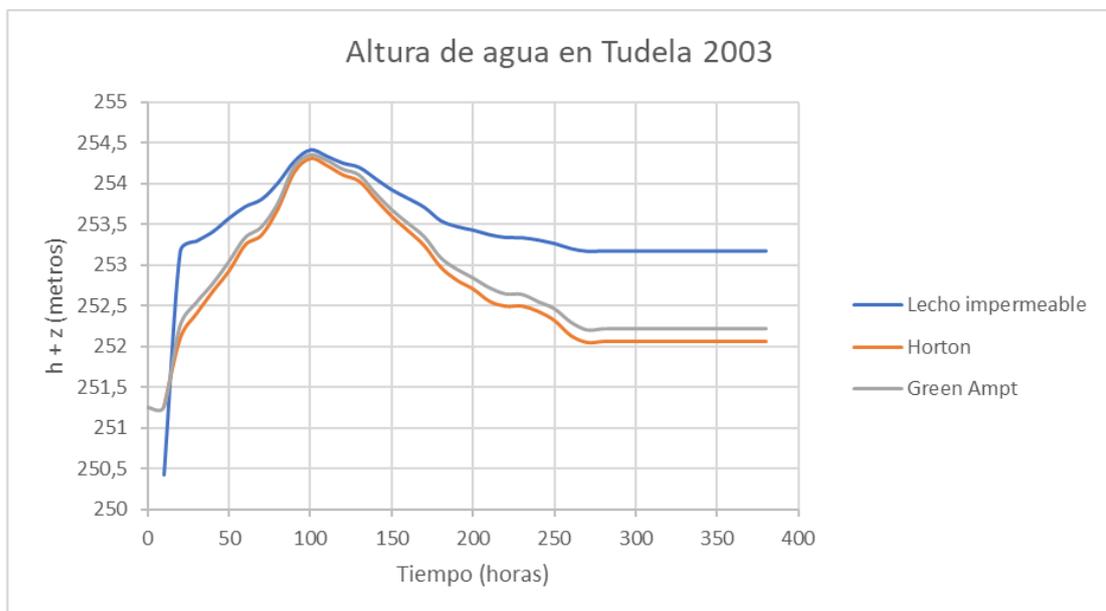


Figura 33. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2003.

Como se ha comentado en la memoria principal para la avenida de 2008, en Tudela la llanura de inundación es la menor de todos los pueblos, traduciéndose esto en valores muy similares entre el caso 0 (lecho impermeable) y el caso 1 (Horton y Green - Ampt). El registro de caudal en Tudela para este año es el mayor de todos los

expuestos en el trabajo y como se indica en la introducción, esta avenida se recuerda como una de las más fuertes en los últimos años.en

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: $27242 m^3$
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : $7320 m^3$

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y de altura para la siguiente localidad, Novillas.

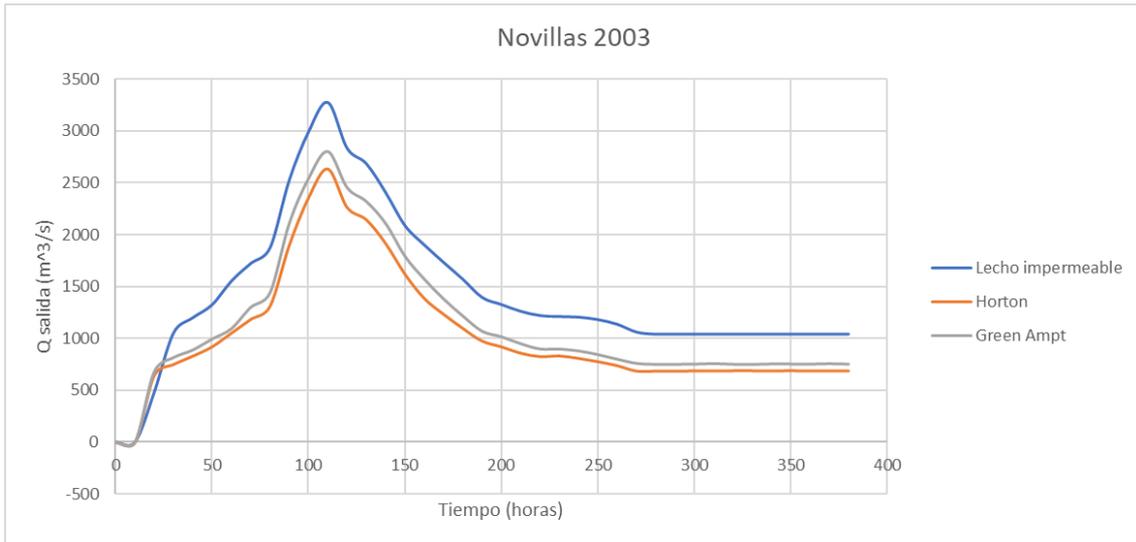


Figura 34. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2003.

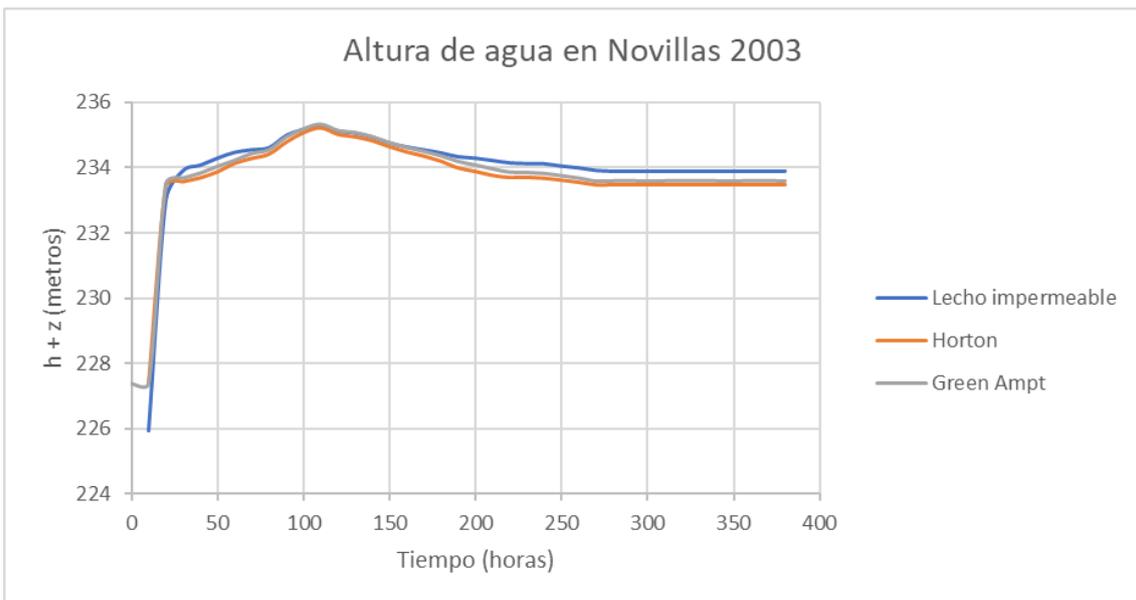


Figura 35. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2003.

En Novillas vuelve a producirse una mayor diferencia entre el caudal circulante en la simulación de lecho impermeable y el circulante en ambos modelos de infiltración. Puede observarse como el pico de la avenida en Novillas es superior en caudal que el pico en Tudela, cosa lógica si tenemos en cuenta que esta población esta aguas abajo de Tudela y entre medio hay afluentes que alimentan al río Ebro.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 152479 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: 116034 m^3

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y de altura para la siguiente localidad que es Alagón.



Figura 36. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2003.

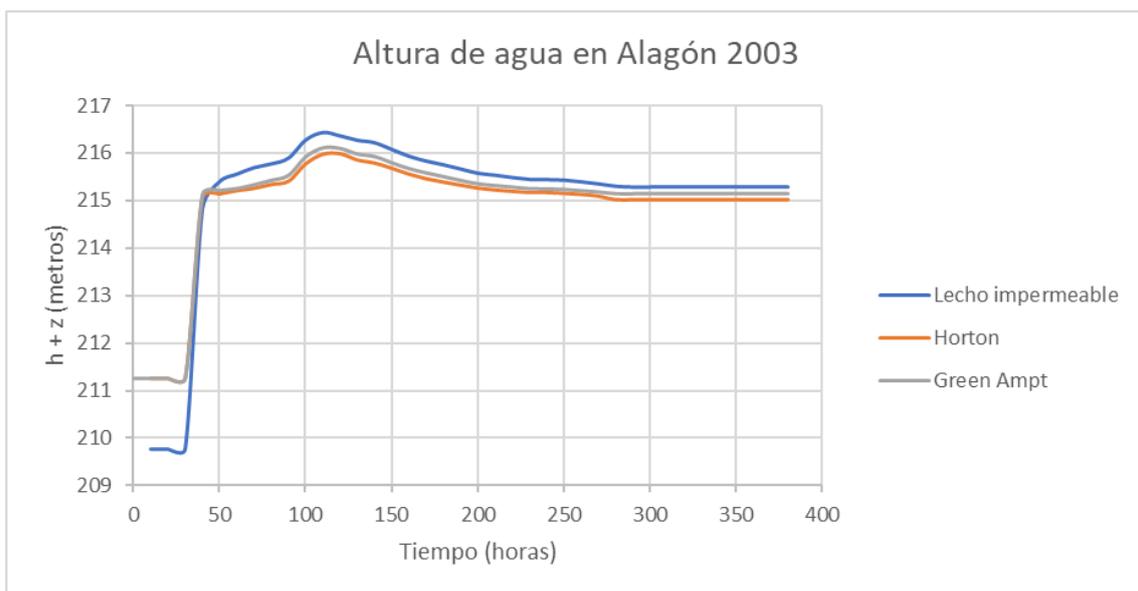


Figura 37. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2003.

La gráfica correspondiente a Alagón nos muestra a simple vista lo mismo que lo observado en las dos anteriores, una mayor infiltración en el modelo de Horton que en el de Green – Ampt.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: $76392 m^3$
- Green – Ampt vs lecho impermeable: $26033 m^3$

A continuación se muestran las imágenes de extensión 2D de la lámina de agua sobre el terreno obtenido mediante la simulación numérica en el caso 0 (Figura 38) y en el caso 1 con el modelo de Horton (Figura 39) y con el modelo de Green - Ampt (Figura 40) para $t=50, 100$ y $150h$. En estas imágenes se podrá apreciar con claridad todo lo citado con anterioridad, evaluando las distintas manchas de agua del caso 0 y el caso 1.

Lecho impermeable:

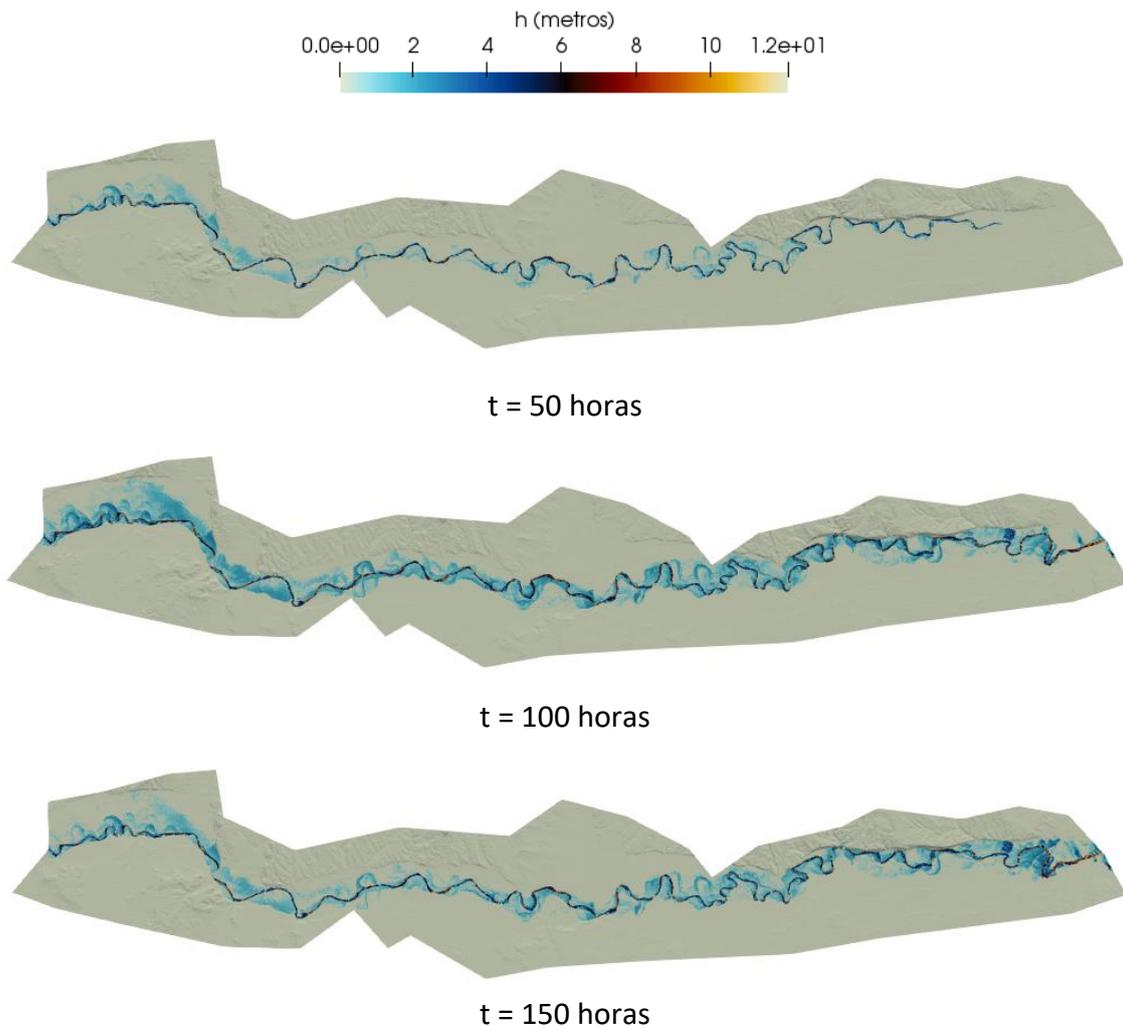
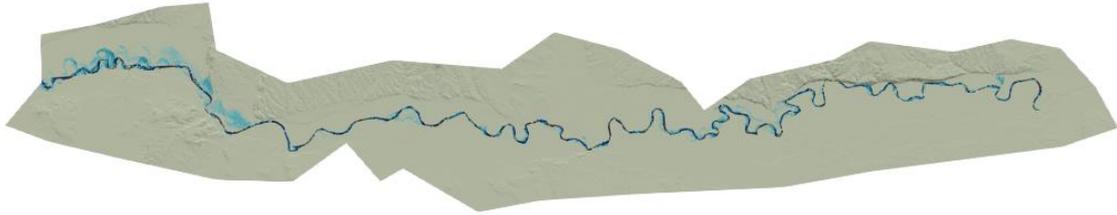
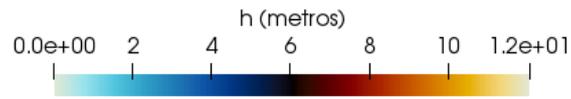
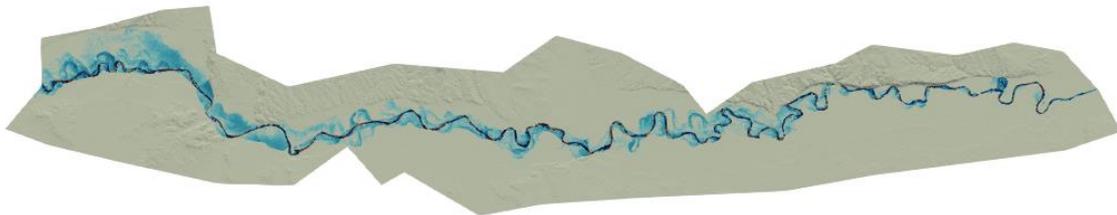


Figura 38. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo lecho impermeable.

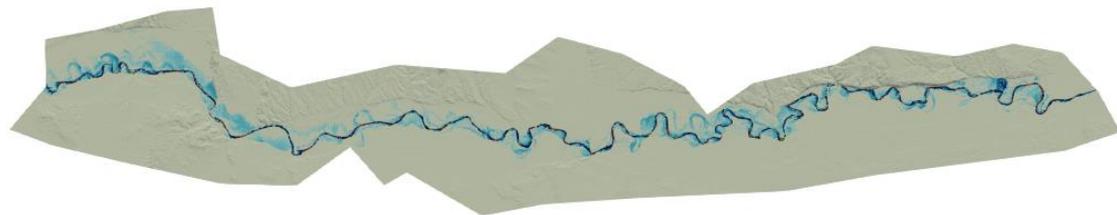
Modelo de Horton:



$t = 50$ horas



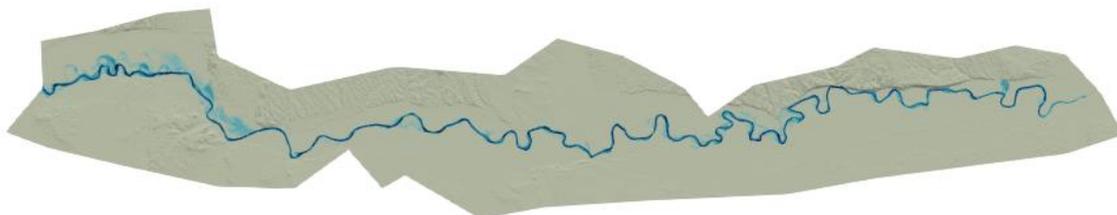
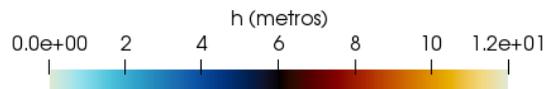
$t = 100$ horas



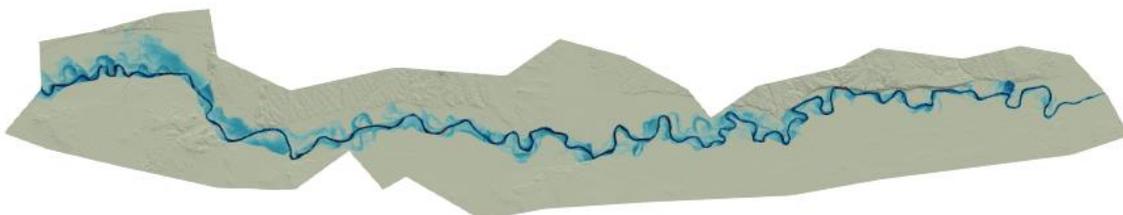
$t = 150$ horas

Figura 39. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo el modelo de Horton.

Modelo de Green - Ampt:



$t = 50$ horas



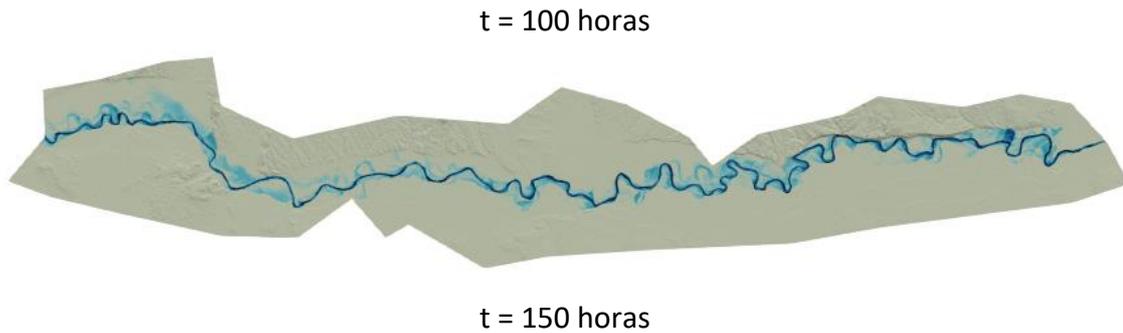


Figura 40. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2003 bajo el modelo de Green – Ampt.

De las figuras anteriores podemos observar que en $t=50h$ el río desborda el cauce en el caso de lecho impermeable mientras que con el modelo de infiltración de Horton esto sólo ocurre aguas arriba. Esto puede ser debido a que aguas abajo el agua se está infiltrando y durante las primeras horas no se produce desbordamiento porque no hay suficiente volumen de agua de escorrentía. En $t=100h$ el pico de caudal máximo se encuentra entrando en el dominio de cálculo y el comportamiento es similar observando mayor desbordamiento en el caso de lecho impermeable. En $t=150h$ nos encontramos ya en la fase de descenso del hidrograma de avenida. En las manchas de inundación observamos un desbordamiento similar con y sin infiltración excepto aguas abajo donde sí que se observa que hay menos agua superficial cuando hay infiltración, como era previsible.

A continuación se presentan tres imágenes en 3D correspondientes con el modelo de lecho impermeable, el modelo de Horton y el modelo de Green – Ampt respectivamente en el tiempo en el que se tiene la máxima inundación.

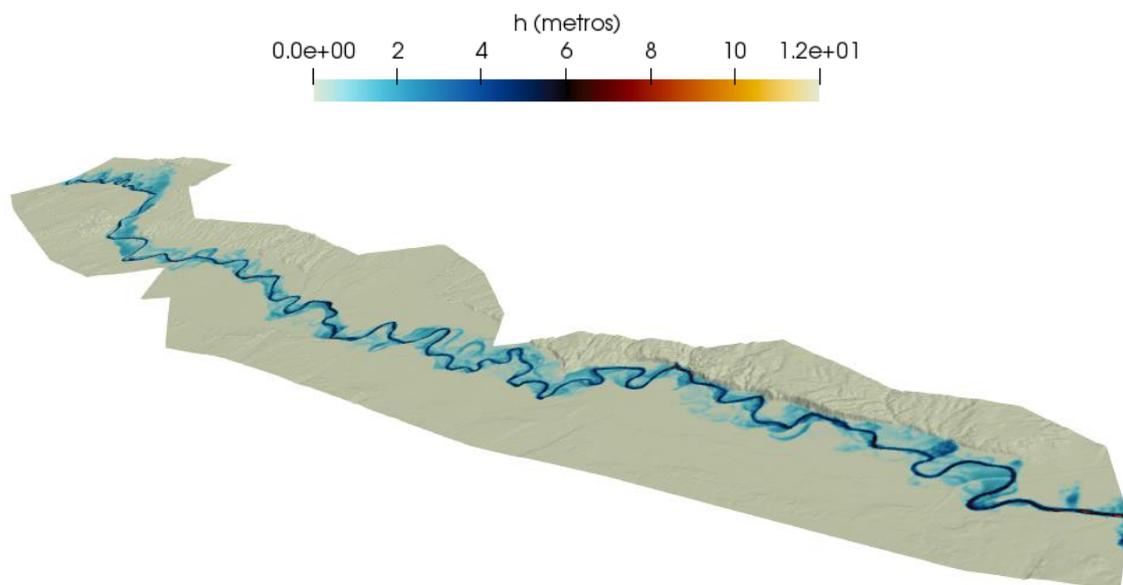


Figura 41. Vista 3D de la huella de máxima inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso de lecho impermeable.

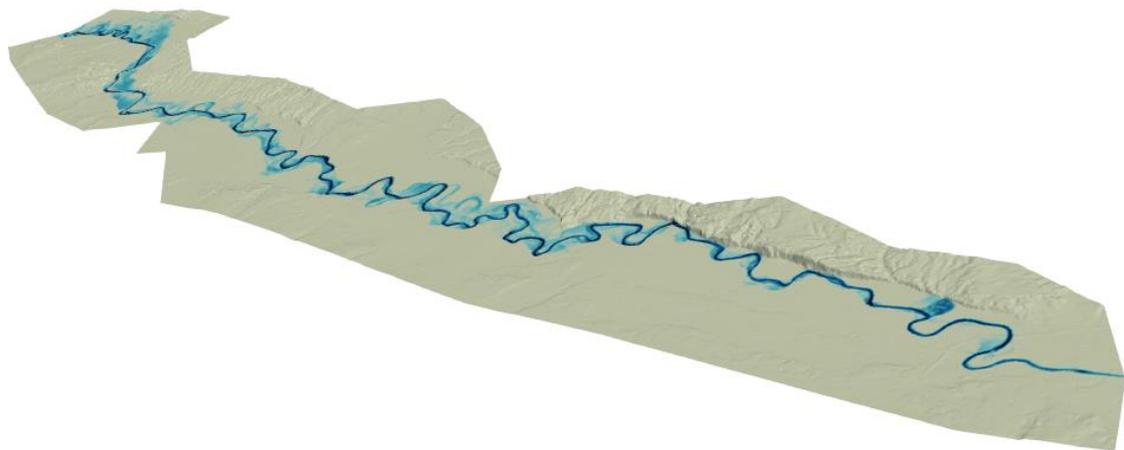


Figura 42. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso del modelo de Horton.

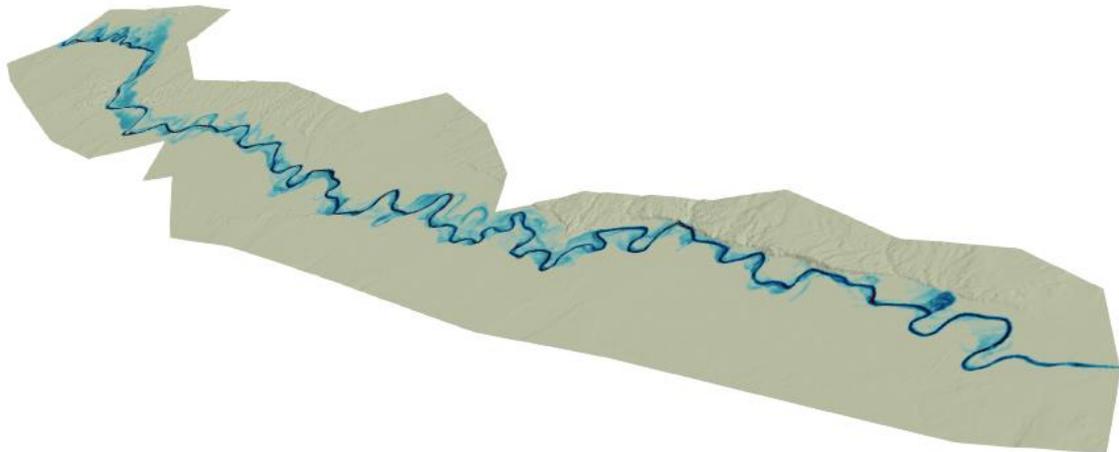


Figura 43. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2003 en el caso del modelo de Green - Ampt.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los años 2013, 2015 y 2018. Como puede observarse, las gráficas de evolución temporal del caudal transmiten la misma información que la que transmiten en el caso de las avenidas de los años 2003 y 2008 ya comentadas, con la única salvedad de que tienen distinta forma; ya que el hidrograma de cada año es distinto. De esta forma, para no causar repetitividad en los comentarios de las figuras sólo se comentan las manchas de agua y las gráficas de evolución temporal de la altura de agua que sí que son distintas en los años citados.

Año 2013

La simulación del episodio del año 2013 se ha realizado para un total de 380 horas de simulación, tiempo suficiente para observar todas las fluctuaciones que sufre la avenida en este año.

A continuación se presentan las gráficas del caudal frente al tiempo y de la altura frente al tiempo de las tres poblaciones, obtenidas mediante las simulaciones con Riverflow2D. En primer lugar se presenta la de Tudela.

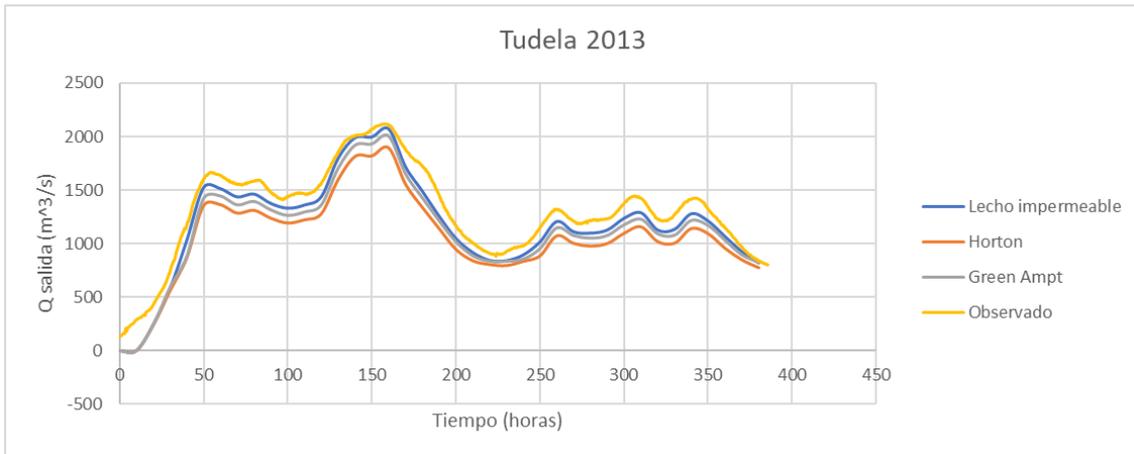


Figura 44. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2013.

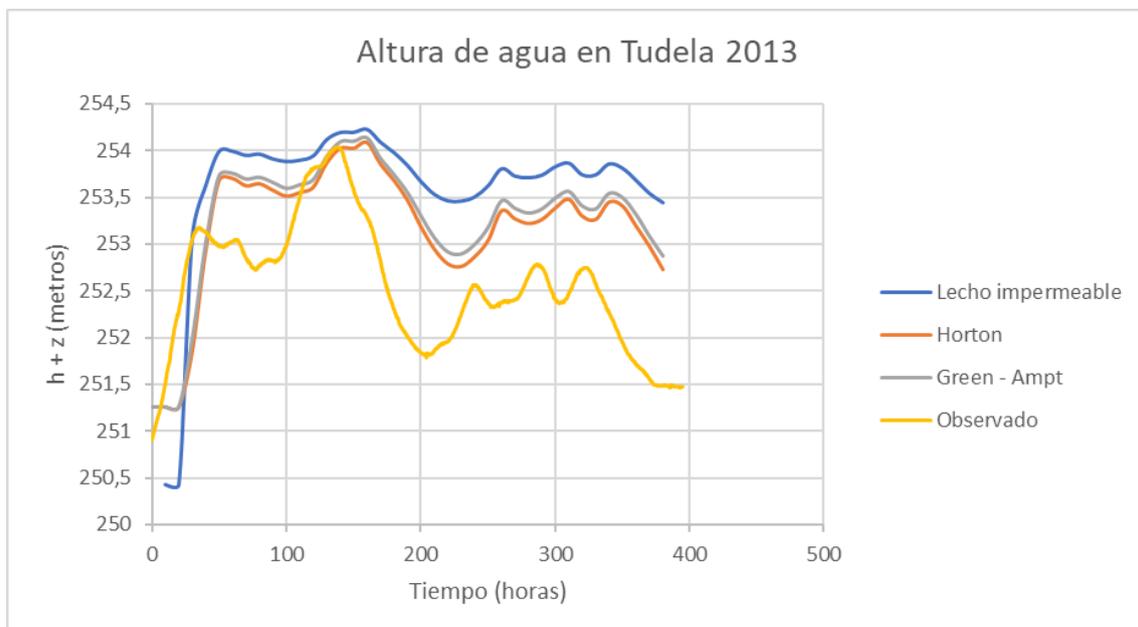


Figura 45. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2013.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 44762 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: 20405 m^3

De la gráfica de evolución temporal de la altura de Tudela cabe destacar que es la que cuenta con una diferencia de altura más abrupta en comparación con las otras dos localidades. De igual forma que pasaba en el caso estudiado en la memoria principal (año 2008) el caso que más se parece a lo observado es el caso 1, concretamente el modelo de Horton aunque resulta muy parejo con el modelo de Green – Ampt.

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y de altura para la siguiente localidad, Novillas.

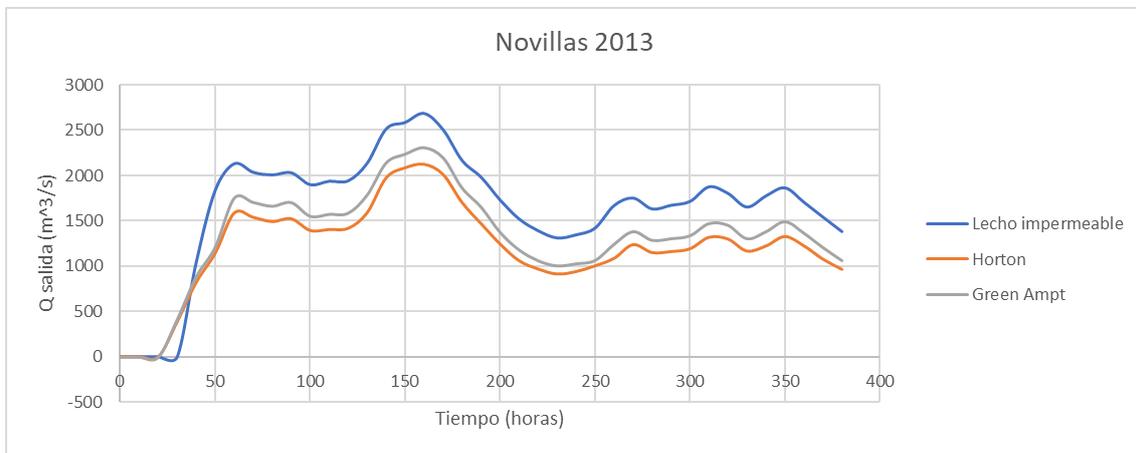


Figura 46. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2013.

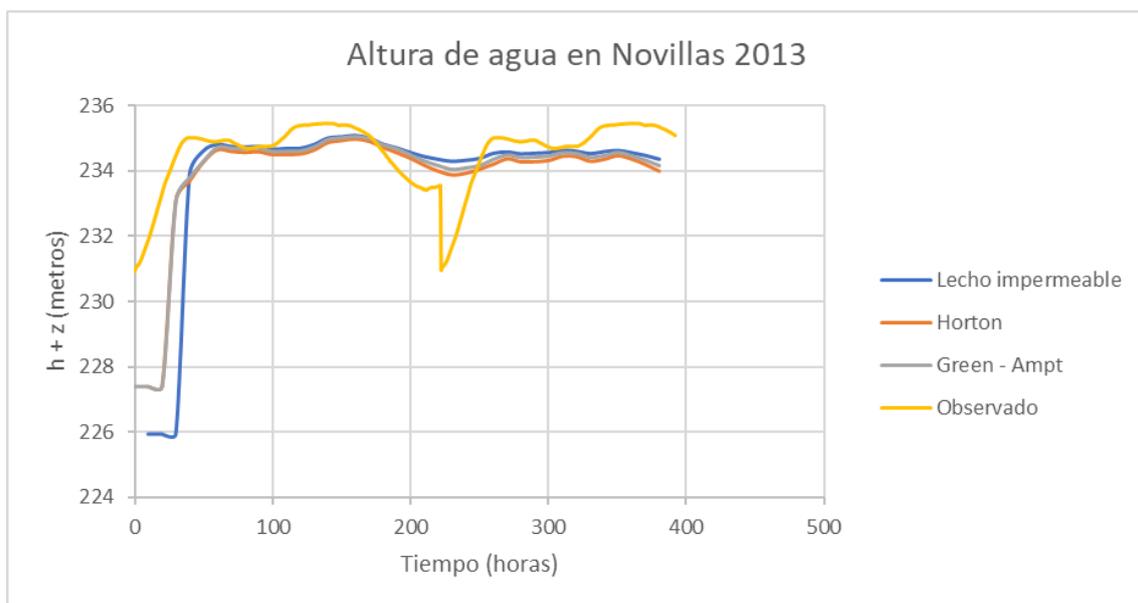


Figura 47. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2013.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 167437 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 117696 m^3

En la evolución temporal de la altura se aprecia una similitud bastante aceptable a excepción del pico formado en $t=220\text{h}$ aproximadamente, que difiere en 3 metros y creemos puede ser debido a un error en la toma de medidas.

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y de altura para la siguiente localidad que es Alagón.



Figura 48. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2013.

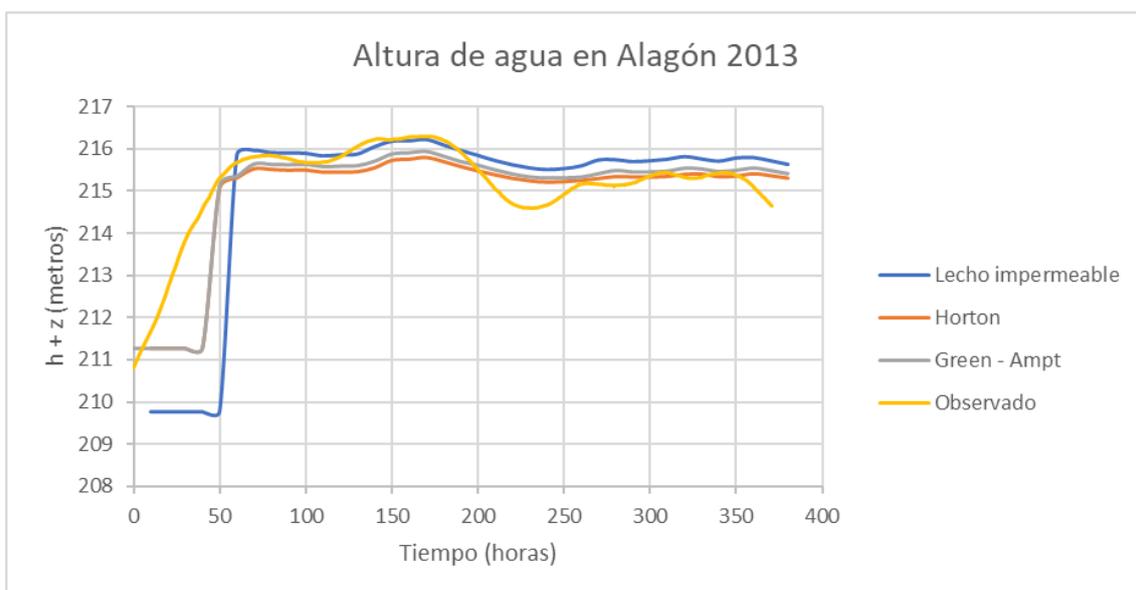


Figura 49. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2013.

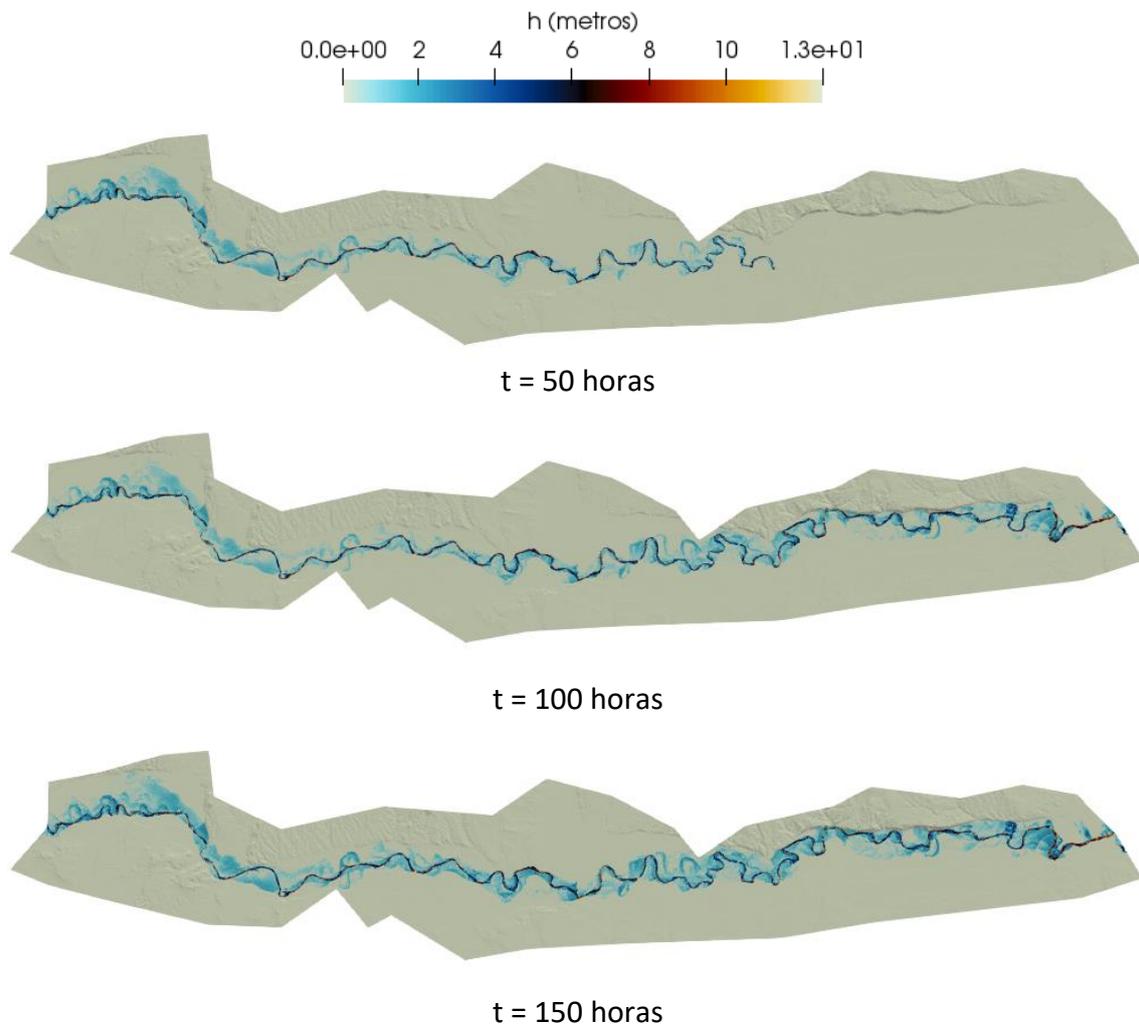
En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

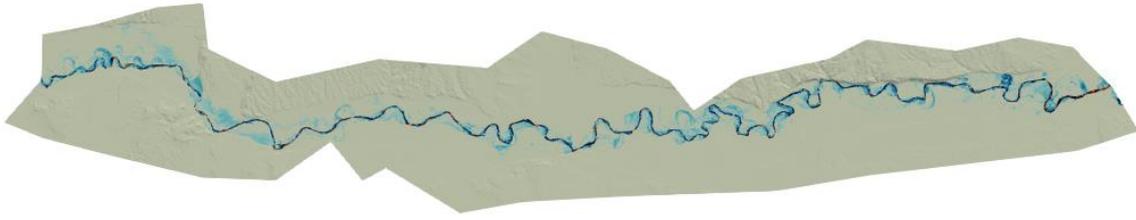
- Horton vs lecho impermeable: 99947 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: 27628 m^3

De igual forma que en la población anterior, en la localidad de Alagón lo observado se asemeja bastante bien en ambos casos. Cabe destacar que en el primer periodo de tiempo se asemeja al modelo de lecho impermeable y aproximadamente a partir de $t=200\text{h}$ pasa a parecerse al caso 1.

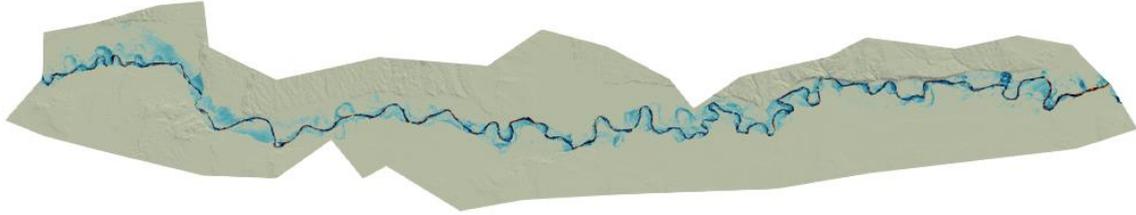
A continuación se muestran las imágenes de extensión 2D de la lámina de agua sobre el terreno obtenido mediante la simulación numérica en el caso 0 (Figura 50) y en el caso 1 con el modelo de Horton (Figura 51) y con el modelo de Green - Ampt (Figura 52) para $t=50, 100$ y $150, 230, 300$ y 380h .

Lecho impermeable:

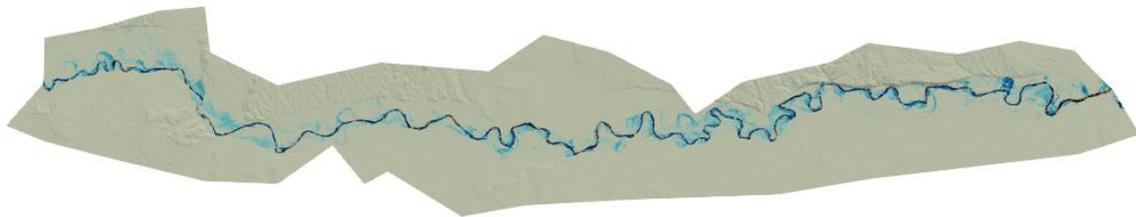




t = 230 horas



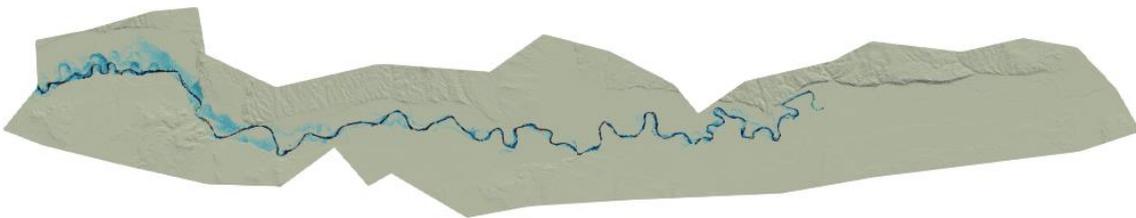
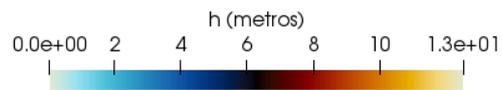
t = 300 horas



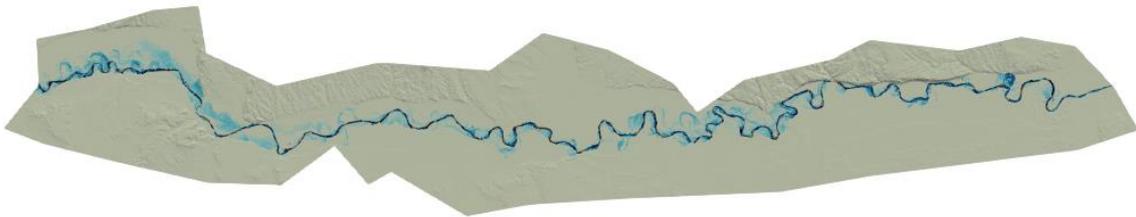
t = 380 horas

Figura 50. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo lecho impermeable.

Modelo de Horton:



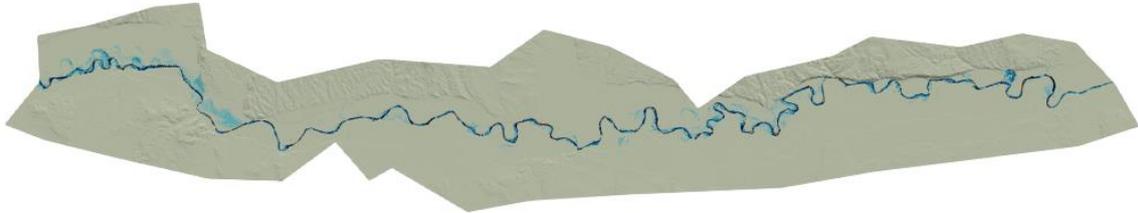
t = 50 horas



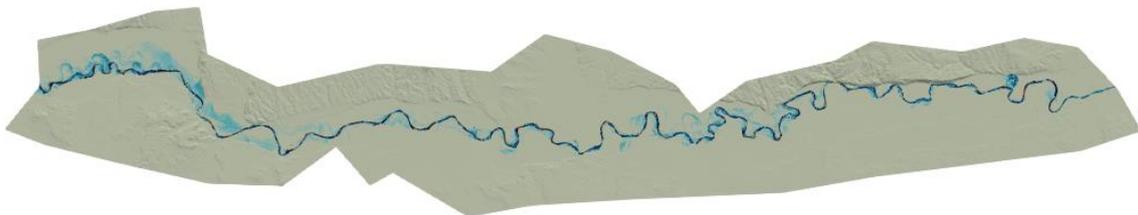
t = 100 horas



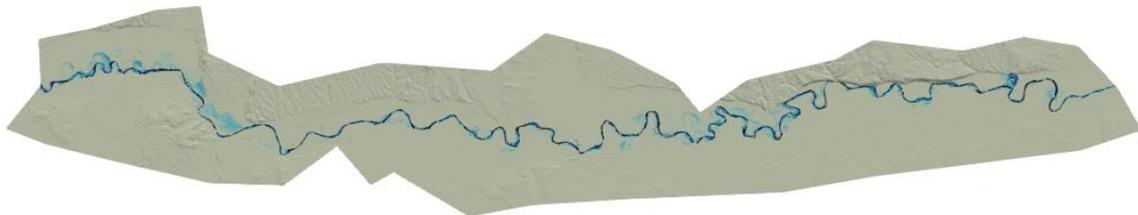
t = 150 horas



t = 230 horas



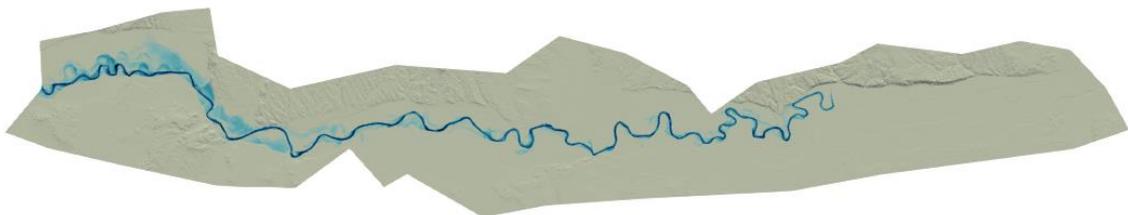
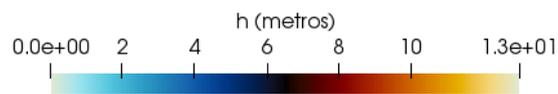
t = 300 horas



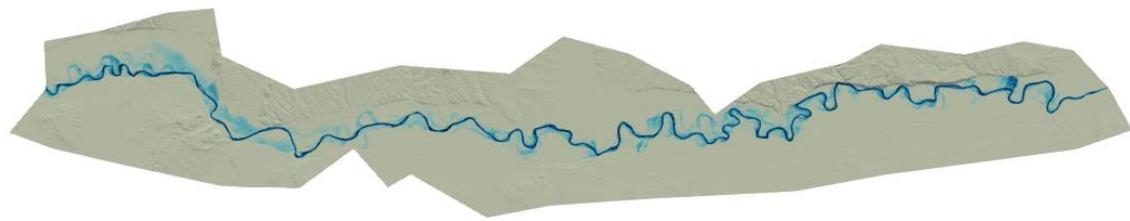
t = 380 horas

Figura 51. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo el modelo de Horton.

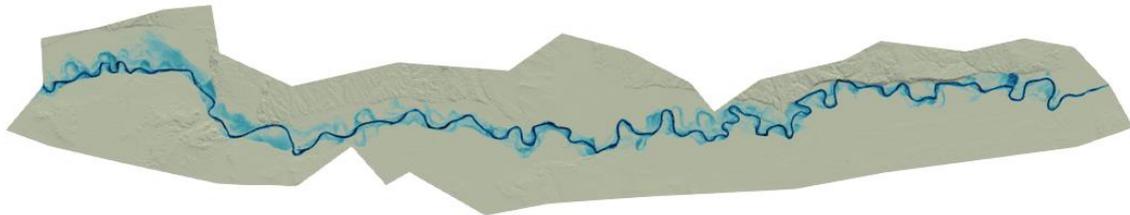
Modelo de Green - Ampt:



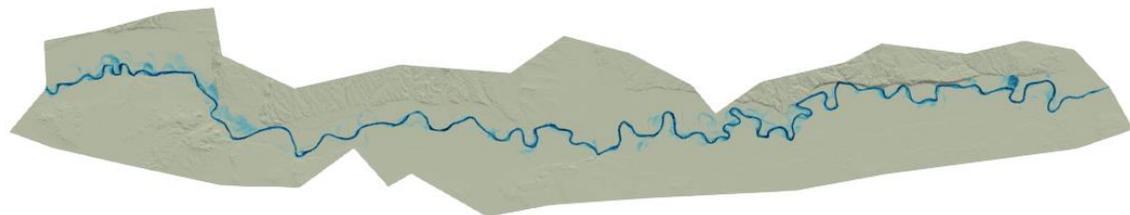
t = 50 horas



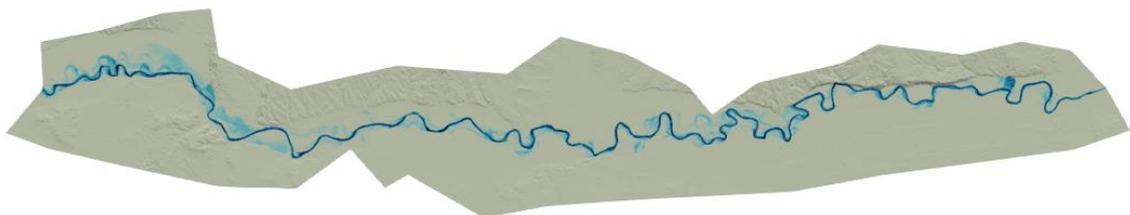
t = 100 horas



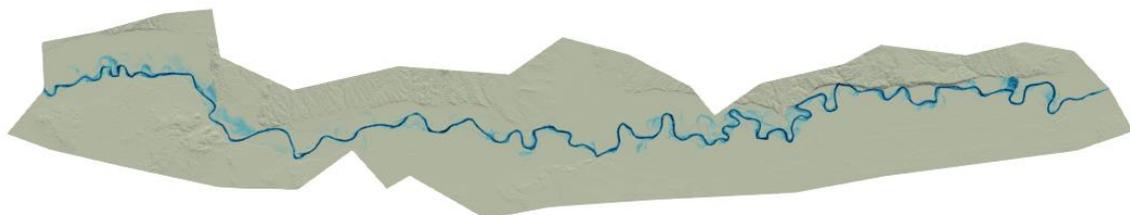
t = 150 horas



t = 230 horas



t = 300 horas



t = 380 horas

Figura 52. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2013 bajo el modelo de Green - Ampt.

De las figuras anteriores podemos observar que en $t=50h$ el río desborda en el caso de lecho impermeable mientras que con el modelo de infiltración de Horton y de Green - Ampt esto sólo ocurre en zonas puntuales y aguas arriba. Esto puede ser debido a que el agua se está infiltrando y durante las primeras horas no se produce apenas desbordamiento porque no hay suficiente volumen de agua de escorrentía. En

t=100h previamente a alcanzar el pico de caudal máximo se encuentra el río ya desbordado tanto en el caso 0 como en el caso 1. Para t=150h es cuando se alcanza el pico de caudal máximo, observándose la influencia de la infiltración ya que en las imágenes de Horton y de Green – Ampt se aprecia menor mancha de agua que en el caso 0. A pesar de esto no se evita el desbordamiento del río en sendos modelos de infiltración. En t=230h nos encontramos en la fase de descenso del hidrograma de avenida, aun con zonas inundadas en el caso 0 y casi ninguna en el caso 1. Tras este esporádico descenso de caudal puede apreciarse que este vuelve a aumentar como muestran las figuras en t=300h, produciéndose de nuevo inundaciones en el caso 0. A partir de este instante de tiempo tanto el caso 0 como el caso 1 reducen su mancha de inundación, quedando en esos dos últimos muy pocas zonas anegadas.

A continuación se presentan tres imágenes en 3D correspondientes con el modelo de lecho impermeable, el modelo de Horton y el modelo de Green – Ampt respectivamente del MDT con el pico máximo de inundación.

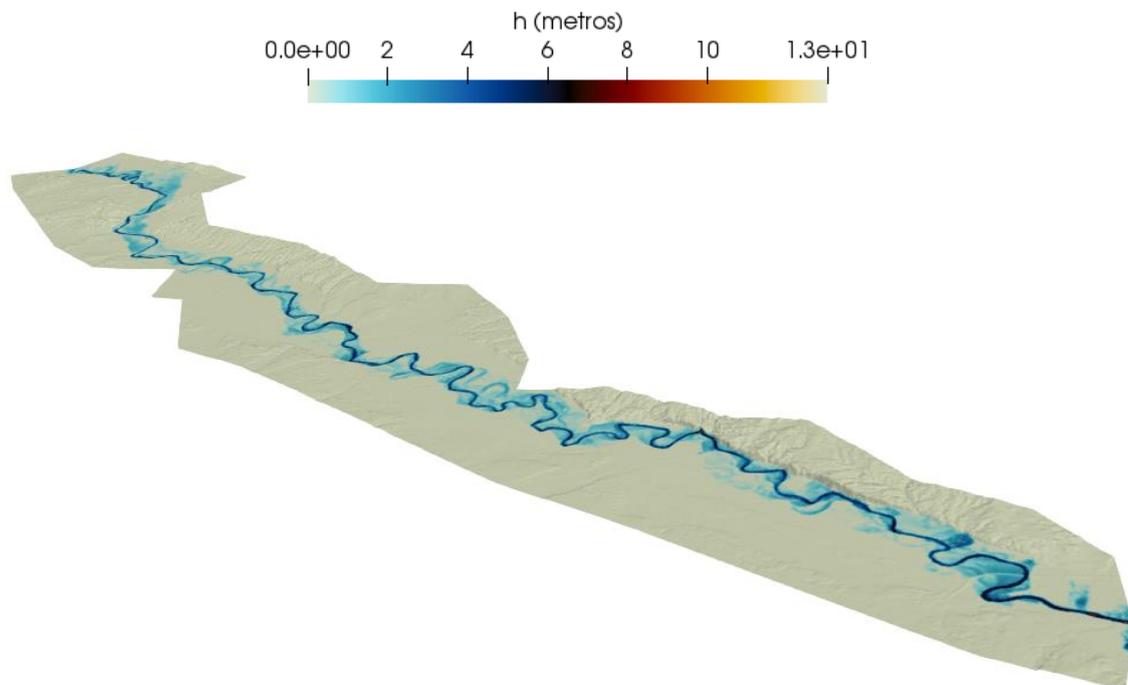


Figura 53. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso de lecho impermeable.

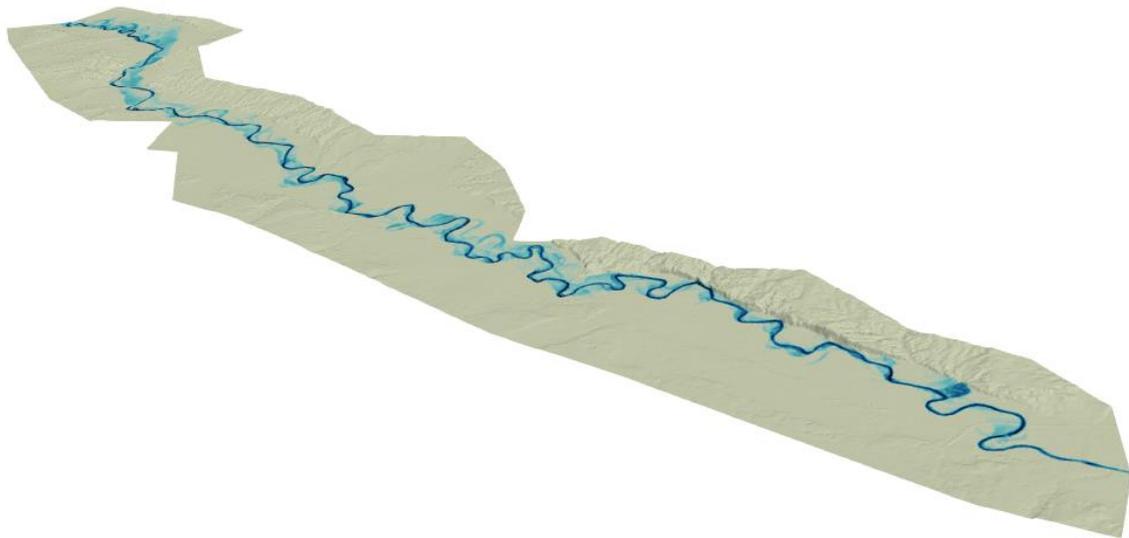


Figura 54. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso del modelo de Horton.

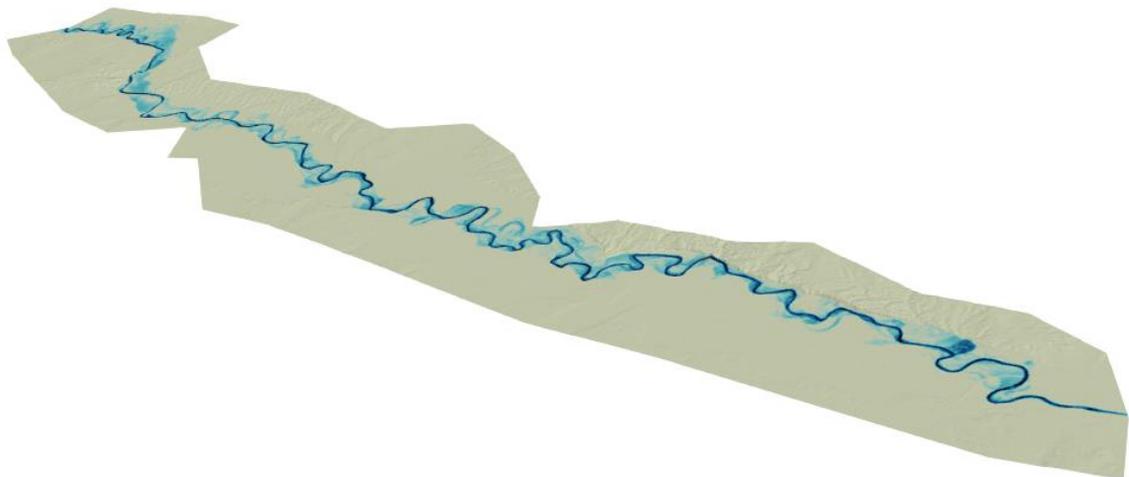


Figura 55. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2013 en el caso del modelo de Green – Ampt.

Año 2015

La simulación del episodio del año 2015 se ha realizado para un total de 500 horas de simulación.

A continuación se presentan las gráficas del caudal frente al tiempo y de la altura frente al tiempo de las tres poblaciones, obtenidas mediante las simulaciones con Riverflow2D. En primer lugar se presenta la de Tudela.

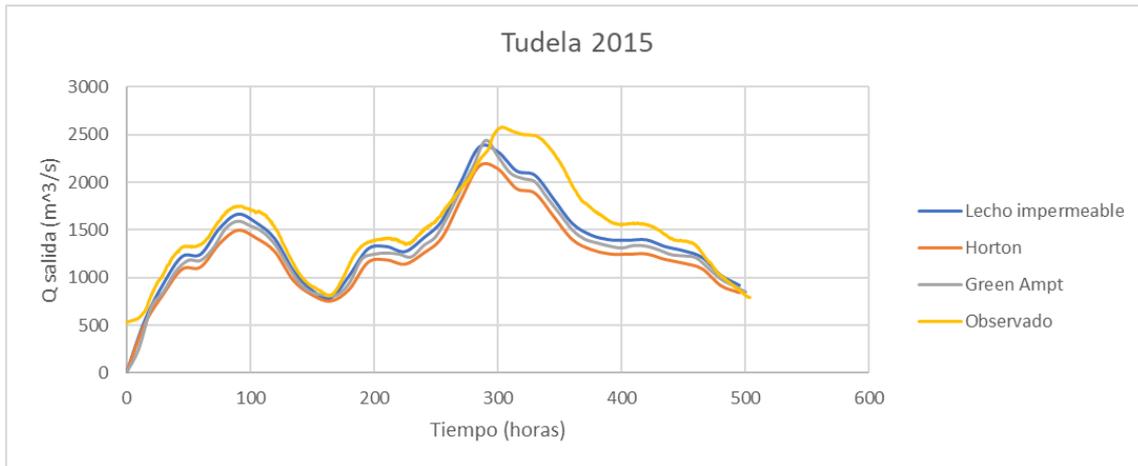


Figura 56. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2015.

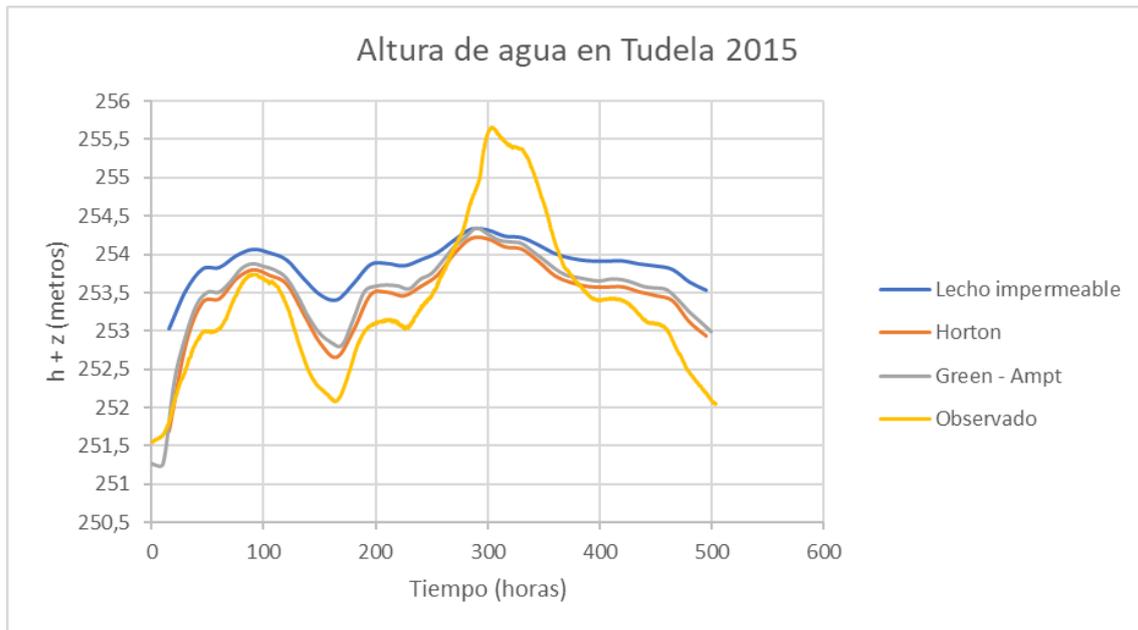


Figura 57. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2015.

En este caso, ninguno de los modelos de simulación representa el pico máximo observado en esta población. Se ha detectado un problema en la localidad de Tudela, la cual recibe el aporte de desviaciones de agua de zonas inundadas anteriormente que vuelven al cauce. El resto se encuentra bien representado. En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 67248 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: 25294 m^3

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y de altura para la siguiente localidad, Novillas.

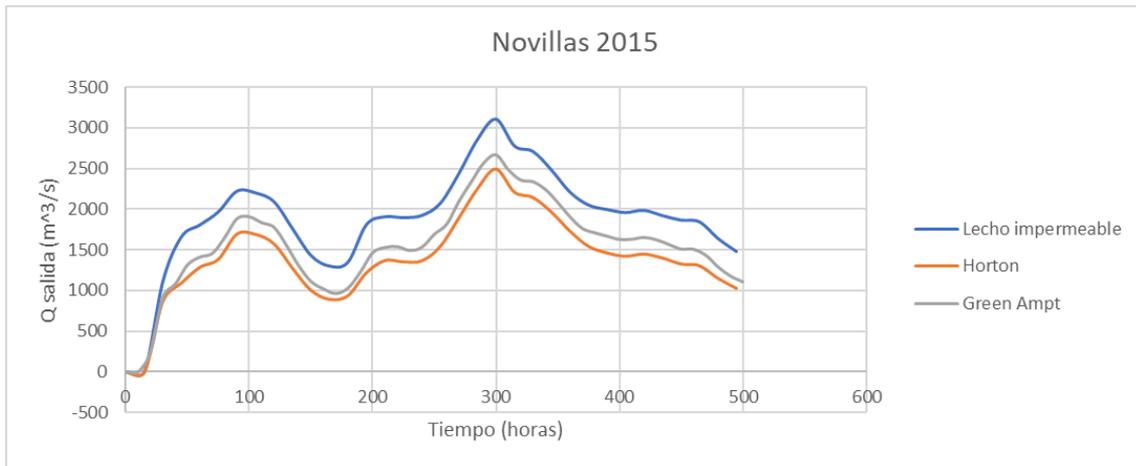


Figura 58. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2015.

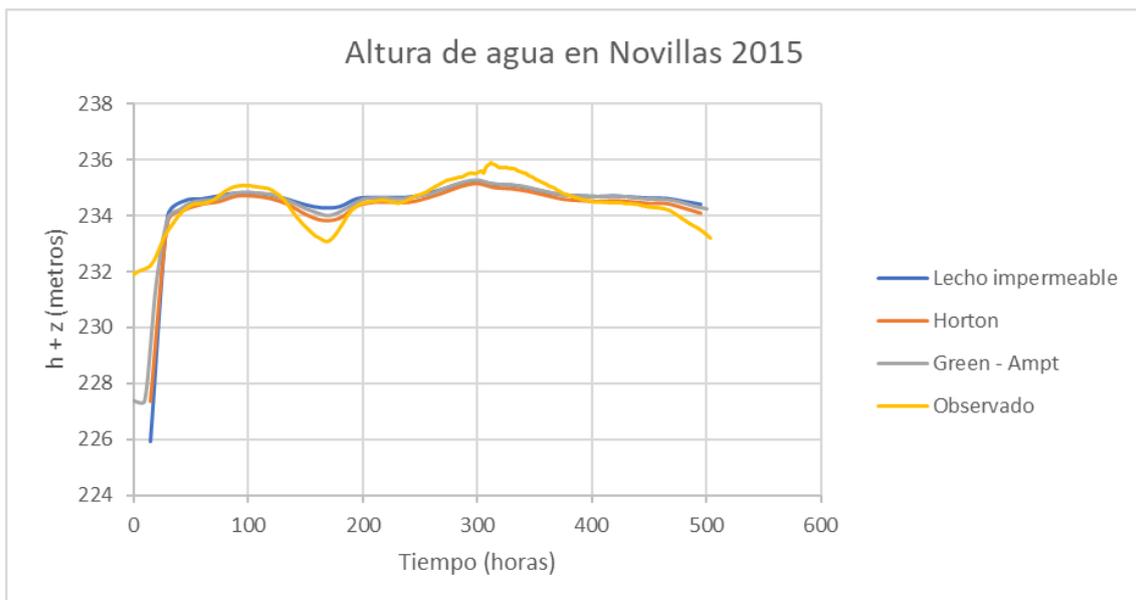


Figura 59. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2015.

Se observa que en esta localidad ya no se recoge la desviación que se tenía en Tudela por los aportes extra y los modelos de simulación reproducen todos la onda registrada de una forma similar. En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 241205 m³
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 158057 m³

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y altura para la siguiente localidad que es Alagón.



Figura 60. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2015.

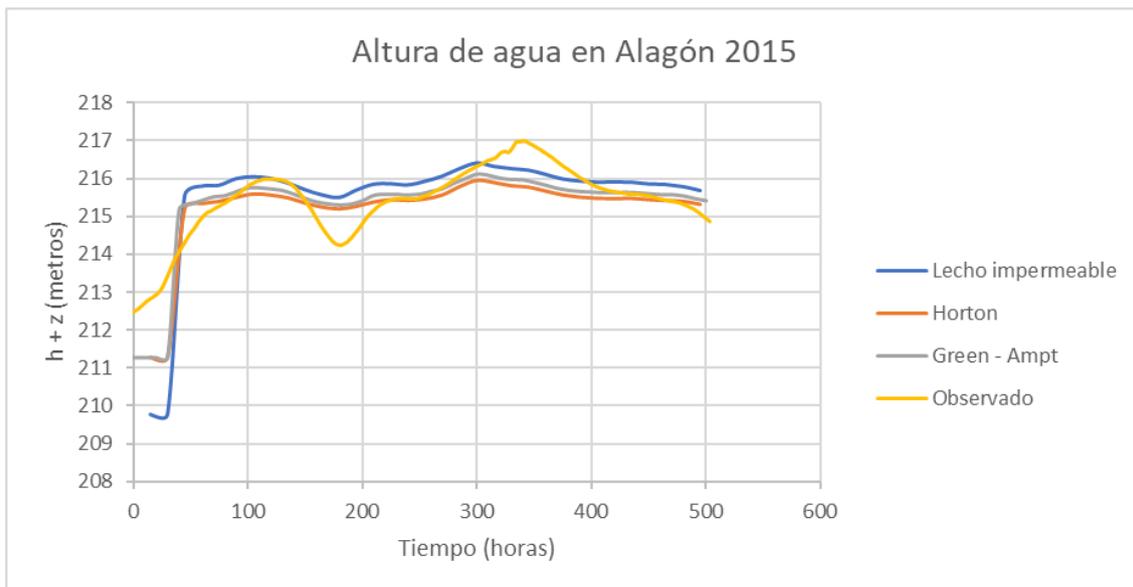


Figura 61. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2015.

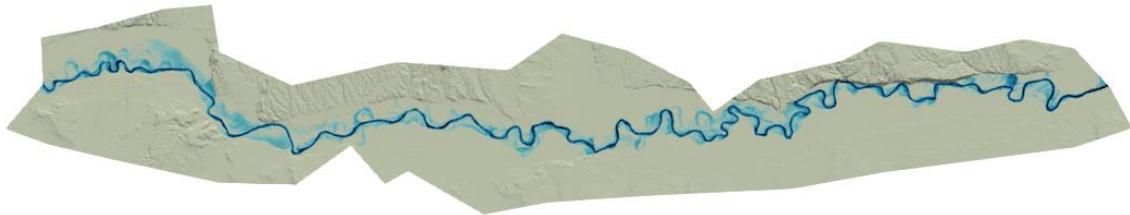
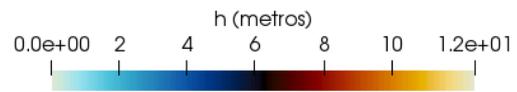
En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 152698 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 33836 m^3

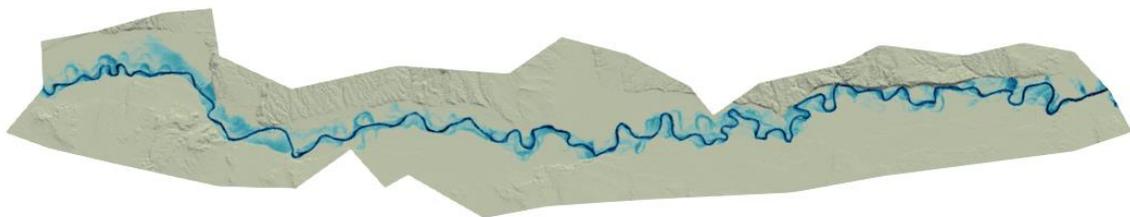
A continuación se muestran las imágenes de extensión 2D de la lámina de agua sobre el terreno obtenido mediante la simulación numérica en el caso 0 (Figura 62) y

en el caso 1 con el modelo de Horton (Figura 63) y con el modelo de Green - Ampt (Figura 64) para $t=60, 90$ y $150, 210, 300$ y $450h$.

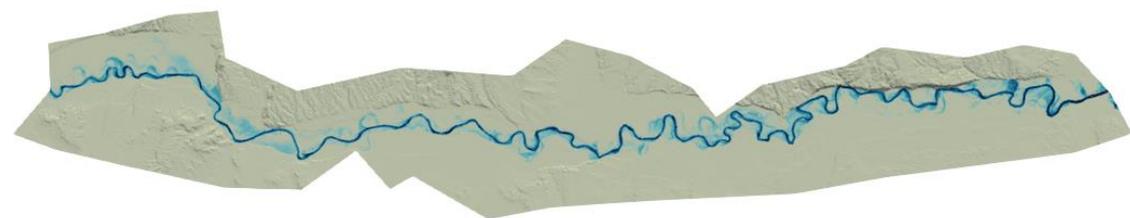
Lecho impermeable:



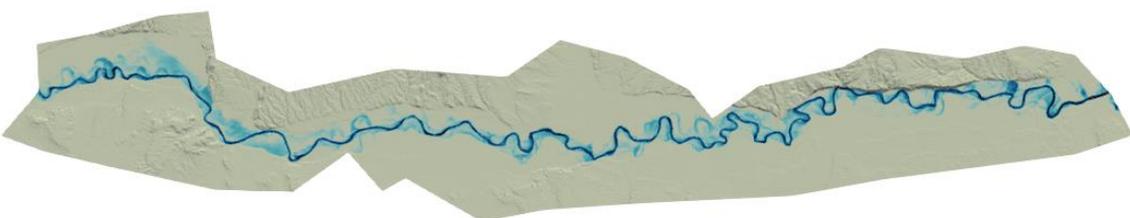
$t = 60$ horas



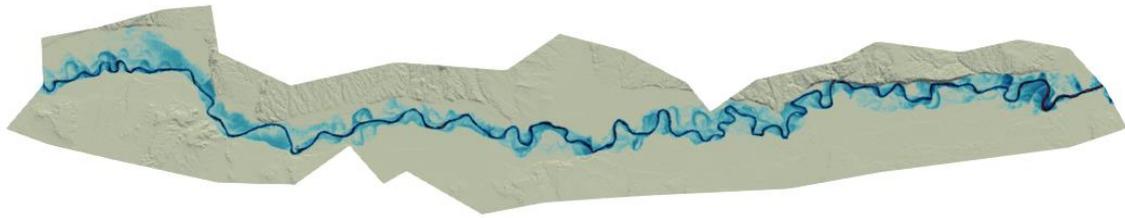
$t = 90$ horas



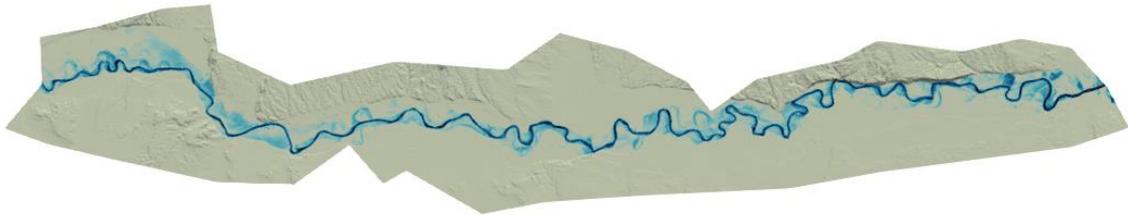
$t = 150$ horas



$t = 210$ horas



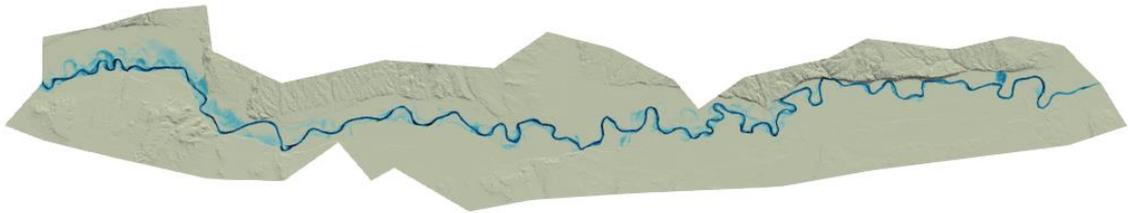
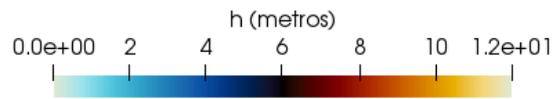
t = 300 horas



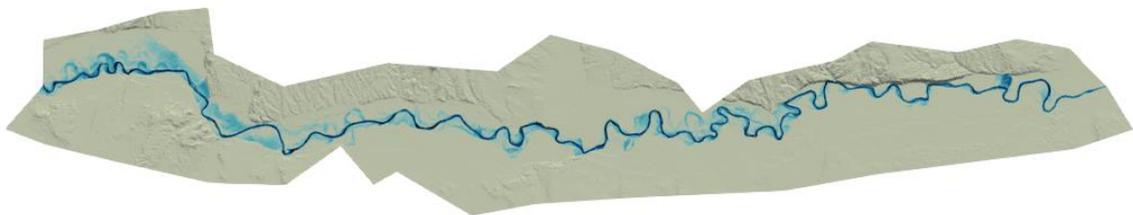
t = 450 horas

Figura 62. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo lecho impermeable.

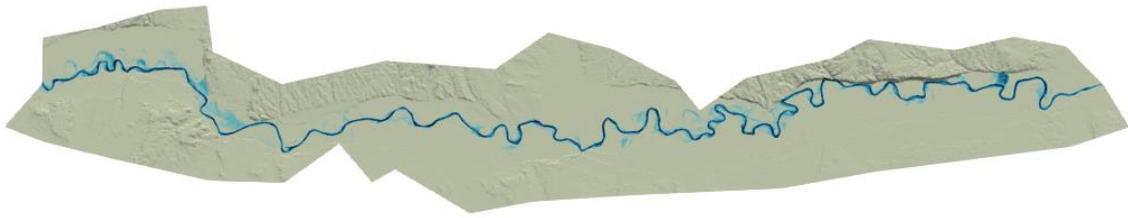
Modelo Horton:



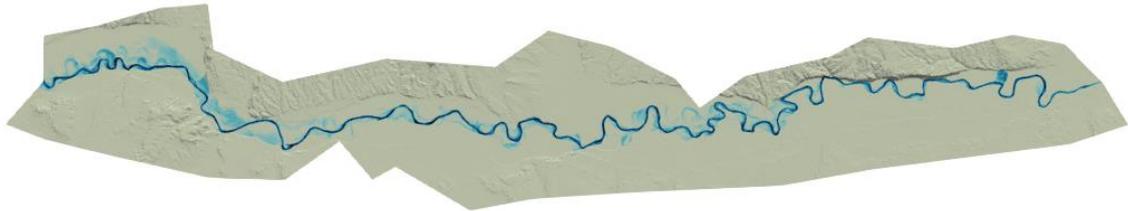
t = 60 horas



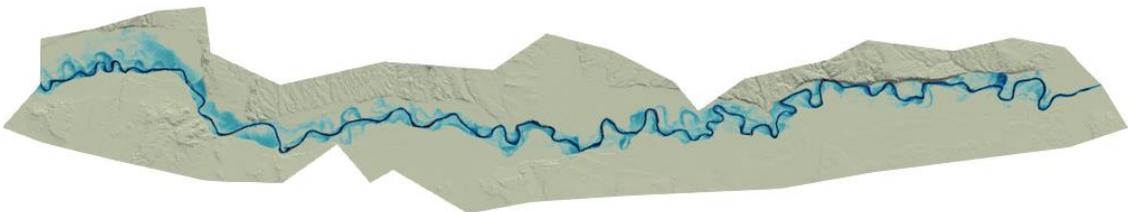
t = 90 horas



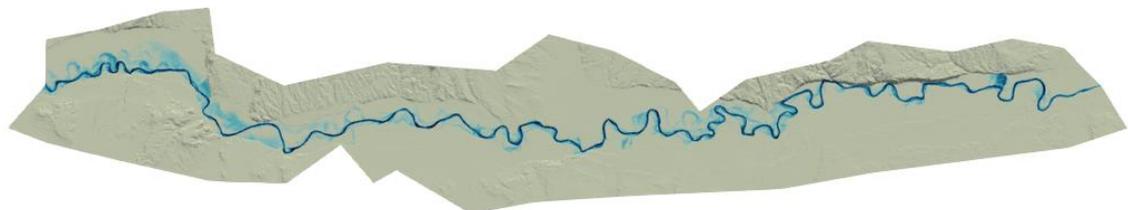
t = 150 horas



t = 210 horas



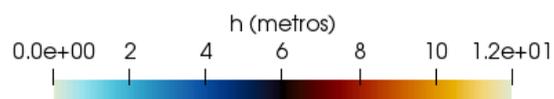
t = 300 horas

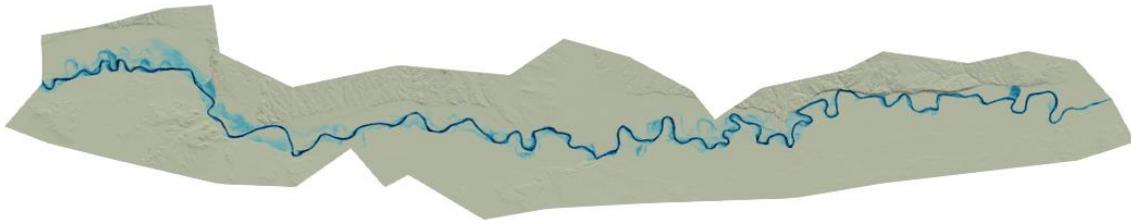


t = 450 horas

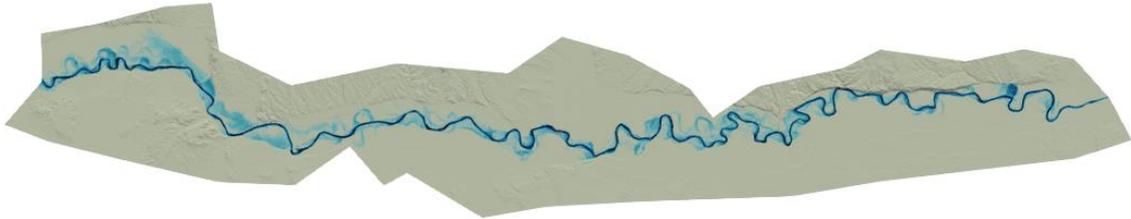
Figura 63. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo el modelo de Horton.

Modelo de Green - Ampt:

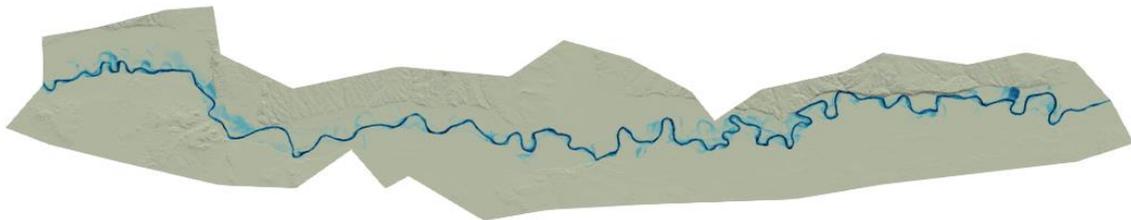




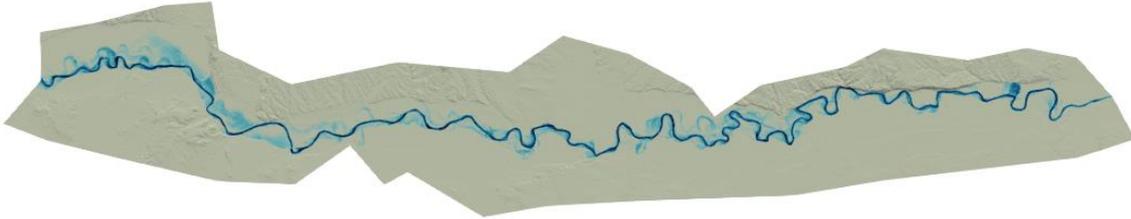
t = 60 horas



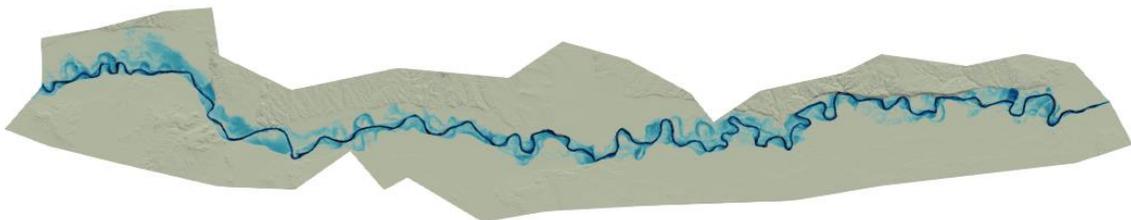
t = 90 horas



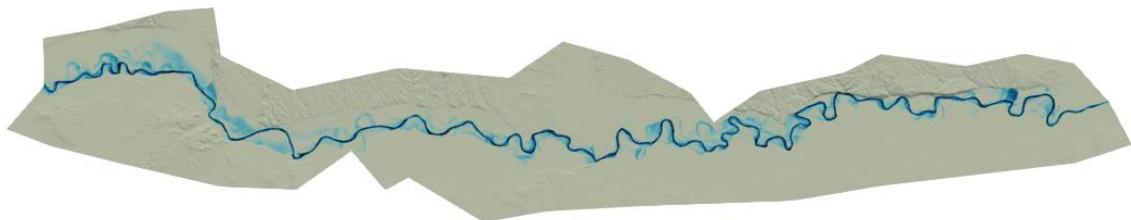
t = 150 horas



t = 210 horas



t = 300 horas



t = 450 horas

Figura 64. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2015 bajo el modelo de Green - Ampt.

De las figuras anteriores podemos observar que en $t=60h$ el río desborda el cauce en el caso de lecho impermeable mientras que con el modelo de infiltración de Horton y de Green - Ampt esto sólo ocurre en zonas puntuales y aguas arriba, debido a que el caudal circulante en este instante de tiempo ya ronda los $1400 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto puede ser debido a que el agua se está infiltrando y durante las primeras horas no se produce apenas desbordamiento porque no hay suficiente volumen de agua de escorrentía. En $t=90h$ se alcanza el primer pico de caudal de los $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente, puede apreciarse el río desbordado tanto en el caso 0 como en el caso 1. Para $t=150h$ se produce una disminución en el caudal circulante, fijándonos en las manchas de inundación observamos que en el caso 0 sí que se ha producido desbordamiento pero en el caso 1 salvo en zonas puntuales no ha habido desborde. En $t=300h$ encontramos el segundo pico de caudal de la avenida, en el que tanto en el caso 0 como el caso 1 se aprecian diversas manchas de inundación. Tras este pico de caudal empieza el descenso como puede en $t=450h$, en el que ya solo quedan escasas zonas anegadas.

A continuación se presentan tres imágenes en 3D correspondientes con el modelo de lecho impermeable, el modelo de Horton y el modelo de Green – Ampt respectivamente en el tiempo correspondiente al pico máximo de inundación.

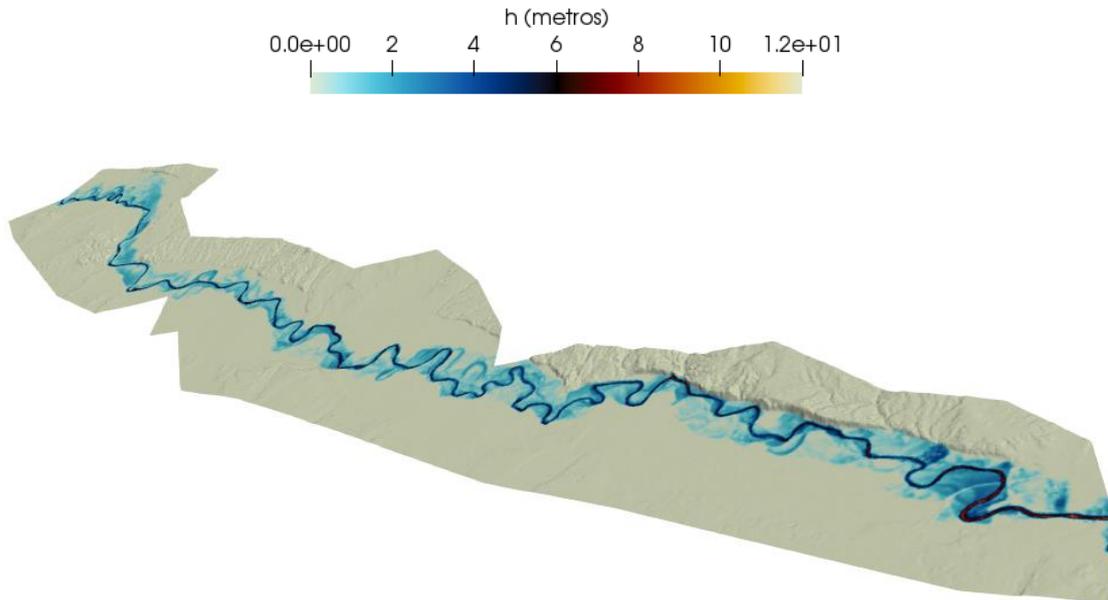


Figura 65. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso de lecho impermeable.

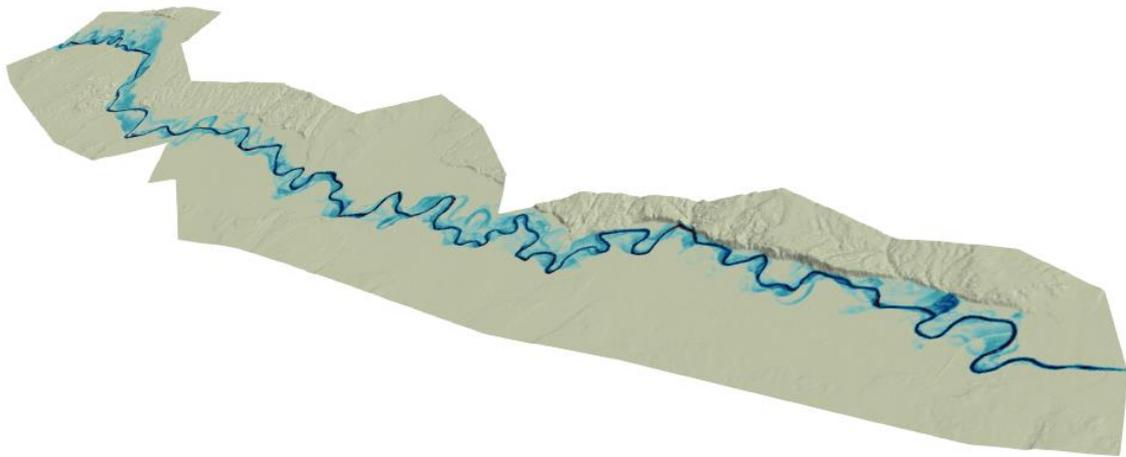


Figura 66. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso del modelo de Horton.

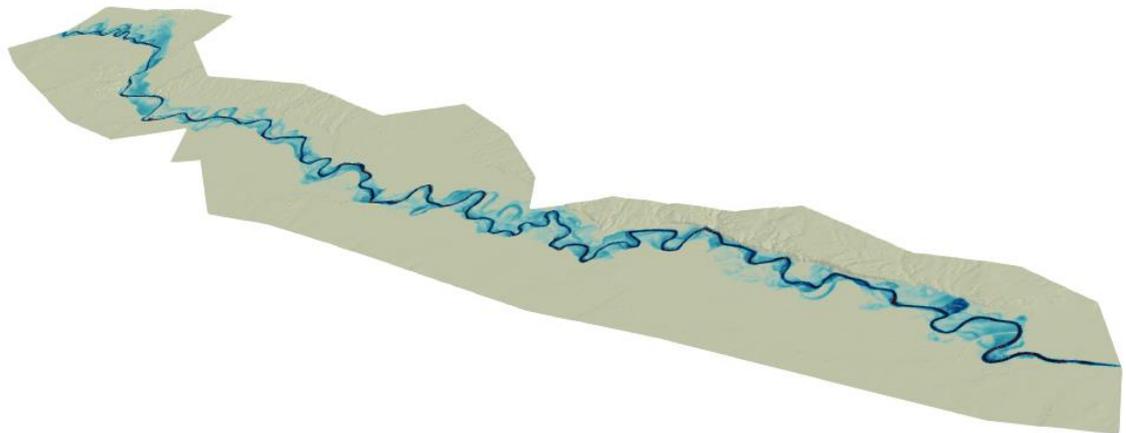


Figura 67. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2015 en el caso del modelo de Green – Ampt.

Año 2018:

La simulación del episodio del año 2018 se ha realizado para un total de 430 horas de simulación, tiempo suficiente para observar todas las fluctuaciones que sufre la avenida en este año. Para este año no se disponen de datos en las poblaciones sonda de Tudela, Novillas y Alagón.

A continuación se presentan las gráficas del caudal frente al tiempo y de la altura frente al tiempo de las tres poblaciones, obtenidas mediante las simulaciones con Riverflow2D. En primer lugar se presenta la de Tudela.

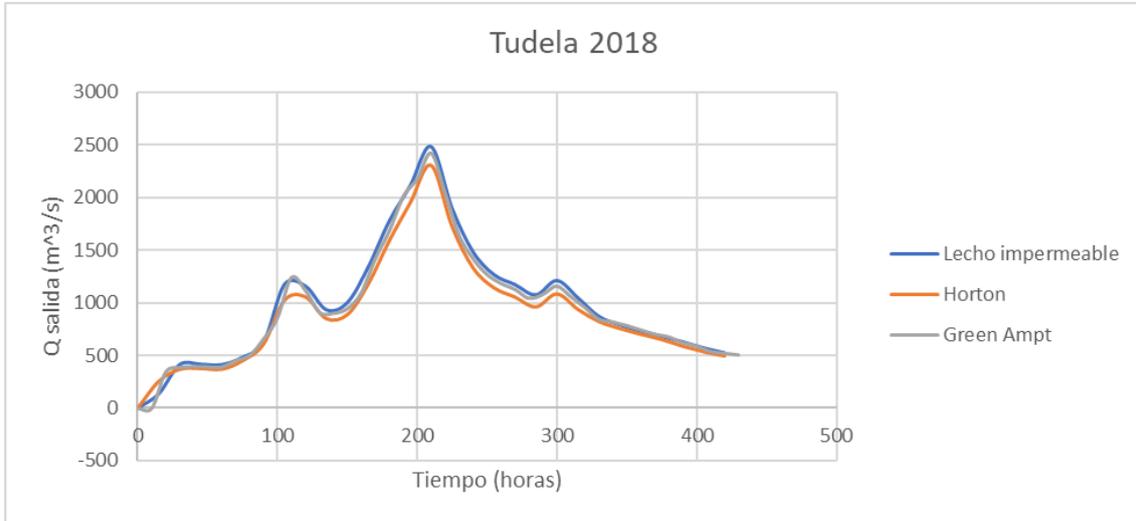


Figura 68. Gráfica caudal frente al tiempo, Tudela 2018.

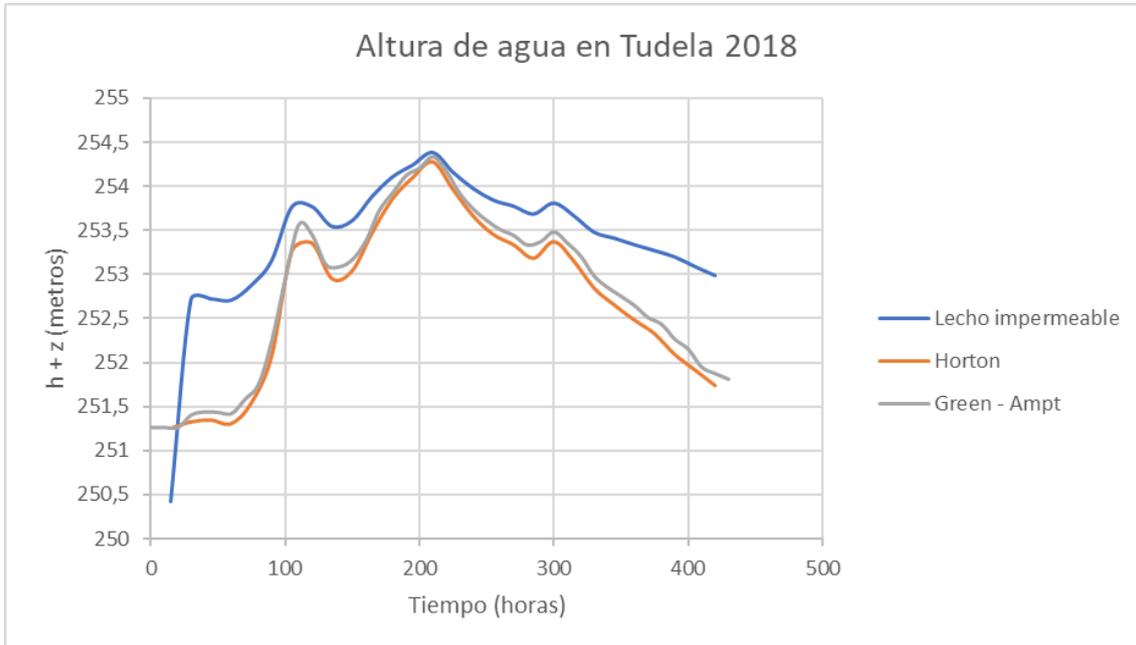


Figura 69. Gráfica altura frente al tiempo, Tudela 2018.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: $35461 m^3$
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : $8574 m^3$

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y altura para la siguiente localidad, Novillas.

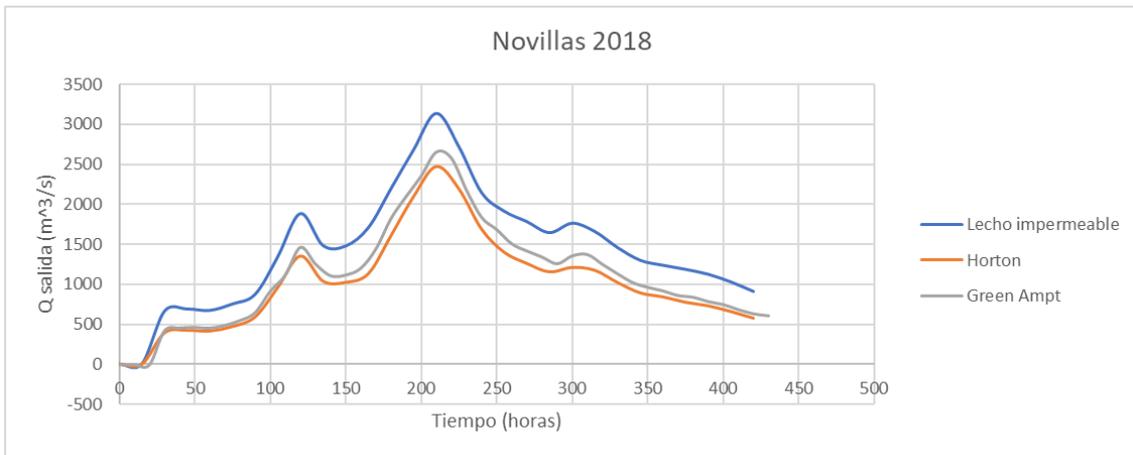


Figura 70. Gráfica caudal frente al tiempo, Novillas 2018.

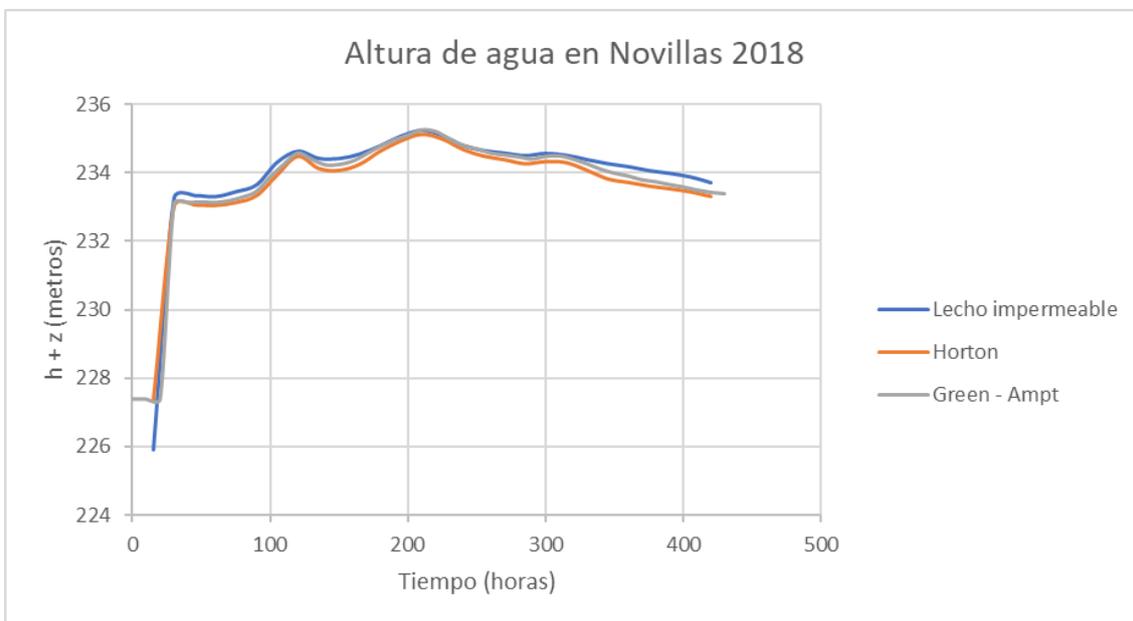


Figura 71. Gráfica altura frente al tiempo, Novillas 2018.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

- Horton vs lecho impermeable: 174707 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 126681 m^3

A continuación se presenta la evolución temporal de caudal y altura para la siguiente localidad que es Alagón.

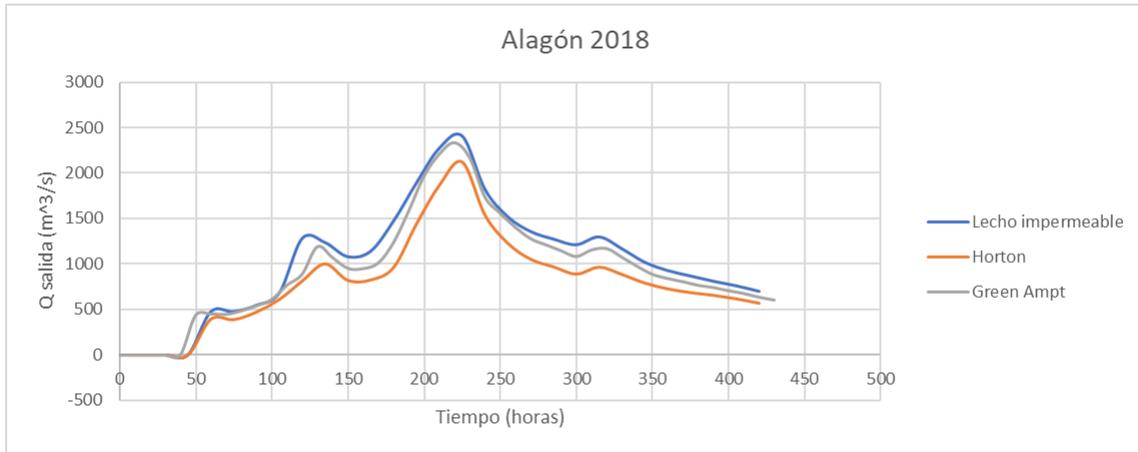


Figura 72. Gráfica caudal frente al tiempo, Alagón 2018.

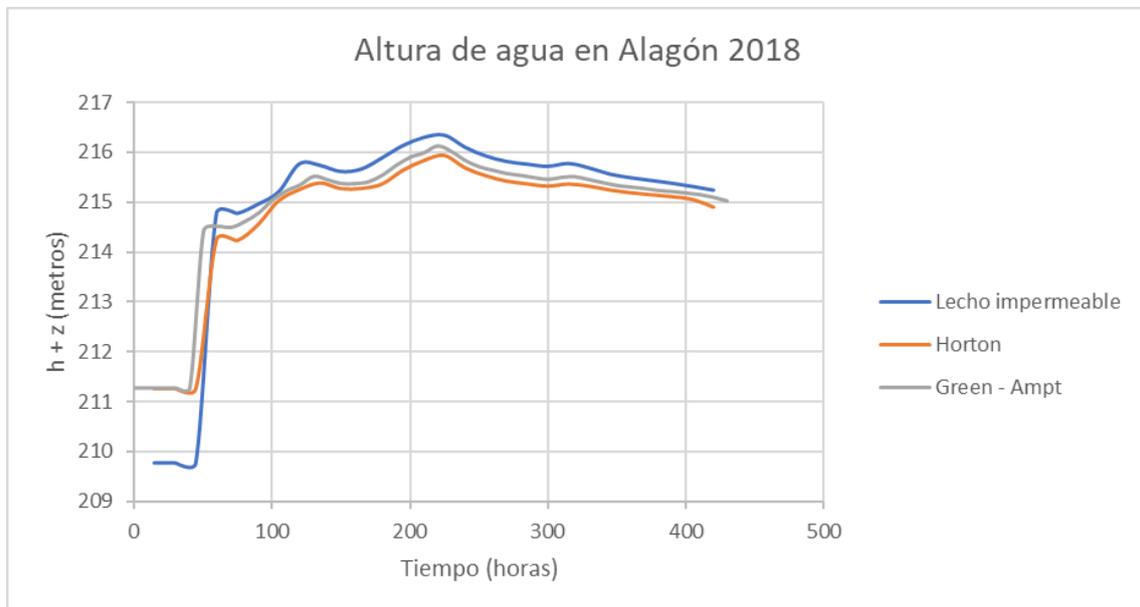


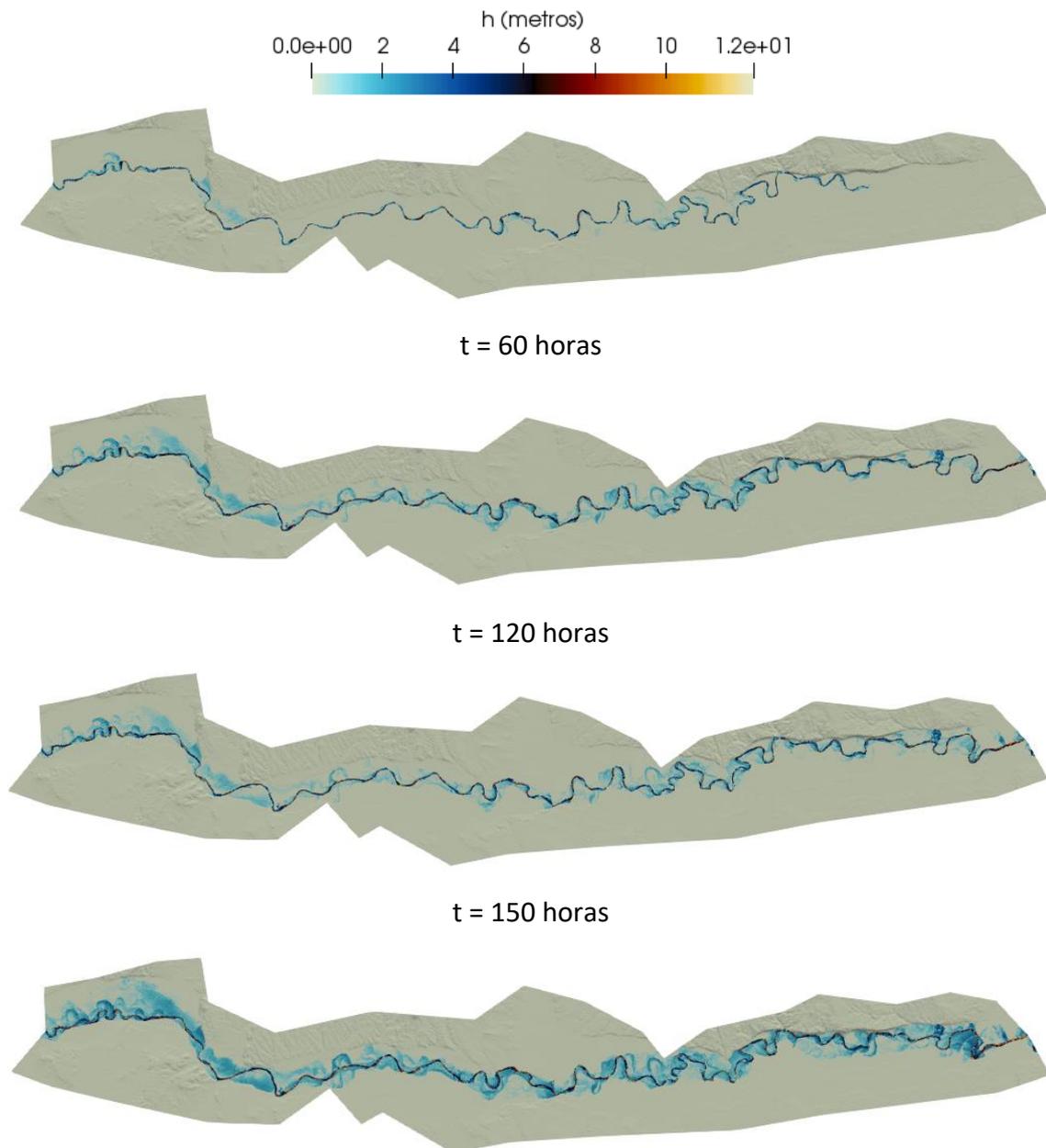
Figura 73. Gráfica altura frente al tiempo, Alagón 2018.

En lo que se refiere a volumen de agua infiltrada en el suelo en comparación con el lecho impermeable:

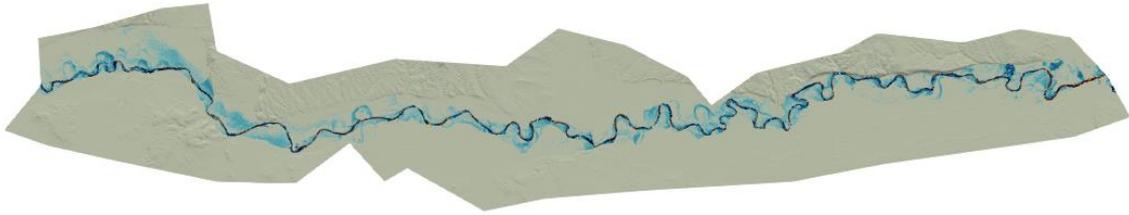
- Horton vs lecho impermeable: 65066 m^3
- Green – Ampt vs lecho impermeable: : 24526 m^3

A continuación se muestran las imágenes de extensión 2D de la lámina de agua sobre el terreno obtenido mediante la simulación numérica en el caso 0 (Figura 74) y en el caso 1 con el modelo de Horton (Figura 75) y con el modelo de Green - Ampt (Figura 76) para $t=60, 120$ y $150, 220, 300$ y 420h .

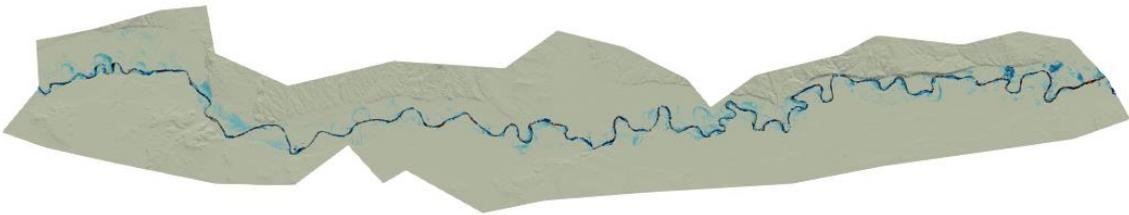
Lecho impermeable:



t = 210 horas



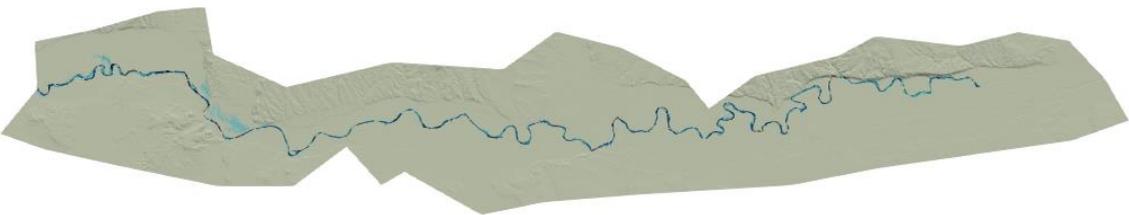
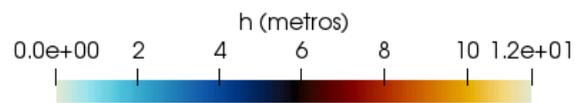
t = 300 horas



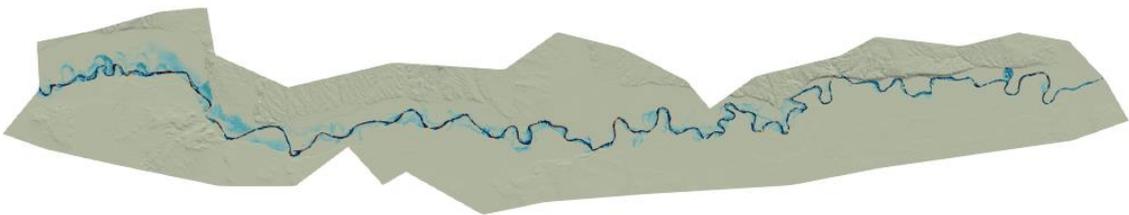
t = 420 horas

Figura 74. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo lecho impermeable.

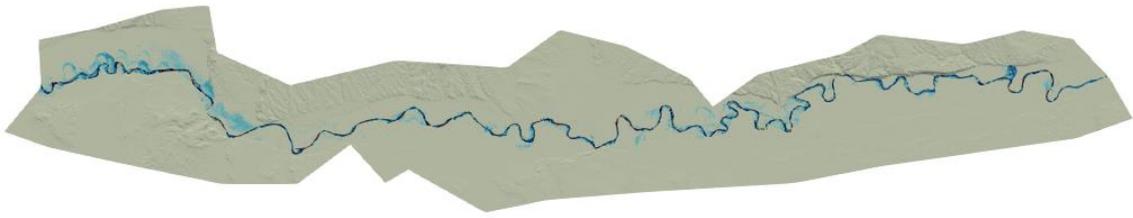
Modelo de Horton:



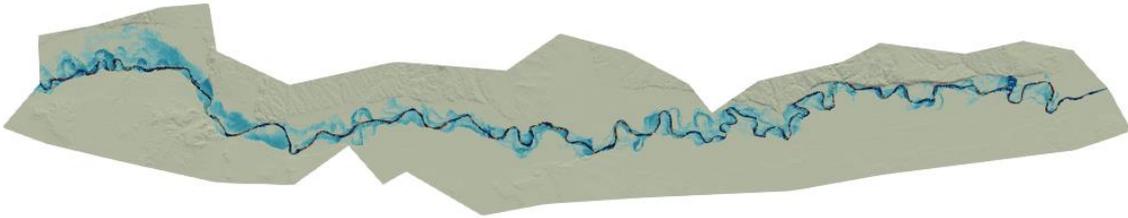
t = 60 horas



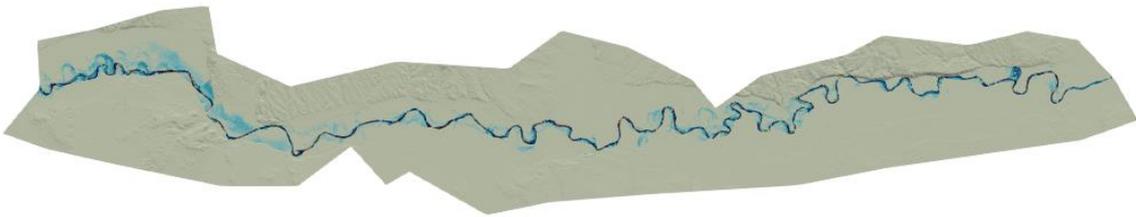
t = 120 horas



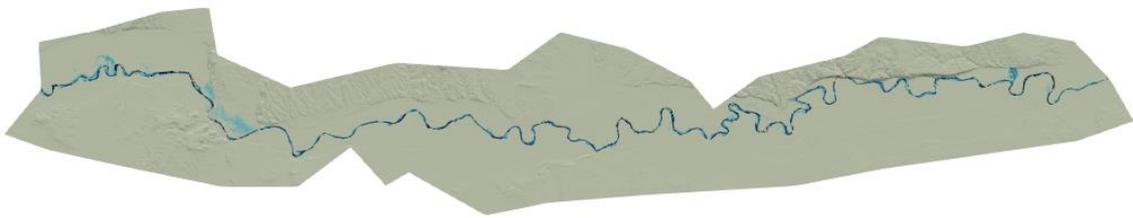
t = 150 horas



t = 210 horas



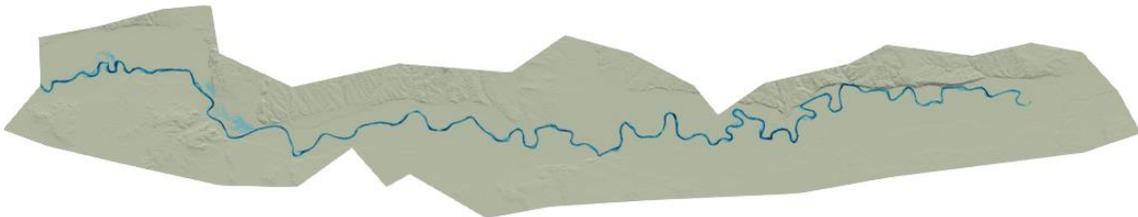
t = 300 horas



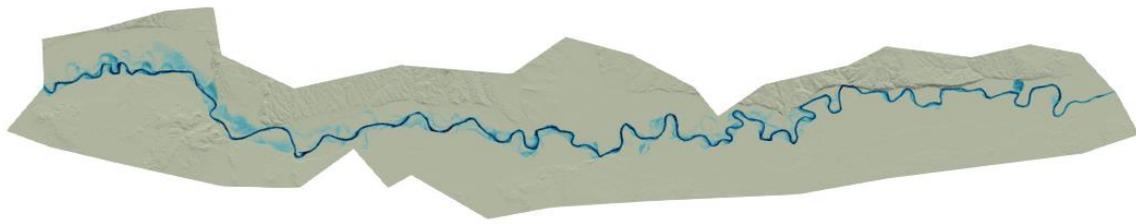
t = 420 horas

Figura 75. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo el modelo de Horton.

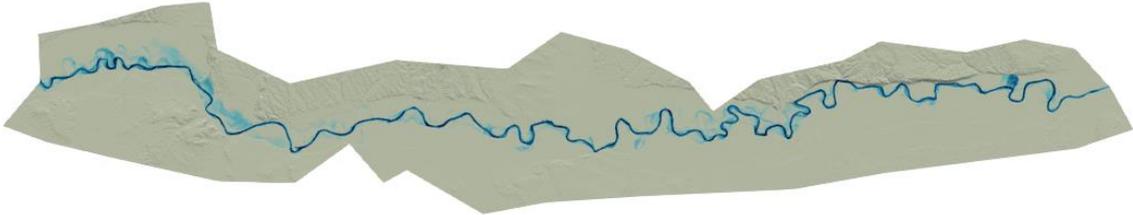
Modelo de Green - Ampt:



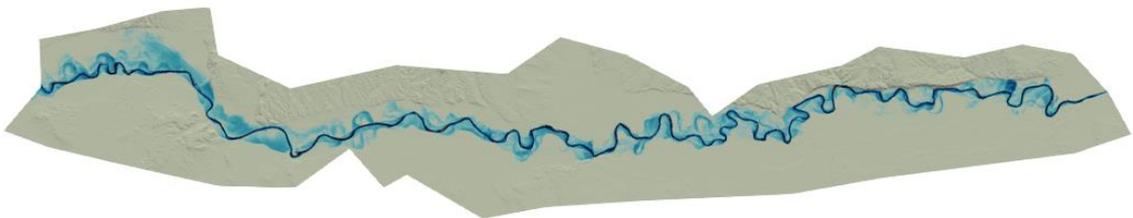
t = 60 horas



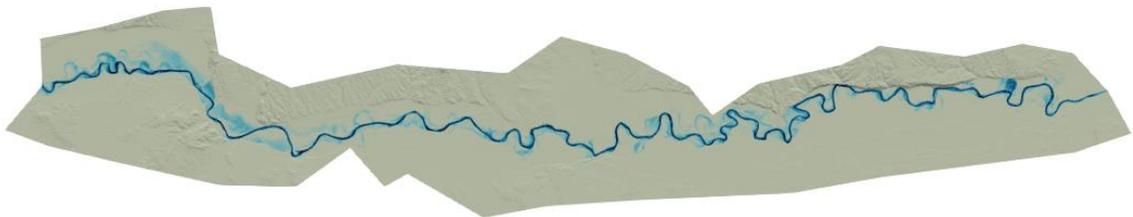
t = 120 horas



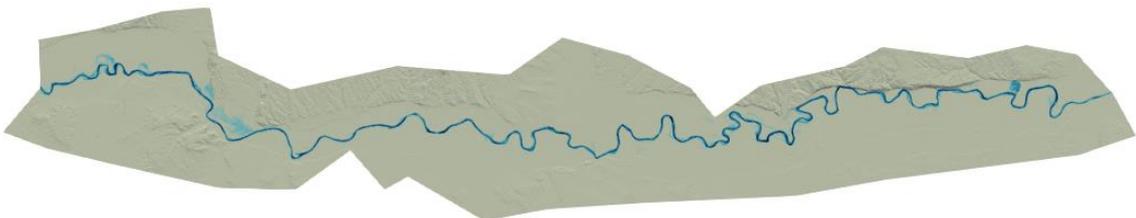
t = 150 horas



t = 210 horas



t = 300 horas



t = 420 horas

Figura 76. Mapas de área inundada en diferentes tiempos en la avenida de 2018 bajo el modelo de Green - Ampt.

De las figuras anteriores podemos observar que en $t=60h$ el río todavía no se ha desbordado ni en el caso 0, pues el caudal en ese instante no excede demasiado el medio circulante. Para el siguiente instante de tiempo, $t=120h$ llega el primer pico de caudal de los dos que se observan en esta avenida, para este pico en el caso 0 se aprecian considerables manchas, significando que el río ya ha desbordado en algunos

puntos, para el caso 1 también se aprecian manchas en zonas puntuales y sobre todo aguas arriba, ya que aguas abajo aún no ha desbordado. En $t=150h$ se aprecia una reducción del caudal, pues tras el primer pico desciende para volver a subir hasta alcanzar el segundo y mayor pico de la avenida. Este segundo pico llega en $t=210h$, apreciándose el río desbordado en todos los casos, junto con la avenida de 2003 en esta se registra el pico más alto de todas. En $t=300h$ ya ha empezado la vuelta a la normalidad con la disminución del caudal punta registrado en la avenida, en este instante de tiempo podemos observar la trascendencia de la infiltración, ya que en el caso 0 se aprecian diversas zonas anegadas y por el contrario en el caso 1, tanto en Horton como en Green – Ampt puede apreciarse la zona de inundación sin apenas manchas, excepto en zonas puntuales. Tras esto en $t=420h$ podemos observar cómo sigue disminuyendo el caudal, quedando pocas zonas inundadas en el caso 0 y ninguna en el caso 1.

A continuación se presentan tres imágenes en 3D correspondientes con el modelo de lecho impermeable, el modelo de Horton y el modelo de Green – Ampt respectivamente en el tiempo de máxima inundación.

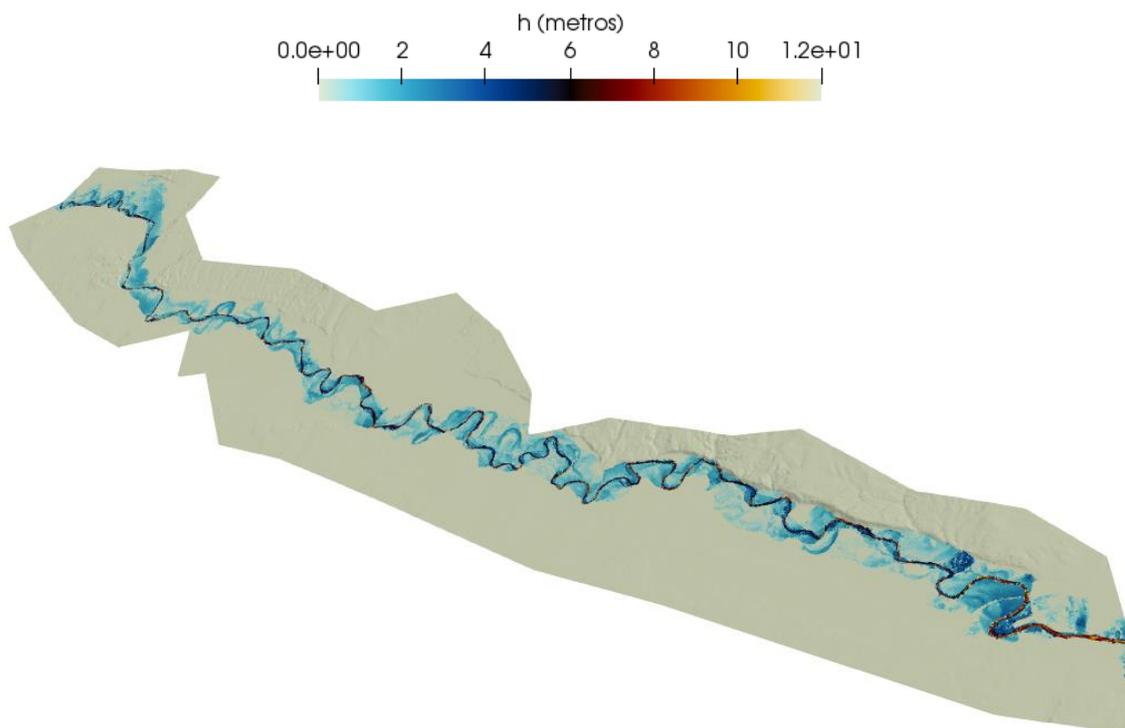


Figura 77. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso de lecho impermeable.

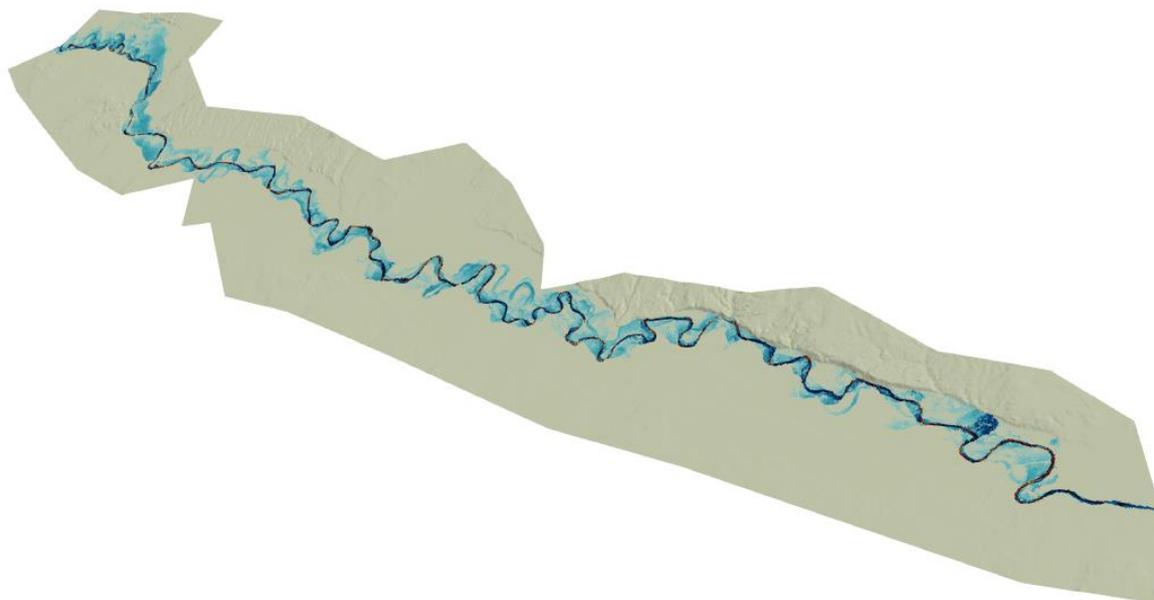


Figura 78. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso del modelo de Horton.

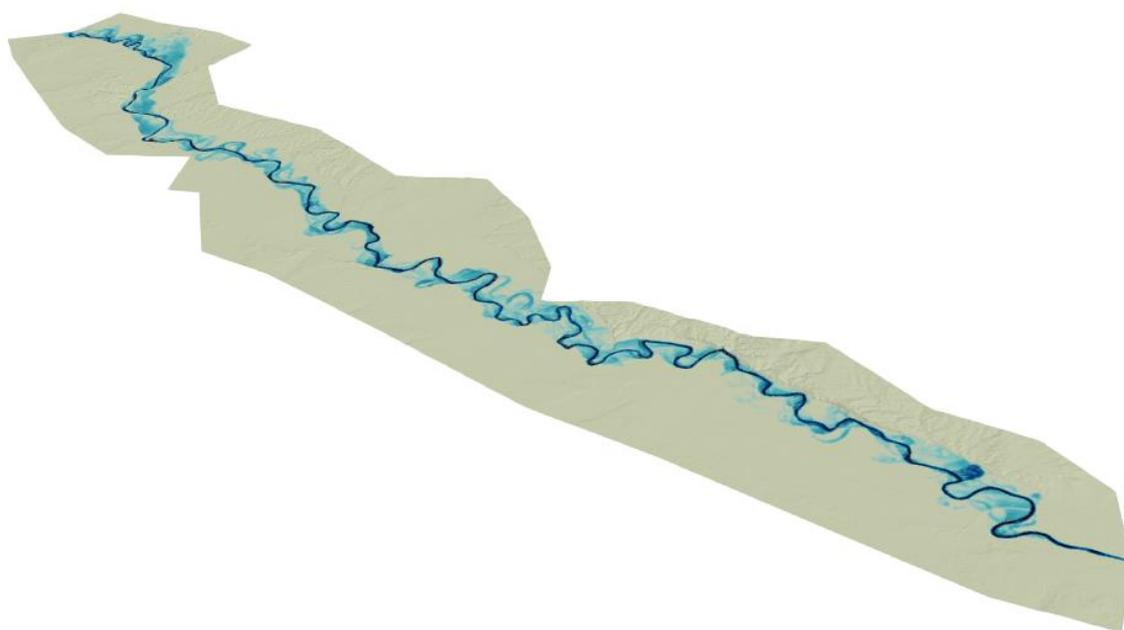


Figura 79. Vista 3D de la huella máxima de inundación sobre el MDT para la avenida de 2018 en el caso del modelo de Green – Ampt.

Anexo III, Preparación de datos en QGIS

El programa que se ha usado para tratar el pre-procesado de datos y elaborar el dominio de cálculo para posteriormente realizar las simulaciones numéricas del flujo de agua, ha sido QGIS.

QGIS es un potente software para el análisis de información geográfica de libre distribución. Este sistema de software integrado con GMSH (mallador) incorpora funciones interactivas para generar y refinar la malla de volúmenes finitos y además utiliza las herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica) para construir una representación de alto nivel del modelo a tratar.

QGIS permite la asignación de condiciones de contorno (en el caso que ocupa el presente trabajo los hidrogramas de avenida), valores de rugosidad y otros parámetros como pueden ser la tasa de infiltración, de esta forma este sistema permite administrar eficientemente todo el proceso de modelado.

QGIS también ofrece la posibilidad de la visualización de resultados obtenidos mediante un conjunto de herramientas de visualización que incluyen renderización, para la correcta representación de los resultados generados por el modelo de simulación. A pesar de esta posibilidad que nos permite el programa QGIS, en el presente trabajo se ha optado por la utilización de otro software para la visualización de resultados, Paraview (Anexo V). Esto es así porque Paraview nos permite una mejor interpretación de estos resultados ya que cuenta en su sistema con un modelo 3D más intuitivo que el visor de QGIS (trabaja en 2D), aparte de un gran sistema de representación de flujos vectoriales entre otras muchas características disponibles.

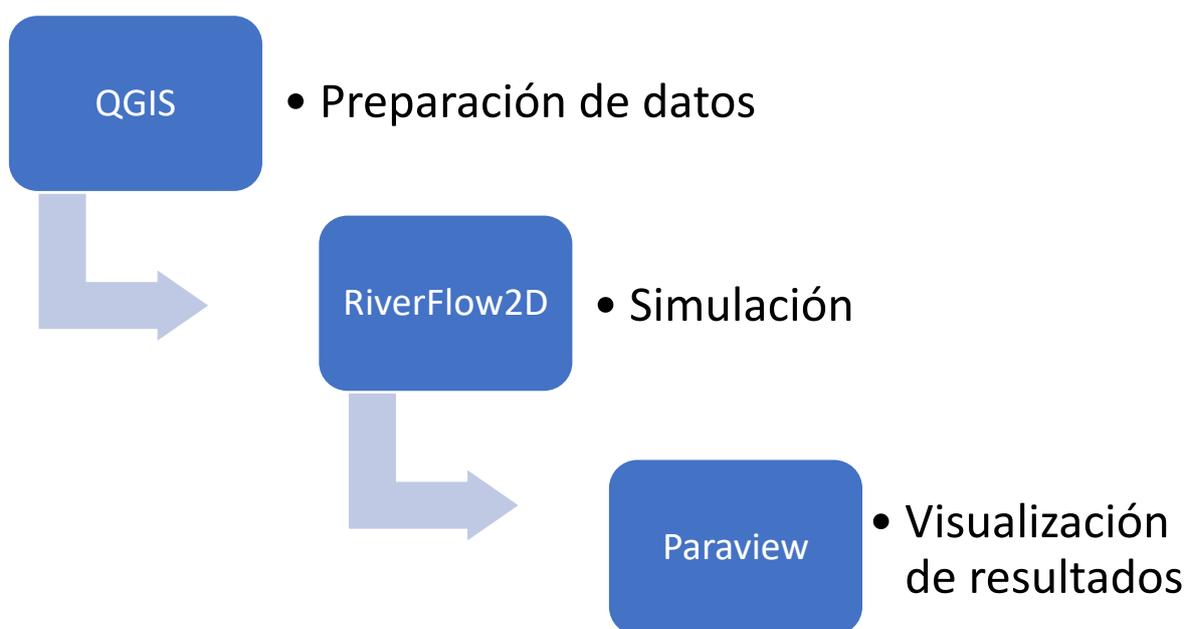


Figura 80. Diagrama de flujo, secuenciación de trabajo.

Cabe destacar que QGIS únicamente se utiliza para el tratamiento y preparación de datos; ya que el motor de cálculo encargado de calcular y resolver el flujo a través de las variables es RiverFlow2D (Anexo IV), trabajando en concordancia con QGIS.

A continuación se procede a explicar todos los pasos efectuados en el programa QGIS para elaborar la preparación de los datos.

En primer lugar, una vez que hemos cargado el MDT en el programa (QGIS crea el ráster automáticamente producto de la interpolación predeterminada) se procede a cambiar el tipo de renderizador, ya que por defecto el programa nos carga el MDT en tonos de degradado de grises siendo difícil su correcta interpretación. El nuevo tipo de renderizador elegido es la *unibanda pseudocolor* con 30 clases distintas, es decir, un abanico de 30 colores distintos para poder diferenciar bien la cota de cada celda del MDT en referencia al nivel del mar (z_b), desde el valor mínimo al valor máximo de cota que contiene el MDT.

A continuación se exponen las dos figuras con distinto tipo de renderizador para apreciar su notable diferencia.

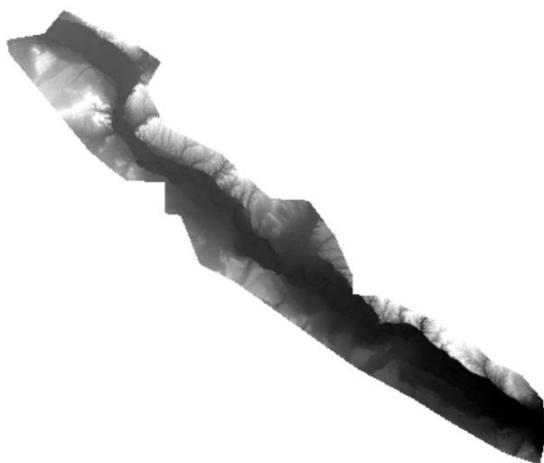


Figura 81. MDT con renderizador en escala de grises.

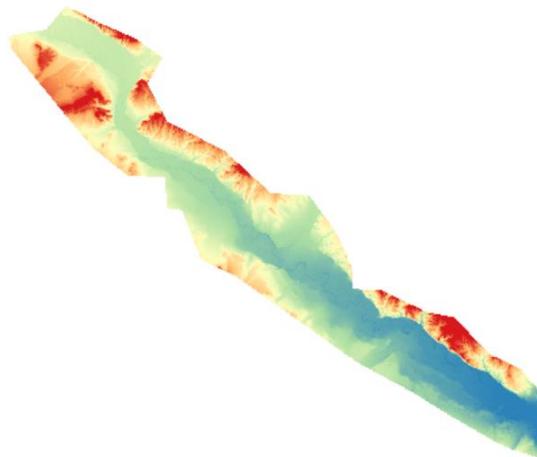


Figura 82. MDT con renderizador en unibanda pseudocolor.

Una vez que ya se ha ajustado el MDT al renderizador adecuado debe crearse el dominio de cálculo sobre el propio MDT.

Para realizar este proceso el programa cuenta con una capa denominada *DomainOutline* que mediante su edición nos permitirá diseñar el polígono cerrado (siempre en el interior del MDT lógicamente) que delimitará el dominio de cálculo. Mediante la herramienta *Conmutar edición* y seleccionando la opción *Añadir objeto espacial* se procede a dibujar los puntos que unidos formarán el dominio de cálculo.

Una vez hemos dibujado el polígono, el programa exige que se le introduzca un valor para el tamaño referencia de la longitud del lado que queremos que tengan las celdas que componen la malla de cálculo (*CellSize*). Como se ha comentado en el apartado del trabajo de *Datos previos – Malla de cálculo*, cuanto más pequeño es este valor, más refinada es la malla de cálculo. En este caso se ha introducido un valor de 95m, teniendo en cuenta que después se puede realizar un refinamiento de la malla en las zonas que se crean convenientes del dominio.

Una vez definido el dominio de cálculo, se debe generar la malla de cálculo formada por elementos triangulares, mediante el botón *Generar la Malla Trimesh*.

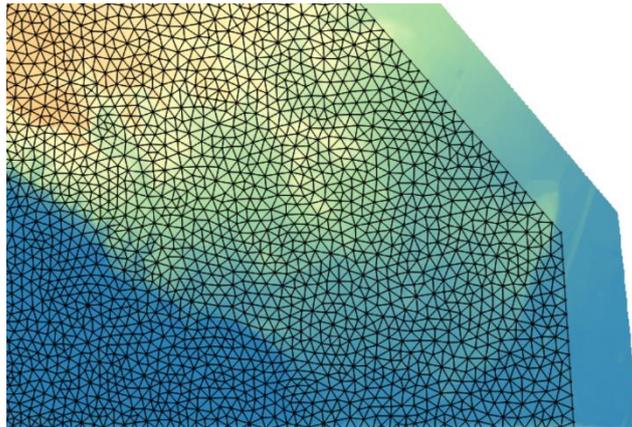


Figura 83. Detalle de la malla triangular no estructurada usada en el cálculo.

Como puede observarse en la figura superior, desde el contorno externo del mallado hasta el contorno del MDT queda un espacio, esto es así dado que el programa a la hora de mallar realiza el mallado sobre el polígono establecido previamente como dominio de cálculo, y éste no se ha realizado justo hasta el extremo del MDT porque puede inducir a problemas de identificación de celdas con cota y además el trozo restante entre el polígono y el MDT no aporta mucho al cálculo, ya que, el agua nunca va a llegar a ese extremo (siendo éste ocupado casi en su totalidad por terreno con cotas de 270 a 460 metros de altura sobre el nivel del mar).

Una vez generada la malla de elementos triangulares se procede al incremento de la densidad de celdas por el cauce del río (refinamiento). El programa QGIS ofrece dos opciones para realizarlo.

La primera opción consiste en el dibujo de un polígono cerrado sobre el cual queremos que se incremente la densidad de mallado y la segunda opción (opción que se ha ejecutado en el presente trabajo) consiste en la realización de una línea poligonal abierta sobre la parcela del dominio en la que queremos incrementar la densidad de mallado, que en este caso ha sido a lo largo de todo el cauce del río. Para realizar esta acción el programa QGIS tiene una capa llamada *MeshDensityLine* que es la que nos permite activar la edición del refinamiento de la malla.

Si bien cuando se ha terminado de realizar el polígono del dominio se nos exigía introducir un tamaño medio de las celdas, en esta ocasión tras realizar el polígono o la línea de refinamiento se nos exige lo mismo, lógicamente el valor que se introduzca en esta ocasión debe ser menor que el introducido anteriormente para lograr la reducción del tamaño de las celdas. En este caso el valor que se ha introducido para el refinamiento es de 70 (el anterior era de 95).

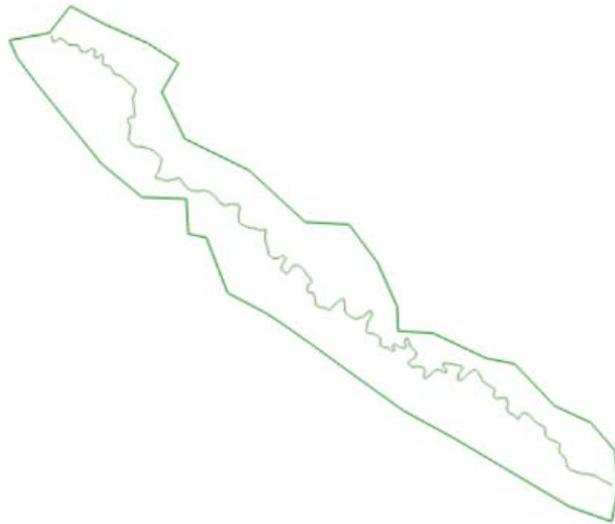


Figura 84. Línea de refinamiento de la malla en el centro del cauce.

En la imagen superior se puede observar la línea de refinamiento realizada para el caso que nos ocupa, siguiendo fielmente el recorrido del cauce del río. Esta línea está formada a base de nodos establecidos con la densidad adecuada para que el trazo se efectuara con la correspondiente precisión.

Como se ha comentado en el subapartado de *Malla de cálculo* correspondiente al apartado *Datos de partida* se han realizado dos casos (caso 0 y caso 1). Las características más relevantes de estos casos son las siguientes:

Malla del caso 0:

- 319887 celdas y 161124 nodos
- Área de malla total: 1020 Km^2
- Área de la celda promedio: 3200 m^2
- Tamaño medio de la celda (altura o anchura): 80 m
- Área de la celda más pequeña: 613.97 m^2
- Área de la celda más grande: 7708.78 m^2

Malla del caso 1:

- 410776 celdas y 206581 nodos
- Área de malla total: 1020 Km²
- Área de la celda promedio: 2490 m²
- Tamaño medio de la celda (altura o anchura): 70.6 m
- Área de la celda más pequeña: 772.55 m²
- Área de la celda más grande: 7543.01 m²

Tras realizarse la malla y su refinamiento, el paso siguiente consiste en introducir en el dominio las condiciones de contorno, en el entorno del programa QGIS se corresponden con la capa llamada *BoundaryConditions*.

En este caso, las condiciones de contorno se corresponden en la entrada del dominio (aguas arriba) con los hidrogramas de avenida de los episodios a simular ocurridos en distintos años y en la salida (aguas abajo) se corresponden con la libertad de salida del flujo, es decir, sale a su antojo sin ningún tipo de restricción.

Para ser impuestas las condiciones de contorno a la malla y después se apliquen en los cálculos, debe realizarse un polígono a la entrada y otro a la salida del dominio, teniendo como condición indispensable que este polígono abarque como mínimo la primera fila de triángulos pertenecientes a la malla de cálculo. Las celdas que se encuentran dentro de estos polígonos, se tratan diferente al resto de celdas de cálculo porque es donde se imponen las condiciones de contorno: hidrogramas de avenida (entrada) y salida libre (salida).

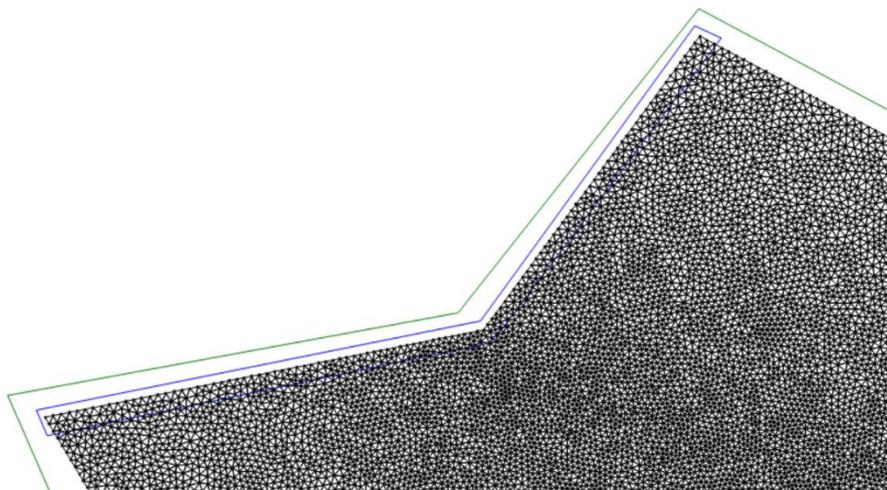


Figura 85. Polígono que contiene a las celdas donde se imponen las condiciones de contorno de entrada (azul).

En la imagen superior se puede apreciar con claridad el polígono creado para imponer las condiciones de contorno de entrada (polígono azul) y también se aprecia la condición que se ha comentado anteriormente, de la obligatoriedad de que este polígono abarque como mínimo la primera fila de triángulos de la malla para la correcta interpretación por parte del programa de los datos impuestos.

El formato en el que se le introducen los hidrogramas de avenida al programa es .txt con un diseño característico tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

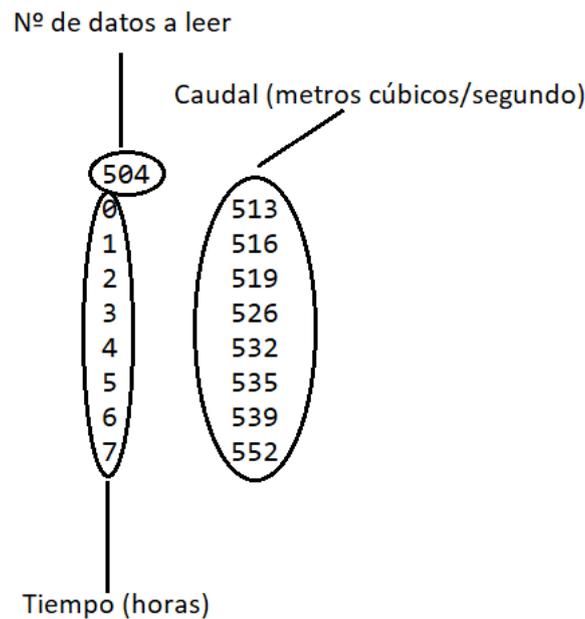


Figura 86. Ejemplo del fichero de datos de la condición de contorno a imponer (hidrograma) en las celdas de entrada.

Una vez impuestas las condiciones de contorno, sólo queda un último escollo para poder ejecutar el programa de cálculo del flujo en RiverFlow2D. Este escollo es el consistente en el valor de Manning.

Para poder introducir el valor de Manning deben delimitarse los polígonos a los que se les va a asociar un determinado valor de n . En este caso se ha decidido realizar un único polígono que abarca todo el dominio del MDT con un único valor de Manning $n = 0,02$. Este valor se ha establecido según la referencia tomada del libro de Chow (Chow, 1959), ya que el interés del trabajo consiste en el volumen total de agua en función del caso 0 o el caso 1 y no en los tiempos de llegada del agua a determinados puntos en función de su rozamiento. De esta forma se justifica la realización de un polígono general con un único valor de Manning (correspondiente al general de las cuencas fluviales).

Con el coeficiente de Manning ya inmerso en el modelo podríamos lanzar la simulación a RiverFlow2D que se ejecutaría sin ningún tipo de problema pero como se ha podido observar a lo largo del trabajo se trata de la comparación y el análisis de datos, hecho que nos obliga a introducir unas secciones transversales y unos puntos de

observación en tres poblaciones (Tudela, Novillas y Alagón) para que el programa de cálculo nos saque los resultados en esos puntos y así poder establecer las comparaciones y las conclusiones pertinentes.

Se han elegido estas tres poblaciones debido a que en la realidad también contienen estaciones de medida y se pueden contrastar los datos observados en éstas con los obtenidos en la simulación.

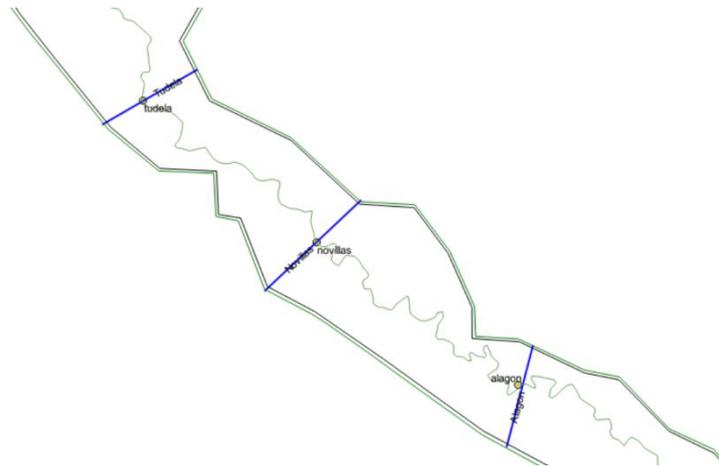


Figura 87. Localización de las secciones transversales y puntos de observación en el tramo estudiado.

Para posicionar estas secciones y puntos de observación en el punto pertinente con la mayor precisión posible, se ha analizado la trayectoria descrita por el río en la realidad y se han tomado puntos de referencia a lo largo de su cauce, como pueden ser meandros característicos, para elegir el punto exacto de posicionamiento de estas secciones y estos puntos.

Una vez posicionadas estas secciones y estos puntos ya se puede exportar el modelo de QGIS a RiverFlow2D para realizar la simulación y obtener los resultados numéricos.

Si se lanzara la simulación con los pasos realizados hasta aquí solo podríamos obtener resultados en lecho impermeable, ya que no hemos realizado ninguna acción sobre el modelo para poder establecer los parámetros de infiltración; ya que no es un dato geométrico de pre-proceso, sino un dato de cálculo de flujo. Para añadir la infiltración a este modelo debería crearse una capa nueva de *infiltration sobre QGIS* creando un polígono cerrado en el cual en las celdas contenidas en el van a aplicarse los distintos parámetros de infiltración al suelo. En el presente trabajo se ha optado por realizar un polígono que abarque todo el dominio a pesar de que el agua no vaya a discurrir por todo el ancho de este.

La forma de introducir el modelo de infiltración deseado (Horton o Green - Ampt) y sus parámetros correspondientes es mediante un archivo con formato .txt que presenta la siguiente estructura:

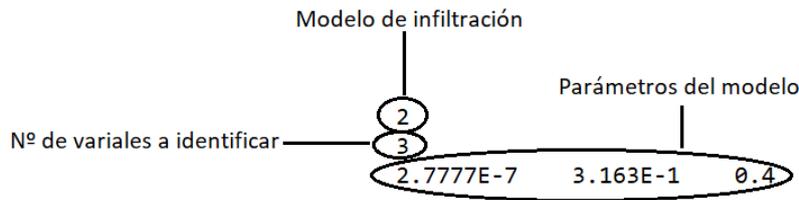


Figura 88. Ejemplo del fichero de introducción de parámetros en los modelos de infiltración.

De la figura superior cabe destacar lo siguiente.

- **Modelo de infiltración:** En este hueco se debe introducir el número 1 si se trata del modelo de infiltración de Horton y el número 2 si se trata del modelo de infiltración de Green – Ampt.
- **Número de variables a identificar:** En esta casilla se debe indicar el número de variables (parámetros) de cada modelo, 3 en el modelo de Horton y 3 en el modelo de Green – Ampt.
- **Parámetros del modelo:** En este hueco deben introducirse los parámetros característicos de cada modelo de infiltración en un orden característico.
 En el modelo de Horton los parámetros son: Tasa de decaimiento (k) / f_c (m/s) / f_0 (m/s).
 En el modelo de Green – Ampt los parámetros son: Conductividad hidráulica (m/s) / Carga de succión en frente mojado (m) / Delta Theta.

En el lado izquierdo de la pantalla del programa QGIS aparece un árbol desplegable con todas las capas y modificaciones que se han realizado sobre el modelo, pudiendo ser modificadas si fuera necesario, por ejemplo para cambiar el hidrograma de avenida de un año a otro o el modelo de infiltración entre otros.

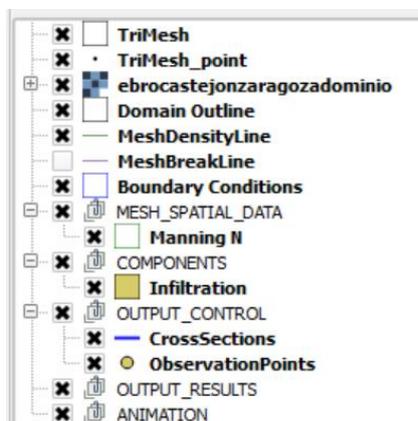


Figura 89. Árbol de capas del programa QGIS en el pre-procesado de datos.

Anexo IV, RiverFlow2D

Como se ha venido comentando a lo largo de todo el trabajo, el programa encargado de resolver las ecuaciones conservativas del flujo de superficie libre (también llamado aguas poco profundas) es RiverFlow2D.

RiverFlow2D es un modelo bidimensional en volúmenes finitos que se apoya sobre la discretización del dominio en una malla triangular flexible adaptada a los contornos y a las irregularidades del terreno, que permite afinar el estudio para obtener los parámetros requeridos en ambientes fluviales complejos, y que puede utilizarse en ríos o estuarios enfrentando con gran detalle las distintas situaciones hidráulicas. Este programa también permite resolver flujos a alta velocidad (como el caso del presente trabajo) y frentes de onda intensos incluso en terrenos inicialmente secos.

Una vez que ya se ha terminado el trabajo en el programa QGIS, se procede a exportar el modelo a RiverFlow2D para que realice la simulación. En primer lugar aparece una ventana de control en la que podemos regular los parámetros de interés de la simulación. La ventana es la siguiente:

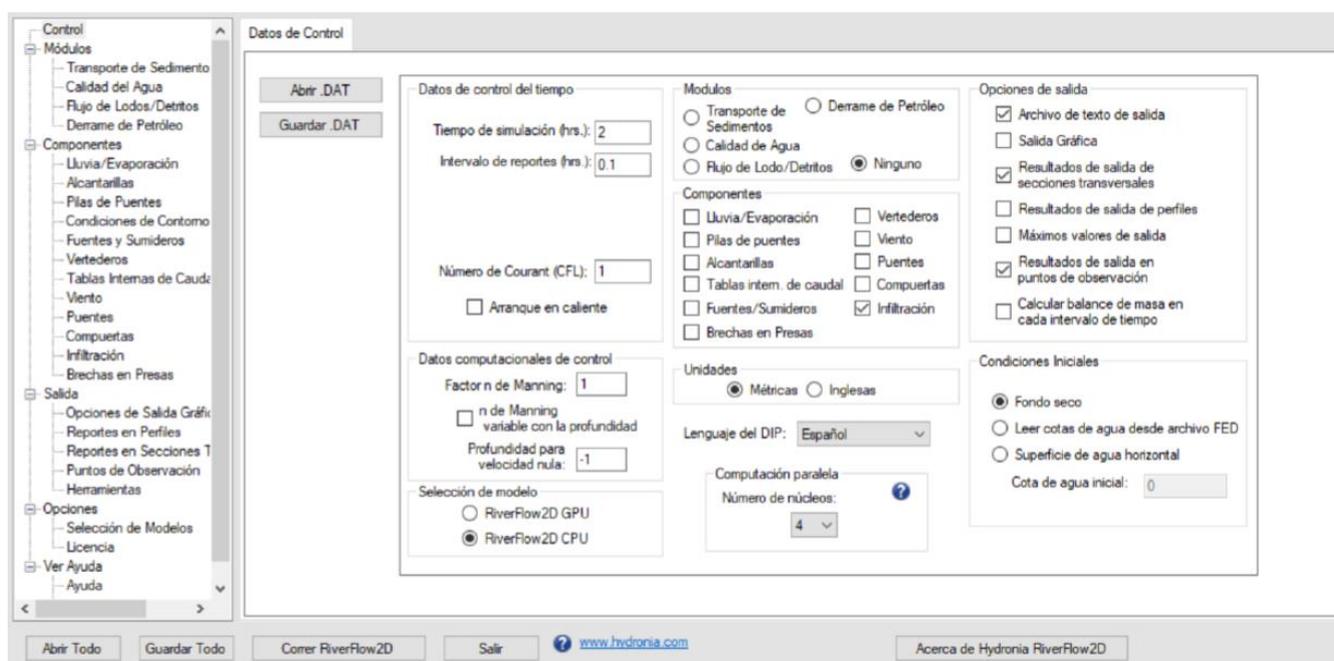


Figura 90. Ventana de control RiverFlow2D.

En primer lugar se aprecia un “espacio central” con diversos parámetros y casillas de selección, en el contexto del presente trabajo las que van a ser de utilidad son las siguientes.

- Tiempo de simulación (horas) e intervalo de reportes (horas): En estas casillas deben introducirse respectivamente el número total de horas que va a durar la simulación, que en este caso es coincidente con el número total de datos de los hidrogramas de avenida comentados en el Anexo I; y el

intervalo deseado para el cual RiverFlow2D escribe los resultados en ficheros de salida. Este intervalo de horas se regula de 10 horas a 15 horas en función de la cantidad de horas introducidas en la casilla anterior para obtener resultados precisos en un tiempo de cálculo razonable.

- Selección de modelo: Esta casilla de selección está puramente relacionada con el trabajo computacional, debe elegirse entre *RiverFlow2D GPU* o *RiverFlow2D CPU*. La primera de ellas es la elegida ya que trabaja sobre la tarjeta gráfica del ordenador, proporcionando así una mayor velocidad de cálculo que la segunda opción, ya que esta trabaja sobre el microprocesador.
- Componentes – infiltración: Esta casilla indica si el modelo que se ha exportado de QGIS contiene parámetros de infiltración o no. En caso de que se trabaje en lecho impermeable esta casilla no aparecerá marcada, ya que se marca automáticamente en función de si previamente en QGIS se ha exportado el caso 0 o el caso 1.
- Unidades: En esta casilla de selección simplemente tenemos que distinguir el tipo de unidades deseadas en las que queremos que RiverFlow2D nos lee y escribe los resultados. En este caso se ha optado por *métricas* ya que nos proporciona los resultados en el Sistema Internacional (S.I.).
- Opciones de salida: En este apartado como puede observarse aparecen marcadas por defecto las casillas *Archivo de texto de salida*, *Resultados de salida de secciones transversales* y *Resultados de salida de puntos de observación*. La primera de ellas indica que RiverFlow2D escribe en archivos .txt todos los resultados obtenidos durante la simulación. Las dos siguientes aparecen marcadas debido a que en el modelo de QGIS se han definido secciones transversales y puntos de información (en Tudela, Novillas y Alagón) para obtener información en esas poblaciones como se ha explicado con anterioridad. Finalmente se debe marcar la casilla *Salida gráfica* para que mientras el programa simula saque un gráfico caudal (m^3/s) – tiempo (horas) de la propia simulación.

Una vez fijados los parámetros de control en función de las necesidades de la simulación se debe atender al árbol desplegable del lado izquierdo de la pantalla. El apartado *módulos* no es de interés en el presente trabajo ya que anteriormente se ha dejado marcada la casilla *Ninguno*. El siguiente apartado *componentes* sí que es de interés ya que aparece el subapartado *infiltración*.

Este subapartado viene predeterminado en función de lo establecido en QGIS, ya que si se trabaja con el caso 1 aparecerán los parámetros que le hemos introducido en el programa anterior y su modelo de infiltración correspondiente y si estamos trabajando con el caso 0 aparecerá todo nulo.

El aspecto que presenta este subapartado al pinchar sobre él es el siguiente:

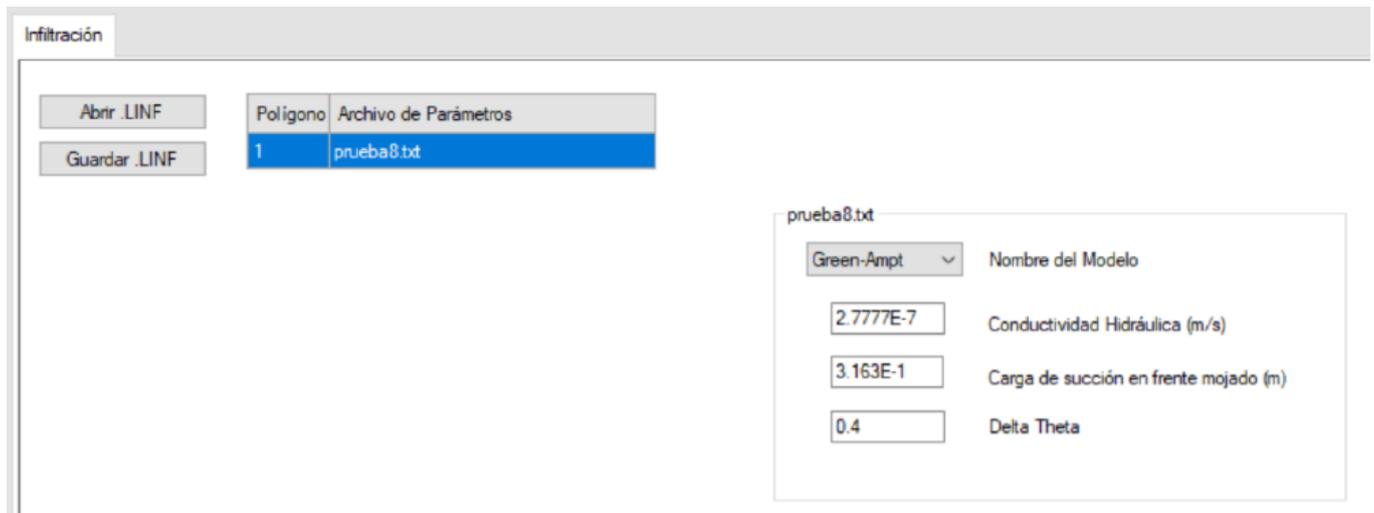


Figura 91. Aspecto del subapartado infiltración.

Puede observarse en primer lugar y en color azul las categorías *Polígono* y *Archivo de Parámetros*. La categoría *Polígono* indica el número de polígonos de infiltración que se han realizado sobre el dominio de cálculo. En el caso del presente trabajo se ha realizado un único polígono que abarca todo el dominio. La categoría *Archivo de Parámetros* corresponde con el fichero .txt que se le ha cargado al programa QGIS con los parámetros de infiltración. A la derecha puede observarse el modelo de infiltración establecido y sus correspondientes parámetros. Cabe destacar la imposibilidad de manipulación tanto del modelo como de los parámetros desde esta ventana, ya que, si desean ser manipulados debe cambiarse el archivo de texto introducido en el programa QGIS y exportarlo de nuevo a RiverFlow2D.

El último apartado que va a resultar de interés en este trabajo es *Salida*, concretamente los subapartados *Opciones de Salida Gráfica*, *Reportes en Secciones Transversales* y *Puntos de Observación*.

El subapartado *Opciones de Salida Gráfica* es el encargado de indicarle a RiverFlow2D que escriba los archivos de resultados en formato .VTK (Anexo V) para poder visualizarlos con el programa Paraview. Para ello deben seleccionarse las casillas *Dibujar ejes* y *Crear archivos de salida*.

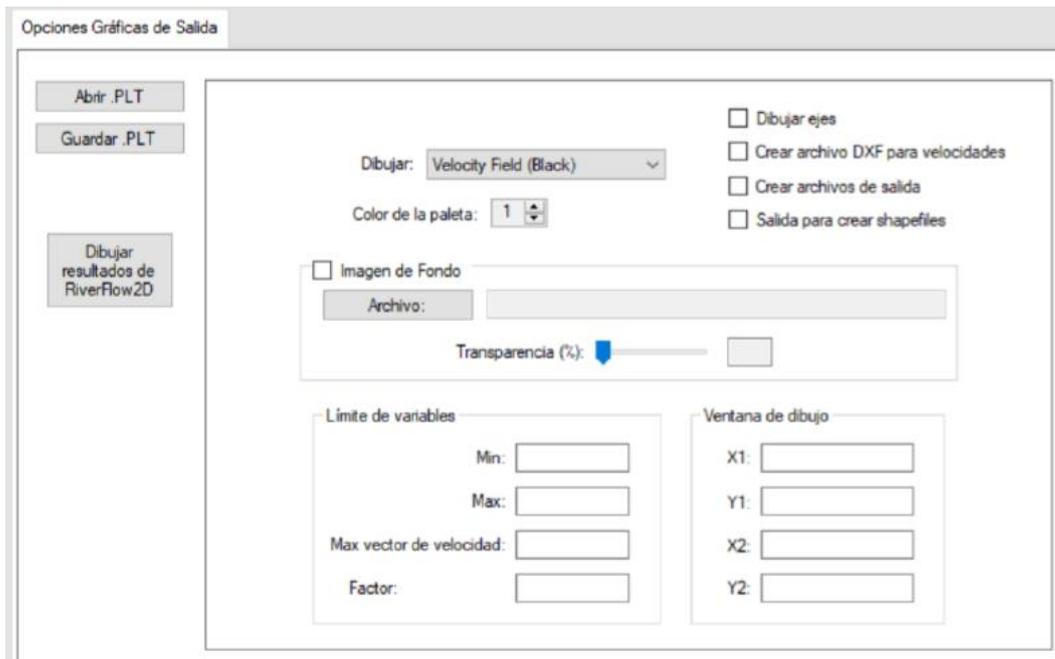


Figura 92. Aspecto del subapartado Opciones de Salida Gráfica.

En último lugar, figuran los subapartados *Reportes en Secciones Transversales* y *Puntos de Observación*. En estos se encuentra la información cartesiana relacionada con los puntos de observación y las secciones transversales creadas en QGIS. Al acceder a ellos aparecen las coordenadas en las cuales están situados los puntos y las coordenadas (2 en el “eje x” y dos en el “eje y”) de las secciones transversales.

Secciones Transversales		Nombre de Sección Transv.	N Intervalos	X1	Y1	X2	Y2
Abrir .XSECS	Guardar .XSECS	Tudela	100	611578.332	4655658.037	621385.494	4661375.009
		Novillas	100	628473.609	4638205.007	638420.209	4647640.334
		Alagon	100	653665.466	4621867.483	656361.274	4632371.837

Figura 93. Coordenadas de los puntos que delimitan las secciones transversales definidas en QGIS.

Puntos de Observación		Nombre del Punto de Observación	X	Y
Abrir .OBS	Guardar .OBS	tudela	615791.300	4658172.900
		novillas	633807.100	4643232.000
		alagon	654802.900	4628258.900

Figura 94. Coordenadas de los puntos de observación definidos en QGIS.

Anexo V, Paraview

Paraview es una aplicación de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto. Este programa es conocido y utilizado en muchas comunidades como la científica para analizar y visualizar conjuntos de datos, tanto de forma cualitativa como de forma cuantitativa.

Este programa permite la exploración de datos interactivamente en 2D, 3D o mediante programación. En el presente trabajo se ha optado por las dos primeras opciones, debido a su gran capacidad de visualización e interpretación de resultados.

Paraview admite varios tipos de formatos para traducirlos a imágenes gráficas, algunos de ellos son VTK, NumPy, SciPy, Plot3D EnSight entre otros.

En el presente trabajo se han utilizado los ficheros con formato VTK, aprovechando que el programa de simulación RiverFlow2D tiene la opción de generar estos archivos cuando realiza las simulaciones pertinentes. Un fichero VTK consiste en información puntual de las variables del estado de la avenida. Mediante la unión de todos estos archivos VTK (se crea uno para cada instante de tiempo) podemos elaborar la secuencia de la avenida desde su inicio hasta su final, como si se tratara de una animación.

A la hora de cargar los datos proporcionados por RiverFlow2D se selecciona un archivo VTK “general” que dependiendo del tiempo de visualización que se le indique llama al “subarchivo” VTK correspondiente almacenado en una carpeta junto con todos los otros.

De esta forma se entiende que en el contexto del trabajo, el programa Paraview ha servido de utilidad para:

- La representación en 2D y 3D de todas las variables influyentes en el problema, permitiendo así la visualización de las manchas de avenida generadas en los sucesivos años o la elaboración de videos del transcurso de la avenida entre otros.
- La visualización del movimiento de las corrientes fluviales mediante la utilización de vectores en función de los parámetros elegidos (componentes del vector velocidad en cada celda de cálculo).
- Obtener mayor precisión en la visualización de los resultados en comparación a la tecnología ofrecida por el programa QGIS.
- Observación cualitativa y cuantitativa de los resultados gracias a su escala de colores autoajustable a la cota del terreno, pudiéndose así realizar los análisis pertinentes.