



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ELIMINACIÓN DEL TAPÓN DE SEDIMENTOS EN LA CONFLUENCIA DEL RÍO MANZANARES CON EL ARROYO DE TROFA (MADRID): CONSECUENCIAS HIDRODINÁMICAS

Trabajo de Fin de Máster

Universidad Politécnica de Madrid

ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural

Máster El Agua en el Medio Natural. Usos y Gestión

Luciano Evelio Lizarazo León
2024

Título: Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Autor:

Luciano Evelio Lizarazo León

Titulación:

Master Universitario El Agua En El Medio Natural. Usos y Gestión

Departamento

Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental

Director/a

Leticia de Salas Regalado

Codirector/a

Leticia Carrero Diez

Tutor/a

Año de presentación:

2024

©UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2024. Todos los derechos reservados.

HOJA DE CALIFICACIÓN

TÍTULO
Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas
AUTOR / AUTORA
Luciano Evelio Lizarazo León
TITULACIÓN
Master El Agua en el Medio Natural. Usos y Gestión

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente	
	Fdo.
Secretario	
	Fdo.
Vocal	
	Fdo.

Reunido el Tribunal de calificación con fecha _____ ,
acuerda otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL de _____.

Se propone la concesión de Matrícula de Honor.

Informe explicativo de calificación

Título

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Autor

Luciano Evelio Lizarazo León

RESUMEN

El Río Manzanares a lo largo del tiempo ha constituido un eje importante para el desarrollo urbano al atravesar toda la comunidad de Madrid. Este desarrollo urbanístico ha generado la necesidad de proveer agua a los centros densamente poblados, producto de esto se presenta en la actualidad un régimen de caudales alterado caracterizado por la disminución de los caudales ordinarios y extraordinarios circulantes.

Esta alteración hidrológica sumada a la alta capacidad de transporte del arroyo de Trofa ha propiciado la acumulación de sedimentos en su confluencia, trayendo como consecuencia la generación de un remanso sobre el río Manzanares de casi 2 km de longitud. La generación de este remanso representa un impacto negativo sobre la biota principalmente vegetal.

Como parte de la mitigación ambiental de estas entre otras más, se ha llevado a cabo la restauración fluvial del río Manzanares Fase I, la cual una de sus actuaciones consistió en la eliminación parcial del tapón de sedimentos localizado en la confluencia del arroyo de Trofa y el río Manzanares. Como respuesta a esta actuación se ha desarrollado este trabajo fin de master con el objetivo de evaluar la efectividad que ha tenido esta actuación sobre el remanso generado en el río Manzanares. El cual, a partir de variables hidráulicas producto de modelizaciones hidráulicas bidimensionales, ha concluido que cuando circula un caudal de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ se presenta una disminución generalizada de más de un metro de calado en la zona del remanso, así como la disminución de las anchuras de la lámina de agua remansada. También se ha determinado que la superficie ocupada por la lámina de agua de agua remansada ha disminuido 12 m^3 . Por lo tanto, las consecuencias hidrodinámicas debidas a la eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa, a partir de los resultados hidráulicos analizados se consideran efectivas.

Palabras clave: SIG, MDT, MODELIZACIÓN, CALADO.

ABSTRACT

The Manzanares River has been an important axis for urban development over time, as it runs through the entire community of Madrid. This urban development has generated the need to provide water to densely populated centers, resulting in an altered flow regime characterized by a decrease in ordinary and extraordinary circulating flows.

This hydrological alteration, combined with the high transport capacity of the Trofa stream, has led to the accumulation of sediments at its confluence, resulting in the creation of a backwater on the Manzanares River of almost 2 km in length. The creation of this backwater represents a negative impact on the mainly vegetal biota.

As part of the environmental mitigation of these and other measures, the fluvial restoration of the Manzanares River Phase I has been conducted, one of which consisted of the partial elimination of the sediment plug located at the confluence of the Trofa stream and the Manzanares River. In response to this action, this master's thesis has been developed with the aim of evaluating the effectiveness of this action on the backwater generated in the Manzanares River. Based on hydraulic variables resulting from two-dimensional hydraulic modelling, it has been concluded that when a flow of 0.9 m³/s circulates, there is a general decrease of more than one meter in depth in the backwater area, as well as a decrease in the width of the sheet of backwater. It has also been determined that the surface occupied by the sheet of backwater has decreased by almost 12 m³. Therefore, the hydrodynamic consequences due to the removal of the sediment plug at the confluence of the Manzanares River with the Trofa stream, based on the analyzed hydraulic results, are considered effective.

Key words: SIG, MDT, MODELING, DRAFT.

Agradecimientos

Primero, quisiera agradecer a mis directoras Leticia de Salas y Leticia Carrero, gracias por su dedicación, tiempo y apoyo durante la realización de este trabajo fin de master, su apoyo fue fundamental para llevarlo a cabo.

A mis padres por ser fuente de motivación para culminar cada una de las metas que me propongo.

Y a Dios porque sin su sabiduría, y salud que me brinda cada día, no sería posible realizar cada una de las metas propuestas.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes hidromorfológicos	13
1.2 Trabajos previos.....	17
2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	23
3. MATERIALES Y MÉTODO	24
3.1 Descripción del tramo de estudio.....	24
3.2 Estudio preliminar de la información	24
3.3 Descripción del modelo a utilizar.....	25
3.4 Validación del modelo	37
3.5 Indicadores para la evaluación de la actuación.....	37
3.6 Simulaciones.....	39
4. RESULTADOS.....	40
4.1 Validación del modelo	40
4.2 Comparativa de resultados hidráulicos (MDT pre vs MDT post)	43
4.3 Indicadores hidráulicos aplicados	49
5. CONCLUSIONES	52
6. BIBLIOGRAFÍA	53
ANEJOS.....	55
I. ACTUACIONES DE RESTAURACIÓN FLUVIAL REALIZADAS COMO PARTE DE LA RESTAURACIÓN FLUVIAL DEL RÍO MANZANARES EN EL ENTORNO DEL REAL SITIO DE EL PARDO (MADRID) FASE I	55
II. BATIMETRÍAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	63
III. COMPARATIVAS COTAS LÁMINAS DE AGUA VS COTA DEL TERRENO	66
IV. FUNDAMENTOS DE IBER	68
V. FOTOGRAFÍAS ACTUALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los principales embalses a lo largo del río Manzanares.....	15
Tabla 2. Adaptación del listado de indicadores para el seguimiento hidromorfológico utilizados en el informe de TRAGSA, Fuente: (TRAGSA , 2022)	19
Tabla 3. Resultados numéricos de la aplicación del Indicador 7, Fuente: (TRAGSA , 2022)	21
Tabla 4. Resultados numéricos de la aplicación del indicador 8, Fuente: (TRAGSA , 2022)	21
Tabla 5. Resultados numéricos de la aplicación del indicador 9, Fuente: (TRAGSA , 2022)	21
Tabla 6.Coordenadas UTM de las secciones escogidas y su correspondiente anchura, Fuente: Informe de seguimiento hidromorfológico Manzanares Fase II-2022	27
Tabla 7. Caudales a utilizar en las modelizaciones, Fuente: INCLAM 2017	32
Tabla 8. Tipos de cauces utilizados, Fuente: INCLAM 2017	34
Tabla 9. n de Manning correspondiente para cada uso de suelo asignado, Fuente: INCLAM 2017.....	34
Tabla 10. Resumen de las modelizaciones realizadas con sus respectivos caudales, tiempos de simulación, intervalos definidos, y paso en el que se alcanza el régimen permanente.	39
Tabla 11. Valores de calado (m) de los resultados INCLAM-PRE en la sección Psomontes0	40
Tabla 12. Valores de calado (m) de los resultados INCLAM-PRE en la sección Psomontes2	42
Tabla 13. Comparativa de resultados de calados (Pre-Post) en la sección Psomontes0	47
Tabla 14. Comparativa de resultados de calados (Pre-Post) en la sección Psomontes2	48
Tabla 15. Cálculo de la superficie ocupada por la lámina de agua remansada (Pre-Post).....	49
Tabla 16. Cálculo de la anchura de la lámina de agua remansada (Pre-Post) ..	51
Tabla 17.Resultado del volumen de agua calculado en cada modelización	51
Tabla 18. Comparativa grafica de las secciones transversales correspondientes a las batimetrías y al MDT original, Fuente: Autor.....	65
Tabla 19. Coordenadas y localizaciones de las fotografías realizadas de la zona de estudio en mayo 2024	73

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación del río Manzanares (línea azul oscura). Ubicación del Arroyo de Trofa (línea roja).	13
Ilustración 2. Ortoimágenes del Río Manzanares antes de 1970, Fuente: Visor Nomecalles https://gestion.comunidad.madrid/nomecalles/Inicio.icm	14
Ilustración 3. Localización de los principales embalses a lo largo del río Manzanares.....	15
Ilustración 4. Ortofoto del año 2014, el polígono rojo representa la ubicación del remanso generado en el río Manzanares aguas arriba de la confluencia con el arroyo de Trofa, Fuente: Visor No Me Calles	16
Ilustración 5. Zona del remanso fuente: (TRAGSA , 2022)	20
Ilustración 6. Ortofoto del año 2022 a la izquierda ubicación del tramo de estudio. Ortofoto del año 2022 a la derecha zoom de la confluencia Manzanares-Trofa	24
Ilustración 7. MDT Pre, a la derecha la zona de la confluencia del Arroyo Trofa-Manzanares, Fuente: TRAGSA.....	26
Ilustración 8. Ubicación de las secciones correspondientes a las batimetrías realizadas en julio de 2022 por la empresa TRAGSA.	27
Ilustración 9. Mapa de curvas de nivel MDT pre (0.2m)	29
Ilustración 10. Mapa curvas de nivel fuera del cauce y área del cauce.....	29
Ilustración 11. Mapa con curvas de nivel incorporando las batimetrías	30
Ilustración 12. Comparativa entre el MDT original del terreno (antes de la actuación) a la izquierda, y el MDT actual (tras la actuación) a la derecha.....	31
Ilustración 13. Ubicación de las secciones de entrada y salida de los modelos.....	33
Ilustración 14. Mapa de usos del suelo asignados al tramo de estudio.....	35
Ilustración 15. Malla no estructura generada a partir de un elemento por superficie, Fuente: IBER 2D.....	36
Ilustración 16. Distribución de distancias. D=0 m (inicio del tramo), D= 2200 m (confluencia Manzanares-Trofa).....	38
Ilustración 17. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Q5%.....	43
Ilustración 18. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q5%.....	44
Ilustración 19. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Q50%.....	44
Ilustración 20. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q50%.....	45
Ilustración 21. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Q _{med}	45
Ilustración 22. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q _{med}	46
Ilustración 23. Ortofoto del año 2021 de la particularidad del terreno encontrado en la zona del remanso, en la imagen de la izquierda se evidencia su ubicación en el tramo de estudio y en la imagen de la derecha un zoom de la zona.	50

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Ilustración 24. Resumen de actuaciones para la recuperación morfológica del espacio de ribera en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).....	55
Ilustración 25. Resumen de actuaciones para la mejora de la cubierta vegetal en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).	56
Ilustración 26. Resumen de actuaciones para la mejora del hábitat acuático en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).	57
Ilustración 27. Resumen de actuaciones para el uso público sostenible e interpretación de la naturaleza en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).	58
Ilustración 28. Resumen de actuaciones para la recuperación y mejora de la continuidad hidrológica en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).....	58
Ilustración 29. Resumen de actuaciones para el cierre en la confluencia Trofa-Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).	59
Ilustración 30. Resumen de actuaciones para el manejo de los grandes herbívoros en la cuenca del arroyo de Trofa, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).....	60
Ilustración 31. Resumen de actuaciones para la lucha contra la erosión y mejora del funcionamiento ecológico del tramo, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).....	61
Ilustración 32. Esquema de la creación del nuevo brazo del río Manzanares en la confluencia con el arroyo de Trofa, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).....	62
Ilustración 33. Izquierda nuevo brazo del río Manzanares en la confluencia con el arroyo de Trofa, a la derecha confluencia actual del Manzanares-Trofa. Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo	62
Ilustración 35. Fotografías de la zona de estudio realizadas en mayo del 2024	72

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Comparación de perfiles topográficos en la sección Psomontes3. La Línea azul corresponde a la topografía del terreno antes de la actuación. La línea naranja representa la topografía del terreno tras la actuación.	28
Gráfica 2. Comparativa de calados en la sección Psomontes0, a partir de la representación del terreno y cotas de láminas de agua respectivas.	41
Gráfica 3. Comparativa de calados en la sección Psomontes2, a partir de la representación del terreno y cotas de láminas de agua respectivas	42
Gráfica 4. Comparativa de calados en situaciones pre vs post (Psomontes0), a partir de la representación de las cotas del terreno y cotas de láminas de agua respectivas	48
Gráfica 5. Comparativa de calados en situaciones pre vs post (Psomontes2), a partir de la representación de las cotas del terreno y cotas de láminas de agua respectivas	49
Gráfica 6. Comparativa cotas láminas de agua vs cota del terreno	50
Gráfica 7. Comparativa cotas láminas de agua vs cota del terreno en el tramo completo.....	67

ABREVIATURAS

CLA: Cota lámina de agua

EA: Estación de aforos

IPH: Instrucción planificación hidrológica

MDT: Modelo digital del terreno

Q50%: Caudal del percentil de excedencia 50%

Q5%: Caudal de la avenida habitual “percentil de excedencia 5%”

Qcmed: Media de los máximos caudales diarios anuales

RTIN: Red irregular de triángulos rectángulos

SIG: Sistema de información geográfica

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fin de master se va a desarrollar en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa pertenecientes a la comunidad de Madrid (España). Para encuadrar el objetivo del trabajo se hará una breve reseña histórica, un análisis de la evolución hidrológica y los problemas actuales que se presentan en la zona de estudio.

1.1 Antecedentes hidromorfológicos

Río Manzanares

El Río Manzanares, con una longitud de 92 km, atraviesa completamente la Comunidad de Madrid (España) y desemboca en el Río Jarama. Su nacimiento se encuentra en el Ventisquero de la Condesa, en la Sierra Norte de Madrid, y su curso inferior se localiza en el término municipal de Rivas Vaciamadrid. En la siguiente ilustración se observa su ubicación.

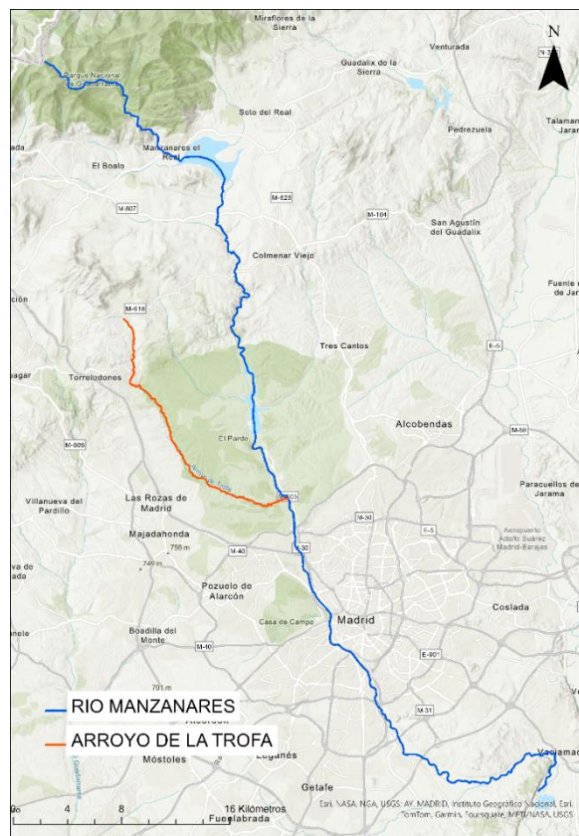


Ilustración 1. Ubicación del río Manzanares (línea azul oscura). Ubicación del Arroyo de Trofa (línea roja).

A su paso este río se encuentra con diferentes ecosistemas de gran valor ambiental con diferentes niveles de protección. La cuenca alta desde su nacimiento hasta el monte de El Pardo constituye el parque regional de la cuenca

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

alta del Manzanares, por otra parte, la cuenca baja también se encuentra protegida dentro del parque regional del Sureste. Según la tipología establecida por la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), el río Manzanares se clasifica como un río de eje mediterráneo continentalizado poco mineralizado (tipología 15).

De forma natural o en condiciones de mínima alteración, presenta una morfología en planta de tipo trenzado debido a una serie de factores como: régimen de caudales pluvio-nivales y sedimentos formados por arenas que son movilizados en las avenidas invernales.

Esta morfología trenzada en planta se había mantenido hasta finales de la década de los 60`s. Como se puede apreciar en la ilustración 2, correspondiente a la ortoimagen antes de 1970, en el meandro de la zona de Mingorrubio se evidencia una gran cantidad de islas y barras de sedimentos formados a lo largo del cauce. Siguiendo aguas abajo a la salida de las últimas edificaciones del pueblo del Pardo se evidencia el gran espacio de movilidad fluvial, y en la confluencia con el arroyo de Trofa se evidencia el arrastre de sedimentos.

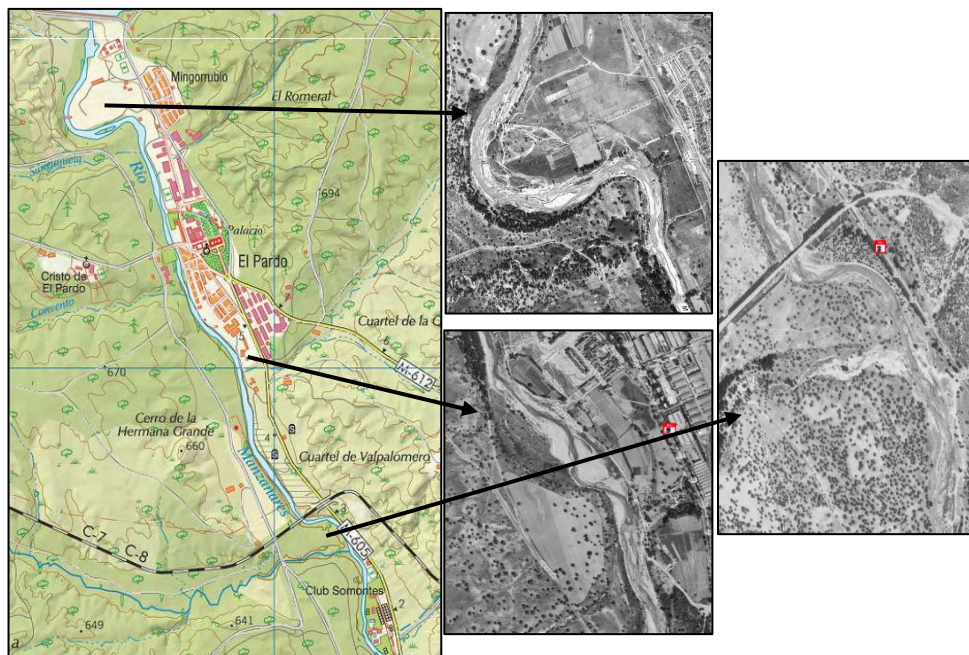


Ilustración 2. Ortoimágenes del Río Manzanares antes de 1970, Fuente: Visor Nomecalles
<https://gestiona.comunidad.madrid/nomecalles/Inicio.icm>

A lo largo del tiempo, el río Manzanares ha tenido una gran importancia, por su estrecha relación con Madrid. La necesidad de proveer de agua a los núcleos urbanos se ha traducido en la construcción de diversas presas y canalizaciones, esto a su vez generando una fuerte regulación de caudales. En el siguiente esquema se pueden apreciar la red de embalses construidos a lo largo de su cauce.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Ilustración 3. Localización de los principales embalses a lo largo del río Manzanares

Estos embalses con sus respectivas presas fueron construidos en la década de los 70`s. En la siguiente tabla se resumen en orden cronológico de construcción, las principales características de estos embalses.

Tabla 1. Características de los principales embalses a lo largo del río Manzanares.

Embalse (EMB)	Río	Uso	Fecha construcción	Volumen útil EMB(hm ³)
Navacerrada	Navacerrada	Abastecimiento	1968	11
Santillana (Manzanares el Real)	Manzanares	Abastecimiento	1969	86
El Pardo	Manzanares	Regulación	1970	43
Los Palancares	-	Abastecimiento	1981	1

Como consecuencia de esta fuerte regulación se presenta en la actualidad una alteración del régimen natural de caudales, generando una disminución de los caudales circulantes y la retención total de sedimentos en los vasos de los embalses.

Arroyo de Trofa

El arroyo de Trofa tiene una longitud de 19,56 km. Su origen se sitúa en el término municipal de Hoyo de Manzanares, y recorre los territorios de Torreldones, Las Rozas y Madrid, desembocando en el río Manzanares aguas abajo de la presa del Pardo. Antes de ingresar al monte del Pardo. En la ilustración 1 se puede apreciar su ubicación.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Es considerado como el afluente más importante del río Manzanares. De forma natural o en condiciones de mínima alteración presenta una morfología del cauce en planta de características trenzadas.

Debido al cambio de uso de suelo principalmente por el crecimiento urbano, la cuenca del arroyo de Trofa ha sufrido una “impermeabilización” por el aumento de esta superficie urbana, generando el síndrome de la cuenca urbanizada. Este síndrome se caracteriza por aguas limpias o libres de sedimentos (Kondolf, 1995) que generan erosión en el lecho y las orillas del río, dando como resultado una gran cantidad de transporte de materiales a lo largo del cauce.

Remanso generado en el río Manzanares

A lo largo del tiempo, la acumulación de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa ha generado un remanso de casi 2 km de longitud en el río Manzanares, haciendo que este funcione como un embalse. Esta situación ha tenido un impacto negativo en la biota, ya que el aumento de calado, consecuencia del remanso, dificulta la oxigenación de las raíces, provocando la muerte de la vegetación de ribera.

Por otro lado, la pérdida de la condición lotica del río facilita la aparición de masas de helófitos que se traduce en problemas de eutrofización.

En la siguiente ilustración, el polígono rojo representa la zona del remanso generado en el río Manzanares.



Ilustración 4. Ortofotografía del año 2014, el polígono rojo representa la ubicación del remanso generado en el río Manzanares aguas arriba de la confluencia con el arroyo de Trofa, Fuente: Visor No Me Calles

Conclusiones

- ❖ Como consecuencia de las alteraciones hidromorfológicas el río Manzanares en la actualidad presenta un régimen de caudales alterado que se caracteriza por la disminución de los caudales circulantes.
- ❖ Por otro lado, el arroyo de Trofa presenta una gran capacidad de transporte de sedimentos, que se acumulan en la confluencia con el río Manzanares.
- ❖ Como consecuencia de la alteración del régimen natural de caudales en el río Manzanares y la alta capacidad de transporte de sedimentos del arroyo de Trofa, en la confluencia de estos dos se generó un tapón de sedimentos. Con el paso del tiempo, este tapón de sedimentos propicio la creación del remanso en el río Manzanares.

1.2 Trabajos previos

Como consecuencia de estas problemáticas se han desarrollado una serie de estudios, actuaciones e informes, entre estos tenemos:

1. Estudio de simulación hidráulica en la confluencia del Río Manzanares y Arroyo de Trofa (Madrid)

En el año 2017, la empresa INCLAM realizó un estudio cuyo objetivo era conocer el comportamiento hidráulico del tramo del río Manzanares comprendido entre la presa del Pardo y hasta 600 m aguas abajo de la desembocadura del arroyo de Trofa con éste, prestando especial atención a la confluencia entre ambos.

En este estudio se realizó la comparativa de calados y velocidades obtenidos a partir de las simulaciones hidráulicas bidimensionales, que representaban la situación existente en el año 2017 y una hipotética situación futura si se llevara a cabo la actuación de retirada parcial del tapón de sedimentos, propuesta como parte de la restauración fluvial del río Manzanares en el entorno natural de El Pardo Fase I.

Los caudales utilizados para la modelización fueron clasificados como bajos y medios (correspondientes a los caudales menores al periodo de retorno de 10 años).

Por un lado, los caudales bajos extraídos de la curva de caudales clasificados caracterizan el comportamiento hidráulico ordinario del río, por lo tanto, fueron seleccionados los caudales correspondientes a los percentiles de excedencia Q5% (caudal que se iguala o supera 18 días al año), Q50% (caudal que se iguala o supera 6 meses al año), con valores de 7 m³/s y 0,9 m³/s respectivamente.

Por otro lado, el caudal medio correspondiente al medio de los máximos caudales diarios anuales (Q_{med}) de 36,97 m³/s. Estos valores, se

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

corresponden a los registrados en la estación de aforos EA 3243 Mingorrubio en el periodo de 1985 al 2007 (actualmente demolida).

Como conclusiones se tuvieron que para los caudales bajos y medios el río Manzanares no es capaz de arrastrar los sedimentos depositados por el arroyo de Trofa en su confluencia, favoreciendo la acumulación de sedimentos.

También se concluyó que, tras la actuación de retirada del tapón, los calados disminuirían del orden de 10-40 cm en la zona del remanso localizado aguas arriba de la confluencia Manzanares-Trofa, cuando circule un caudal medio de 36,97 m³/s.

2. Restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real sitio de El Pardo (Madrid) Fase I

A finales del año 2017 se inició con la restauración fluvial del río Manzanares financiado por el plan PIMA adapta (Plan Impulso al medio ambiente para la adaptación al cambio en España). En esta restauración se llevaron a cabo una serie de actuaciones, con el objetivo de mitigar las consecuencias ocasionadas por las alteraciones hidromorfológicas presentes en el río Manzanares y en el arroyo de Trofa. En el anejo I se presenta un resumen de estas actuaciones.

Cabe destacar que, de todas las actuaciones realizadas, algunas de estas se llevaron a cabo en el entorno de la confluencia entre el río Manzanares y el arroyo de Trofa, de modo que cambiaron sensiblemente la morfología del cauce en este tramo. Entre estas tenemos:

- Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa y un programa de avenidas prescritas: esta actuación consistió en primero eliminar toda la vegetación localizada sobre la barra de sedimentos, luego, se realizó un dragado dejando una isla de sedimentos localizada en la parte central, con el objetivo de que actuase como una pantalla visual ante la alta afluencia social en esta zona. Finalmente se creó un nuevo brazo del río Manzanares con el fin de que movilizara los sedimentos aportados por el arroyo de Trofa en el programa de avenidas prescritas. Se estableció que es de vital importancia cumplir el programa de avenidas de acuerdo con los valores establecidos en el plan de cuenca para los caudales máximos a desaguar en la presa del Pardo, porque de lo contrario el problema volvería a aparecer.
- Apertura de la llanura de inundación en la zona del puente del Ferrocarril: se realizó un perfilado de los taludes, reduciendo su pendiente permitiendo la reconexión del cauce con la llanura de inundación. También se adecuaron sendas autorizadas en las riberas para el disfrute social y la reconexión con el ambiente natural del río.
- Retirada de carrizal en la zona del puente del Ferrocarril: las orillas cubiertas por carrizos y enneas fueron limpiadas, y sustituidas por vegetación arbórea y arbustiva como sauces y fresnos, logrando que el río se rodee de un bosque de ribera.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

3. Seguimiento del estado hidromorfológico restauración fluvial del Río Manzanares Fase II: Verano/2022

Este informe fue realizado por la empresa TRAGSA en el año 2022. Su principal objetivo consistía en evaluar el comportamiento hidromorfológico del río Manzanares a lo largo del tiempo, en el tramo correspondiente desde la salida de la presa del Pardo hasta la confluencia con el arroyo de Trofa.

Esta evaluación se realizó mediante la aplicación de 18 indicadores de seguimiento hidromorfológico extraídos del artículo denominado “¿Cómo planear el seguimiento de las actuaciones de restauración fluvial? Caso del Río Manzanares en el entorno del Real Sitio del Pardo (Madrid) (Martinez Santa-Maria et al, 2019).

Cada uno de estos indicadores estaba relacionado con las actuaciones de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno natural de El Pardo Fase I, y fueron aplicados en tres estados: estado inicial 0 (julio/2017) y estado final 1 (julio/2022).

A continuación, en la siguiente tabla se presenta la relación establecida entre las actuaciones de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno natural de El Pardo Fase I (Ver Anejo I) y los indicadores de seguimiento hidromorfológicos utilizados en el informe.

Tabla 2. Adaptación del listado de indicadores para el seguimiento hidromorfológico utilizados en el informe de TRAGSA, Fuente: (TRAGSA, 2022)

LISTADO DE INDICADORES PARA EL SEGUIMIENTO HIDROMORFOLÓGICO	
ACTUACIÓN DE RESTAURACIÓN FLUVIAL	INDICADOR PROPUESTO
1. Incremento de la complejidad y diversidad hidráulica	I1: Secuencia de mesohábitats
	I2: Biotopo hidráulico: calados
	I3: Biotopo hidráulico: velocidades
	I4: Biotopo hidráulico: sustratos
	I5: IBMWP
2. Retirada de carrizo y enea del cauce	I6: Superficie ocupada por helófitos
3. Retirada de la isla de sedimentos de la confluencia Ayo.Trofa-Manzanares	I7: Superficie ocupada por la lámina de agua remansada
	I8: Longitud ocupada por la lámina de agua remansada
	I9: Anchura de la lámina de agua remansada
	I10: Volumen de sedimento movilizado
4. Instalación de rampa para peces	I11: Índice de efecto barrera del obstáculo (IF)

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

	I12: Superficie ocupada por la lámina de agua remansada
	I13: Longitud ocupada por la lámina de agua remansada
	I14: Anchura de la lámina de agua remansada
5. Retirada de rellenos	I15: % Longitud de cauce recuperado
6. Trabajos selvícolas y eliminación de vegetación exótica	I16: Naturalidad: porcentaje (%) de superficie de la ribera funcional ocupado por especies ribereñas autóctonas
7. Restauración de la vegetación de ribera	I17: Porcentaje (%) de marras
	I18: Porcentaje (%) de ejemplares en mal estado fitosanitario

Cabe destacar que, del listado completo de indicadores aplicados, se relacionan los resultados obtenidos de los indicadores I7, I8, I9 correspondientes a la retirada de la isla de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa, por su aplicación directa a este trabajo.

Para aplicar estos indicadores fue necesario definir la zona del remanso, la cual quedo acotada entre la confluencia Manzanares-Trofa, hasta la cola del remanso (antes de las actuaciones), en la siguiente ilustración se observa su respectiva ubicación.

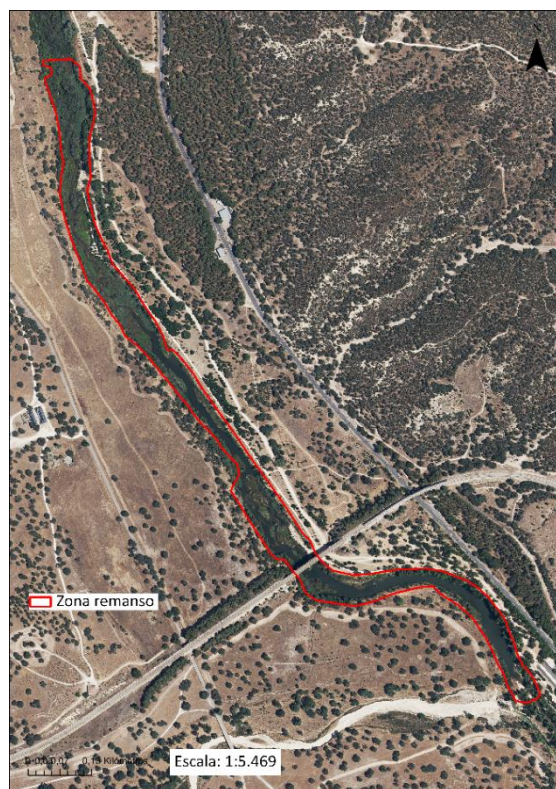


Ilustración 5. Zona del remanso fuente: (TRAGSA , 2022)

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Estos indicadores fueron determinados de “visu” con el apoyo del SIG, y con la imagen del vuelo DRON se marcaron los polígonos resultantes. Valores cercanos al 100% no representan cambio, valores cercanos al 0% representan una gran variación respecto a la situación inicial, y valores superiores al 100% indican que los valores obtenidos en el estado final son superiores a la situación inicial.

❖ I7: Superficie ocupada por la lámina de agua remansada

Tabla 3. Resultados numéricos de la aplicación del Indicador 7, Fuente: (TRAGSA, 2022)

Seguimiento	Fecha	Superficie remanso (m ²)	Ratio superficie remanso (%)
0. Situación inicial	jul-17	73,626	100
1. Estado final	jul-22	31,163	42,33

La superficie ocupada por la lámina de agua remansada paso de 73,626 m² a 31,163 m², lo que quiere decir que disminuyo 42,463 m² que equivale a una ratio superficie remanso Trofa de 42,33%.

❖ I8: Longitud ocupada por la lámina de agua remansada

Tabla 4. Resultados numéricos de la aplicación del indicador 8, Fuente: (TRAGSA, 2022)

Seguimiento	Fecha	Longitud remanso (m)	Ratio longitud remanso (%)
0. Situación inicial	jul-17	1.783	100
1. Estado final	jul-22	1.143	64,15

La longitud ocupada por la lámina de agua remansada paso de 1.783 m a 1.143 m, lo que quiere decir que su longitud se redujo 640 m, que equivale a una ratio longitud remanso Trofa de 64,15%.

❖ I9: Anchura de la lámina de agua remansada

Tabla 5. Resultados numéricos de la aplicación del indicador 9, Fuente: (TRAGSA, 2022)

Distancia al tapón (m)	Anchuras (m)		Ratio anchura remanso %
	0. Situación inicial (julio 2017)	1. Estado final (julio 2022)	
0	37,67	11,62	30,85
100	33,51	28,57	85,26

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

200	33,61	28,71	85,42
300	24,87	19,96	80,26
400	33,89	25,43	75,04
500	49,07	31,87	64,95
600	53,99	28,57	52,92
700	61,5	42,63	69,32
800	38,56	41,46	107,52
900	29,92	21,71	72,56
1000	35,84	26,3	73,38
1100	39,39	22,1	56,11
1200	49,33	14,4	29,19
1300	50,96	22,6	44,35
1400	45,37	8,63	19,02
1500	45,89	8,56	18,65
1600	30,74	16,83	54,75
1700	34,79	22,29	64,07

Se concluye que, de forma general las anchuras de las láminas de agua en el remanso disminuyeron en la mayoría de los puntos de análisis. A excepción del punto correspondiente a la distancia 800 m ubicada aproximadamente 200 m aguas arriba del puente del Ferrocarril, el cual paso de 35,56 m de ancho a 41,46 m. Por otro lado, el punto localizado en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa presenta una disminución significativa en relación con todos los resultados, pasando de 37,67 m de ancho a 11,62 m.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Las alteraciones hidromorfológicas que se han producido históricamente tanto en el río Manzanares como en el arroyo de Trofa, han tenido como consecuencia, entre otras, la acumulación de sedimentos en la confluencia de ambos. Este depósito ha provocado un remanso aguas arriba del río Manzanares que se manifiesta sobre casi 2 km de longitud, como ya se ha explicado anteriormente.

Una de las actuaciones llevadas a cabo para mitigar los efectos adversos de estas alteraciones, fue realizar un desmantelamiento parcial del depósito de sedimentos y prescribir un programa de avenidas que pudieran movilizar los sedimentos que quedaran en el cauce.

Para conocer el alcance real de dicha medida, es importante realizar un seguimiento del efecto que dicha actuación ha tenido sobre las variables hidráulicas del tramo afectado.

Como parte de los estudios llevados a cabo para realizar dicho seguimiento, se encuadra este trabajo, titulado, Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas, cuyo objetivo general es

- Evaluar la efectividad que ha tenido la eliminación del tapón de sedimentos realizada a finales del año 2017 con respecto al remanso generado en el río Manzanares.

3. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 Descripción del tramo de estudio

El tramo de estudio se corresponde con las coordenadas de inicio X: 434.631,76 Y:4.484.495,56 y fin X: 435.699,779 Y: 4.482.261,861 DATUM ETRS89 Proyección UTM 30N. El inicio se ubica 600 m aguas arriba del fin de la cola del remanso generado por el tapón de Trofa (antes de las actuaciones) y el final hasta 600m aguas abajo de la desembocadura del arroyo de Trofa en el río Manzanares.



Ilustración 6. Ortofoto del año 2022 a la izquierda ubicación del tramo de estudio. Ortofoto del año 2022 a la derecha zoom de la confluencia Manzanares-Trofa

3.2 Estudio preliminar de la información

Para la realización de este trabajo, se han tenido en cuenta algunos datos de los trabajos realizados anteriormente en el mismo tramo de estudio. Por lo tanto, a continuación, se resume la información extraída de cada uno.

- Estudio de simulación hidráulica en la confluencia del Río Manzanares y Arroyo de Trofa (Madrid)

Para realizar cualquier estudio hidráulico es imprescindible contar con datos de caudales y de rugosidad. Por lo tanto, del estudio de INCLAM, se utilizaron los

mismos caudales modelizados (especificados en el epígrafe 1) y los usos de suelo.

- Seguimiento del estado hidromorfológico restauración fluvial del Río Manzanares Fase II: Verano/2022

Del trabajo de TRAGSA, se utilizaron los datos de las 12 batimetrías realizadas en el tramo de estudio en julio de 2022. Estas secciones fueron nombradas bajo la denominación “Psomontes” usando como referencia la zona de Somontes ubicada en la margen izquierda de la confluencia Manzanares-Trofa.

Estos datos se incorporaron al modelo digital del terreno (MDT) del año 2017 aportado por la misma empresa, con la finalidad de representar la topografía del terreno bajo el agua luego de la actuación.

Por otra parte, de este informe se aplicaron los indicadores 17, 18, 19 (especificados en el epígrafe 1), con el objetivo de comparar los resultados de este informe con los obtenidos en este trabajo.

3.3 Descripción del modelo a utilizar

Como se ha explicado en el objetivo del trabajo, para conocer el alcance real de la actuación de la eliminación de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa, se van a evaluar los cambios hidrodinámicos que ha sufrido este tramo.

Para ello se ha utilizado un modelo hidráulico en dos dimensiones que nos proporcione información de las condiciones hidráulicas que tenía el tramo antes de la actuación (pre-actuación) y después de haberse ejecutado (post-actuación).

Para la modelización hidráulica, el programa escogido ha sido IBER (E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, A. Coll, 2014), desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE).

Este programa resuelve las ecuaciones de flujo en lámina libre para aguas poco profundas, específicamente las ecuaciones de St. Venant 2D. Estas ecuaciones se resuelven mediante el método de volúmenes finitos en una malla no estructurada. Además, para que los resultados sean precisos, se requiere información topográfica con un gran detalle. Gracias a estas características, Iber se destaca como uno de los softwares más avanzados en modelización hidráulica en la actualidad.

Iber tiene en cuenta las dos componentes horizontales de la velocidad, y por lo tanto las estimaciones de las variables hidráulicas se acercarán más a la realidad, en tramos donde el flujo sea efectivamente bidimensional.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

A continuación, se detallan cada uno de los datos necesarios para ejecutar el modelo hidráulico escogido.

- Datos topográficos

Como se va a realizar una comparativa, se necesita la topografía que representa el tramo antes y después de la actuación.

Por lo tanto, para este trabajo, se empleó el modelo digital del terreno (MDT) elaborado en el año 2017 por la empresa TRAGSA. Este MDT el cual a partir de ahora se denominará (MDT pre) se generó a partir de imágenes lidar, mediante la eliminación de elementos vegetales y excluyendo edificaciones y puentes, con un tamaño de celda de 1x1m. El sistema de referencia utilizado fue ETRS89, en proyección UTM, huso 30 N (tanto elipsoidal como ortométrica). Dado que este MDT pre cubría una extensa área, se procedió a recortarlo para ajustarlo únicamente al tramo de estudio, con márgenes adicionales para asegurar que la lámina de agua permaneciera dentro del área simulada para los caudales modelizados.

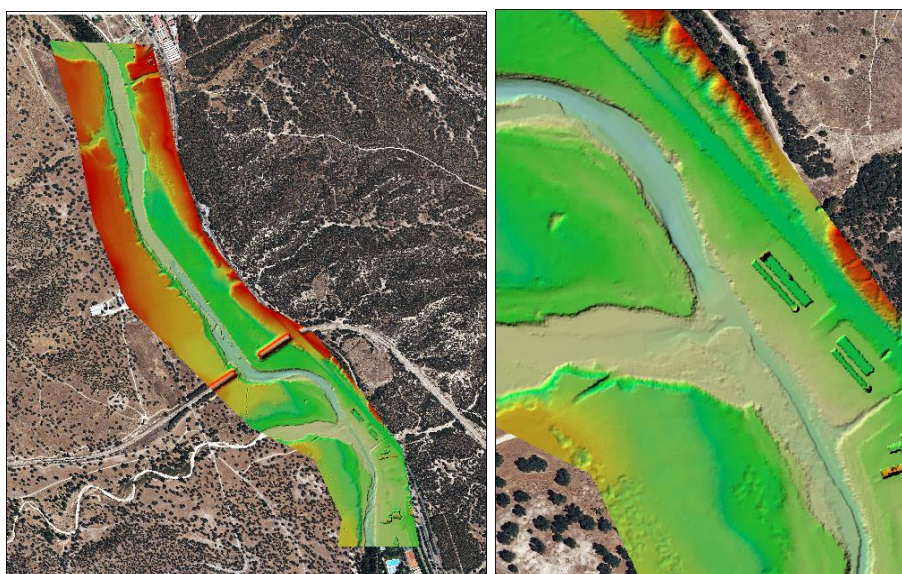


Ilustración 7. MDT Pre, a la derecha la zona de la confluencia del Arroyo Trofa-Manzanares, Fuente: TRAGSA

A partir de este MDT pre, se precisa generar una nueva topografía que represente las condiciones del terreno bajo el agua tras la eliminación del tapón de sedimentos (MDT post), para lo cual fue necesario incluir los datos de las 12 batimetrías realizadas en julio del 2022 por la empresa TRAGSA. En la siguiente ilustración se indica la ubicación de estas secciones.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Ilustración 8. Ubicación de las secciones correspondientes a las batimetrías realizadas en julio de 2022 por la empresa TRAGSA.

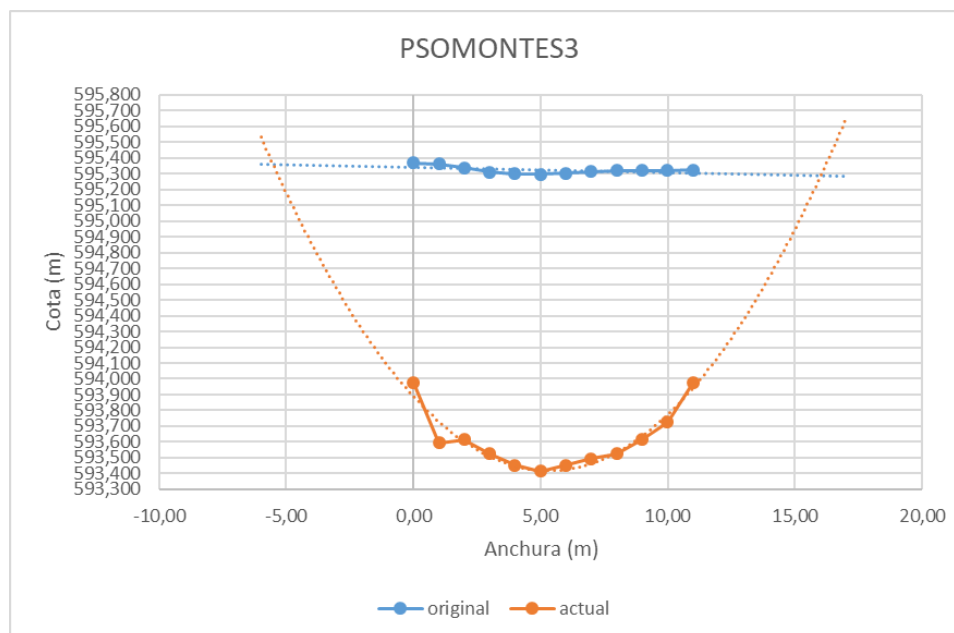
A continuación, se detallan las coordenadas UTM de estas secciones y sus respectivas anchuras.

Tabla 6. Coordenadas UTM de las secciones escogidas y su correspondiente anchura, Fuente: Informe de seguimiento hidromorfológico Manzanares Fase II-2022

Sección:	Coordenadas inicio: margen izquierda			Coordenadas final: margen derecha			Anchura (m)
	X	Y	Cota (m)	X	Y	Cota (m)	
Psomontes 0	435160,76	4483452,56	594,108	435128,22	4483429,03	594,108	40,30
Psomontes 1	435550,91	4483293,06	594,03	435525,65	4483279,88	593,943	29,00
Psomontes 2	435564,36	4483240,83	597,54	435549,36	4483233,11	594,056	17,00
Psomontes 3	435594,12	4483206,44	593,974	435583,94	4483202,31	593,974	11,00
Psomontes 4	435611,4	4483177,05	593,982	435603,66	4483173,55	593,982	8,65
Psomontes 5	435644,73	4483133,11	593,974	435636,67	4483127,14	593,874	10,00
Psomontes 6	435666,54	4483096,83	593,84	435657,66	4483092,22	593,89	10,30
Psomontes 7	435690,8	4483040,45	593,776	435683,14	4483035,92	593,776	8,90
Psomontes 9	435725,06	4482917,69	593,722	435715,6	4482918,6	593,722	9,60
Psomontes 10	435703,86	4482847,75	593,719	435696,21	4482849,09	593,719	7,75
Psomontes 11	435695,43	4482773,25	593,613	435686,07	4482774,9	593,613	9,40
Psomontes 12	435684,2	4482696,89	593,476	435677,15	4482696,24	593,476	7,35

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Para proporcionar una visión más clara de la topografía, se presenta como ejemplo la siguiente gráfica, correspondiente a la sección batimétrica Psomontes3, ubicada en la zona de la actuación. En esta gráfica se observan las diferencias de cotas del terreno entre los perfiles transversales pre (original) y post (actual).



Gráfica 1. Comparación de perfiles topográficos en la sección Psomontes3. La Línea azul corresponde a la topografía del terreno antes de la actuación. La línea naranja representa la topografía del terreno tras la actuación.

El perfil transversal pre-original (azul) de las cotas del terreno antes de la retirada de sedimentos, representa un cauce somero y abierto. Por otro lado, en el perfil transversal post-actual (naranja) se evidencia un cauce más profundo con taludes cerrados y diferencia de cota de hasta 2 m, consecuencia de la actuación realizada. En el anejo II se representan las 12 secciones de las batimetrías y sus respectivas comparaciones.

Creación de curvas de nivel correspondientes a las batimetrías

Después de verificar los perfiles transversales correspondientes a las batimetrías, se procedió a generar las curvas de nivel del MDT pre con una equidistancia de 0,2 m (ilustración 9).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

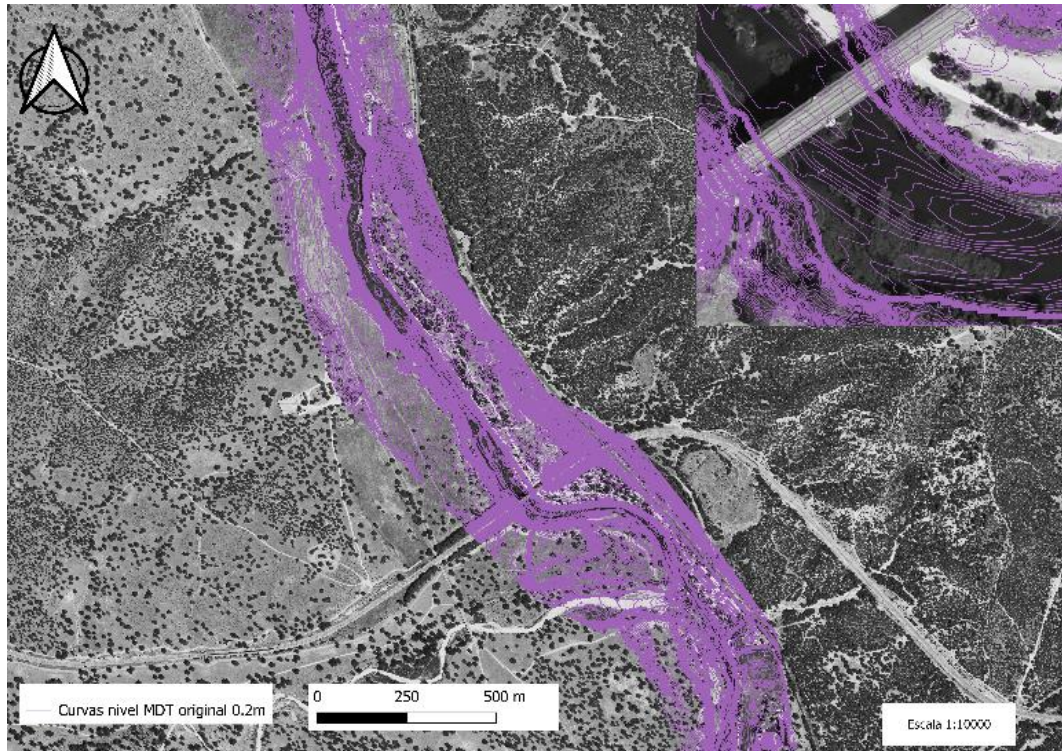


Ilustración 9. Mapa de curvas de nivel MDT pre (0.2m)

Generadas las curvas de nivel, se eliminaron las correspondientes al cauce, y se dibujaron uniendo los puntos de igual cota entre secciones batimétricas. (ilustración 10).

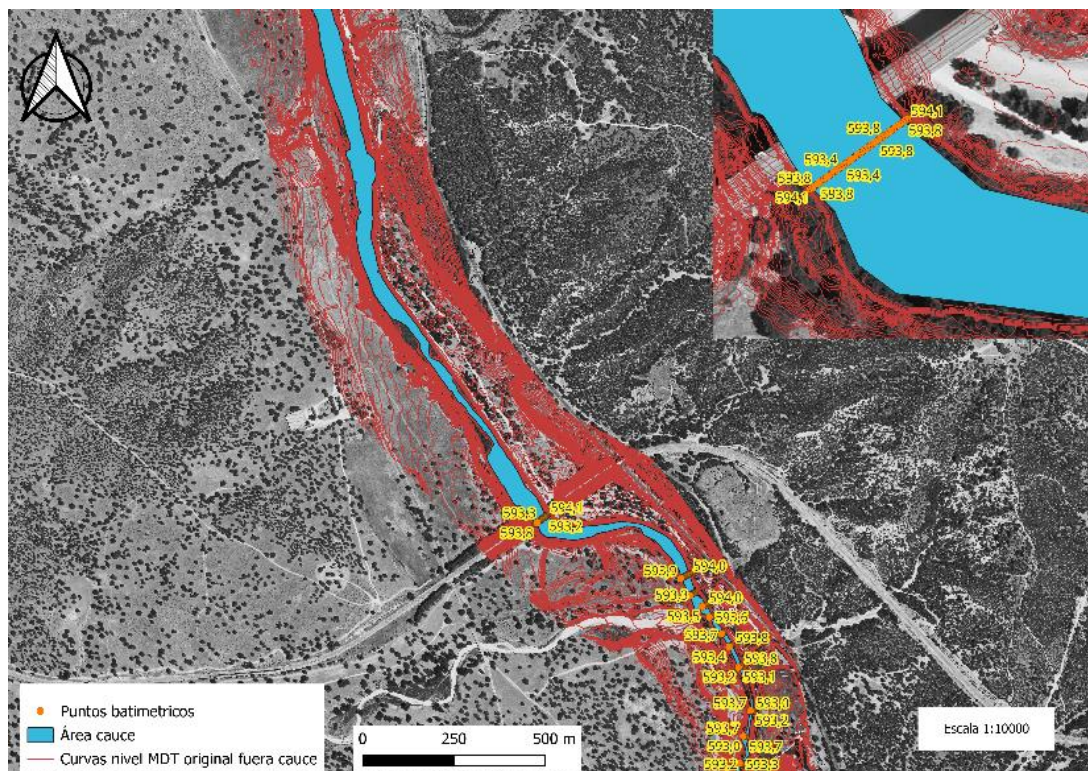


Ilustración 10. Mapa curvas de nivel fuera del cauce y área del cauce

En la ilustración 11, se observa el mapa de curvas de nivel generado con equidistancias de 0,2 m.

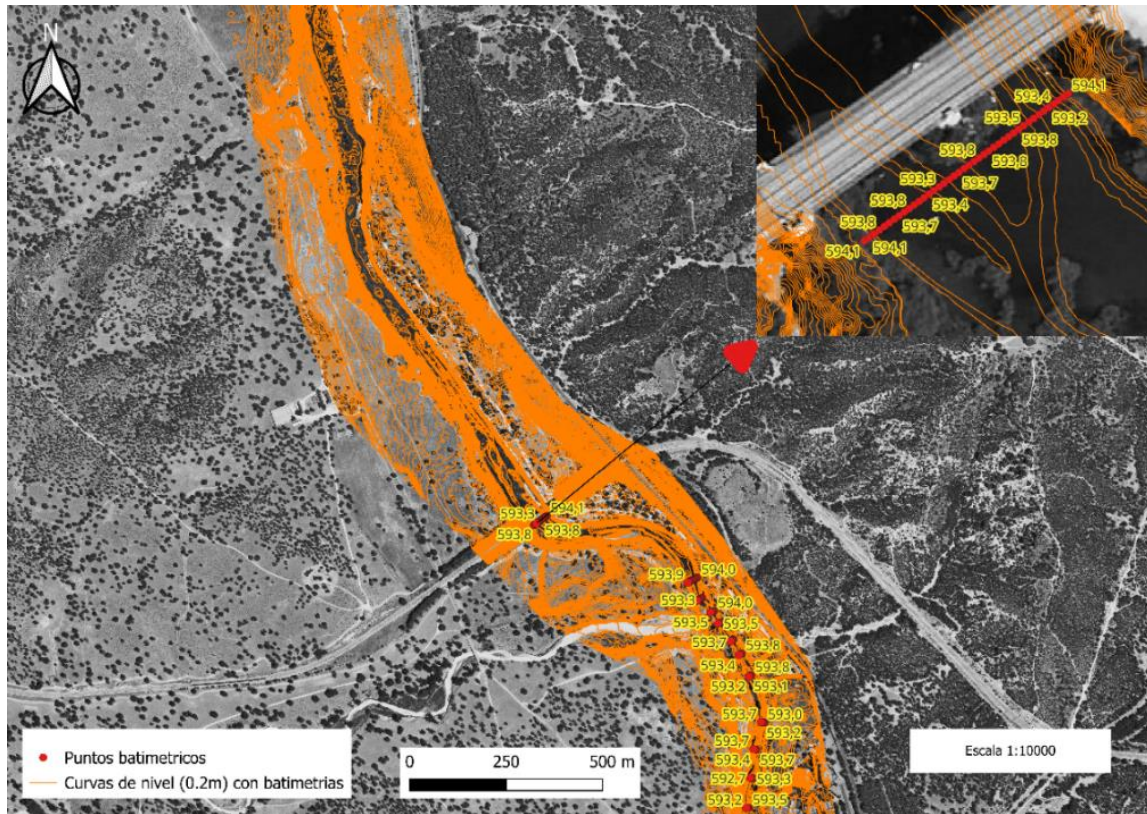


Ilustración 11. Mapa con curvas de nivel incorporando las batimetrías

Generación del MDT post

Después de obtener las curvas de nivel incorporando las batimetrías, es necesario generar el MDT post. Para esto se utilizó la herramienta *Topo To Raster* del software ArcgisPro, donde se ingresó la capa de puntos de los perfiles batimétricos y se le asignó la opción *point elevation*. También se cargó la capa de curvas de nivel incorporando las batimetrías como tipo *contour*.

El tamaño de celda asignado fue de 1x1m, el sistema de referencia utilizado fue ETRS89, en proyección UTM, huso 30 N (tanto elipsoidal como ortométrica).

En la siguiente ilustración, se presenta una comparativa entre el MDT pre y el MDT post. La zona donde se realizó la actuación de eliminación de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa se encuentra rodeada por un círculo rojo. A la izquierda MDT pre y a la derecha MDT post.

Se observa la apertura generada en el cauce y el cambio de coloración amarilla-azul, lo que indica la mejora de la continuidad en este punto luego de la actuación.

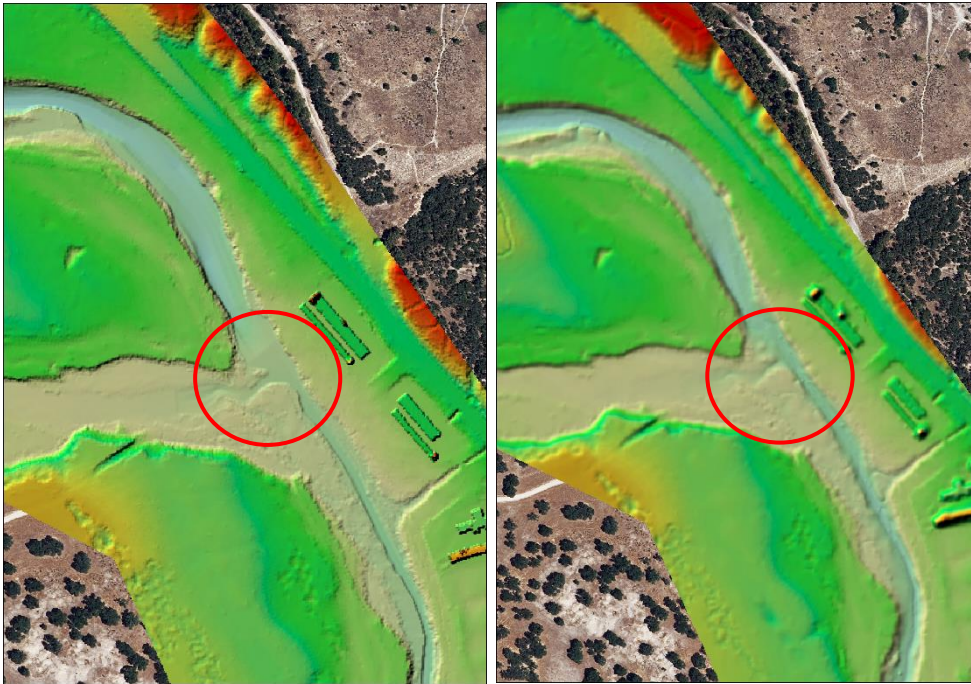


Ilustración 12. Comparativa entre el MDT original del terreno (antes de la actuación) a la izquierda, y el MDT actual (tras la actuación) a la derecha

Geometría

Para poder aplicar las ecuaciones de Saint-Venant, fue necesaria la creación de una geometría que representara fielmente las condiciones del terreno, por lo tanto, el tipo de geometría utilizado es la formada por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN), ya que es la más conveniente cuando se presentan topografías que representan irregularidades o complejidades.

Este RTIN fue creado tanto para el MDT pre como para el MDT post, a partir de sus respectivos raster (.txt).

Cuando Iber genera la geometría empieza creando triángulos de lado igual al tamaño máximo que se ha definido. Seguidamente, verifica si cumple con la tolerancia, en caso de no cumplirse disminuye el tamaño del triángulo. Así repetidas veces hasta que se cumpla con la condición de tolerancia. La disminución del tamaño de los triángulos se realiza hasta que sea aproximadamente igual al tamaño mínimo introducido y cuando este tamaño mínimo se para, se ha cumplido o no el criterio de tolerancia (Barea, 2015).

Por lo otro lado la tolerancia es la diferencia máxima que se está dispuesto a aceptar entre el MDT y la geometría RTIN (Barea, 2015).

Por lo tanto, la geometría utilizada en el trabajo, teniendo en cuenta las variables comentadas anteriormente, consiste en un RTIN de tolerancia 0.3 m, con un lado máximo y mínimo de 10 y 1 metro respectivamente.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

- Condiciones de contorno

Entrada

Para este trabajo, se tomaron en consideración los caudales utilizados en la modelización realizada por la empresa INCLAM en el año 2017. Esto permite comparar los resultados obtenidos. En consecuencia, se establecieron dos entradas ingresadas en Iber como caudal total.

Dos de los caudales utilizados fueron obtenidos de la curva de caudales clasificados, la cual relaciona los caudales medios diarios con su correspondiente percentil de excedencia. El percentil de excedencia representa el tiempo tomando como referencia un año, en que un caudal es igualado o superado. El último caudal permite enmarcar el orden de magnitud de los máximos circulantes. A continuación, se describen cada uno los caudales utilizados.

- Caudal de la avenida habitual “percentil de excedencia 5%” (Q5%): Caudal que se iguala o supera 18 días al año
- Caudal del percentil de excedencia 50% (Q50%): Caudal que se iguala o supera 6 meses al año, representa el comportamiento hidráulico en situación ordinaria.
- Media de los máximos caudales diarios anuales (Q_{cm})

En siguiente tabla se relacionan las entradas consideradas con sus respectivos caudales utilizados.

Tabla 7. Caudales a utilizar en las modelizaciones, Fuente: INCLAM 2017

Entrada	Caudales utilizados		
	Q _{cm} (m ³ /s)	Q5% (m ³ /s)	Q50% (m ³ /s)
Río Manzanares	26,99	7,0	0,9
Arroyo de Trofa	9,98	0,0	0,0

Salida

Debido a que en la salida del tramo de estudio no hay ninguna estructura que permita establecer una curva caudal-lámina de agua, se ha optado por establecer la condición de régimen crítico, caracterizado por el número de Froude (Fr)=1, fuerzas inercia= fuerzas gravedad (M.Ponce, 2016), incluyendo 600 m aguas abajo de la confluencia. Esto con la finalidad de que la condición de salida no influya en los valores de las variables estimadas en el tramo analizado.

En la ilustración 13, se observa la ubicación de las secciones de entrada y salida consideradas para las modelizaciones.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Ilustración 13. Ubicación de las secciones de entrada y salida de los modelos

- Rugosidad

Para generar el mapa de uso del suelo en la zona de estudio, tanto para las modelizaciones pre y post, se han empleado las mismas tipologías desarrolladas en el estudio de simulación hidráulica en la confluencia del río Manzanares y el arroyo de Trofa (Madrid), realizado por la empresa INCLAM en el año 2017. Es posible que luego de las actuaciones de restauración realizadas en el tramo de estudio, se presenten cambios en el uso del suelo. Estos posibles cambios fueron descartados para la asignación de la rugosidad en la modelización post al no contar con datos reales y actuales.




Como complemento, se ha utilizado la fotointerpretación de la ortofoto más reciente disponible para crear el mapa de rugosidades en formato raster. Posteriormente, este mapa se ha convertido a formato ASCII (.txt), el cual es reconocido para la asignación automática de la rugosidad en Iber.

Los usos de suelo definidos como: masa forestal (25, 50, 75 y 100) hacen referencia a la fracción de cabida cubierta definida como la *proporción de la superficie del rodal cubierta por la proyección de las copas de los árboles, expresada indistintamente en tanto por ciento; es uno de los índices de espesura más habituales y su notación es F_{cc}* (Real academia de Ingeniería, s.f.).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Por otro lado, los tipos de cauces presentes en el tramo de estudio se describen en la tabla 8.

Tabla 8. Tipos de cauces utilizados, Fuente: INCLAM 2017

Tipos de cauce	Fotografía	Descripción
Cauce somero		Corresponde a un cauce somero, con lecho rocoso de tamaño mediano, descubierta de vegetación.
Cauce con vegetación arbórea		Corresponde a un cauce con abundante vegetación arbórea y arbustiva en las orillas, carrizos y restos vegetales presentes.
Cauce con vegetación riparia densa		Corresponde a un cauce rodeado por vegetación riparia densa, arbustos de talla media y baja con presencia de eutrofización.

En la ilustración 14, se representan todos los tipos de uso del suelo utilizados para la asignación de la rugosidad y en la tabla 9, la respectiva *n* de Manning asignada para cada uso.

Tabla 9. n de Manning correspondiente para cada uso de suelo asignado, Fuente: INCLAM 2017

Uso del suelo	n de Manning
Red viaria	0,02
Suelo desnudo	0,03
Masa forestal 100	0,06
Masa forestal 75	0,05
Urbano	0,03
Cauce con vegetación riparia densa	0,05
Arena/arcilla	0,023
Limo	0,028
Cauce con vegetación arbórea	0,048
Cauce somero	0,033

Masa forestal 50	0,04
Masa forestal 25	0,03

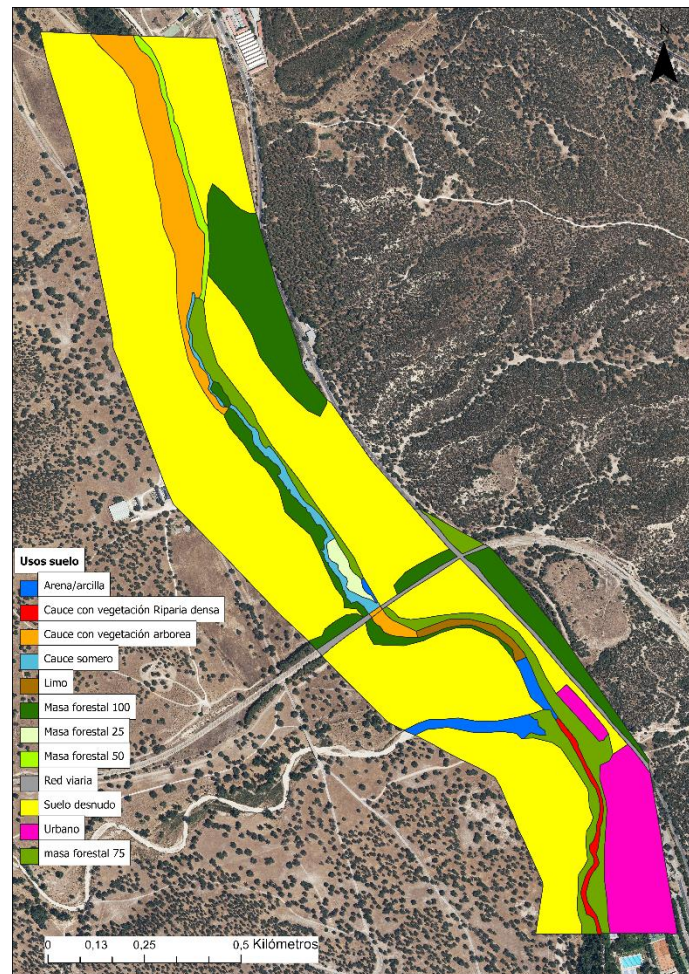


Ilustración 14. Mapa de usos del suelo asignados al tramo de estudio

- Malla de cálculo

La malla se crea a partir del RTIN generado. Se utiliza una malla no estructurada, asignando un elemento por superficie. Este tipo de malla es ideal cuando se trabaja con geometrías complejas.

La cantidad de nodos obtenidos para la malla del MDT pre es de 110891 nodos y 217233 elementos, mientras que para la malla correspondiente al MDT post, el número de nodos es de 53414 y 102332 elementos.

En la siguiente ilustración se muestra cómo se ha generado la malla en una parte del tramo. Los triángulos rectángulos irregulares son más pequeños donde la irregularidad topográfica es más importante; cuando el tramo es más uniforme, Iber permite que los triángulos rectángulos sean mayores- siempre que se cumplan las hipótesis establecidas de tolerancia y lado máximo. De esta manera,

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

se reduce el número de puntos donde se resuelven las ecuaciones, y se reducen, por tanto, los tiempos de simulación.

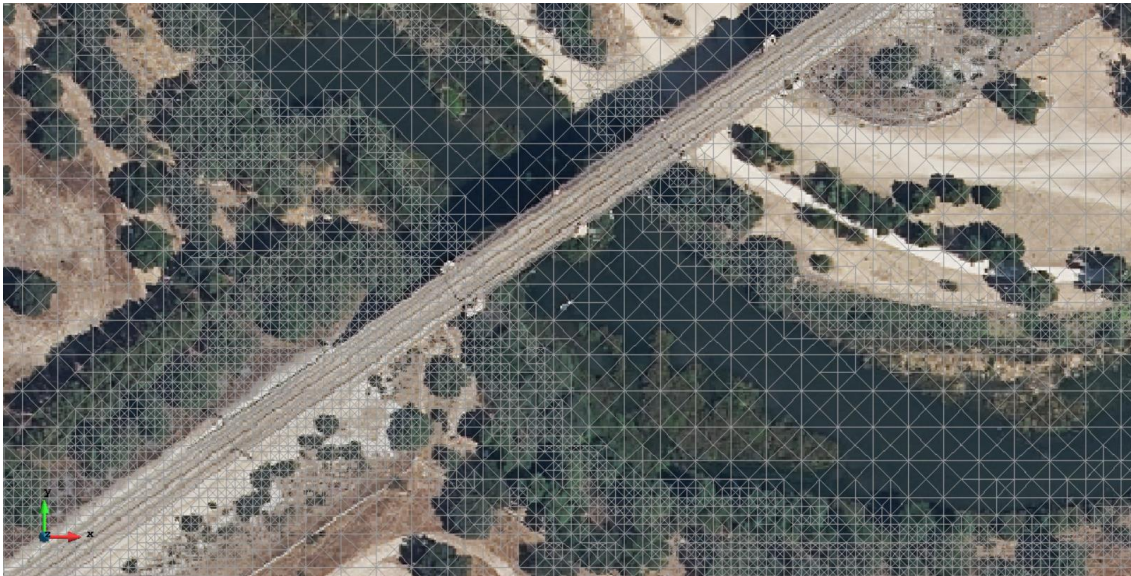


Ilustración 15. Malla no estructura generada a partir de un elemento por superficie, Fuente: IBER 2D

- Tiempos de simulación

Los tiempos de simulación son los requeridos para alcanzar el régimen permanente, cuando el caudal de entrada es igual al caudal de salida. En Iber, este tiempo se corresponde con los segundos necesarios para lograr dicha condición denominado “paso”.

- Variables resultado

De los resultados obtenidos de cada una de las modelizaciones en Iber, se utilizaron tres variables necesarias para evaluar el comportamiento hidráulico del tramo de estudio. Estas variables fueron exportadas en formato. ASC, el cual es un tipo de raster que contiene la información expresadas en secuencias de caracteres ASCII que consta de valores de datos ordenados por filas y por columnas (IBM, 2014), los cuales fueron cargados en sistemas de información geográfica para sus respectivos análisis. Estas fueron:

Calado

El calado se define como la diferencia entre la superficie del agua y la cota del terreno, su unidad de medida de forma general son los metros. Para obtenerla basta con marcar la casilla correspondiente en la pestaña “resultados” del módulo datos del problema.

Cota lámina de agua

La cota lámina de agua hace referencia a los metros tomando como referencia el nivel del mar a los que se encuentra la superficie del agua. Para obtener esta

variable, es necesario activar la casilla “cota del agua” en la pestaña resultados del módulo datos del problema, la unidad de medida en el sistema internacional son los metros.

Velocidad

Se expresa en m/s. Para obtener resultados de velocidad es necesario activar la casilla correspondiente en la pestaña “resultados” del módulo datos del problema en Iber. Como resultado se obtuvo el módulo velocidad $|V|$, que corresponde con la velocidad instantánea en un punto determinado.

3.4 Validación del modelo

Con la finalidad de validar el modelo utilizado, se compararon resultados de calados y velocidades correspondientes al caudal Q50% obtenidos del MDT pre, con los resultados obtenidos por la empresa INCLAM en su estudio. Para realizar esta comparación fue necesario asignar los valores Z de los raster de calados y velocidades, a las líneas correspondientes de las secciones batimétricas (Psomontes0 y Psomontes2). Estas secciones fueron seleccionadas por ubicarse en la zona del remanso.

3.5 Indicadores para la evaluación de la actuación

Para evaluar de forma cuantitativa la actuación, se han aplicado los indicadores I7, I8 e I9 del informe de TRAGSA en la zona del remanso, la cual está delimitada desde la sección D=500 (final de la cola del remanso antes de las actuaciones) hasta la sección D=2200 (confluencia Manzanares-Trofa) (Ver ilustración 16).

Estos indicadores se aplicaron solo a las variables resultado de las modelizaciones pre y post correspondientes al Q50% que representa la “normalidad” del río.

I7: Superficie ocupada por la lámina de agua remansada

Esta superficie se determinó a partir de los raster de calados, sumando todos los píxeles de 1 m² con valores >0 m en la zona del remanso.

La ratio que representa el cambio en la superficie ocupada por la lámina de agua remansada se calculó mediante la fórmula;

$$\text{Ratio superficie remanso (\%)} = \frac{\text{Superficie remanso post (m}^2\text{)}}{\text{Superficie remanso pre (m}^2\text{)}} * 100$$

I8: Longitud ocupada por la lámina de agua remansada

Para determinar la longitud ocupada por la lámina de agua remansada, lo primero fue dibujar en SIG el Thalweg del río Manzanares, uniendo los puntos de menor cota a lo largo del cauce con ayuda de las curvas de nivel.

A esta línea generada se le asignaron los valores Z correspondientes a las cotas de las láminas de agua (CLA) con la opción interpolar forma. En la siguiente ilustración se observa la línea del Thalweg con secciones trazadas cada 100 m.



Ilustración 16. Distribución de distancias. D=0 m (inicio del tramo), D= 2200 m (confluencia Manzanares-Trofa)

De este modo se obtuvieron 2 líneas con valores de cota de lámina de agua (pre y post). Luego se crearon los gráficos de perfil respectivos para su análisis.

La ratio que representa el cambio en la longitud ocupada por la lámina de agua remansada se calculó mediante la fórmula;

$$\text{Ratio longitud remanso } \% = \frac{\text{Longitud remanso post (m)}}{\text{longitud remanso pre(m)}} * 100$$

I9: Anchura de la lámina de agua remansada

Para el análisis de este indicador se utilizó la misma distribución de distancias reflejadas en la ilustración 16. La ratio que representa el cambio en la anchura de la lámina de agua remansada se calculó mediante la fórmula;

$$\text{Ratio anchura remanso } \% = \frac{\text{Anchura remanso post(m)}}{\text{Anchura remanso pre(m)}} * 100$$

Y, por último, se complementó con un nuevo indicador propuesto para este trabajo.

Volumen de agua

Se obtuvo el volumen de agua de todo el tramo de estudio en la situación pre y post. Para su cálculo fue necesario extraer la información de los raster de calados. El volumen de agua se determinó mediante la fórmula;

$$\text{Volumen agua} = \sum \text{número de píxeles (m}^2\text{)} * \text{valor de calado} > 0 \text{ m}$$

3.6 Simulaciones

Se han realizado en total 6 simulaciones: 3 para el MDT pre y 3 para el MDT post. El tiempo total fue de 338000s (5633,33 min).

En la siguiente tabla se exponen los caudales, tiempos de simulación, intervalos y pasos, correspondientes a cada modelización.

Tabla 10. Resumen de las modelizaciones realizadas con sus respectivos caudales, tiempos de simulación, intervalos definidos, y paso en el que se alcanza el régimen permanente.

Condición	Modelizaciones	Caudal	Tiempo de simulación (s)	Intervalo (s)	Paso (s)
MDT pre	Modelización 1	Q50%	122000	2000	122000
	Modelización 2	Q5%	40000	1000	39000
	Modelización 3	Qcmed	25000	1000	25000
MDT post	Modelización 4	Q50%	86000	2000	86000
	Modelización 5	Q5%	40000	1000	34000
	Modelización 6	Qcmed	25000	1000	19000

4. RESULTADOS

4.1 Validación del modelo

Como se detalla en el epígrafe 1, en el año 2017 se realizó una modelización hidráulica bidimensional en el mismo tramo de estudio. Las condiciones de contorno, los usos del suelo y los caudales utilizados en ese entonces se replicaron en el presente trabajo. Esta comparativa tiene como objetivo validar el modelo del MDT pre para luego replicar las mismas condiciones al modelo del MDT post.

Para validar el modelo del MDT pre, se calculó la diferencia porcentual de la variable calado y la diferencia absoluta de la variable velocidad, las cuales están definidas mediante las expresiones;

$$\text{Diferencia porcentual (\%)} = \frac{|(\text{Variable modelización INCLAM} - \text{Variable modelización trabajo actual})|}{\text{Variable modelización INCLAM}} * 100$$

$$\text{Diferencia absoluta} = |(\text{Variable modelización INCLAM} - \text{Variable modelización trabajo actual})|$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de calados y diferencias porcentuales (%) obtenidas en la sección Psomontes0.

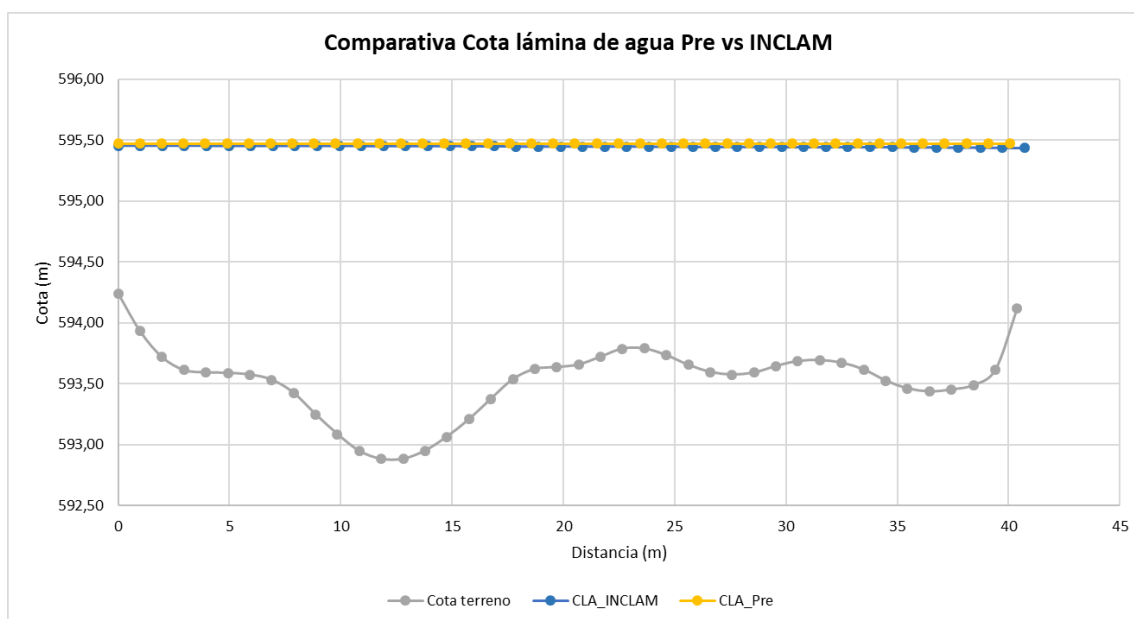
Tabla 11. Valores de calado (m) de los resultados INCLAM-PRE en la sección Psomontes0

Distancia (m)	Calado (m)		
	Sección: Psomontes0		
	INCLAM	PRE	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)
0,0	1,11	1,19	7,21
1,0	1,46	1,46	0,00
2,0	1,69	1,69	0,00
3,0	1,82	1,79	1,65
3,9	1,86	1,86	0,00
4,9	1,86	1,94	4,30
5,9	1,87	1,99	6,42
6,9	1,91	2,04	6,81
7,9	2,00	2,09	4,50
8,9	2,17	2,13	1,84
9,8	2,34	2,18	6,84
10,8	2,48	2,21	10,89
11,8	2,57	2,19	14,79
12,8	2,57	2,16	15,95
13,8	2,51	2,13	15,14
14,8	2,41	2,10	12,86
15,7	2,27	2,07	8,81
16,7	2,10	2,04	2,86
17,7	1,93	2,00	3,63

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

18,7	1,84	1,97	7,07
19,7	1,81	1,93	6,63
20,7	1,80	1,89	5,00
21,7	1,73	1,84	6,36
22,6	1,67	1,83	9,58
23,6	1,66	1,83	10,24
24,6	1,71	1,84	7,60
25,6	1,78	1,85	3,93
26,6	1,85	1,85	0,00
27,6	1,87	1,86	0,53
28,5	1,86	1,89	1,61
29,5	1,80	1,91	6,11
30,5	1,76	1,93	9,66
31,5	1,75	1,94	10,86
32,5	1,77	1,95	10,17
33,5	1,82	1,96	7,69
34,4	1,91	1,95	2,09
35,4	1,98	1,95	1,52
36,4	2,00	1,93	3,50
37,4	1,99	1,83	8,04
38,4	1,95	1,63	16,41
39,4	1,83	1,29	29,51
40,4	1,37	0,81	40,88
MEDIA			4,34

La media de la diferencia porcentual corresponde a 4,34%, lo que indica que en esta sección los valores de calados son similares. En la siguiente gráfica se representa la comparativa de CLA entre ambos resultados.



Gráfica 2. Comparativa de calados en la sección Psomontes0, a partir de la representación del terreno y cotas de láminas de agua respectivas.

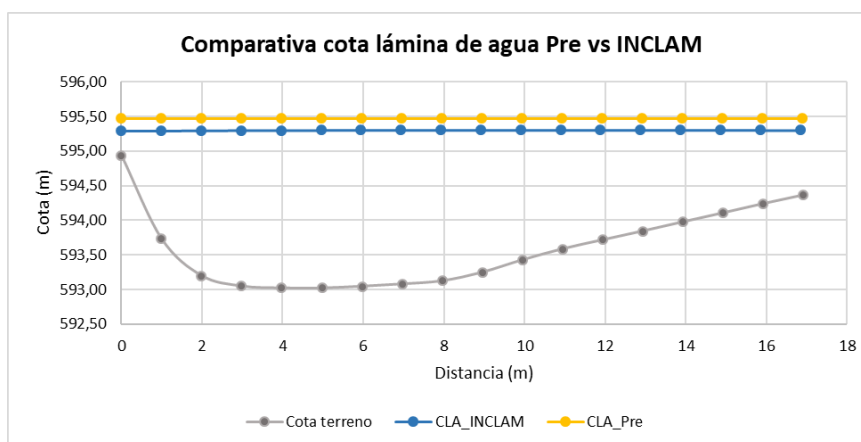
Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Por otro lado, en la siguiente tabla se muestran los resultados de calados y diferencias porcentuales obtenidas en la sección Psomontes2.

Tabla 12. Valores de calado (m) de los resultados INCLAM-PRE en la sección Psomontes2

Distancia (m)	Calado (m)		
	Sección: Psomontes2		
	INCLAM	PRE	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)
0,0	0,36	1,17	225,00
1,0	1,55	1,75	12,90
2,0	2,1	2,07	1,43
3,0	2,25	2,22	1,33
3,9	2,28	2,28	0,00
4,9	2,28	2,22	2,63
5,9	2,26	2,14	5,31
6,9	2,23	2,07	7,17
7,9	2,18	2,01	7,80
8,9	2,06	1,95	5,34
9,9	1,88	1,88	0,00
10,8	1,73	1,77	2,31
11,8	1,59	1,65	3,77
12,8	1,47	1,52	3,40
13,8	1,33	1,39	4,51
14,8	1,21	1,26	4,13
15,8	1,07	1,13	5,61
16,8	0,95	0,96	1,05
	MEDIA		3,6

Como se evidencia la media de los porcentajes de cambio corresponde a 3,60%, lo que indica que en esta sección los valores de calados son similares. En la siguiente gráfica se representa la comparativa de CLA entre ambos resultados.



Gráfica 3. Comparativa de calados en la sección Psomontes2, a partir de la representación del terreno y cotas de láminas de agua respectivas

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Respecto a la comparativa (INCLAM-pre) de velocidades en las secciones Psomontes0 y Psomontes2, se determinó una diferencia media de 0,01 m/s.

Por lo tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos, se aceptan las condiciones introducidas para la modelización (condiciones de contorno, usos de suelo, caudales) para ser utilizadas en la modelización con el MDT post.

4.2 Comparativa de resultados hidráulicos (MDT pre vs MDT post)

A continuación, se realiza una comparativa de los resultados de calados y velocidades obtenidos para los caudales Q5%, Q50% y Q_{med}, con el objetivo de mostrar el cambio que se produce en la funcionalidad hidráulica luego de la eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa.

Esta comparativa se llevó a cabo en dos partes. Primero se realizaron comparativas gráficas de calados y velocidades para los caudales Q5%, Q50% y Q_{med}. Luego se utilizaron las dos secciones ubicadas en la zona del remanso (Psomontes0 y Psomontes2) para calcular las diferencias de calado correspondientes al caudal Q50% en las situaciones pre-post.

Q5%

❖ Calados

Se observa descenso de hasta 1 m de calado en la zona del puente del Ferrocarril. En la modelización del MDT post se observa una desconexión longitudinal con el arroyo de Trofa.

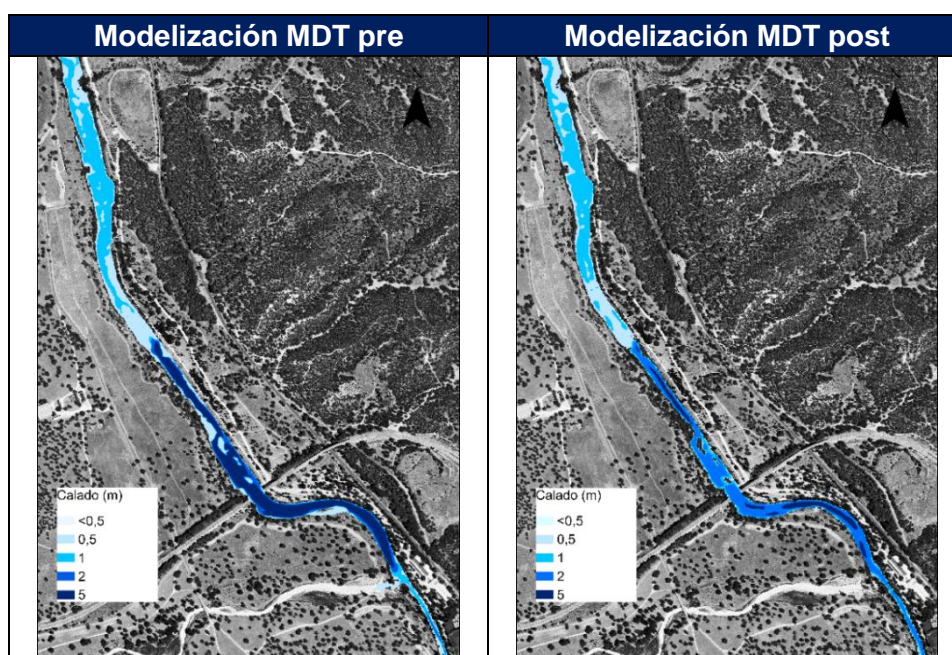


Ilustración 17. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Q5%

❖ Velocidades

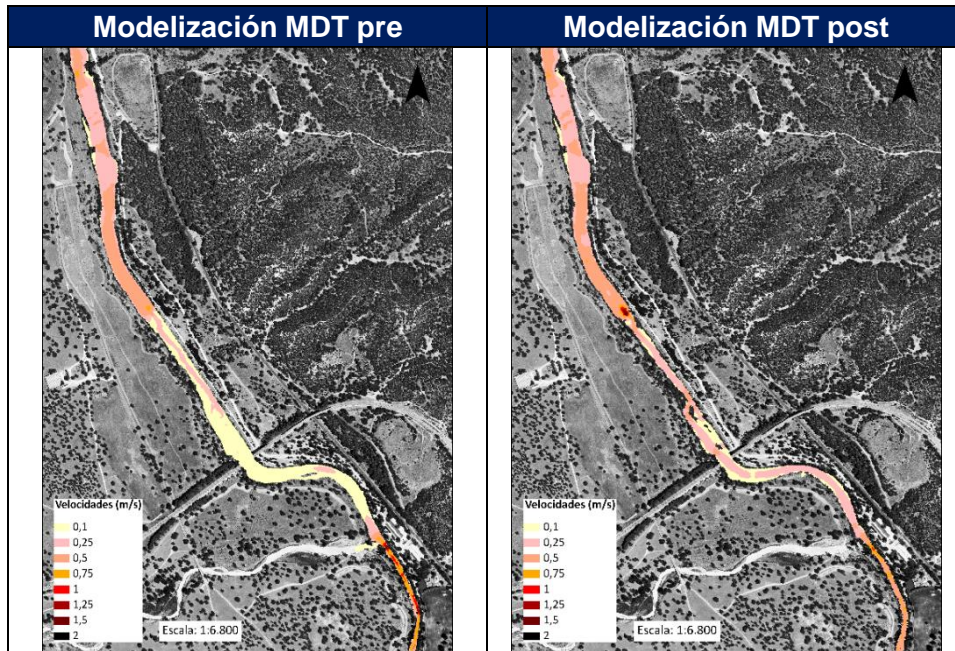


Ilustración 18. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q5%.

Se observa el aumento generalizado de la velocidad en la zona del remanso, siendo este significativo en el tramo comprendido entre la confluencia Manzanares-Trofa y el puente del Ferrocarril, donde pasó de 0,1 a 0,25 m/s.

Q50%

❖ Calados

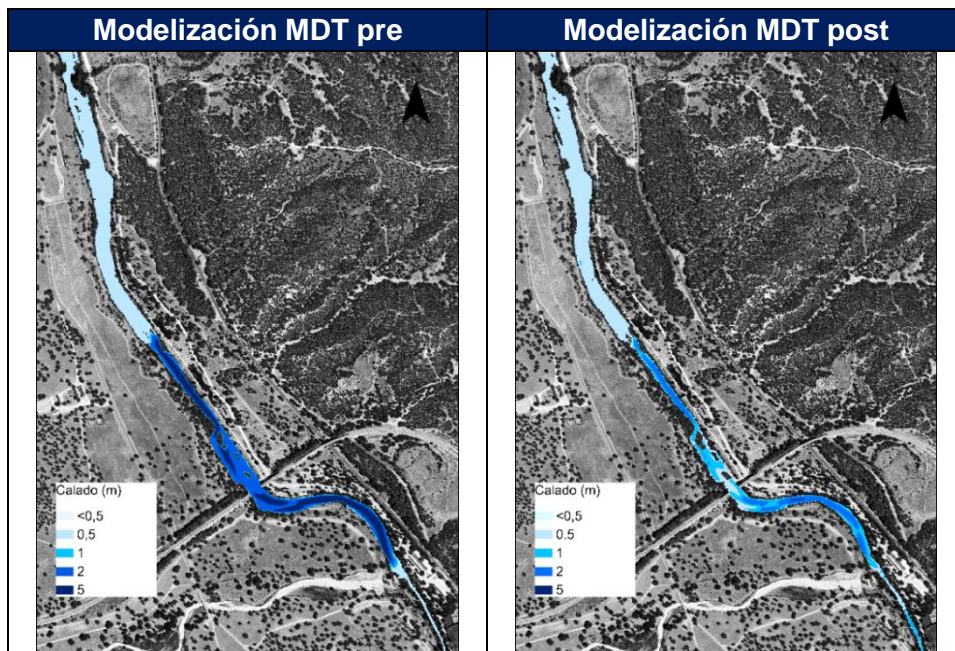


Ilustración 19. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Q50%

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

A partir de la comparativa gráfica, se observa que de forma generalizada los valores de calado disminuyen en el remanso, siendo significativa en el puente del Ferrocarril, donde pasa de registros de 2 a 0,5 m.

❖ Velocidades

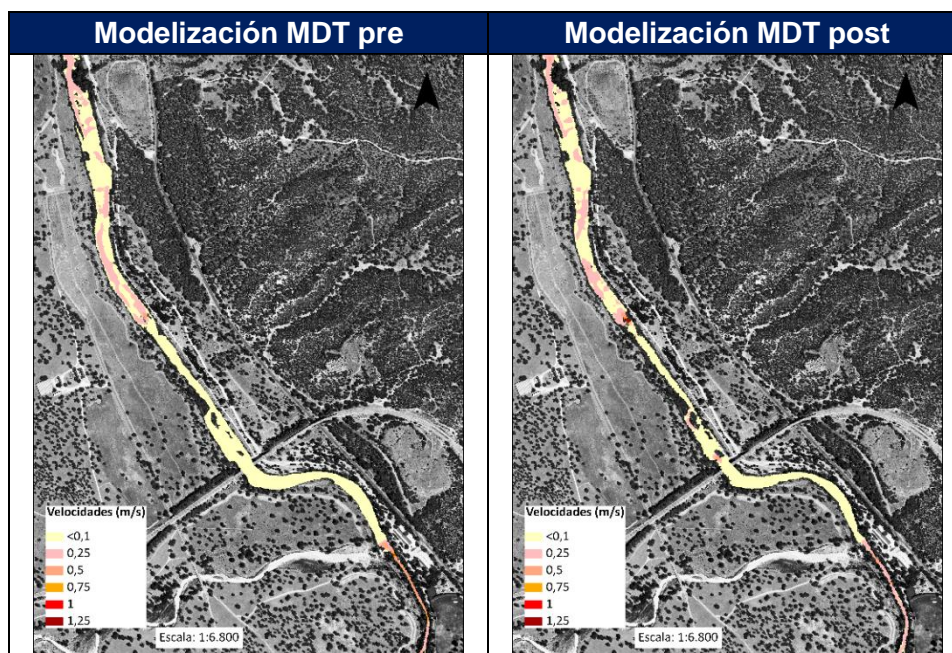


Ilustración 20. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q50%

Respecto a la comparativa de velocidades para el Q50%, los cambios no son significativos.

Qcmed

❖ Calados

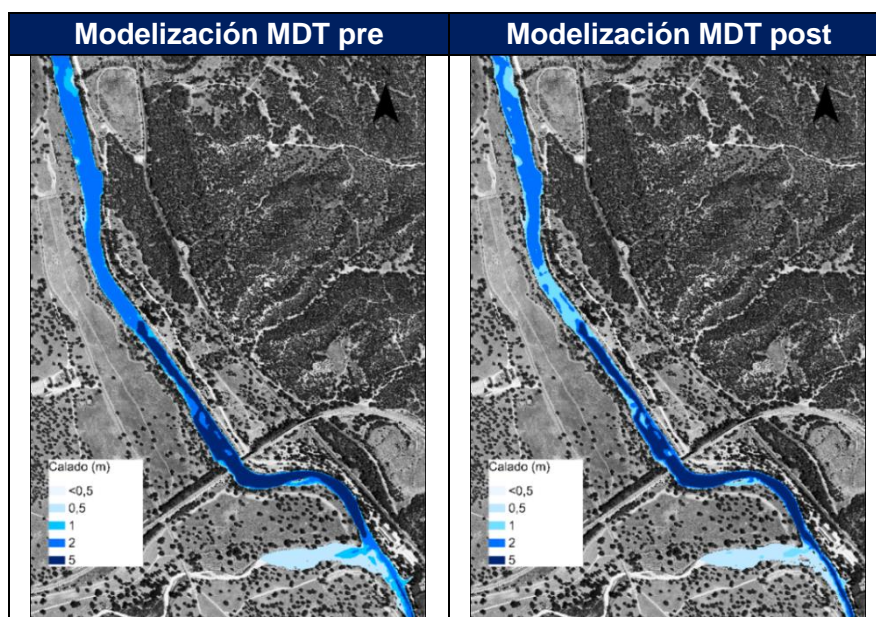


Ilustración 21. Comparativa gráfica resultados de calados modelización MDT pre y MDT post, para Qcmed

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Se observa disminución de 0,5 m de calado en la zona del puente del Ferrocarril. De igual forma este descenso se observa en zona puntual ubicada en el inicio del tramo, donde pasa de 2 a 1 m de calado.

❖ Velocidades

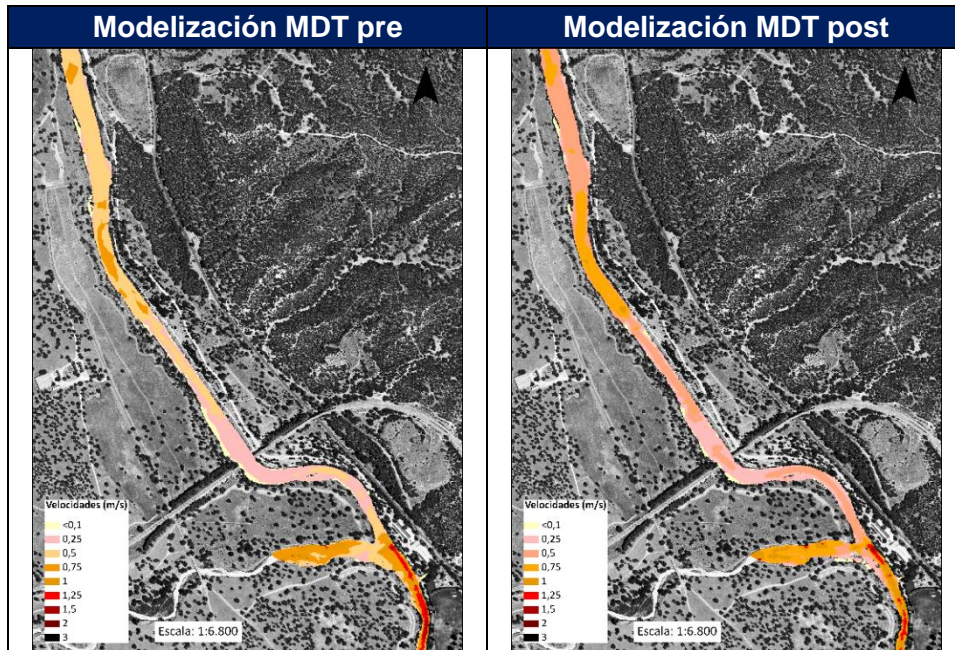


Ilustración 22. Comparativa gráfica resultados de velocidades modelización MDT pre y MDT post, para Q_{cmed}

Respecto a la comparativa grafica de velocidades resultado de las modelizaciones de Q_{cmed} , se observa que la velocidad pasa de aproximadamente 0,25 m/s a 0,5 m/s, en el tramo ubicado entre el final de la cola del remanso y el puente del Ferrocarril.

Comparativa de resultados en las secciones batimétricas

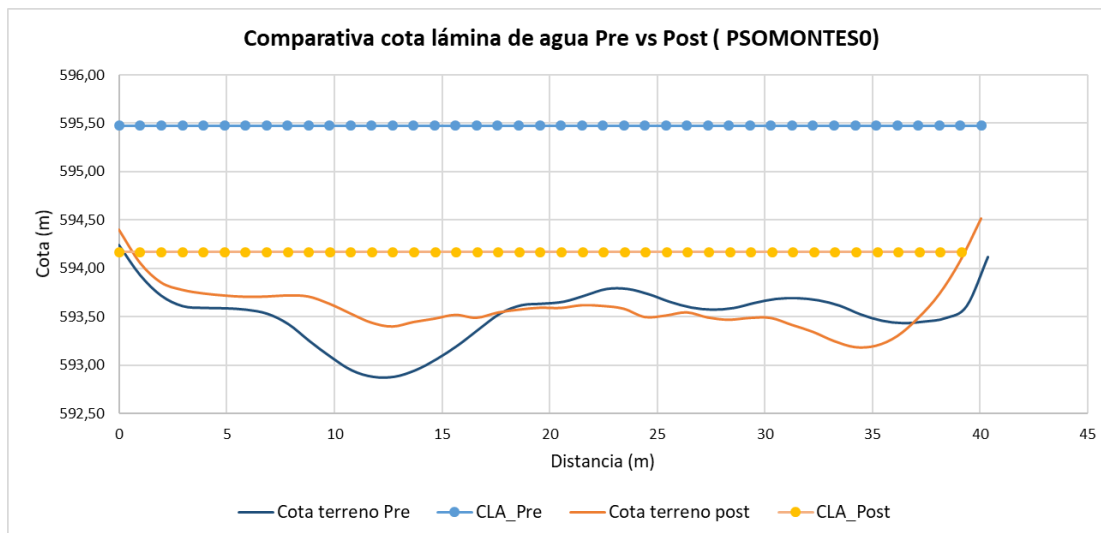
En la siguiente tabla se muestran los valores de calados y la diferencia de calado registrados en la sección Psomontes0.

Tabla 13. Comparativa de resultados de calados (Pre-Post) en la sección Psomontes0

DISTANCIA (m)	CALADO PRE (m)	CALADO POST (m)	DIFERENCIA CALADO (m)
0,00	1,19	0,23	0,96
1,00	1,46	0,30	1,16
2,00	1,69	0,30	1,39
3,00	1,79	0,41	1,38
3,90	1,86	0,47	1,39
4,90	1,94	0,57	1,37
5,90	1,99	0,59	1,40
6,90	2,04	0,60	1,44
7,90	2,09	0,62	1,47
8,90	2,13	0,63	1,50
9,80	2,18	0,65	1,53
10,80	2,21	0,63	1,58
11,80	2,19	0,61	1,58
12,80	2,16	0,58	1,58
13,80	2,13	0,58	1,55
14,80	2,10	0,54	1,56
15,70	2,07	0,51	1,56
16,70	2,04	0,49	1,55
17,70	2,00	0,46	1,54
18,70	1,97	0,45	1,52
19,70	1,93	0,44	1,49
20,70	1,89	0,42	1,47
21,70	1,84	0,43	1,41
22,60	1,83	0,49	1,34
23,60	1,83	0,54	1,29
24,60	1,84	0,54	1,30
25,60	1,85	0,56	1,29
26,60	1,85	0,57	1,28
27,60	1,86	0,62	1,24
28,50	1,89	0,68	1,21
29,50	1,91	0,72	1,19
30,50	1,93	0,79	1,14
31,50	1,94	0,79	1,15
32,50	1,95	0,77	1,18
33,50	1,96	0,66	1,30
34,40	1,95	0,62	1,33
35,40	1,95	0,46	1,49
36,40	1,93	0,39	1,54
37,40	1,83	0,31	1,52
38,40	1,63	0,00	1,63
39,40	1,29	0,00	1,29
40,40	0,81	0,00	0,81
		MÁXIMO	1,63
		MEDIA	1,37

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

La diferencia máxima en los valores de calado pre-post corresponde a 1,63 m, y la diferencia media en toda la sección a 1,37 m. En la siguiente gráfica se representa el cambio generado en la cota de lámina de agua en las situaciones pre y post.



Gráfica 4. Comparativa de calados en situaciones pre vs post (Psomontes0), a partir de la representación de las cotas del terreno y cotas de láminas de agua respectivas

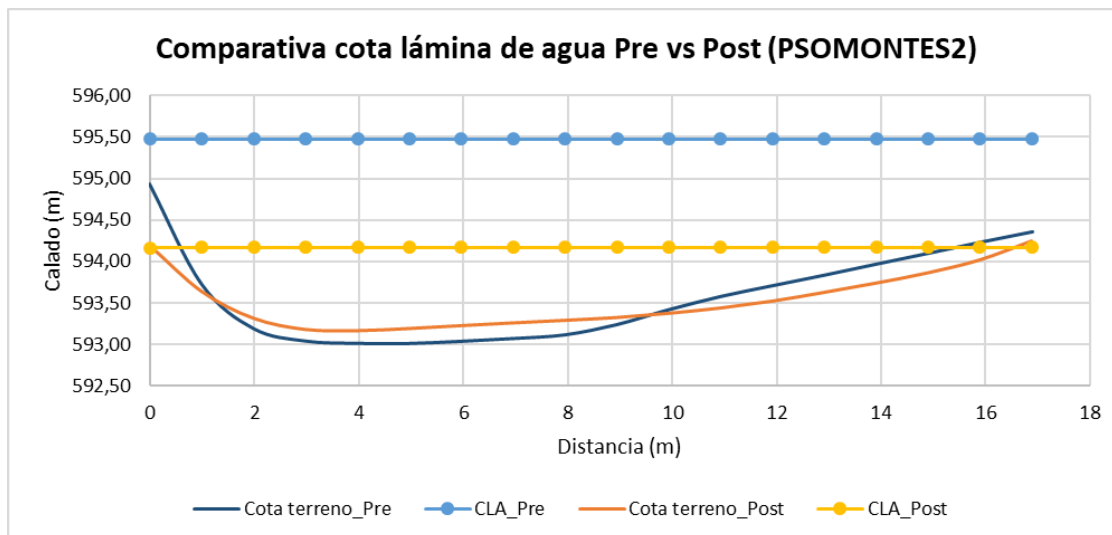
Por otra parte, en la siguiente tabla se muestran los resultados de la comparación realizada en la sección Psomontes2.

Tabla 14. Comparativa de resultados de calados (Pre-Post) en la sección Psomontes2

DISTANCIA (m)	CALADO PRE (m)	CALADO POST (m)	DIFERENCIA CALADO (m)
0,00	1,17	0,42	0,75
0,99	1,75	0,65	1,10
1,98	2,07	0,76	1,31
2,98	2,22	0,89	1,33
3,97	2,28	0,89	1,39
4,96	2,22	0,89	1,33
5,95	2,14	0,84	1,30
6,95	2,07	0,81	1,26
7,94	2,01	0,77	1,24
8,93	1,95	0,73	1,22
9,92	1,88	0,68	1,20
10,92	1,77	0,64	1,13
11,91	1,65	0,57	1,08
12,90	1,52	0,53	0,99
13,89	1,39	0,46	0,93
14,89	1,26	0,42	0,84
15,88	1,13	0,00	1,13
16,87	0,96	0,00	0,96
	MÁXIMO		1,39
	MEDIA		1,12

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

La diferencia máxima en los valores de calado pre-post corresponde a 1,39 m, y la diferencia media en toda la sección a 1,12 m. En la siguiente grafica se representa el cambio generado en la cota de lámina de agua en las situaciones pre y post.



Gráfica 5. Comparativa de calados en situaciones pre vs post (Psomontes2), a partir de la representación de las cotas del terreno y cotas de láminas de agua respectivas

4.3 Indicadores hidráulicos aplicados

❖ I7: Superficie ocupada por la lámina de agua remansada

Tabla 15. Cálculo de la superficie ocupada por la lámina de agua remansada (Pre-Post)

Condición	Superficie remanso (m ²)	Ratio superficie remanso (%)
Modelización pre	73,207	100
Modelización post	61,216	83,62

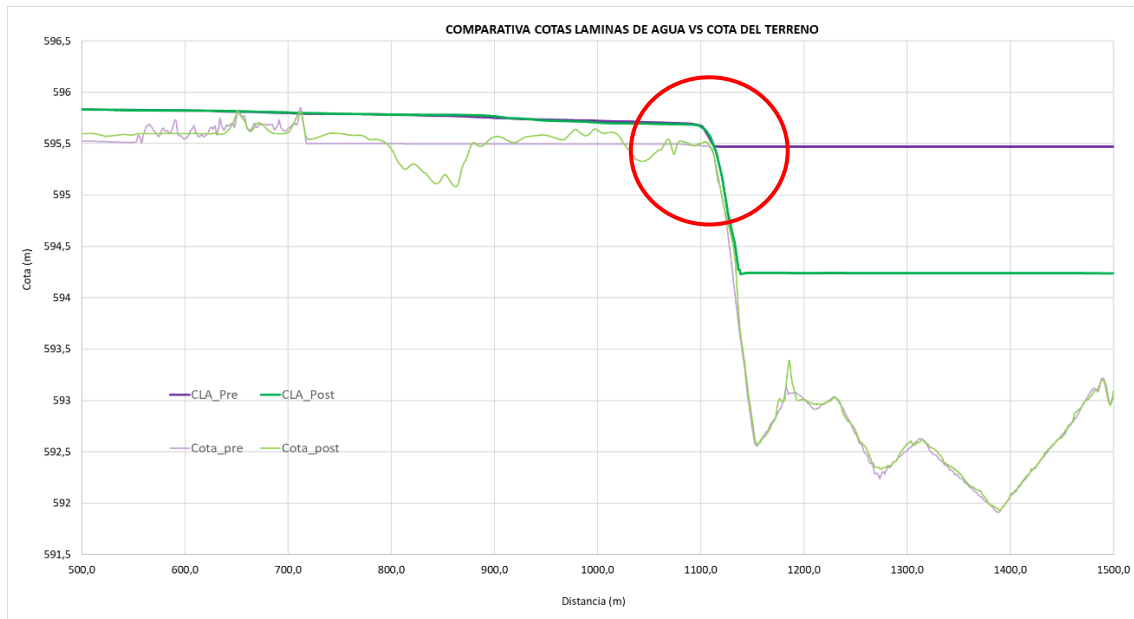
La superficie ocupada por la lámina de agua remansada paso de 73,207 m² a 61,216 m², lo que quiere decir que disminuyo 16,38% que equivale a 11,991 m².

❖ I8: Longitud ocupada por la lámina de agua remansada

Este indicador no fue posible calcularlo ya que al comparar los perfiles de las cotas de la lámina de agua con sus respectivas cotas del terreno del tramo (Ver Anejo II) en las situaciones pre y post, se ha encontrado una particularidad.

Esta particularidad que se puede observar en la siguiente gráfica (círculo rojo), representa un cambio de 3 metros de cota del terreno en menos de 50 m de longitud del tramo.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Gráfica 6. Comparativa cotas láminas de agua vs cota del terreno

Esto quiere decir que el terreno presenta un desnivel, que representara importantes consecuencias en las variables hidrodinámicas. A partir de la revisión bibliográfica e histórica de la zona, se concluyó que ese cambio abrupto en la cota del terreno pudo ser generado por la extracción de áridos a lo largo del tiempo.

En la siguiente imagen correspondiente a la ortofoto del año 2021, se localiza la particularidad observada en la comparativa de las cotas de las láminas de agua vs cotas del terreno (gráfica 6).



Ilustración 23. Ortofoto del año 2021 de la particularidad del terreno encontrado en la zona del remanso, en la imagen de la izquierda se evidencia su ubicación en el tramo de estudio y en la imagen de la derecha un zoom de la zona.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

❖ I9: Anchura de la lámina de agua remansada

Tabla 16. Cálculo de la anchura de la lámina de agua remansada (Pre-Post)

Distancia (m)	Anchuras (m)		Ratio anchura remanso %
	Modelización pre	Modelización post	
2200	11,95	6,97	58,33
2100	29,69	24,75	83,36
2000	38,95	30,96	79,49
1900	27,84	22,87	82,15
1800	33,8	23,86	70,59
1700	48,71	41,75	85,71
1600	48,99	35,99	73,46
1500	64,76	41,84	64,61
1400	21,84	17,87	81,82
1300	26,92	21,94	81,50
1200	31,77	27,8	87,50
1100	21,79	12,87	59,06
1000	52,55	51,56	98,12
900	50,64	48,65	96,07
800	43,94	40,94	93,17
700	47,64	47,64	100,00
600	63,97	58,97	92,18
500	46,97	45,97	97,87

A excepción de la sección D=700 m donde la anchura se mantuvo igual, en general las anchuras de las láminas de agua en la zona del remanso disminuyeron. Esta disminución es mayor en la sección D= 2200 m ubicada en la zona donde se eliminó el tapón de sedimentos, allí la anchura disminuyó 4,98 m que equivale a una reducción del 41,67%. De igual forma, en la sección D=1100 m (coincidente con el punto de la particularidad encontrada) la anchura disminuyó 8,92 m lo que equivale a una reducción del 40,94%.

❖ Volumen de agua

En la siguiente tabla se recogen los resultados de volumen de agua de todo el tramo de estudio, obtenidos a partir de las modelizaciones (pre y post).

Tabla 17. Resultado del volumen de agua calculado en cada modelización

	Vol. agua (m ³)
Modelización Pre	88602,51
Modelización Post	40860,59

El volumen de agua en el tramo de estudio se redujo en 47,741.92 m³ después de la actuación, en comparación con el volumen pre, lo que representa una disminución del 53,88%.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era valorar la efectividad que ha tenido la eliminación del tapón de sedimentos realizada a finales del año 2017 con respecto al remanso generado en el río Manzanares. Tras la realización de este, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Los resultados de calados y velocidades obtenidos por la empresa INCLAM, y los obtenidos en la modelización realizada en el presente trabajo fin de master, representan una diferencia porcentual menor al 5%, lo que ha permitido validar el modelo para utilizarlo en los posteriores análisis comparativos. Se podría utilizar como base para futuras actuaciones y sopesar su efectividad.
2. Cuando circula un caudal $Q_{50\%} = 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$, se concluye que la eliminación de sedimentos tiene influencia en la disminución del calado hasta la sección $D=1100 \text{ m}$. En futuros estudios al incluir mayor cantidad de caudales a modelizar, se podría estudiar cual es el caudal a partir del cual esta disminución es más o menos significativa.
3. Las velocidades aumentan en la zona del remanso, luego de eliminar el tapón de sedimentos, para todos los caudales modelizados. Sería interesante incluir el módulo de transporte de sedimentos y tensión de fondo para conocer los efectos producidos en la dinámica sedimentaria del tramo.
4. Se ha detectado un desnivel de 3 m en la sección $D=1100\text{m}$, no analizado en trabajos previos, que se debería estudiar con más detalle.
5. La disminución de la superficie ocupada por la lámina de agua, de las anchuras del cauce y del volumen del tramo son consecuencias hidrodinámicas de las variaciones hidráulicas (descenso de calado y aumento de velocidad) determinadas en la zona del remanso. Estas disminuciones reflejan que la eliminación de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa ha sido efectiva.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Barea, C. D. (2015). *Modelización hidrológica distribuida con un esquema en volúmenes finitos validación del método*. Barcelona.
- Biain, A. L. (2020). *Estudio Hidráulico Bidimensional para el Proyecto de Rehabilitación del meandro "Los Garridos" en el Río Jarama (Algete, Madrid)*.
- Carolina Martínez Santa-María, J. A. (Julio de 2021). *Departamento de investigación Montes UPM*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid.
- Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Tajo del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2016). *Restauración Fluvial del Río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo (Madrid)*. Obtenido de <https://restauracionfluvialriomanzanares.es/descargas/>
- E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, A. Coll,. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos,. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*,, Pages 1-10,.
- IBM. (2014). *Documentación de IBM*. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/db2/11.1?topic=formats-non-delimited-ascii-asc-file-format>
- INCLAM. (2017). *Estudio de simulación hidráulica en la confluencia del Río Manzanares y Arroyo de Trofa (Madrid)*. Madrid.
- Kondolf, G. M. (1995). *Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining*.
- M.Ponce, V. (2016). *Clasificación de los regímenes de flujo en canales*. Obtenido de https://ponce.sdsu.edu/clasificacion_de_los_regimenes_de_flujo_en_canales.html
- Martinez Santa-Maria et al. (2019). ¿Cómo plantear el seguimiento de las actuaciones de restauración fluvial? Caso del río Manzanares en el entorno del Real Sitio del Pardo (Madrid). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*., 45. 209-218.
- Real academia de Ingeniería. (s.f.). *Diccionario español de ingeniería*. Obtenido de <https://diccionario.raing.es/es/lema/fracci%C3%B3n-de-cabida-cubierta>
- TRAGSA . (2022). *Seguimiento del estado hidromorfológico restauración fluvial del Río Manzanares Fase II: Verano/2022*. Madrid .



Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

TRAGSATEC. (2015). *Evaluación del estado ecológico en tramos fluviales del río Manzanares y en el arroyo de la Trofa* . Madrid .

ANEJOS

I. ACTUACIONES DE RESTAURACIÓN FLUVIAL REALIZADAS COMO PARTE DE LA RESTAURACIÓN FLUVIAL DEL RÍO MANZANARES EN EL ENTORNO DEL REAL SITIO DE EL PARDO (MADRID) FASE I

Actuaciones realizadas en el Río Manzanares



Ilustración 24. Resumen de actuaciones para la recuperación morfológica del espacio de ribera en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Ilustración 25. Resumen de actuaciones para la mejora de la cubierta vegetal en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

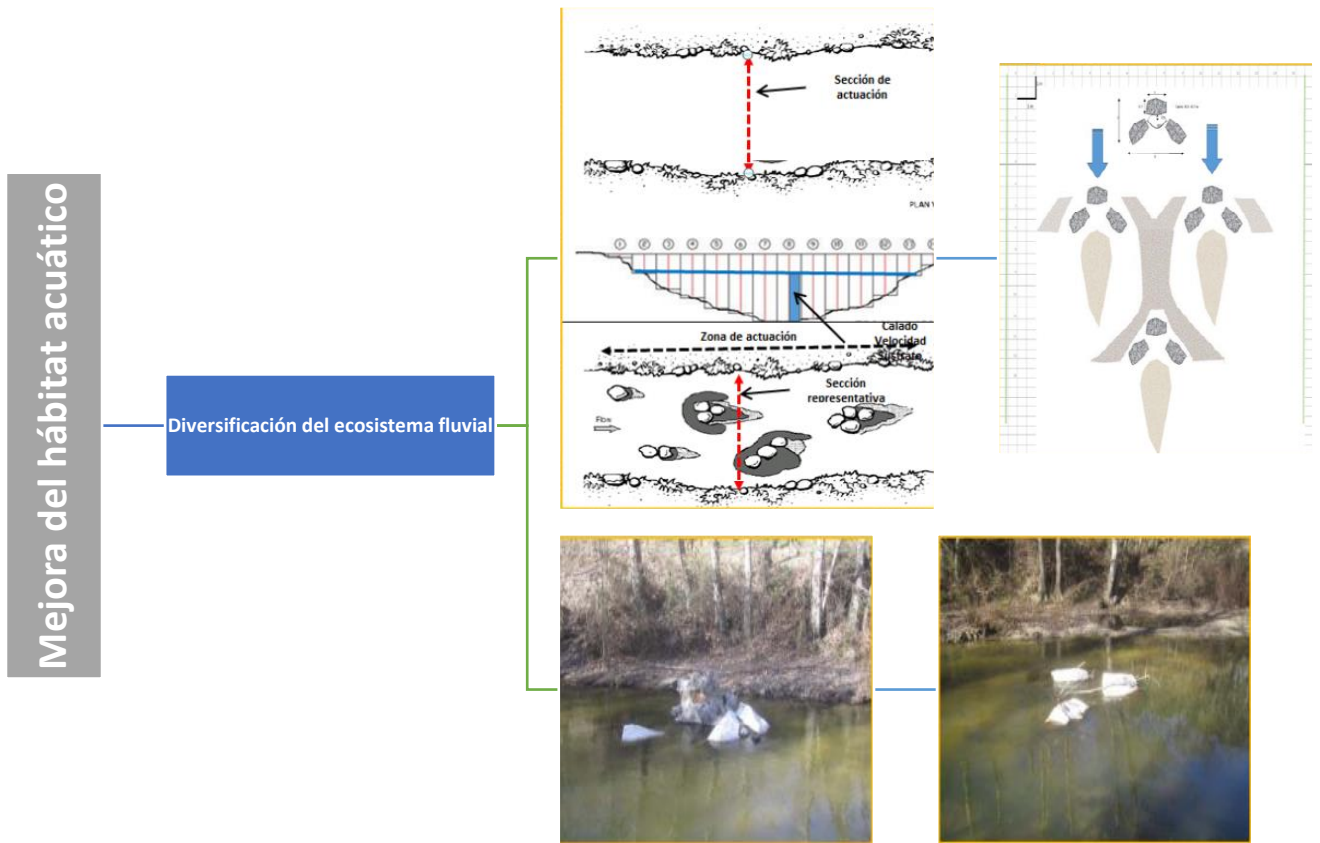


Ilustración 26. Resumen de actuaciones para la mejora del hábitat acuático en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Ilustración 27. Resumen de actuaciones para el uso público sostenible e interpretación de la naturaleza en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).



Ilustración 28. Resumen de actuaciones para la recuperación y mejora de la continuidad hidrológica en el río Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Actuaciones realizadas en el Arroyo de Trofa



Ilustración 29. Resumen de actuaciones para el cierre en la confluencia Trofa-Manzanares, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Manejo de los grandes herbívoros en la cuenca del arroyo de Trofa



El objetivo era disminuir drásticamente la carga cinegética del valle del arroyo de Trofa de manera que las acciones de revegetación y recuperación de la ribera fuesen efectivas. Para ello se ejecutaron unos siete kilómetros de vallado para acotar la zona comprendida desde el punto en el que el arroyo cruza con la línea del ferrocarril hasta su desembocadura en el río Manzanares

Ilustración 30. Resumen de actuaciones para el manejo de los grandes herbívoros en la cuenca del arroyo de Trofa, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Lucha contra la erosión y mejora del funcionamiento ecológico del tramo



En total se han construido seis hidrotecnias en el lecho del arroyo de Trofa en lugares donde se puede reconectar éste con su llanura. Estas construcciones están compuestas por bloques de granito dispuestos de tal manera que permiten el paso del agua y sedimentos pero, según aumenta el caudal, retienen arenas aguas arriba y forma un ligero embalsamiento que distribuye las aguas por la llanura más próxima

Ilustración 31. Resumen de actuaciones para la lucha contra la erosión y mejora del funcionamiento ecológico del tramo, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Actuaciones realizadas en la confluencia Manzanares-Trofa

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa



Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Adicional a la eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia Manzanares-Trofa, se creó un nuevo brazo del río Manzanares con la finalidad de que cuando se presenten avenidas habituales en el arroyo de Trofa, los sedimentos sean transportados por allí, y el río fluya normalmente por su cauce habitual, en la siguiente ilustración se detalla la creación de este brazo en la confluencia Manzanares-Trofa.



Ilustración 32. Esquema de la creación del nuevo brazo del río Manzanares en la confluencia con el arroyo de Trofa, Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo (Madrid).

Este brazo creado tiene una longitud de 350 m sección trapezoidal de 5m de ancho y 2 m de profundidad (Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Tajo del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2016).

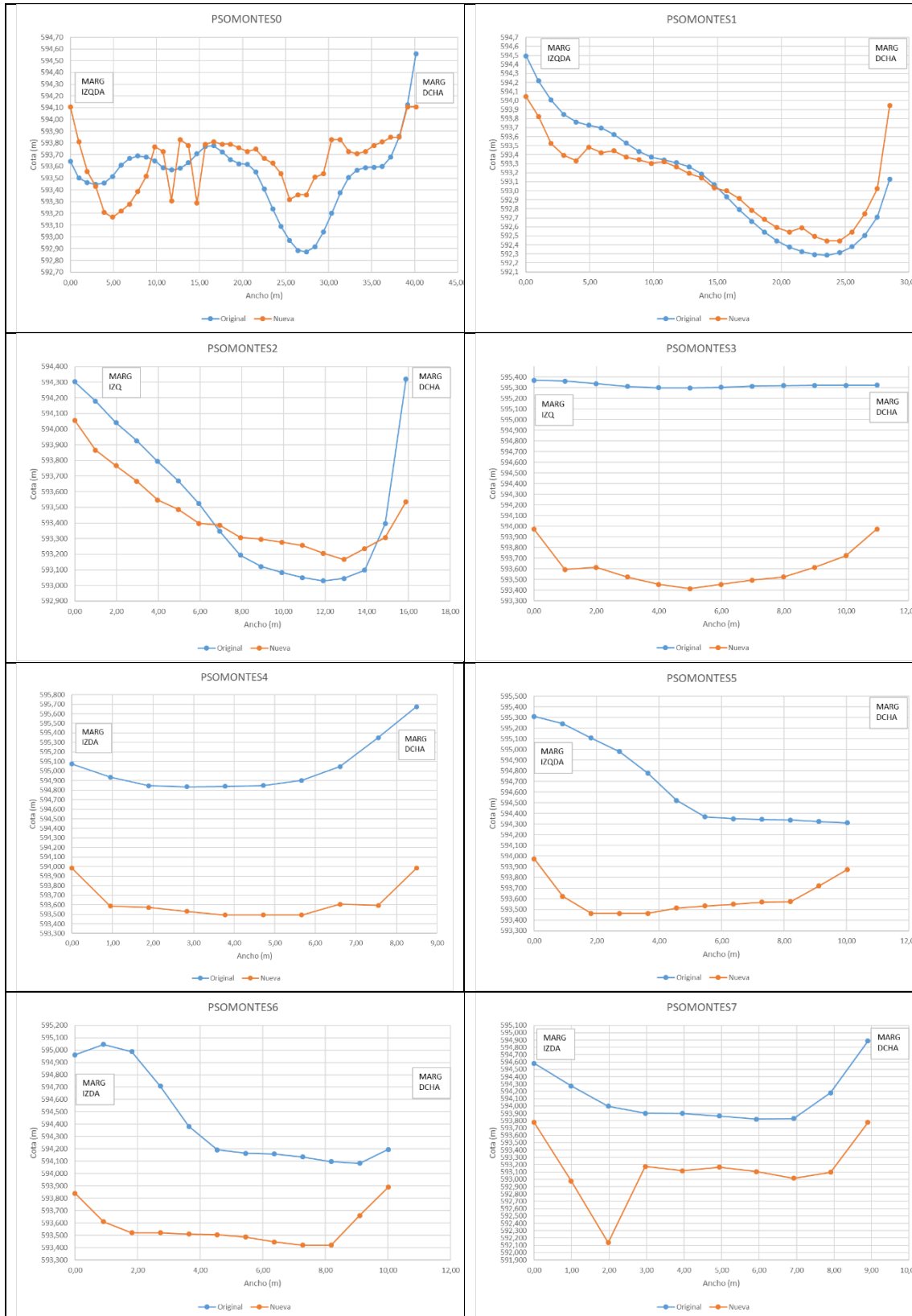


Ilustración 33. Izquierda nuevo brazo del río Manzanares en la confluencia con el arroyo de Trofa, a la derecha confluencia actual del Manzanares-Trofa. Fuente: Fase I Presentación obras restauración fluvial del río Manzanares en el entorno de El Real Sitio de El Pardo

II. BATIMETRIAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente anejo se muestran las secciones transversales de las batimetrías realizadas en el año 2022 por la empresa TRAGSA, de igual forma se calcularon estas mismas secciones extraídas del MDT pre para realizar una comparativa, con la finalidad de obtener una idea más clara de la topografía del terreno antes y después de las actuaciones.

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

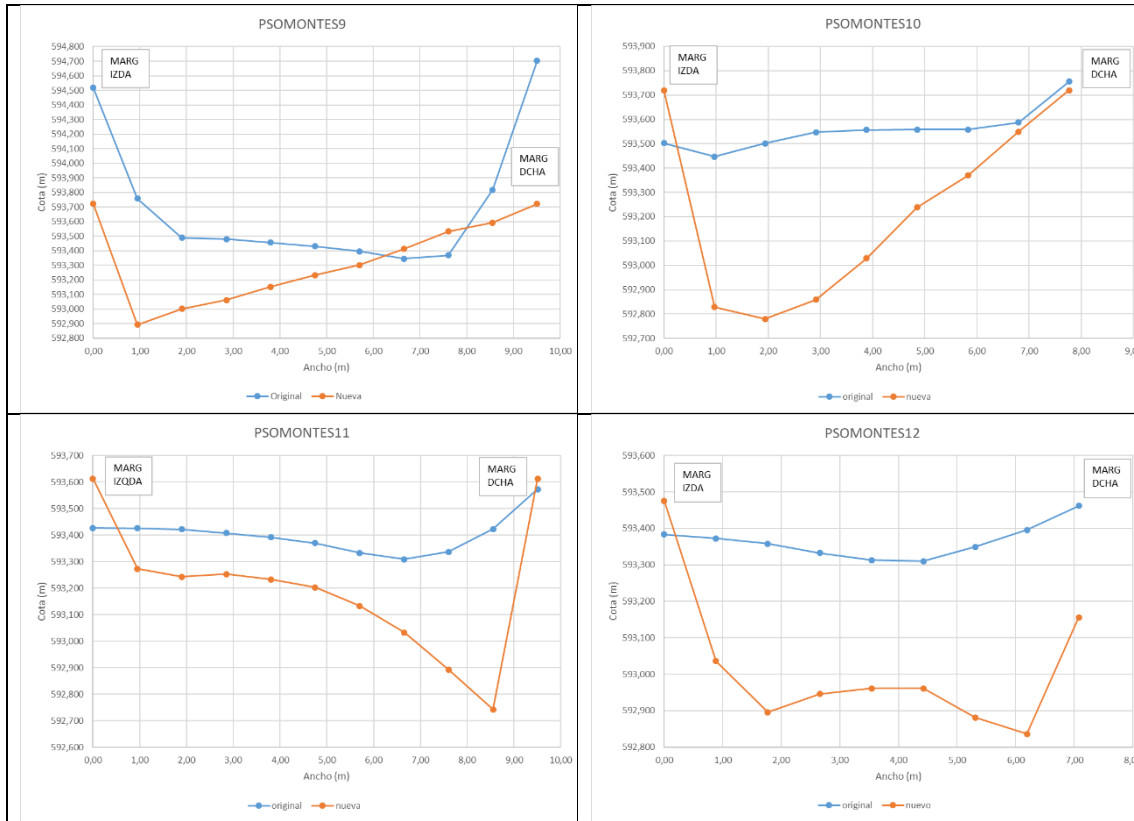
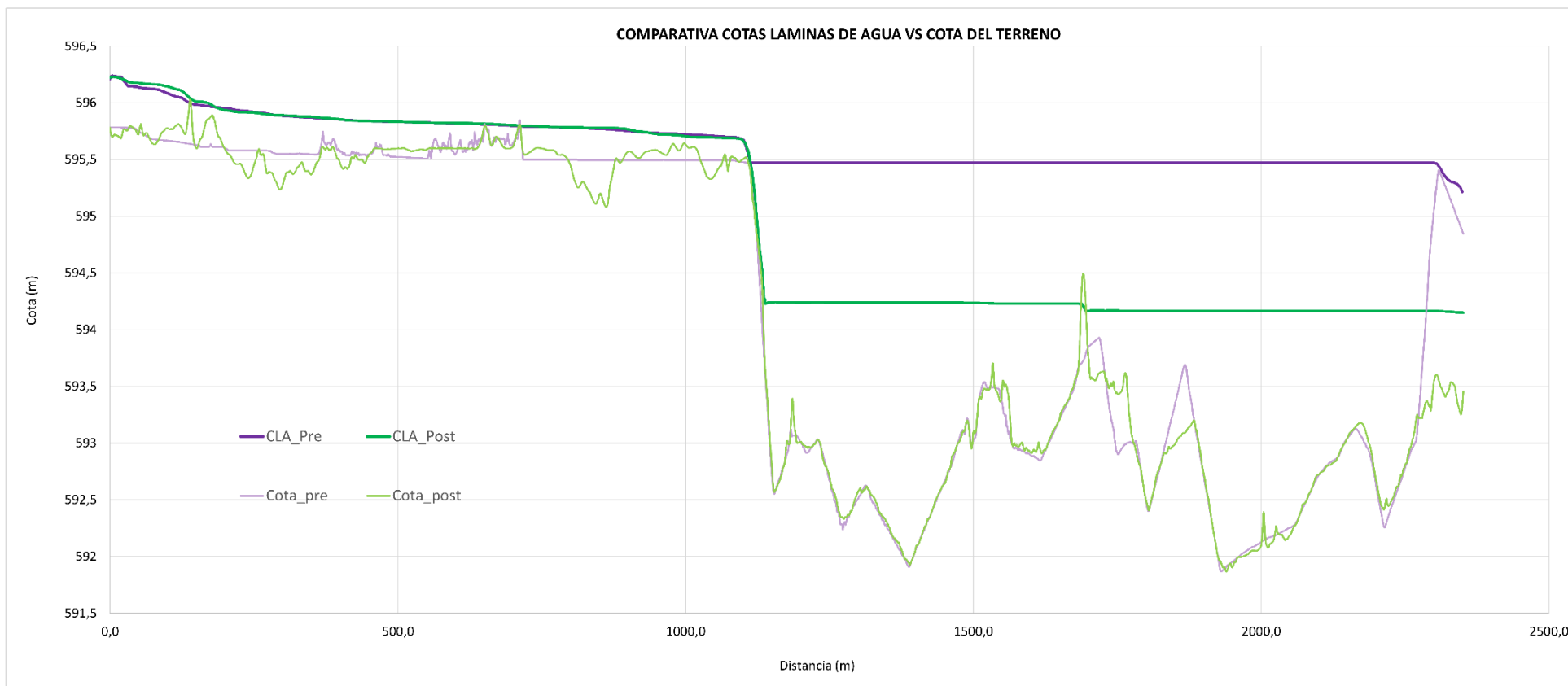


Tabla 18. Comparativa grafica de las secciones transversales correspondientes a las batimetrías y al MDT original, Fuente: Autor



III. COMPARATIVAS COTAS LÁMINAS DE AGUA VS COTA DEL TERRENO

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Gráfica 7. Comparativa cotas láminas de agua vs cota del terreno en el tramo completo

IV. FUNDAMENTOS DE IBER

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujo de agua en lámina libre con aplicaciones a la hidráulica y morfología fluvial. Ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua.

El modelo Iber es un modelo de libre difusión que utiliza el método de volúmenes finitos como método numérico de aproximación, sobre una malla de cálculo no estructurada. Actualmente consta de 5 módulos de cálculo:

- Hidrodinámica
- Turbulencia
- Transporte de sedimentos
- Calidad del agua
- Procesos hidrológicos
- Hábitat

En este estudio se emplea el módulo hidrodinámico, que resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y velocidad uniforme.

- La hipótesis de la presión hidrostática es válida tanto en ríos como en estuarios no estratificados.
- La distribución uniforme de velocidad suele cumplirse en ríos y estuarios, siempre y cuando no existan procesos de estratificación relevantes por diferencias de salinidad, temperatura o viento.

Bladé et. al (2014) exponen los fundamentos del modelo numérico del software:

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento:

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\partial U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y ν_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

donde, $V_{X,10}$, $V_{Y,10}$ son las 2 componentes de la velocidad del viento a 10m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10m de altura y C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5,6 \text{ m/s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6}$$

$$|V_{10}| \geq 5,6 \text{ m/s} \rightarrow C_{VD} = 1,2 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5,6}{|V_{10}|} \right)^2$$

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente.

La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. Iber incluye 3 modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo $k-\mathcal{E}$ de Rastogi y Rodi. En el modelo parabólico se calcula la viscosidad turbulenta como:

$$v_t = 0,068u_f h \quad u_f = \sqrt{\tau_b/\rho}$$

siendo u_f la velocidad de fricción de fondo. Utilizando la fórmula de Manning para calcular la fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0,068\sqrt{gn|U|h^{5/6}}$$

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0,267\kappa h, \kappa d_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2,34\frac{u_f}{\kappa h}\right)^2} \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$

donde $\kappa=0,41$ es la constante de von Karman y d_{wall} es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana. El modelo $k-\mathcal{E}$ de Rastogi y Rodi resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación de energía turbulenta \mathcal{E} :

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3,6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho |U|^2}$$

$$c_\mu = 0,09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1,44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1,92 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\varepsilon = 1,31$$

V. FOTOGRAFÍAS ACTUALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el siguiente mapa se ilustra la ubicación de las fotografías de la zona de estudio realizadas en mayo de 2024, en la tabla 20 se detallan sus respectivas sistema de coordenadas proyectadas X, Y, Z (ETRS 1989 Zona 30N) y localizaciones de referencia.

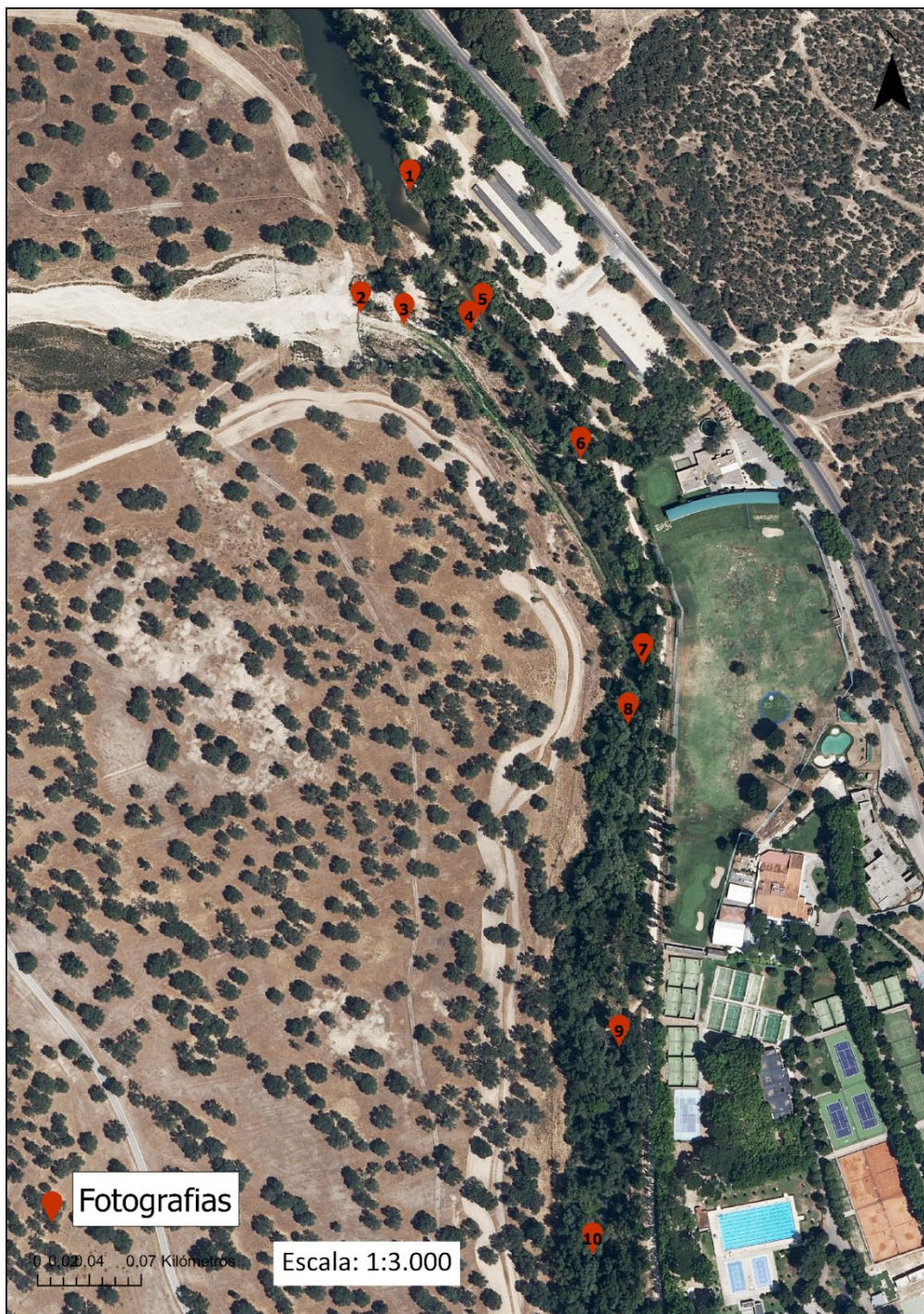


Ilustración 34. Fotografías de la zona de estudio realizadas en mayo del 2024

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

Tabla 19. Coordenadas y localizaciones de las fotografías realizadas de la zona de estudio en mayo 2024

ID	X	Y	Z	Localización
1	435567	4483242	599	Río Manzanares 100 m aguas arriba de la confluencia con Arroyo de Trofa
2	435534	4483160	598	Sistema de cierre en la desembocadura del Arroyo de Trofa
3	435563	4483152	597	Confluencia Manzanares-Trofa
4	435607	4483147	598	Isla de sedimentos existente en la confluencia Manzanares-Trofa
5	435616	4483159	599	Río Manzanares 50 m aguas abajo de la confluencia con Arroyo de Trofa
6	435682	4483062	598	Río Manzanares 150 m aguas abajo de la confluencia con Arroyo de Trofa
7	435724	4482923	599	Río Manzanares 280 m aguas abajo de la confluencia con Arroyo de Trofa
8	435714	4482883	597	Río Manzanares 310 m aguas abajo de la confluencia con Arroyo de Trofa
9	435708	4482666	597	Río Manzanares 500 m aguas abajo de la confluencia con arroyo de Trofa
10	435690	4482526	597	Río Manzanares 650 m aguas abajo de la confluencia con Arroyo de Trofa

Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas



Eliminación del tapón de sedimentos en la confluencia del río Manzanares con el arroyo de Trofa (Madrid): Consecuencias hidrodinámicas

