



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico
y Minero de España

INFORME SOBRE LA PROBLEMÁTICA Y PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA LAS INUNDACIONES EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA (SEGOVIA)



Agosto de 2016

Ficha técnica:

IGME (2016). *Informe sobre la problemática y propuesta de soluciones para las inundaciones en la Real Casa de la Moneda de Segovia (Segovia)*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Informe técnico 3173/2015, 101 páginas + VI apéndices.

Documento elaborado por las áreas de Riesgos Geológicos y de Hidrogeología Aplicada del IGME, a solicitud del Excmo. Ayuntamiento de Segovia (Concejalías de Patrimonio y Turismo).

Madrid, agosto de 2016.

Autoría del informe:

- Andrés Díez Herrero (apartados 0, 1.1, 1.2, 1.4, 2.1, 2.2 y 3; apéndices I, II, III y VI)
- Carlos Camuñas Palencia (apartados 1.3, 1.4, 2.2 y 3; apéndices IV y V)
- Jesús del Pozo Tejado (apartados 1.3, 1.4, 2.2 y 3; apéndices IV y V)
- Miguel Mejías Moreno (apartados 1.3, 1.4, 2.2 y 3; apéndices IV y V)

Colaboraciones externas al IGME:

- Eduardo Sánchez Parada (arquitectura técnica y gestión del complejo RCMS)
- Marina Sacristán Marcos - alumna UCM (apartado 1.2; apéndice III)
- Sara Sánchez Torralbo - alumna UAH (apéndice I)
- Juan Antonio Fernández Herranz (topografía)
- Néstor Bernal López - alumno UCM (trabajos de campo)
- Álvaro de las Heras Gómez - alumno UPM (trabajos de campo)
- Mariana, Alejandro y Federico (mantenimiento de instalaciones y apoyo logístico RCMS)

Imagen de portada: Vista frontal de la fachada septentrional del Ingenio Chico, con la terraza inundada por desbordamiento del río Eresma durante las avenidas de enero de 2009.



Índice

0. INTRODUCCIÓN	1
0.1. ANTECEDENTES ADMINISTRATIVOS	4
0.2. ANTECEDENTES CIENTÍFICO-TÉCNICOS	5
1. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LAS INUNDACIONES EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA	7
1.1. INUNDACIONES PREHISTÓRICAS E HISTÓRICAS DEL RÍO ERESMA EN SEGOVIA	9
1.1.1. El registro geológico de paleoinundaciones e inundaciones recientes	10
1.1.2. El registro documental de inundaciones históricas	12
1.1.3. El registro dendrocronológico	18
1.2. ANÁLISIS DE LA INUNDABILIDAD POR DESBORDAMIENTO DEL RÍO ERESMA EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA	23
1.2.1. Análisis hidrometeorológico de las inundaciones recientes	24
1.2.2. Análisis hidrológico de los caudales de avenida	32
1.2.3. Modelación hidráulica de los caudales de avenida	40
1.3. ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LAS POSIBLES FILTRACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA BASE DEL CANAL DE LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA	64
1.3.1. Introducción a la problemática hidrogeológica	64
1.3.2. Marco hidrogeológico	66
1.3.3. Descripción de actuaciones	71
1.4. CONCLUSIONES	86
2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA PREVENCIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIONES EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA	89
2.1. RECOMENDACIONES GENERALES	89
2.1.1. Coordinación institucional entre la Confederación Hidrográfica del Duero y el Ayuntamiento de Segovia en materia de gestión del riesgo de inundación	89
2.1.2. Articulación de un protocolo ágil de comunicación en emergencias entre la Confederación Hidrográfica del Duero y el Ayuntamiento de Segovia	90
2.1.3. Adecuación del plan de explotación de la presa del Pontón Alto para optimizar su papel en la laminación de avenidas y crecidas	91
2.2. RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS	92
2.2.1. Mejora del sistema de drenaje durante crecidas	92
2.2.2. Gestión de la inundación en el interior del canal	94
2.2.3. Otras recomendaciones menores	95
3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98



APÉNDICES

- Apéndice I. El registro de paleoinundaciones en el yacimiento arqueológico del Abrigo del Molino.
- Apéndice II. El registro de inundaciones históricas en el Monasterio de Santa María de los Huertos.
- Apéndice III. Resultados pormenorizados de los análisis de datos hidrológicos e hidráulicos.
- Apéndice IV. Planta y perfil del sistema de canales de la Real Casa de la Moneda.
- Apéndice V. Reportaje fotográfico de los aspectos hidrogeológicos.
- Apéndice VI. Consecuencias técnicas, ambientales y económicas del dragado o 'limpieza' del cauce.



0. INTRODUCCIÓN

El complejo arquitectónico de la Real Casa de la Moneda de Segovia (en adelante, RCMS) es un conjunto de edificios, patios y zonas ajardinadas que comprenden tanto las instalaciones del antiguo Real Ingenio de la Moneda, establecido por el rey Felipe II a finales del siglo XVI, como sus posteriores reformas, ampliaciones y modificaciones de uso durante los siglos XVII al XXI (ceca de acuñación por volante, molino harinero, museo, bar-restaurante...).

Desde el punto de vista geográfico se sitúa en el centro de la península Ibérica, dentro de la submeseta Norte o Cuenca del Duero, en su sector centro-meridional, justo donde enlaza con los relieves del Sistema Central español (tramo de los Montes Carpetanos de la Sierra de Guadarrama) y su piedemonte septentrional.

Desde el punto de vista político-administrativo se ubica dentro de la comunidad autónoma de Castilla y León, provincia de Segovia, término municipal de Segovia y núcleo de población de Segovia (figura 0.0.1). Actualmente su propiedad y gestión económico-administrativa corre a cargo del Excmo. Ayuntamiento de Segovia, en concreto adscrito a las Concejalías de Patrimonio y Turismo, junto con la empresa municipal Turismo de Segovia.

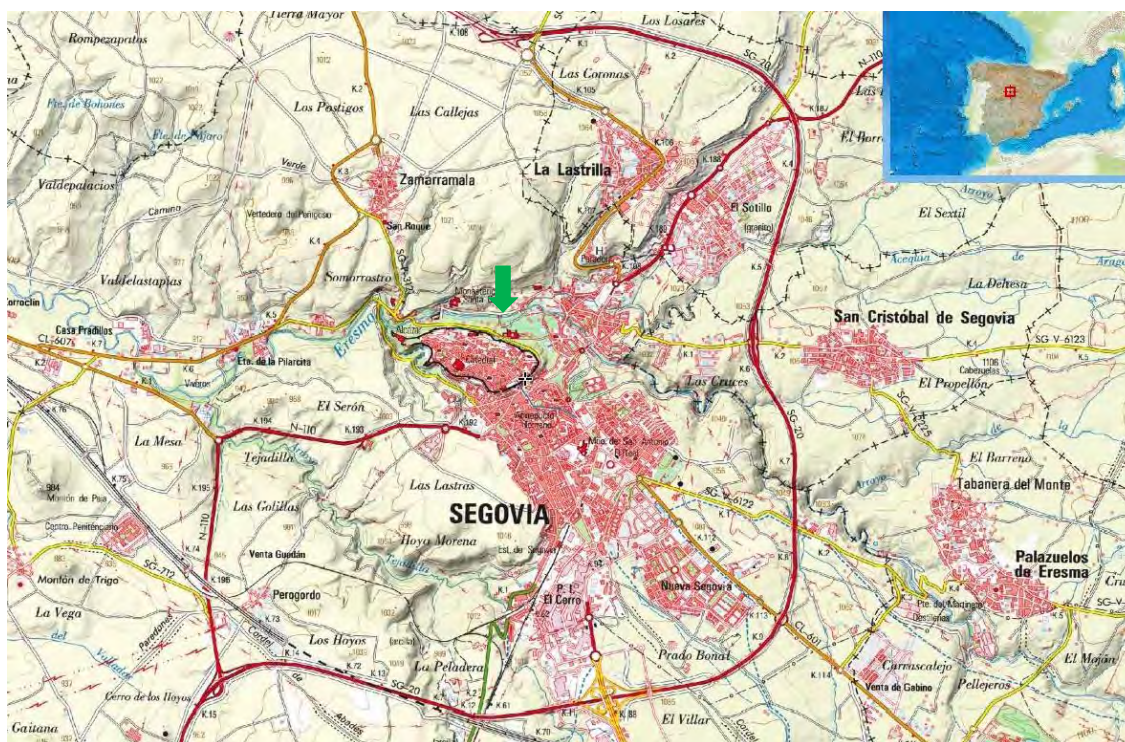


Figura 0.0.1. Mapa de situación del complejo de la RCMS, en el centro de la península Ibérica, en la ciudad de Segovia (flecha verde). Fuente: Iberpix (IGN).



Más en detalle, la RCMS se ubica al norte del recinto amurallado de la ciudad de Segovia, ocupando la ladera meridional y fondo del valle del río Eresma en la Alameda del Parral, aguas abajo del puente conocido como de la Moneda (o de acceso al monasterio del Parral) y aguas arriba del puente de San Marcos (o Puente Castellana; figuras 0.0.2 y 0.0.3).



Figura 0.0.2. Mapa de situación del complejo de la RCMS (contorno verde), justo al norte del recinto amurallado de la ciudad de Segovia (fuente: Iberpix, IGN).

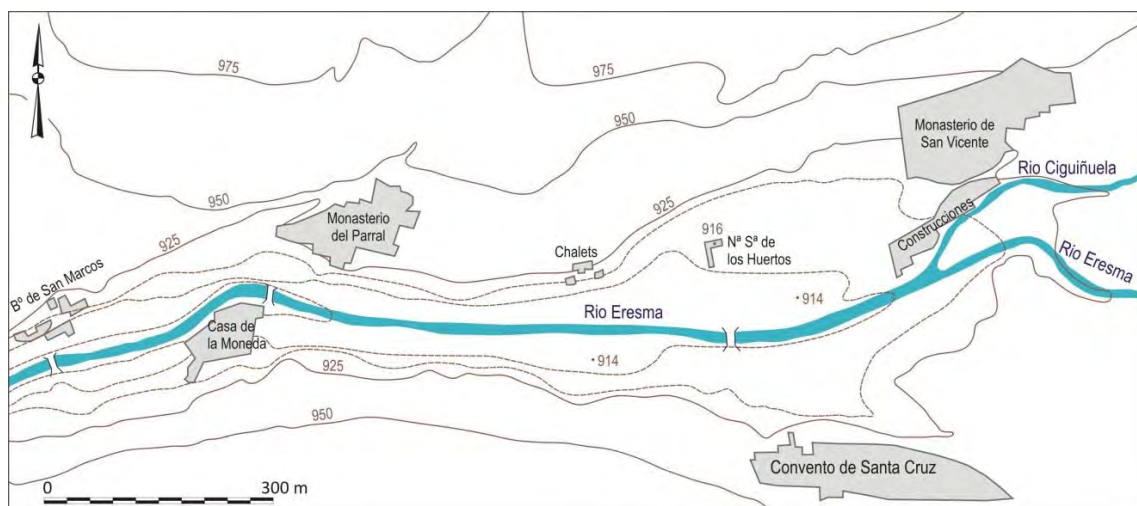


Figura 0.0.3. Mapa de situación del complejo de la RCMS en el contexto de la Alameda del Parral y su relación con otros edificios religiosos de su entorno.

El complejo de la RCMS queda inscrito en un rectángulo cuyas coordenadas están recogidas en la tabla 0.0.1; la altitud está comprendida entre los 923 m s.n.m. de la parte superior y los 909 m s.n.m. del lecho del río en la parte inferior del complejo.



Tabla 0.0.1. Coordenadas geográficas que delimitan el complejo de la RCMS.

	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
Extremo Norte	40° 57' 17,81" N	
Extremo Sur	40° 57' 13,82" N	
Extremo Este		04° 07' 40,06" W
Extremo Oeste		04° 07' 46,19" W



0.1. ANTECEDENTES ADMINISTRATIVOS

En julio de 2015, varios técnicos e investigadores del área de Riesgos Geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (MINECO, Gobierno de España; en adelante, IGME) realizaron una visita a la RCMS en el marco de una comisión de servicio para el reconocimiento de los estudios que se venían desarrollando por parte del IGME en diversas localidades de la provincia de Segovia (Pajares de Pedraza, Pedraza, Real Sitio de San Ildefonso,...).

En dicha visita técnica, los técnicos del IGME fueron recibidos por el arquitecto técnico de la Concejalía de Patrimonio Histórico y Turismo del Excmo. Ayuntamiento de Segovia, D. Eduardo Sánchez Parada, quien, en su condición de responsable de la gestión de mantenimiento y obras del complejo de la RCMS, le trasladó al Jefe del Área de Riesgos Geológicos del IGME (D. Luis Laín Huerta), la problemática que sufren algunos edificios relacionados con las inundaciones. El ingeniero Luis Laín ofreció los servicios y la capacidad técnica del IGME para colaborar con el Ayuntamiento de Segovia en la resolución de esta problemática, a través de solicitud de la Alcaldesa de Segovia al Director del IGME.

El día 29 de julio de 2015, la Sra. Alcaldesa de Segovia, Dña. Clara Luquero de Nicolás, dirigió un escrito de solicitud de informe (registro de salida 10250734532254447714/2015020452 del Ayuntamiento de Segovia de fecha 31 de julio de 2015) al Director del IGME (registro de entrada 1528100002705 del IGME de fecha 02 de septiembre de 2015).

Una vez recibida la solicitud por parte de la Dirección del IGME y tras aceptar su realización, además con carácter gratuito para el Excmo. Ayuntamiento de Segovia, como parte de la asistencia a las administraciones públicas que realiza habitualmente el IGME, se tramitó a través del Gabinete Técnico del Director, mediante nota interior (referencia 3173/2015 de fecha 02 de septiembre de 2015) al Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica, al cual se encuentra adscrita el área de Riesgos Geológicos.

Finalmente, el Director Adjunto del citado Departamento, ante la ausencia por baja laboral del Jefe del área de Riesgos Geológicos, decidió asignar la realización del informe solicitado al científico titular Andrés Díez Herrero, especializado en análisis y gestión del riesgo por inundaciones y buen conocedor de la zona y su problemática.

Con posterioridad, en el mes de marzo de 2016, mientras se estaba ultimando el informe solicitado, el Excmo. Ayuntamiento de Segovia cursó una nueva solicitud complementaria, vía llamada telefónica y correo electrónico a través del arquitecto técnico, por la cual se pedía que dicho estudio se complementara incluyendo un análisis y diagnóstico de las inundaciones que afectan al edificio también debidas a las filtraciones y surgencias del agua subterránea y subsuperficial. Por este motivo, la entrega del informe tuvo que retrasarse unos meses respecto a la fecha inicialmente prevista, y así poder desarrollar los estudios hidrogeológicos por parte de técnicos del área de Hidrogeología Aplicada del IGME, que se incluyen igualmente en este informe.

Esta demora ha permitido incorporar al informe algunos resultados derivados de estudios complementarios, de modelación hidrológico-hidráulica que la alumna Dña. Marina Sacristán ha venido realizando en el IGME, primero como prácticas profesionales y posteriormente en el marco de su trabajo fin de master (Master oficial de Geología Ambiental de la UCM), que fue presentado y defendido el día 11 de julio de 2016, obteniendo la calificación de 9 sobre 10 (Sobresaliente).



0.2. ANTECEDENTES CIENTÍFICO-TÉCNICOS

Los estudios científicos y técnicos sobre la problemática del riesgo por avenidas e inundaciones en la RCMS y su entorno (valle del río Eresma en la Alameda del Parral y paso por la ciudad de Segovia) se vienen desarrollando, de forma intermitente desde finales de la década de 1980. De hecho, las primeras recopilaciones de inundaciones históricas que afectaron a esta zona ya se reflejan en capítulos de libros divulgativos de la década de 1990 (Díez y Martín, 1993a y 1993b) y en artículos centrados en la parte alta de la cuenca del río Eresma, pero que también hacen referencia a acontecimientos en Segovia capital (Bullón, 1999).

Pero no es hasta el inicio de la década de 2000 cuando se sistematizan estos estudios, con los primeros catálogos e inventarios de inundaciones históricas (Díez-Herrero *et al.*, 2007), que dieron lugar incluso a ejercicios prácticos con finalidad didáctica (Díez *et al.*, 1993), que posteriormente serían publicados (Díez-Herrero, 2008b). Además, este inicio del siglo XXI viene marcado por el paso del simple ejercicio de recopilación de información histórica, a auténticos análisis de datos hidrológicos, hidráulicos, sedimentológicos y dendrocronológicos.

Para el proyecto de restauración y adecuación museográfica de la RCMS, la dirección de obra y el director del proyecto museográfico encargan un estudio hidrológico e hidráulico a una consultora de ingeniería.

A partir del año 2007-2009, aprovechando las obras de restauración y adecuación del complejo para uso museístico, y en coordinación con las labores arqueológicas, se realizan diversos estudios de índole dendrocronológica en elementos de madera de los canales, que derivarán en interesantes interpretaciones sobre la cronología y magnitud de las inundaciones históricas (Génova *et al.*, 2010 y 2011).

A lo largo de la última década, desde el año 2007 y hasta la actualidad de forma ininterrumpida, se han celebrado nueve ediciones (diez si se contabiliza la que se celebrará el próximo 19 de noviembre de 2016), de la actividad divulgativa “A todo riesgo. Convivir con los desastres geológicos cotidianos”, enmarcada en la Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid (en algunas ediciones, también en la Semana de la Ciencia de Castilla y León), consistente en una excursión didáctico-divulgativa guiada, en la que se recorren lugares donde han ocurrido, están ocurriendo actualmente o es previsible que ocurran en el futuro, desastres y catástrofes de índole geológica o natural en sentido amplio (desprendimientos, colapsos, terremotos, deslizamientos, inundaciones...); está organizada por el IGME, con la colaboración de la UNED-Segovia, Universidad de Valladolid y otras entidades.

Los guiones editados y entregados a los participantes han ido creciendo en extensión y profundidad, y han sido publicados con licencia *Creative Commons* (Díez-Herrero *et al.*, 2007 a 2015). Una de las paradas a realizar y comentar siempre ha sido la RCMS, por lo que centenares, casi miles, de personas, han sabido de la problemática de inundaciones y las posibles soluciones propuestas.

Desde el punto de vista técnico y de gestión, la Confederación Hidrográfica del Duero, en el marco del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, realizó la evaluación preliminar del riesgo (Caballero *et al.*, 2011), catalogando este tramo como Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (código ARPSI ES020/0022, ADAJA-ERESMA-CEGA; subtramo10-1800014-01, Segovia, con longitud afectada de 0,67 km), y realizando los correspondientes mapas de peligrosidad y



riesgo; estando previsto la realización de planes de gestión del riesgo de inundación en la revisión de los planes hidrológicos de cuenca.

Finalmente, durante el periodo 2015-2016, diversos alumnos del Grado en Geología y del Master de Geología Ambiental de la UCM realizan sus trabajos específicos de fin de grado y sus trabajos de fin de master en esta zona, contribuyendo a tener un adecuado conocimiento de la peligrosidad de inundaciones del río Eresma.



1. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LAS INUNDACIONES EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA

A finales del siglo XVI, a propuesta del rey Felipe II, se decide construir una nueva fábrica de acuñación de moneda (ceca) en Segovia; esta vez ubicada en las proximidades del río Eresma para aprovechar la fuerza motriz de su caudal. Se decide reutilizar parte de las instalaciones de un antiguo molino de papel y harina ubicado frente al Monasterio del Parral y conocido como molino de Antonio de San Millán (figura 1.0.1).

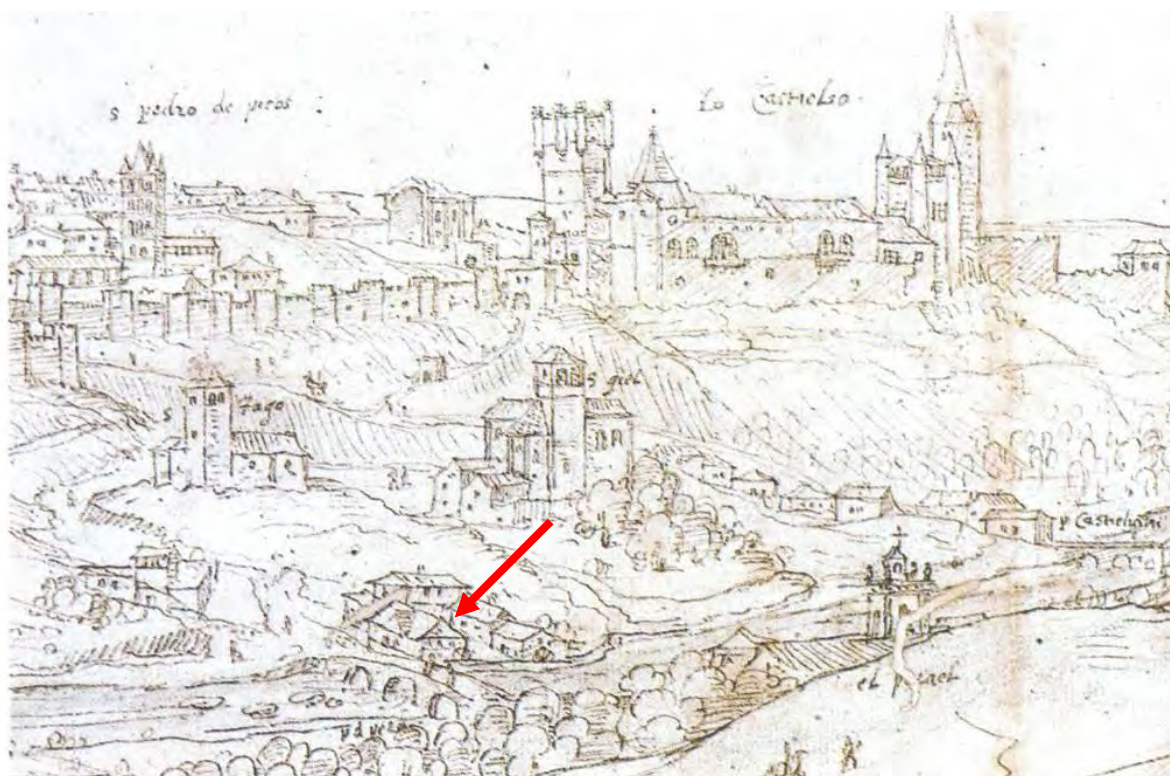


Figura 1.0.1. Fragmento de uno de los dibujos de Segovia realizados por Antón Van den Wyngaerde en 1562, donde se aprecia el antiguo molino de papel de Antonio de San Millán (flecha roja), elegido para ubicar el Real Ingenio.

El Nuevo Real Ingenio de la Moneda de Segovia (1583) era propiedad particular del Rey, gobernado por Real Junta de Obras y Bosques -administración interna de la Casa Real- y siempre acuñó con técnicas mecanizadas, nunca a martillo (Murray, 2006; Murray *et al.*, 2006; Murray, 2008). Por ello, está considerado como el edificio industrial en pie más antiguo del Mundo (figura 1.0.2).



Figura 1.0.2. Fotografía aérea oblicua del complejo del Real Ingenio de la Moneda de Segovia antes del inicio de las obras de rehabilitación, donde se aprecia su proximidad y relación con el río Eresma. Tomada de Murray (2006).

Desde que se inició su construcción, y durante todo el periodo en el que se estuvo acuñando moneda, las interferencias de la actividad fabril con las periódicas crecidas y los frecuentes estiajes del río fue continua, hasta el punto de detener e interrumpir buena parte de las actividades del Real Ingenio. Por ello se conserva una buena y completa relación de eventos de crecida y avenida del río que tuvieron incidencia en la acuñación, y cuya información se encuentra fundamentalmente en el Archivo Histórico de Simancas.

Esta relación de dependencia del río, no sólo para aprovechar su energía hidráulica, sino también por los trastornos que producen las inundaciones, ha continuado una vez finalizada su actividad de acuñación. El puente contiguo a la Casa de la Moneda también sufrió los embates de las inundaciones, y tuvo que ser reparado al menos dos veces, en 1681 y en 1759 (AMS 1413-6; Bullón, 1999).

Inundaciones históricas que se prolongan hasta nuestros días (2009, 2013 y 2014), incluso teniendo en consideración que en la cuenca alta del río Eresma, aguas arriba de la RCMS, se construyó entre 1995 y 1996 el embalse del Pontón Alto, con cierta capacidad de regular y laminar las crecidas de bajos periodos de retorno; no así las grandes crecidas de alto periodo de retorno, puesto que suelen acontecer cuando la presa ya está completamente llena, habiendo inundado repetidas veces la RCMS.



1.1. INUNDACIONES PREHISTÓRICAS E HISTÓRICAS DEL RÍO ERESMA EN SEGOVIA

El río Eresma nace en la vertiente septentrional de los Montes Carpetanos (Sierra de Guadarrama, Sistema Central español), como resultado de la confluencia de varios arroyos y ríos que drenan las alineaciones montañosas del Macizo de Peñalara, Guarramillas (Bola del Mundo) y Siete Picos - Cerro Ventoso - Cerro Minguete - Montón de Trigo; entre los que destacan: el arroyo del Puerto, Minguete, de Peñalara, Morete, Carneros y Chorranca, entre otros muchos. En su tramo alto circula por el valle de Valsaín, una fosa tectónica intramontana. Luego, tras recibir los arroyos afluentes de la falda septentrional del macizo de Peñalara - El Reventón (entre los que destaca el río Cambrones), discurre por el piedemonte cristalino del Guadarrama, labrando en los granitoides y gneises una garganta fluvial estrecha y profunda. Justo en el contacto entre el piedemonte cristalino y las rocas sedimentarias de la orla mesozoica que supone la prolongación occidental de la rama castellana de la Cordillera Ibérica, se sitúa la ciudad de Segovia. En este sector, el río Eresma pasa de formar una garganta en los gneises y granitoides, a disponerse en un valle más amplio con perfil de cañón fluvial y laderas escalonadas. Es en el inicio de este tramo de cañón fluvial donde se ubica la RCMS.

El régimen de caudales del río Eresma es de claro carácter nivo-pluvial, con un máximo de aportaciones en primavera, asociados a la fusión nival; y otros máximos en invierno-primavera relacionados con precipitaciones prolongadas e intensas, asociadas al paso sucesivo de frentes atlánticos con sus correspondientes líneas de chubascos. Eso hace que sean frecuentes y formen parte de su régimen los eventos de crecidas que, debido a la intensidad puntual de las precipitaciones en la cuenca, la elevada pendiente de las corrientes fluviales y las laderas de la Sierra, y el alto grado de impermeabilidad del sustrato rocoso, sean avenidas súbitas (*flash floods*, en terminología anglosajona). Estas avenidas súbitas se caracterizan por sus cortos periodos en la curva de ascenso o crecida del hidrograma, que en ocasiones se reducen a unas pocas horas; los elevados caudales punta en comparación con los caudales medios e incluso con los caudales precedentes; y por unas curvas de descenso que se pueden prolongar varios días, si bien suelen estar salpicadas por picos de avenida secundarios, asociados a las aportaciones de afluentes con tiempos de viaje diferentes del cauce principal.

La configuración geomorfológica del valle del río y de su llanura de inundación también son fundamentales para entender la dinámica de las inundaciones en este tramo del río Eresma. Si bien el río circula por el fondo de un cañón asimétrico, siguiendo un trazado fundamentalmente rectilíneo, la disposición meandriforme del valle confinante hace que el canal trazase meandros de gran longitud de onda. Sin embargo, la ancestral interferencia de las actividades antrópicas en la ribera (aprovechamientos hortícolas, instalaciones industriales, construcción de azudes, ajardinamientos, etc.) ha conllevado la rectificación del canal y los bancos de orilla, estabilizados mediante escolleras, gaviones y vegetación arbórea; y por otro lado, acortamientos por estrangulamientos artificiales de meandros (La Fuencisla) o, al contrario, exageración de la curvatura de meandros para ganar desnivel (caso de la RCMS; figura 1.1.1). Eso conlleva que parte de las instalaciones del complejo de la RCMS (zona de los canales, planta baja del Ingenio Chico) en realidad no esté en la llanura de inundación o terrazas bajas, sino que se trate del paleocauce o antiguo canal propiamente dicho del río Eresma, estando en ocasiones situada a cotas topográficamente más bajas que el cauce actual del río (desviado artificialmente).



Figura 1.1.1. Ortofotografía del tramo del valle del río Eresma a su paso por Segovia, en el que se pueden reconocer tanto el cauce actual (desde el año 1846), como las principales modificaciones históricas artificiales, con la corta del meandro de La Fuencisla y la exageración por extensión de la curvatura en la RCMS (probablemente anterior a la implantación del molino de Antonio de San Millán).

1.1.1. El registro geológico de paleoinundaciones e inundaciones recientes

Los eventos de crecidas y avenidas súbitas del río Eresma no son fenómenos que únicamente se hayan registrado en la actualidad, ni siquiera en tiempos históricos. Existe un registro de eventos de avenidas a través de los depósitos y materiales detríticos formados o depositados durante las mismas, que permite retrotraer la existencia de importantes eventos catastróficos, al menos desde hace unos 60.000 años antes del presente (Apéndice I). Igualmente existen depósitos formados por inundaciones y avenidas súbitas recientes (siglo XX), que han sido también registradas documentalmente.

El registro de materiales detríticos de inundaciones recientes en la RCMS

Durante las excavaciones arqueológicas realizadas para la rehabilitación del edificio de la RCMS en el año 2009, se pudieron estudiar depósitos dejados por crecidas recientes en las proximidades del denominado Ingenio Chico, junto al puente (Díez Herrero, 2008a; figura 1.1.2).



Figura 1.1.2. Detalle de la situación de los dos perfiles (E y S) de los depósitos de inundaciones históricas estudiados en las inmediaciones de la Casa de la Moneda (Díez Herrero, 2008a).

Los dos depósitos de barras de gravas y cantos deben corresponder a momentos de alta energía, máxime cuando aguas arriba se sitúa el azud de la Casa de la Moneda, que actúa como represa de la carga de fondo. Por ello, lo más probable es que se depositaran durante eventos de crecidas y/o avenidas torrenciales del río Eresma, que superaran la capacidad de laminación y retención del azud, trasladando carga de fondo aguas abajo. Pevio a esos eventos, la arroyada difusa de la ladera arrastraría arenas y limos hasta la margen izquierda del río, depositando un manto o cono en el que se apoyan los depósitos de barras (figura 1.1.3).

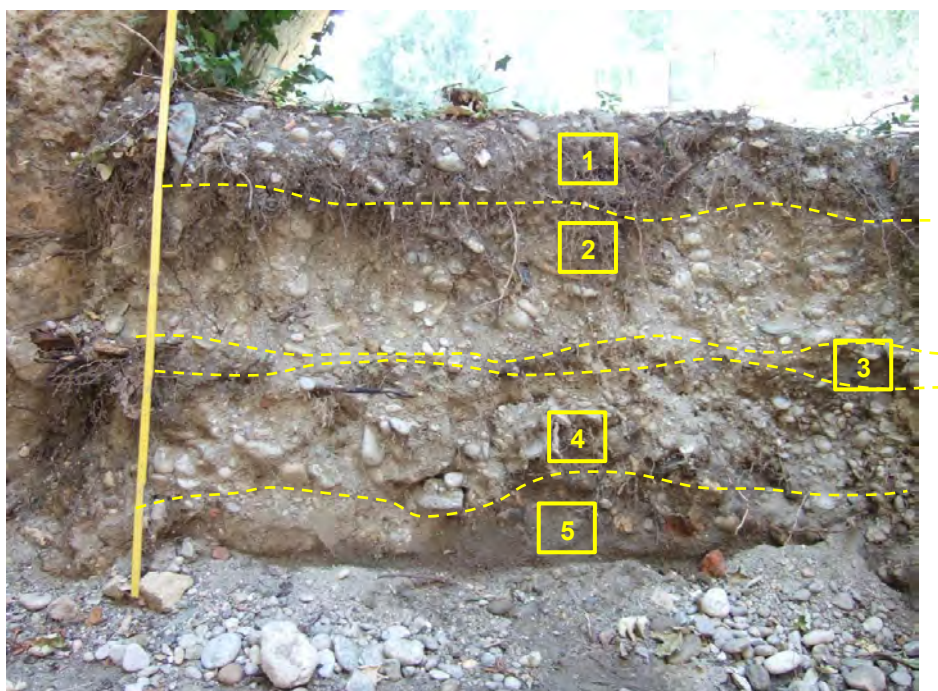


Figura 1.1.3. Perfil E de los depósitos de inundaciones históricas estudiados en las inmediaciones de la Casa de la Moneda, donde se diferencian cinco niveles, correspondientes, al menos, a dos eventos de avenidas históricas del río Eresma (Díez Herrero, 2008a).



1.1.2. El registro documental de inundaciones históricas

El registro documental de inundaciones históricas de la ciudad de Segovia es relativamente reducido para lo que cabría pensar en una ciudad con más de dos milenios de historia, y con la trascendencia socio-política que ha tenido desde la dominación romana. Los motivos fundamentales son que el recinto amurallado y gran parte del caserío se encontraba elevado varias decenas de metros respecto al fondo de los valles circundantes (Eresma y Clamores), por lo que las noticias sobre los efectos de las inundaciones están restringidos a las fincas y construcciones del fondo de los valles (monasterios, conventos, molinos, puentes...), o a los arrabales de la ciudad ubicados en las orillas de los ríos (San Lorenzo, San Marcos, Santa Eulalia, San Millán...). Sin embargo, los edificios emblemáticos y centros del poder civil, militar o religioso (Alcázar, Catedral, Ayuntamiento, Palacio Obispal...), por su situación en lo alto del recinto amurallado, salvo la Real Casa de la Moneda, nunca se han visto afectados por las inundaciones, y por ello se pierden importantes y continuas series documentales de registro.

A partir de la consulta de diferentes fuentes de archivos, bibliotecas y hemerotecas, ha sido posible ir completando una relación de los principales eventos de inundación que han afectado al valle del río Eresma a su paso por la ciudad de Segovia:

- ✓ **1304.** Inundación del Monasterio de Santa María de los Huertos, siendo abad Arnaldo, a causa del desbordamiento del río Eresma, que "*inundó la iglesia y claustros de él*".
- ✓ **13-05-1477.** Inundación del Eresma de consecuencias desconocidas. AMS (I. Álvarez, com. pers.).
- ✓ **1502.** El puente de la Alameda ha sido derribado por las crecidas. A.G.S., Cámara de Castilla (Pueblos), leg. 19, 18 enero 1514. Asenjo (1987), *Segovia, la Ciudad y su Tierra a fines del Medievo*, pag. 66. AMS.
- ✓ **1504.** El puente de la Alameda ha sido construido en madera dos veces, y ambas veces sólo ha durado dos años, pues crecidas sucesivas lo han derribado. A.G.S., Cámara de Castilla (Pueblos), leg. 19, 18 enero 1514. Asenjo (1987), *Segovia, la Ciudad y su Tierra a fines del Medievo*, pag. 66.
- ✓ **26-01-1511.** Peticiones sucesivas del Concejo de Segovia para arreglar el puente sobre el río Eresma a la altura del Monasterio del Parral, roto por las crecidas. A.G.S. Registro General del Sello, XII, 1510 Madrid 12 diciembre; A.G.S. R.G.S., VIII, 1510, Madrid 31; A.G.S., Cámara de Castilla (Pueblos), leg. 19, Segovia, 26 enero 1511. Asenjo (1987), *Segovia, la Ciudad y su Tierra a fines del Medievo*, pag. 66.
- ✓ Invierno **1513-1514.** Solicitud de reparación del puente desde el Soto al Tormohito (Alameda del Parral) para permitir el paso de las carretas y los mercaderes. A.G.S., Cámara de Castilla (Pueblos), leg. 19, 18 enero 1514. Asenjo (1987), *Segovia, la Ciudad y su Tierra a fines del Medievo*, pag. 66.
- ✓ Otoño **1521.** Inscripción en un libro de canto de la Catedral de Segovia (A. Ruiz, com. pers.).
- ✓ **25-08-1540.** Arrancó dos puentes, seis batanes, once molinos y más de cuarenta casas; inundó el monasterio de Sta. María de los Huertos, y alcanzó tres varas en la iglesia y las casas de San Lorenzo. Colmenares (1637).
- ✓ **25-08-1543.** Garci Ruiz de Castro. *Comentario sobre la primera y segunda repoblación de Segovia*, Excma. Diputación de Segovia. También crecido en Carbonero el Mayor. El Adelantado de Segovia, 25-1-1996.



- ✓ **1547.** Inundación del Eresma de consecuencias desconocidas. AMS (I. Álvarez, com. pers.).
- ✓ **1598.** Las inundaciones obligan a los frailes del Monasterio de Sta. María de los Huertos a abandonar el mismo. AP. FSI13536 y Bullón (1999).
- ✓ **1599.** Inundaciones en el Monasterio de Sta. María de los Huertos. AP. FSI13536 y Bullón (1999).
- ✓ **1603.** El río arrastró el macho de acarreo en el molino de San Lázaro. Pregunta 11 (Maldonado, 1611).
- ✓ **1605.** Arreglo de lo derruido en la Puente Castellana por el cantero Yturralde. Protocolo 994 ó 924 (?).
- ✓ Invierno de **1618.** Domingo de Mendiola. A.G.S., Casas Reales, leg. 327, folio 409.
- ✓ **1626.** Reparación de la cerca principal del convento de S. Vicente, derribada por las aguas. Archivo de Hacienda, carpeta 10/31. Libro de cuentas, fols. 61 vuelto y 188 vuelto.
- ✓ Enero de **1627.** Propuesta de reparación (22-2-1627) del batán que se había llevado el río. Protocolo 1087, fol 44 y ss.
- ✓ 31-10/01-11-**1629.** Monasterio de Sta. María de los Huertos. Escribano Eugenio Velázquez. A.H.P.S., protocolo nº 1065, fols. 1177-1181, V.
- ✓ **1681.** Daños en el puente de piedra del Monasterio de Santa María del Parral.
- ✓ **1695.** Libros de Cuentas del Ayuntamiento 1696-1697. A.M.S., 857-2.
- ✓ 23-06-**1733.** J.A. Marín, *Estudios Segovianos*, t. XIV (XV), 281-287
- ✓ 22-06-**1791.** Expediente sobre reconocimiento de los Puentes de la Alameda, puente castellano y el de S. Lázaro con motivo de la avenida ocurrida el 22 de junio, A.M.S. XXVIII-812-13 y 874-26; AP.FSI13664.
- ✓ 19-03-**1799.** Se hacen los muros del parque del Alcázar, derribados por las avenidas del río Eresma el invierno anterior. A.G.P., Sección Administrativa, Leg. 731; ver Ceballos-Escalera, pág. 180.
- ✓ 23 a 25-12-**1860.** La Casa de la Moneda de Segovia fue inundada tres veces.
- ✓ 15 y 16-05-**1906.** Daños en la planta hidroeléctrica segoviana. AMS (I. Álvarez, com. pers.).
- ✓ 29-03-**1956.** Se registra un caudal medio diario de 291 m³/s (202 m³/s en la revisión del Anuario). C.H. del Duero. La Casa de la Moneda es inundada. *El Adelantado de Segovia*.
- ✓ 20-01-**1966.** Se registra un caudal instantáneo de 77 m³/s. C.H. del Duero. *El Adelantado de Segovia*.
- ✓ 18-12-**1997.** Se registra un caudal instantáneo de 66 m³/s. C.H. del Duero.
- ✓ 22 al 30-01-**2009.** Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al Ingenio Chico de la Casa de la Moneda. *El Adelantado de Segovia, El Norte de Castilla, Gente en Segovia y Zoquejo.com*



- ✓ 26 al 30-03-**2013**. Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al bar-restaurante del Ingenio Chico de la Casa de la Moneda y al taller de la herrería. *El Adelantado de Segovia, El Norte de Castilla, Gente en Segovia, Segovia al Día y Zoquejo.com*
- ✓ 01 al 03-03-**2014**. Crecidas por precipitaciones intensas y prolongadas y fusión de nieve, con desbordamientos en Segovia que afectaron al bar-restaurante del Ingenio Chico de la Casa de la Moneda. *El Adelantado de Segovia, El Norte de Castilla, Gente en Segovia, Segovia al Día y Zoquejo.com*

CLAVES:

- A.G.P. Archivo General de Palacio
- A.G.S. Archivo General de Simancas
- A.H.M.S. Archivo Histórico Militar de Segovia
- A.H.P.S. Archivo Histórico Provincial de Segovia
- A.M.S. Archivo Municipal de Segovia
- R.G.S. Registro General del Sello

Entre todos estos lugares con registro de inundaciones históricas, destaca por la longitud de las citas y referencias, así como las alusiones a la magnitud (calados alcanzados), el monasterio de Santa María de los Huertos, ubicado unos centenares de metros aguas arriba de la RCMS, por lo que merece un análisis específico (Apéndice II).

El registro de inundaciones históricas en la hemeroteca de los siglos XIX y XX

Además se han consultado los fondos documentales de la hemeroteca del siglo XIX del Archivo Municipal de Segovia, correspondiente a publicaciones periódicas (prensa escrita) de los siguientes periódicos:

- El Eresma (1871)
- La Consecuencia (1872)
- La Semana (1873)
- El Alcázar (1879)
- El Moscardón (1877)
- El Porvenir Segoviano (1899)
- El Adelantado de Segovia (1901-actualidad)



No se ha podido realizar una recopilación de alturas de lámina de agua ni de caudales de inundaciones históricas. La información que sí se recoge en estos diarios son las actas municipales de peticiones al Ayuntamiento para realizar obras a consecuencia de subidas de agua e indemnizaciones por pérdidas de cultivos cercanas al río Eresma (figuras 1.1.4, 1.1.5 y 1.1.6). Así también se detallan numerosas reconstrucciones de los puentes construidos sobre el río.

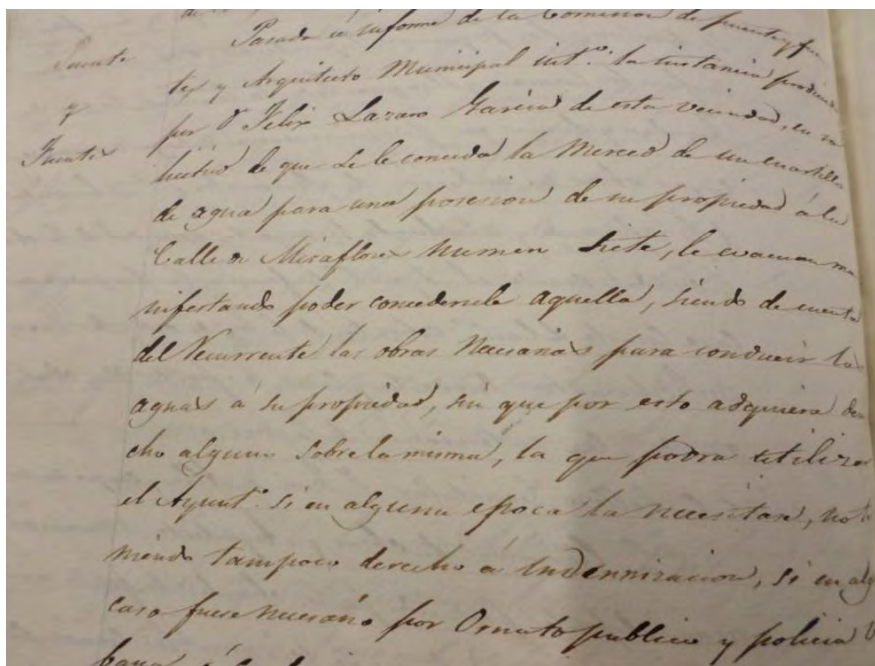


Figura 1.1.4. Extracto de las actas municipales del Ayuntamiento de Segovia, dirigidas al arquitecto municipal donde se ponen de manifiesto problemas por las inundaciones que han afectado la ciudad.



Información Local

EL RIO ERESMA, DESBORDADO, HA ANEGADO LOS PARAJES QUE ATRAVIESA A SU PASO POR LA CAPITAL

La Alameda se encuentra totalmente cubierta por las aguas y una vivienda próxima al puente de la fábrica de loza ha tenido que ser desalojada

El Milanillo ha cortado la carretera de Arévalo, haciendo imposible la circulación | En Hontangres, un hombre está cercado por el agua en una casita, desde ayer tarde

Un muro de contención se derrumbó en la calle de Gascoa, y próximo a él existen algunas viviendas en peligro

Las pertinaces lluvias que en estos días vienen cayendo sobre Segovia han producido, unidas al deshielo, una gran crecida del río Eresma y de sus afluentes, originando numerosas inundaciones, algunas de ellas de gran importancia. El aspecto de las márgenes de las inundaciones impresionante. Las aguas bajan con gran impetuosidad y en varios lugares llegan hasta las barreras, arrastrando tierras y edificaciones. Las carreteras están cortadas por el inasombrable torrente. Los árboles sólo presentan troncos y cuerdas de barro, las ramas de sus copas. Muchos vecinos coinciden en afirmar que esta inundación presenta caracteres no conocidos desde hace muchos años en la capital. El Parque de bomberos lleva, todo el día, trabajando activamente en distintos lugares. Un hombre se halla incomunicado por las aguas en Hontangres.

También en la capital han ocurrido varias incidencias como consecuencia de las pertinaces lluvias. La impresión es sobresaltadora y hace temer daños materiales bastante elevados.

Cuando esta mañana hemos salido de nuestra peregrinación por algunos rincones de la capital y sus alrededores, nos encontramos a nuestros lados los ríos del panorama que ofrecen los terrenos inundados por las aguas. La lluvia cae, como una prolongación de la noche y esta madrugada, extraordinariamente. La chimenea carboniza que se abre ante nosotros se transforma en carbón. El barrio de San Lorenzo, cercano a la Alameda, está inundado y algunas viviendas cercadas al punto, desde el que, hasta el día, la persona que se encontraba en el agua, después de haber estado en el agua, se encuentra en el agua.

Una fábrica, amenazada de inundación, se encuentra en su punto más alto. A medida que el río avanza, va creciendo en su caudal un terreno más elevado, por eso, un poco antes de la Alameda, las aguas han cubierto un terreno que hasta ahora estaba seco. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

El río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto. En el momento de escribir estas líneas, el río Eresma, en su caudal, se encuentra en su punto más alto.

Figura 1.1.5. Extracto de la página segunda de El Adelantado de Segovia correspondiente al 29 de marzo de 1956, donde se describe los efectos de las inundaciones como consecuencia del desbordamiento del río Eresma en la Alameda del Parral.



Información Local

Grandes inundaciones a lo largo del río Eresma

La Alameda aparece completamente anegada por las aguas, que llevan una enorme velocidad

En la fábrica de la Moneda se inundó el sótano repleto de trigo Un obrero tuvo que ser sacado izándolo con una cuerda

Los Viveros aparecen también completamente cubiertos por las aguas, que llegan hasta la misma cornisa

El Millanillo atravesaba esta misma carretera de Segovia a Arévalo a lo largo de doscientos metros

La barra terminal, que ha caído durante toda esta mañana sobre la ciudad ha dado origen a que el río Eresma se desbordara y llegase a inundar, en una gran extensión, las tierras situadas a ambas orillas del mismo.

En algunas ocasiones podría darse la idea de que el río ha crecido sobre la ciudad, fundiéndose imposible el tránsito de personas y mercancías por las calles, en un momento de la ciudad donde los edificios no son muy altos.

El agua ha sido acumulada también, durante una noche, en el

agua. Esto demuestra, con gran claridad, la importancia de las inundaciones.

La gran lluvia causada la noche del lunes pasado, desde la mañana anterior al momento de la inundación, durante el día de hoy, causó una gran inundación, que cubrió toda la zona de la Alameda, desde la zona de la Alameda hasta la zona de la Alameda. En consecuencia, la zona de la Alameda se inundó completamente.

La zona de la Alameda se inundó completamente, y el agua llegó a cubrir la zona de la Alameda.

En consecuencia, la zona de la Alameda se inundó completamente, y el agua llegó a cubrir la zona de la Alameda.

NOTAS DE VIDA

SECO Y POTABLE

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

SECO Y POTABLE

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

OPORTUNIDAD APRECIABLE POR LA COMISSION PREMIER

En la zona de la Alameda, se ha producido una gran inundación, que cubrió toda la zona de la Alameda.

NOTAS DE LA ENSEÑANZA

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

La zona de la Alameda se inundó completamente, y el agua llegó a cubrir la zona de la Alameda.

En consecuencia, la zona de la Alameda se inundó completamente, y el agua llegó a cubrir la zona de la Alameda.

EN LOS VIVEROS

Los Viveros aparecen también completamente cubiertos por las aguas, que llegan hasta la misma cornisa.

EL RIO MELANILLO

El río Melanillo atravesaba esta misma carretera de Segovia a Arévalo a lo largo de doscientos metros.

INUNDACIONES EN INDIOS

Las inundaciones en la zona de la Alameda, se han producido en consecuencia de la gran lluvia.

COMISSION PREMIER

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

SECO Y POTABLE

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

OPORTUNIDAD APRECIABLE POR LA COMISSION PREMIER

En la zona de la Alameda, se ha producido una gran inundación, que cubrió toda la zona de la Alameda.

NOTAS DE LA ENSEÑANZA

El Consejo de Administración de la Compañía de Seguros de Vida, S.A., ha acordado la suspensión de los dividendos por el momento, en consecuencia de la situación de la Compañía.

LA ALAMEDA

La zona de la Alameda se inundó completamente, y el agua llegó a cubrir la zona de la Alameda.

EL RÍO MELANILLO

El río Melanillo atravesaba esta misma carretera de Segovia a Arévalo a lo largo de doscientos metros.

Figura 1.1.6. Extracto de la página segunda de El Adelantado de Segovia correspondiente al 20 de enero de 1966, donde se describe los efectos de las inundaciones como consecuencia del desbordamiento del río Eresma en la Alameda del Parral.



1.1.3. El registro dendrocronológico

Análisis dendrocronológicos realizados en una cubierta de madera, descubierta en 2009 sobre los canales hidráulicos de la antigua Casa de la Moneda de Segovia (siglo XVI), han permitido datar las fechas aproximadas de su instalación y/o reposición. Comparando estos datos con el registro documental de las obras de restauración en el edificio y con el inventario de inundaciones históricas en esa cuenca, se han podido correlacionar las fechas de las principales avenidas que afectaron al edificio entre los años 1583-90 y 1771.

En el mes de abril-mayo de 2009, durante las labores de investigación arqueológica en este complejo de la RCMS para su rehabilitación como museo, apareció en el lecho del antiguo canal (caz) un entarimado cubierto por una gran cantidad de escombros. Este entarimado, que cubría los antiguos canales en roca originalmente construidos a finales del siglo XVI (Juan de Herrera ca. 1583-1590), limitaba con otra estructura de mampostería y sillería suprayacente, que se corresponde con el denominado canal de Sabatini (ca. 1771; figura 1.1.7). Se tiene constancia documental de que los elementos de madera del complejo han sido sustituidos, al menos, seis veces y reparados total o parcialmente en los años 1615, 1648, 1677-78, 1701, 1770-71 y 1861 (Murray, 2006; Murray *et al.*, 2006; Murray, 2008). Estas sustituciones se han debido tanto a simples obras de mejora, como a desperfectos producidos por eventos singulares de avenidas e inundaciones.

Se tomaron muestras de todo el material puesto a nuestra disposición: 4 vigas durmientes, 3 tablones de la tarima y 3 tacos de fijación de la estructura del canal (figura 1.1.7). Nuestra hipótesis de trabajo es que al menos las vigas, por su elevada dimensión y menor tecnología para el aprovechamiento y transformación maderera de la época, proviene cada una de un árbol. Sobre la procedencia del resto de los elementos serán de gran ayuda los análisis dendrocronológicos. En total se obtuvieron 24 secciones transversales y posteriormente en laboratorio fueron secadas y pulidas (figura 1.1.8). Para el conteo y medición de la anchura de los anillos, se empleó una mesa LINTAB bajo lupa binocular y la aplicación TSAP Win (figura 1.1.9). Las secuencias de crecimiento obtenidas se sincronizaron entre sí (figura 1.1.10), visual y estadísticamente, mediante las aplicaciones del programa citado y con el programa COFECHA. La datación final de las muestras se estableció utilizando la serie maestra de la Sierra de Guadarrama elaborada para el periodo 1513-1995.

La investigación histórico-documental se hizo por procedimientos convencionales de búsqueda sistemática en archivos (AGS, AGP, AHMS, AHPS...), bases de datos digitales (segoviamint), hemerotecas y publicaciones impresas; y tanto para la datación de obras de reparación en los canales (palabras clave: madera, pino, obra, Valsaín, canal, presa...), como para las avenidas históricas (palabras clave: crecida, avenida, desbordamiento, etc.).

Para cada evento de inundación histórica detectado, se anotó la fecha, periodo y estimación de la magnitud del evento o de los daños ocasionados. Especial hincapié se puso en la documentación de las obras de reparación con referencia expresa de los daños en los canales producidos por eventos de inundación, como el escrito de 1678 en el que se cita expresamente que la obra se hace "...por que lo referido esta mal tratado por averse entrado las abenidas del rio...".

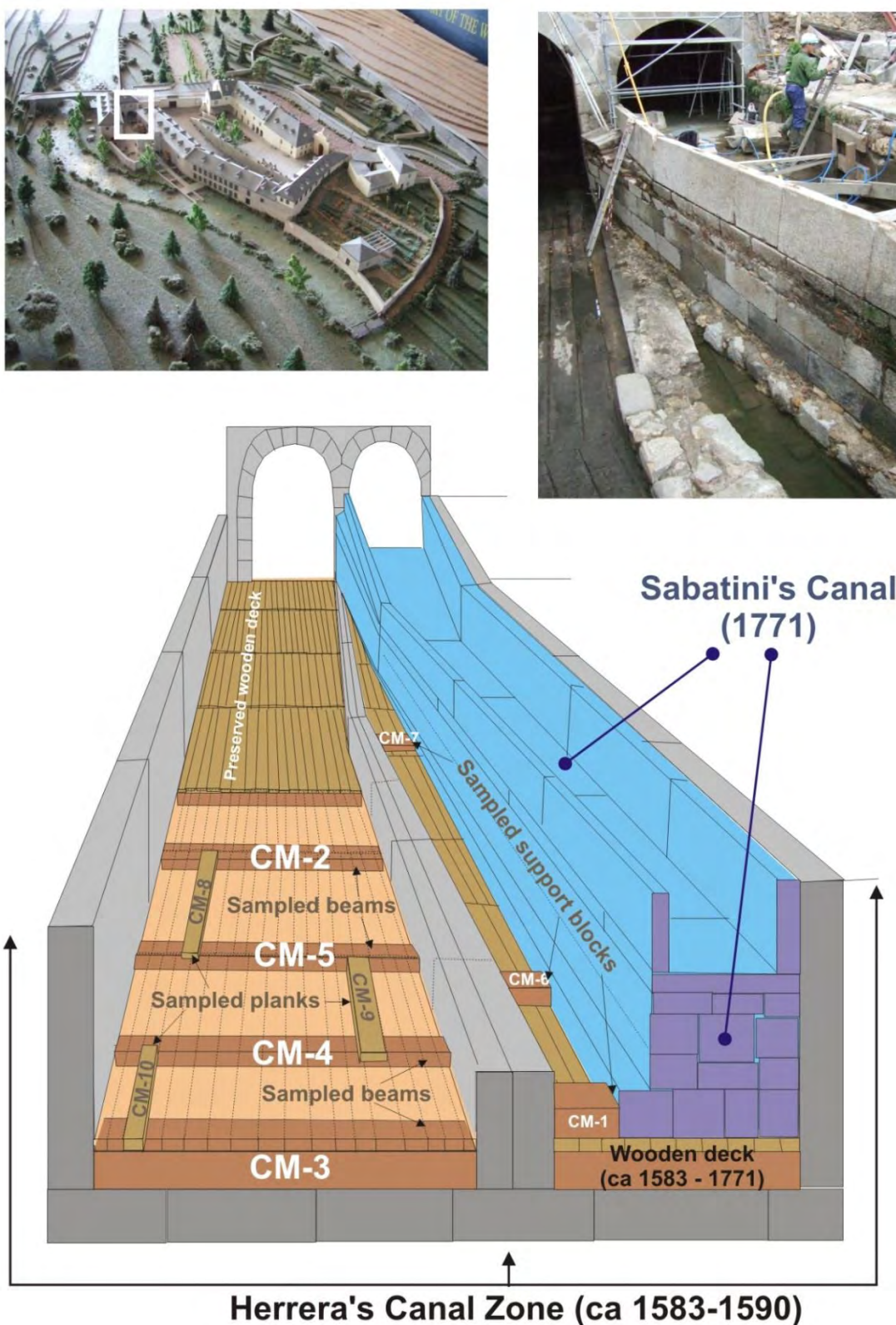


Figura 1.1.7. Situación del entarimado de madera en la zona de los canales de la RCMS, colocado sobre la zona del canal de Herrera y tapado por el canal de Sabatini; con indicación de las maderas que fueron muestreadas para su estudio dendrocronológico (Génova et al., 2011).

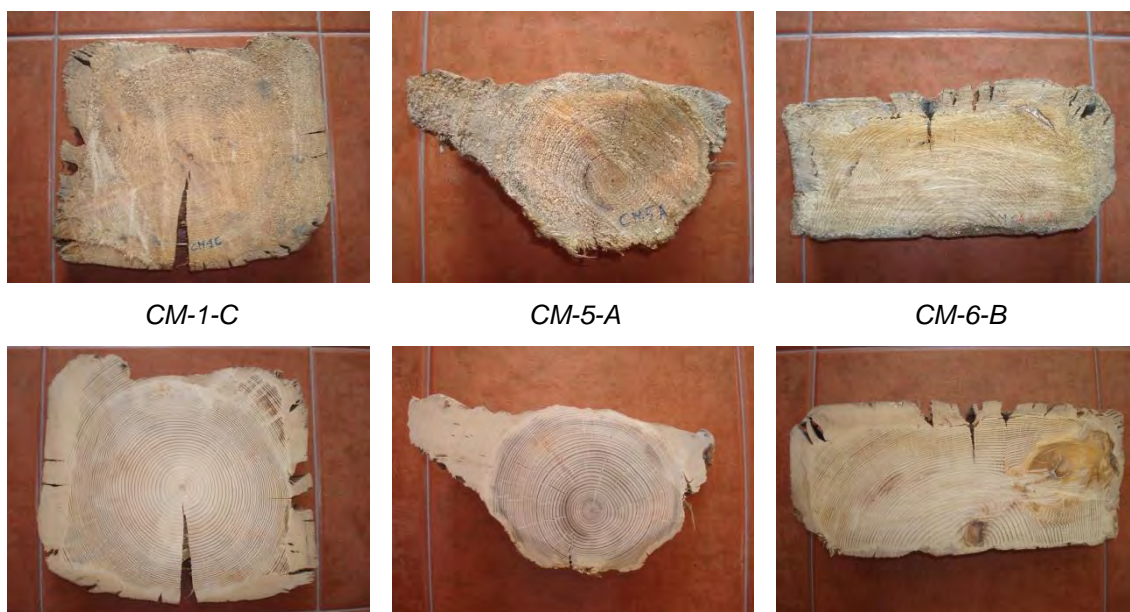


Figura 1.1.8. Aspecto de tres de las secciones, antes y después del pulido de una de sus caras.

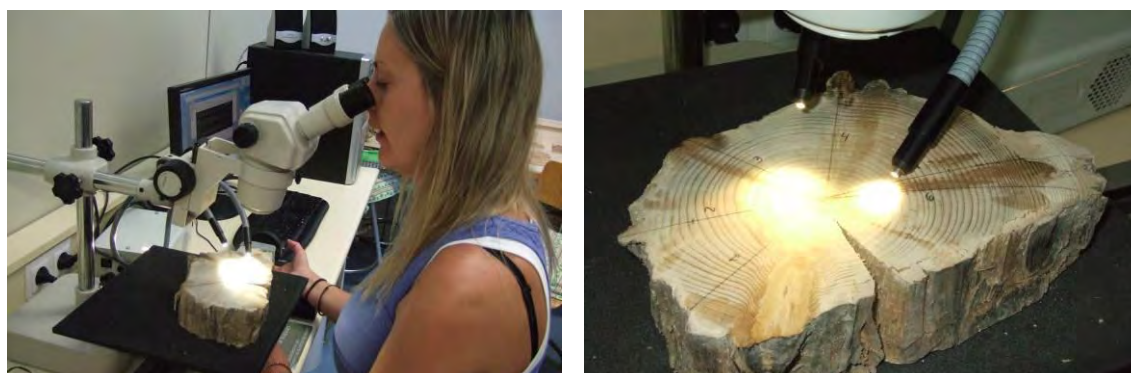


Figura 1.1.9. Conteo y medición de la anchura de los anillos en varios radios de una misma sección con el empleo de la mesa de medición LINTAB TM.

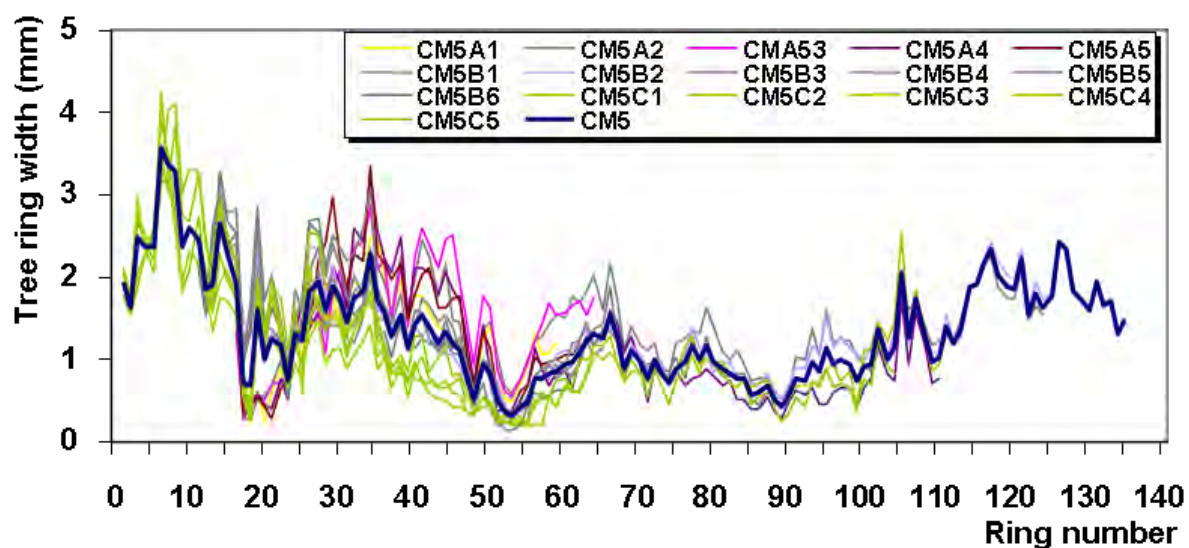


Figura 1.1.10. Gráfico del espesor de los anillos de crecimiento de las muestras y su correlación.



En las dataciones de los anillos más externos, correspondientes con fechas más próximas al momento de la tala de los árboles, parecen reconocerse tres poblaciones de fechas próximas entre sí (tabla 1.1.1): 1677-1678, 1690-1700 y 1713-1742.

Tabla 1.1.1. Parámetros y valores dendrocronológicos de las muestras analizadas de las tarimas de la RCMS.

ID	Radio máximo (mm)	Máximo número de anillos	Intervalo temporal	Crecimiento medio en los últimos 10 años (mm)	Número estimado de anillos	Fecha estimada de tala
CM1	178	99	1578-1676	0.6 ± 0.17	135 ± 4	1713
CM2	161	106	1584-1689	1.35 ± 0.26	136 ± 10	1720
CM3	192	161	1561-1721	0.4 ± 0.04	181 ± 0	1742
CM4	185	99	1562-1660	1.5 ± 0.39	115 ± 6	1677
CM5	186	135	1550-1684	1.8 ± 0.35	148 ± 5	1698
CM6	166	104	1566-1669	0.66 ± 0.17	155 ± 6	1721
CM7	162	103	1548-1650	0.77 ± 0.15	152 ± 6	1700
CM8	180	99	1559-1657	1 ± 0.26	119 ± 5	1678
CM9	176	149	1517-1665	0.96 ± 0.28	173 ± 7	1690

Ello podría marcar al menos dos o tres momentos de reposición de maderas que podrían asociarse a: las reparaciones de 1648 después de los deterioros asociados a las inundaciones de 1626, 1627 y 1629; las reparaciones de 1678 y 1701, vinculadas a los daños de las avenidas de 1681 y 1695; y las reformas de 1770-71, en parte tras los daños de las avenidas de 1733 y 1759 (figura 1.1.11).

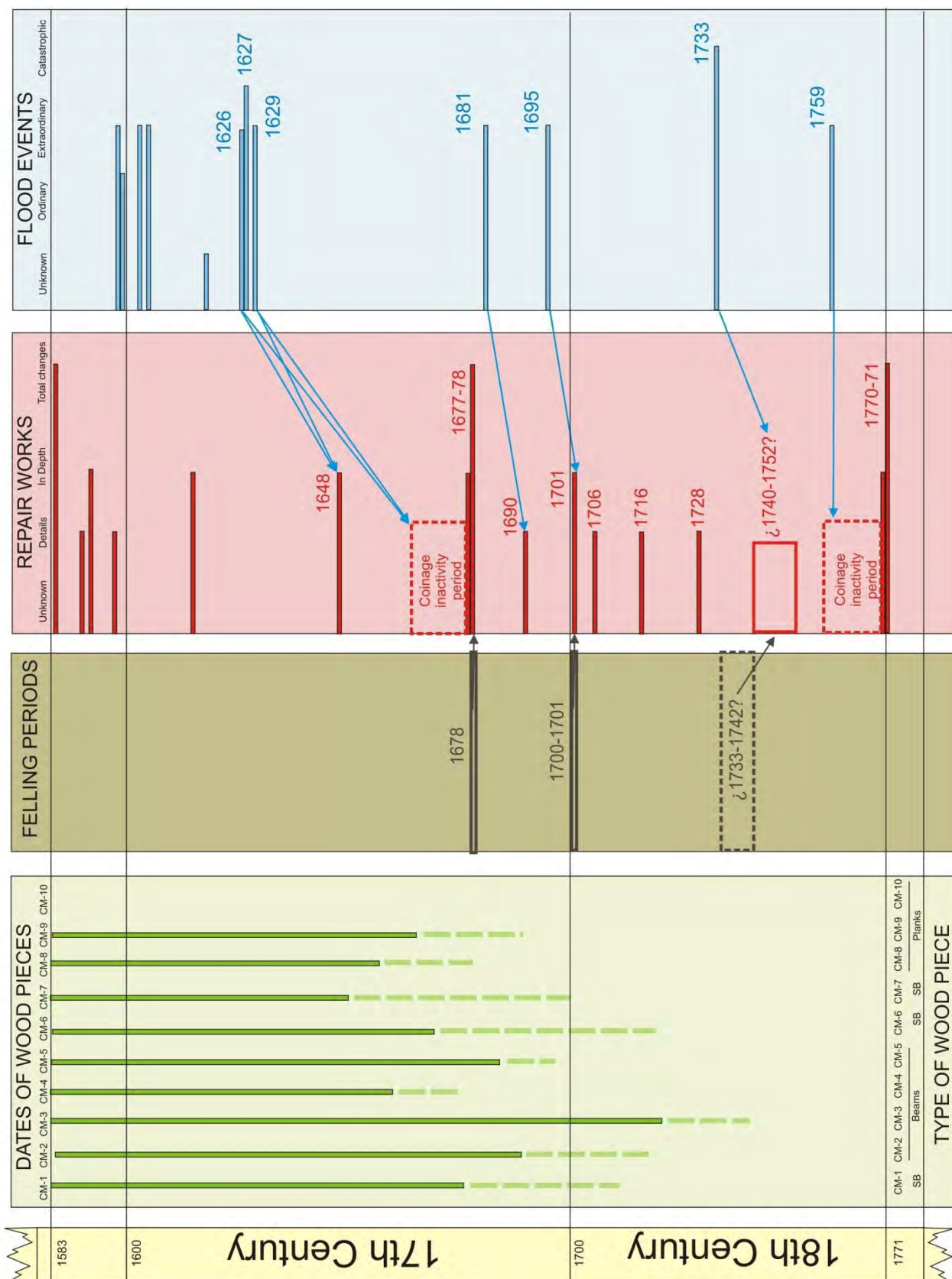


Figura 1.1.11. Gráfico de correlación entre las edades de las maderas, las fechas posibles de tala, las avenidas históricas documentadas y las obras de reparación (Génova et al., 2011).



1.2. ANÁLISIS DE LA INUNDABILIDAD POR DESBORDAMIENTO DEL RÍO ERESMA EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA

Para el análisis de la peligrosidad por inundaciones se ha utilizado de forma integrada y complementaria tres fuentes de datos y metodologías (figura 1.2.1):

- *Hidrológica*: con un análisis estadístico de caudales del registro sistemático obtenidos de estación de aforos y análisis de caudales de eventos recientes.
- *Histórico-documental*: a partir de los resultados de inundaciones pasadas en archivos y hemerotecas de Segovia.
- *Hidráulica*: con el empleo de modelos matemáticos de simulación numérica del flujo de los caudales, calibrados y que representen la realidad física del área de estudio.

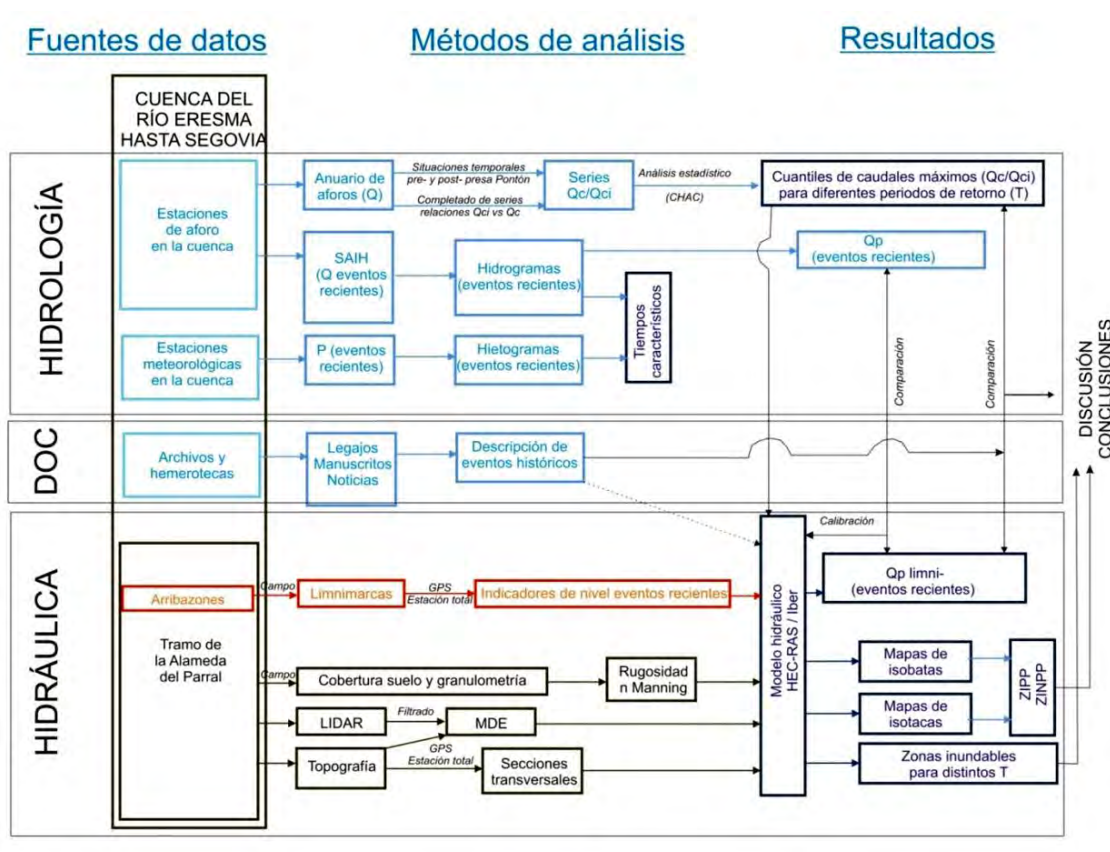


Figura 1.2.1. Esquema metodológico general del estudio, desde las fuentes de datos a los resultados, pasando por los métodos de análisis hidrológicos, documentales e hidráulicos.



1.2.1. Análisis hidrometeorológico de las inundaciones recientes

Las inundaciones del río Eresma de enero de 2009 en la Casa de la Moneda

Durante los últimos días del mes de enero de 2009, tras un periodo de lluvias prolongado y de fusión repentina de la nieve acumulada en la Sierra de Guadarrama, el río Eresma experimentó una avenida con un espectacular aumento de su caudal, pasando de apenas 3 m³/s de caudal base del día 21 de enero, a un primer hidrograma de crecida de 35 m³/s el día 23 de enero (tiempo de crecida de 33 horas); y tras un periodo con curva de descenso entre los días 24 y 27 de enero en los que el caudal descendió hasta 14 m³/s, una segunda punta de crecida los días 28 y 29 de enero, que alcanzó los 55 m³/s (estimación inicial sin calibración; figuras 1.2.2 y 1.2.5).

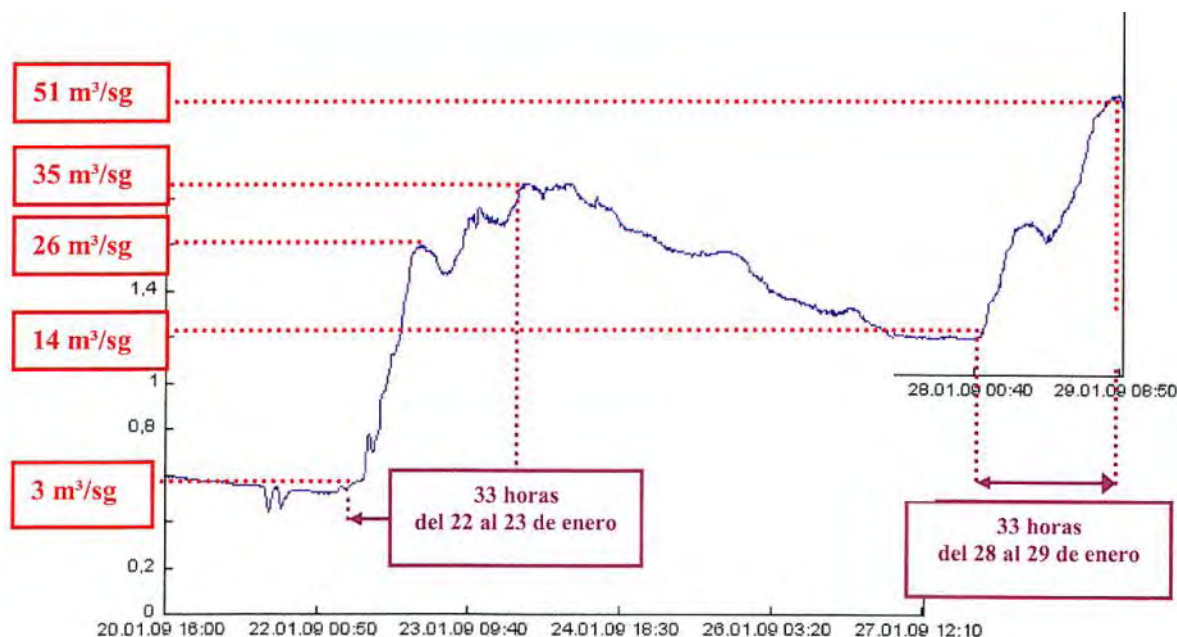


Figura 1.2.2. Hidrograma de la estación de aforos de Segovia (2050) de la CHD correspondiente a los días 20 al 29 de enero de 2009 (fuente datos: página web de la Confederación Hidrográfica del Duero, en la que se advierte expresamente que estos datos no se pueden considerar como definitivos y por lo tanto son aproximados; fuente gráfico: García de Castro, 2009).

Estos aumentos de caudal produjeron desbordamientos en diferentes puntos de las márgenes del cauce, pero principalmente en la cuenca alta-media a su paso por Segovia y Hontanares de Eresma, y en la cuenca baja en Coca. En el tramo que discurre por las proximidades de la ciudad de Segovia, los desbordamientos más significativos afectaron a la Alameda del Parral y la zona de Los Viveros, y dentro del primer sector, fueron especialmente mediáticos y polémicos los efectos de las inundaciones en las instalaciones de la Casa de la Moneda (figura 1.2.3).

Este complejo, que se encontraba entonces en fase de restauración y rehabilitación para su conversión en un museo, se vio afectado únicamente en los canales y edificaciones más próximas al río, sobre todo el conocido como Ingenio Chico, en cuya planta baja el agua alcanzó más de medio metro de altura (figura 1.2.4). Especialmente llamativo, además del anegamiento de los edificios e instalaciones, era la gran velocidad con la que circulaba el agua por el canal ordinario, con régimen turbulento próximo a crítico en algunos puntos.



Figura 1.2.3. El río Eresma desbordado a la altura de la Casa de la Moneda, inundando el edificio del Ingenio Chico en la margen izquierda. 29 de enero de 2009.

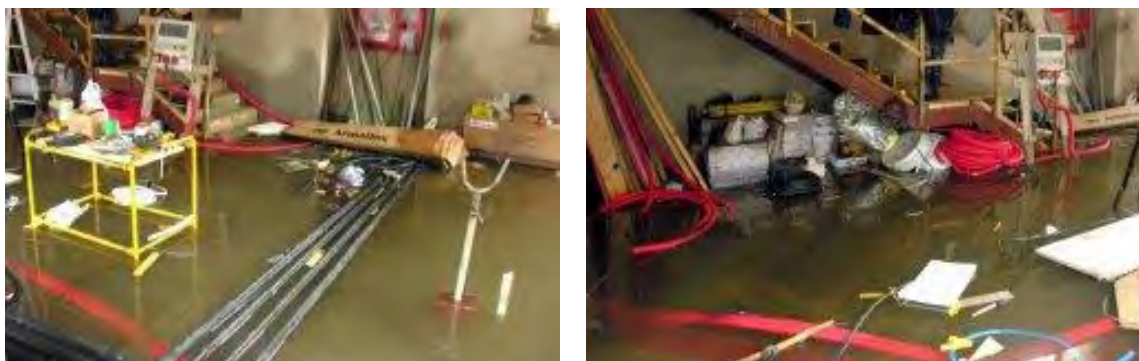


Figura 1.2.4. Imágenes de los efectos de la inundación del Ingenio Chico de la Casa de la Moneda, anegando algunos de los materiales empleados en la restauración (fuente: El Norte de Castilla).

A raíz de estas inundaciones se suscitó una intensa polémica mediática entre diversos técnicos y políticos, sobre cuáles serían o deberían haber sido las medidas preventivas a adoptar para evitar dichas inundaciones y minimizarlas en el futuro. En este sentido, se propusieron diversas medidas de índole estructural (dragado, eliminación de la vegetación de ribera, diques laterales, puertas y ventanas estanco,...), no siempre avaladas por estudios técnicos y científicos que garanticen su efectividad, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental (García de Castro, 2009).

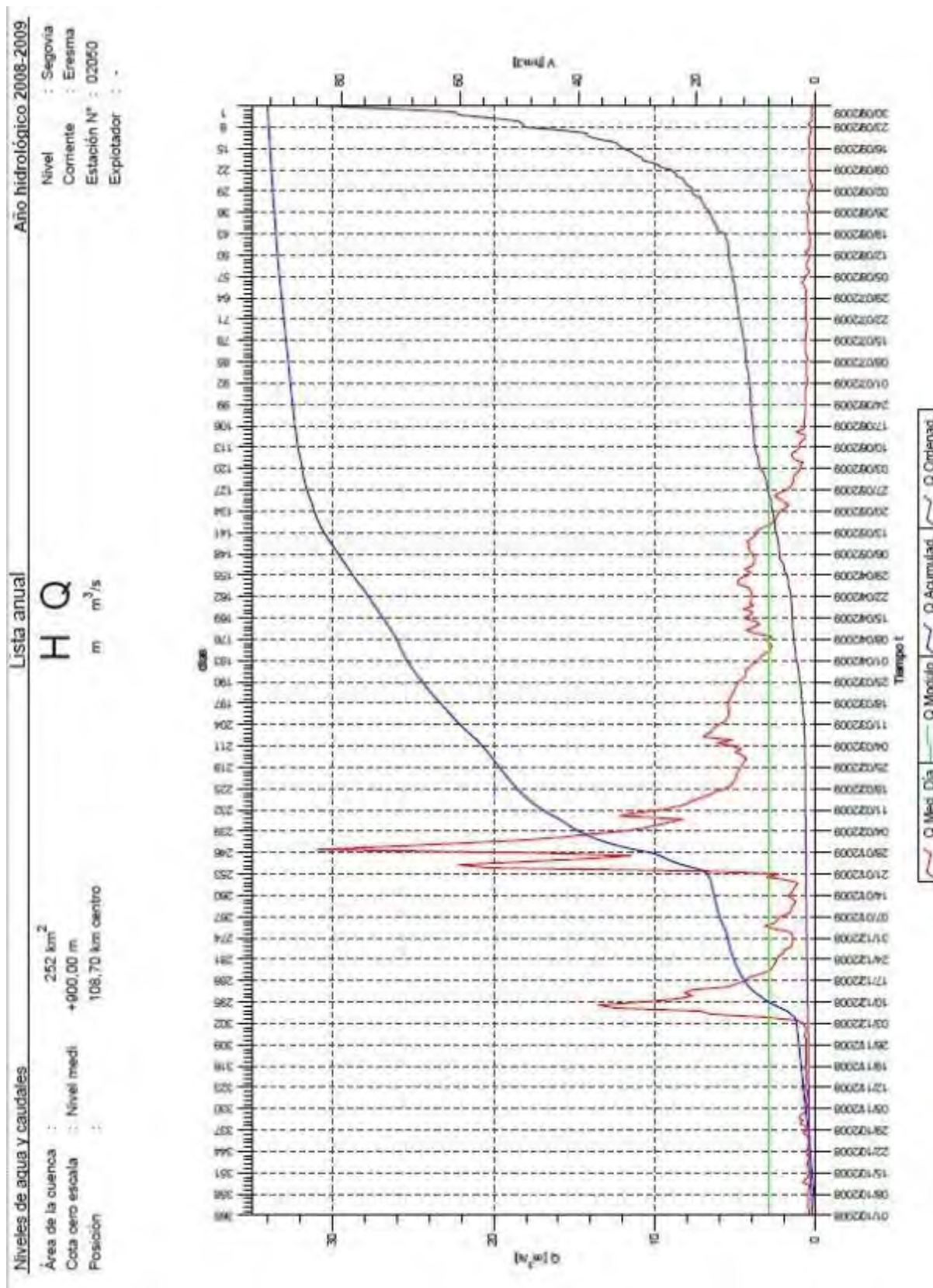


Figura 1.2.5. Hidrograma de la estación de aforos del río Eresma en Segovia correspondiente al año hidrológico 2008-2009 (línea roja Q vs tiempo), en el que se aprecian con claridad los eventos de crecida de diciembre de 2008 y enero-febrero 2009 (fuente: Anuario de aforos Confederación Hidrográfica del Duero).



Las inundaciones del río Eresma de marzo de 2013 en la Casa de la Moneda

Según la nota informativa de la AEMET (2013), el mes de marzo de 2013 fue extremadamente lluvioso en casi toda España, de forma que la precipitación media mensual a nivel nacional alcanzó el valor de 157 mm, lo que supera ampliamente el triple del valor normal del mes que es de 46 mm (periodo de referencia: 1971-2000). Se trató del mes de marzo más húmedo en el conjunto de España de toda la serie iniciada en el año 1947, superando en 20 mm al mes de marzo de 1947, que había sido hasta la fecha el de precipitación media más elevada. Las precipitaciones acumuladas en marzo superaron el 300% del valor medio en toda España, con excepción de las regiones de la franja norte peninsular, así como las de la franja mediterránea, Baleares y parte de Canarias. En la tercera decena del mes se intensificaron las precipitaciones, especialmente en las regiones de la vertiente atlántica. Fueron especialmente intensas en Galicia, Extremadura, zonas montañosas de Andalucía y puntos de los Sistemas Ibérico y Central. En área del suroeste de Galicia y del oeste del Sistema Central las cantidades acumuladas en esta decena superaron los 200 mm.

En el caso particular de la cuenca alta del río Eresma aguas arriba de Segovia las precipitaciones fueron constantes y algunas en forma de nieve en la Sierra, destacando las intensidades registradas los días 24 a 27 de marzo que, según los datos recogidos por el sistema automático de información hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Duero (SAIH Duero) para la cuenca aguas arriba del embalse del Pontón Alto llegó a alcanzar puntas de precipitación de más de 4 L/m² en intervalos horarios; manteniendo durante buena parte de la tarde del día 26 de marzo intensidades sostenidas superiores a 3 L/m² (figura 1.2.6). Además esta precipitación se produjo sobre parte de la cubierta nival acumulada los días previos hasta cotas relativamente bajas, lo que desencadenó su fusión repentina.

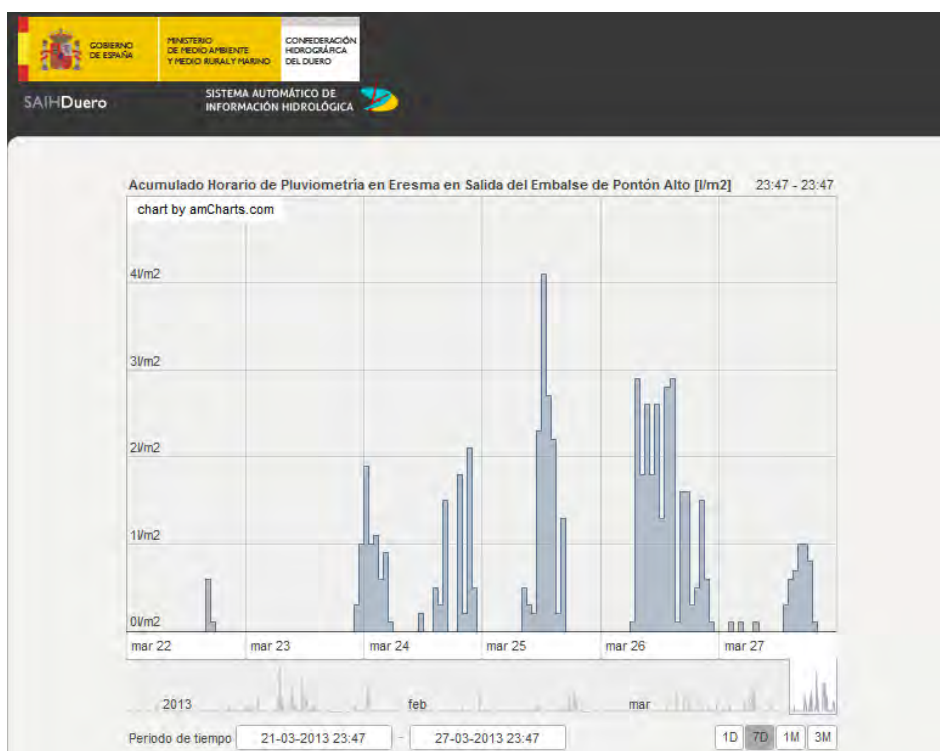


Figura 1.2.6. Pluviograma de precipitaciones en la estación de salida del embalse del Pontón Alto los días 22 a 27 de marzo de 2013 (fuente: web SAIH Duero, CHD).



Como consecuencia de estas precipitaciones prolongadas previas que habían saturado el suelo superando con creces el umbral de escorrentía, las lluvias intensas y de la fusión repentina de la cobertera nival, los ríos incrementaron súbitamente sus caudales, pasando por ejemplo el río Eresma en Valsaín de un caudal inferior a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ el 25 de marzo a mediodía, a superar los $17 \text{ m}^3/\text{s}$ el 26 de marzo a las 21:00 h; habiendo multiplicado el caudal por tres y medio en apenas unas horas de la tarde del 26 de marzo; el máximo lo alcanzó el día 29 de marzo con $19,36 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con el embalse del Pontón Alto completamente lleno y sin apenas capacidad de laminación de la onda de avenida, los caudales de vertido pasaron de ser menos de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ los días 24 y 25 de marzo, a superar los $33 \text{ m}^3/\text{s}$ la tarde-noche del día 26 de marzo (figura 1.2.7); esto es, se multiplicaron por seis en apenas unas horas de este último día según los datos del SAIH Duero.

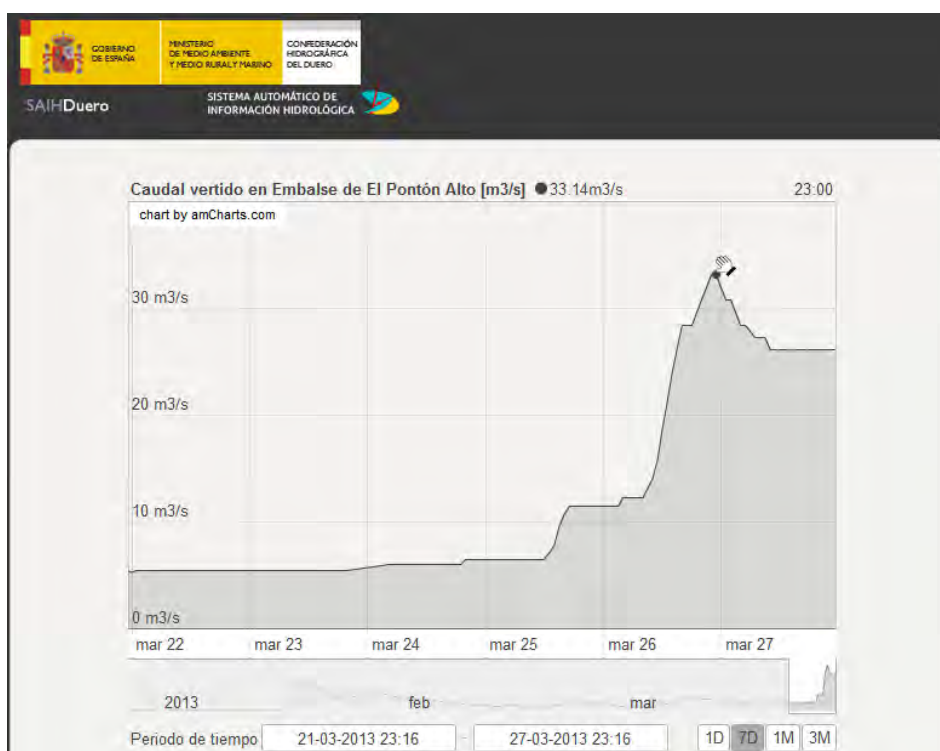


Figura 1.2.7. Hidrograma de caudales vertidos en la estación de salida del embalse del Pontón Alto los días 22 a 27 de marzo de 2013 (fuente: web SAIH Duero, CHD).

A estos caudales de vertido del embalse del Pontón Alto se sumaron los afluentes que recibe el río Eresma antes de su llegada a la ciudad de Segovia, principalmente el del arroyo Ciguiñuela, que tenía una importante crecida provocando inundaciones en la urbanización El Sotillo (La Lastrilla).

Como resultado, el río Eresma a su paso por la ciudad de Segovia alcanzó en la tarde-noche del día 26 de marzo puntas de caudal superiores a los $60 \text{ m}^3/\text{s}$; sin que se sepa con exactitud el valor de caudal, puesto que el traslado de la estación de aforos de Segovia desde el puente de San Marcos hasta el marco de control aguas abajo (Cárnicas Aquilino), donde se alcanzaron los $63 \text{ m}^3/\text{s}$, hace que tenga que ser tenido en consideración el efecto de laminación por desbordamiento en este tramo y que los datos ya no figuren en el anuario de aforos disponible en la web de la CHT.



No obstante, este valor es notablemente inferior (una cuarta parte) que la máxima avenida registrada en este tramo del río Eresma durante el último siglo (202 m³/s, enero de 1956); o a los 222,81 m³/s alcanzados por el propio río Eresma en Coca durante este episodio (día 30 de marzo de 2013). Pero significativamente superior al caudal de la avenida de enero de 2009, que alcanzó finalmente una punta de caudal de 33,9 m³/s (ver datos calibrados y validados en el Anuario de Aforos de la CHD 2008/2009, con la nueva curva de gasto de la estación).

Ante la insuficiente capacidad del cauce ordinario para albergar estos caudales dentro de los bancos de orilla, se produjo el desbordamiento a la llanura de inundación en varios puntos de la denominada Senda de los Molinos, la Alameda del Parral, barrio de San Marcos, entorno del Molino de los Señores y sector de Los Lavaderos. En la mayor parte de los casos consistieron en el anegamiento de pastos naturales, caminos, sendas, praderas y superficies arboladas o elementos del mobiliario urbano y del ajardinamiento periurbano (figuras 1.2.8 y 1.2.9).



Figura 1.2.8. Inundación de los paseos de las zonas ajardinadas periurbanas en el barrio de San Marcos por desbordamiento del río Eresma, el 26 de marzo de 2013 (fuente: Facebook MeteoSegovia. Autor: Adrián Escobar).



Figura 1.2.9. Rizaduras de corriente (ripplemarks) en las arenas y limos de una senda inundada en las inmediaciones del barrio de San Marcos.

Pero en el caso del complejo de la RCMS la inundación afectó a varios de los edificios de la parte baja, más próxima al río. Según la prensa y declaraciones de los responsables, más en concreto, afectó a: el Ingenio Grande, donde inundó el restaurado taller de la herrería y los elementos allí reconstruidos (fragua, martinete y torno); la zona de los canales, llegando a los ejes de las ruedas hidráulicas allí reconstruidas; y el interior y terraza del nuevo bar-restaurante del Ingenio Chico, donde obligó a desmontar el suelo de tarima flotante y algunos elementos de zócalos (figuras 1.2.10 y 1.2.11). Ante la persistencia de los altos niveles del río, los responsables de este último edificio colocaron sacos terreros en las puertas y ventanas de acceso a la terraza, y pusieron en funcionamiento sistemas de bombeo del agua acumulada en las distintas dependencias para su achique y posterior limpieza.

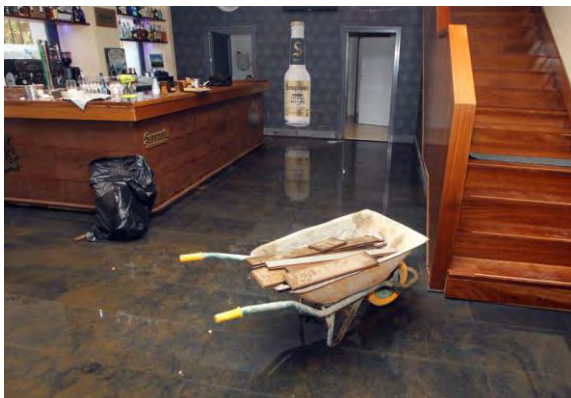


Figura 1.2.10. Efectos de la inundación en la planta baja del bar-restaurant Ingenio Chico, con la retirada de la tarima flotante de madera tras la inundación (fuente: El Norte de Castilla 27-03-2013. Autor: Antonio de Torre).



Figura 1.2.11. Vista de la terraza del bar-restaurant Ingenio Chico tras el bombeo del agua acumulada tras el muro perimetral y con los sacos terreros en puertas y ventanas para tratar de prevenir otras posibles inundaciones.

Las inundaciones del río Eresma de marzo de 2014 en la Casa de la Moneda

El invierno 2013-2014 (de diciembre de 2013 a febrero de 2014) fue el más lluvioso de los últimos 14 años y el tercero de los últimos 33 años en Segovia; se recogieron 210 L/m², sólo superado por el invierno de 1996-1997, con 248 L/m². En el mes de febrero de 2014 se registraron 21 días de lluvias, batiendo el record de febrero del 2007 que eran 20; todas las semanas de febrero, hubo al menos un día de nieve en Segovia. En total, se han registrado 58 L/m², pero una vez más no fue récord absoluto, pues data de 67,9 L/m² en febrero del 2010 (periodo 1991-2014). Fuente: Adrián Escobar, MeteoSegovia, http://www.meteosegovia.es/crbst_18.html

La semana entre el 24 y el 28 de febrero de 2014 hubo precipitaciones poco intensas prácticamente todos los días en la cuenca alta del río Eresma, por lo que, con la precipitación precedente de ese invierno y ese mes, el suelo estaba completamente saturado. La predicción meteorológica de la AEMET para el fin de semana del 1 y 2 de marzo era de precipitaciones intensas en el centro peninsular, posiblemente parte de ellas en forma de nieve en la Sierra.

Las predicciones se cumplieron y, tan solo el día 1 de marzo, las precipitaciones en Segovia capital superaron los 25 L/m² (Información Meteorológica Regional AEMET, Delegación Territorial de Castilla y León, 2 de marzo de 2014); con intensidades horarias en el pluviómetro del SAIH Duero en Valsain que superaron cuatro veces los 3 L/h y una vez los 4 L/h. Estas precipitaciones sobre suelo saturado produjeron escorrentía superficial y subsuperficial súbitas, que hicieron aumentar bruscamente el caudal del río Eresma en Valsain de 2,21 m³/s a las 9:00 h, a más de diez veces superior (23 m³/s) tan solo 12 horas, a las 21:00 h. La llegada de estos caudales, junto con los de otros tributarios como el río Cambrones y el arroyo del Rastrillo, al embalse del Pontón Alto, dado que éste se encontraba al máximo de su capacidad (no habiéndose previsto vaciado previo para disponer de margen de laminación) hizo que los caudales de vertido de la presa aguas abajo reflejaran fielmente los caudales de entrada, pasando de 5 m³/s a las 10:00 h, a más de 24 m³/s a las 21:00 h; la punta de caudal vertido por el embalse se alcanzó el 2 de marzo a las 7:00 h, con 53,62 m³/s (figuras 1.2.12 y 1.2.13).

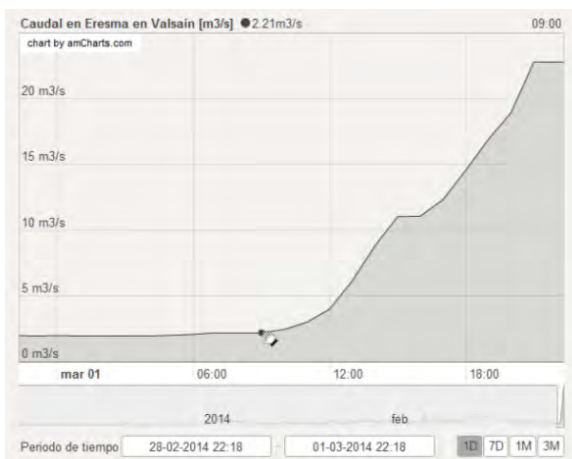


Figura 1.2.12. Hidrograma de la estación del río Eresma en Valsain del día 1 de marzo de 2014 (fuente: web SAIH Duero, CHD).



Figura 1.2.13. Hidrograma de la estación del de vertido del embalse del Pontón Alto entre los días 24 de febrero y 1 de marzo de 2014 (fuente: web SAIH Duero, CHD).

La propagación aguas abajo de esta punta de avenida súbita de vertido del embalse, junto con la de otros afluentes no regulados (Gamones, Marigalindo, Cerezo...) hizo que en la estación de aforos del Eresma en Segovia (ubicada bajo el puente de la carretera de Boceguillas; barrio de San Lorenzo), se pasara de 8,2 m³/s (9:00 h) a más de 40 m³/s (21:00 h); la punta de 59,59 m³/s se alcanzó a las 7:00 h del día 2 de marzo (figura 1.2.14). En el marco de control ubicado cerca de San Pedro Abanto (incorporando el Ciguñueña y Clamores), el caudal se multiplicó por diez en esa tarde-noche, pasando de 8 m³/s a los 79,86 m³/s de la punta de la crecida a las 8:00 h del día 2 de marzo. Fuente: Red Integrada SAIH-ROEA Confederación Hidrográfica del Duero (figura 1.2.15).



Figura 1.2.14. Hidrograma del río Eresma en el marco de control Segovia entre los días 27 de febrero y 9 de marzo de 2014 (fuente: web SAIH Duero, CHD).

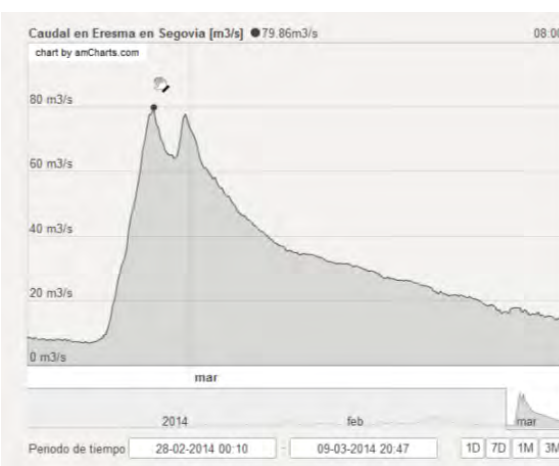


Figura 1.2.15. Hidrograma de la estación del río Eresma en Segovia entre los días 28 de febrero y 9 de marzo de 2014 (fuente: web SAIH Duero, CHD).



Ante la insuficiente capacidad del cauce ordinario para albergar estos caudales dentro de los bancos de orilla, se produjo el desbordamiento a la llanura de inundación nuevamente en varios puntos como en el barrio de San Lorenzo, que conllevó la evacuación preventiva de los bajos de las viviendas de la urbanización de Carretero a primera hora de la mañana del día 2 de marzo. En el caso del complejo de la Casa de la Moneda la inundación afectó a varios de los edificios de la parte baja, más próxima al río, concretamente: la zona de los canales, superando los ejes de las ruedas hidráulicas allí reconstruidas; y el interior y terraza del nuevo bar-restaurante del Ingenio Chico, donde volvió a dismantelar el suelo de tarima flotante y algunos elementos de la planta baja (cubreradiadores y mobiliario de la cafetería; figuras 1.2.16 y 1.2.17). Otras dependencias del Ingenio Grande (herrería, sala de exposiciones temporales...) y patio bajo quedaron esta vez libres de la inundación gracias al acristalamiento blindado colocado en las ventanas y al aceptable funcionamiento de los sistemas de aislamiento y achique.



Figura 1.2.16. Vista de la terraza del bar-restaurante Ingenio Chico en el momento de circulación de la punta máxima de caudal de la avenida, el 2 de marzo de 2014 a las 8:00 h. Obsérvese el efecto de represamiento y elevación de nivel que produce el muro perimetral de la terraza.

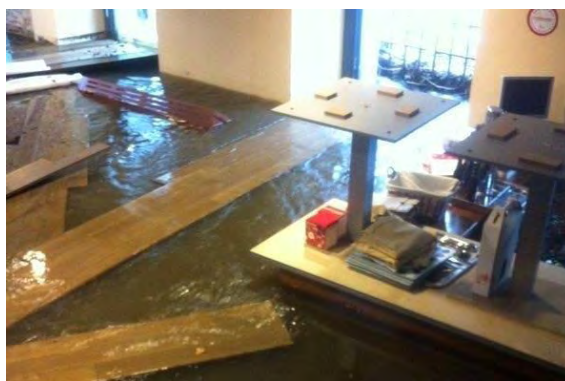


Figura 1.2.17. Efectos de la inundación en la planta baja del bar-restaurante Ingenio Chico, con tarima flotante de madera levantada y los elementos del mobiliario sumergidos (fuente: Segovia al Día. www.segoviaaldia.es Autor: Javier López Alarma).

Nuevamente estas inundaciones, al igual que las ocurridas en 2009 y 2013, han sido objeto de polémica en el ámbito político y mediático por afectar a las instalaciones de un complejo recientemente restaurado y habilitado para cafetería y amenazar las instalaciones que albergarán el futuro museo, en el que se han invertido importantes cantidades de dinero de administraciones públicas.

1.2.2. Análisis hidrológico de los caudales de avenida

La estación de aforos principal, por su localización aguas abajo de la Casa de la Moneda, es la estación Eresma en Segovia (nº 2050), gestionada por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). Además para el estudio de eventos recientes, se analiza la información de: Eresma a la Salida del Embalse del Pontón Alto (nº 2526) y Eresma en Valsaín (nº 2525); ambas pertenecientes a la red del Sistema Automático de Información Hidrográfica (SAIH) de la CHD.



A partir de la página web de la Confederación Hidrográfica del Duero se obtiene la información de los datos de caudales máximos registrados en la estación de aforo de Segovia (nº 2050) desde el año hidrológico 1912-13, hasta el año 2006-07; y se completa esta información del anuario de aforos editado por la DGA hasta el año 2010.

Se tiene por tanto un total de 88 años hidrológicos con datos, de los cuales, 26 años tienen datos incompletos y 62 años hidrológicos con toda la información.

En el transcurso de la serie hidrológica (1915-16/2010-11) cambian las condiciones de localización de la estación de aforos y se construye, en el año hidrológico 1995-96, el embalse del Pontón Alto. Por ello se plantean diferentes escenarios: estudio de la serie completa, y otra serie utilizando únicamente los datos antes de la construcción del embalse, para una posterior comparación, con el objetivo de observar si influye la construcción de la infraestructura en la serie de caudales.

Análisis estadístico de caudales

Para el análisis de los caudales máximos se estudiarán un total de 12 series de datos distintos.

En primer lugar se han considerado cuatro periodos temporales diferentes:

1. Periodo completo (1915-16/2010-11); desde el inicio de la toma de datos hasta el cambio de localización de la estación de aforos, cuyo objetivo es determinar si existe una diferencia significativa con la variación de las condiciones de la estación de aforo al aumentar la cuenca y variar el instrumental y la curva de gastos.
2. Un periodo que comprende desde el inicio de los datos medidos hasta la construcción, aguas arriba del río, del embalse del Pontón Alto, en 1995-96, por si la infraestructura tiene consecuencias en la laminación de crecidas y efectos en las avenidas e inundaciones del río Eresma en Segovia.
3. Periodo desde el comienzo de los datos hasta el cambio de localización de la estación de aforos, en el año 2008-09.
4. Además se ha hecho una serie añadiendo dos valores que corresponden con los caudales máximos de los años 2013 y 2014 (que no se encuentran en las bases de datos de donde se han obtenido el resto de registros de caudales, pero sí fueron mostrados en el SAIH Duero), con el fin de ver si son eventos excepcionales o se encuentran dentro de las probabilidades ya estimadas con el análisis de las otras series.

Estos periodos temporales se cruzan con las dos variables diferentes que se recogen en las estadísticas: Q_c , serie anual de caudales máximos medios diarios; Q_{ci} , serie anual de caudales máximos instantáneos.

Y se ha generado una tercera variable sintética completando los años sin datos Q_{ci} a partir del valor Q_c y usando la relación media Q_{ci}/Q_c de los años con ambos datos coincidentes en el mismo tiempo (misma fecha).



El resultado de este cruce son las siguientes doce series (figura 1.2.18):

- **Serie 1:** Periodo completo (1915-16/2010-11) de los caudales medios (Q_c)
- **Serie 2:** Periodo entre el inicio de los datos y el cambio de localización de la estación de aforo (2009), utilizando los datos de los caudales medios (Q_c)
- **Serie 3:** Periodo desde el comienzo de los datos hasta el año de construcción del embalse de Pontón Alto (1995), con los datos de caudales medios (Q_c)
- **Serie 4:** Periodo completo analizando los caudales máximos (Q_{ci})
- **Serie 5:** Periodo hasta el cambio de localización de la estación de aforo analizando los caudales máximos (Q_{ci})
- **Serie 6:** Periodo hasta la construcción del embalse estudiando los caudales máximos de esta serie (Q_{ci})
- **Serie 7:** Periodo completo, estudiando los caudales máximos, completando los valores de los que no se disponían datos, deduciéndolos de los caudales medios (Q_{ci} completado)
- **Serie 8:** Periodo hasta el cambio de localización de la estación de aforo analizando los caudales máximos, completando los valores de los que no se disponían datos, deduciéndolos de los caudales medios (Q_{ci} completado)
- **Serie 9:** Periodo hasta la construcción del embalse de Pontón Alto estudiando los caudales máximos, completando los valores de los que no se disponían datos, deduciéndolos de los caudales medios (Q_{ci} completado)
- **Serie 10:** Periodo completo analizando los caudales medios que coinciden con los caudales máximos
- **Serie 11:** Periodo completo estudiando los valores coincidentes medios y máximos además de añadir los valores completados de Q_{ci}
- **Serie 12:** Periodo completo añadiendo los valores máximos de los años 2013 y 2014

		PERIODO TEMPORAL					
	Inicio datos aforo	Construcción embalse	Cambio localización estación de aforos				
	Años	1915-16	1995-96	2008-09	Actualidad		
Qc		Serie 1					Serie 1
		Serie 2					Serie 2
		Serie 3					Serie 3
Qci	Qci Registrados	Serie 4					Serie 4
		Serie 5					Serie 5
		Serie 6					Serie 6
	Qci completados	Serie 7					Serie 7
		Serie 8					Serie 8
		Serie 9					Serie 9
Qci coincidentes	Serie 10					Serie 10	
Qci coincidentes y completado	Serie 11					Serie 11	
Completado datos 20013 y 2014	Serie 12					Serie 12	

Figura 1.2.18. Series de datos utilizadas en el análisis estadístico, con la variable que contiene (Q_c o Q_{ci}) y el periodo temporal que abarca.

Ajustes de funciones de distribución de frecuencias

La aplicación CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas), es un programa desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), para proporcionar una herramienta útil para el desarrollo de trabajos hidrológicos y el análisis estadístico de una



determinada variable. En el caso del análisis de avenidas, es común analizar el periodo de retorno (T) dependiendo de un determinado caudal (Q) en lo que se conoce como cuantiles.

El método utilizado por CHAC es la frecuencia muestral de Gringorten (Ferrer, 1992):

$$F(x) = \frac{i-0.44}{N+0.12}$$

Las diferentes funciones de distribución para modelar las series de máximos anuales que emplea CHAC son las siguientes (Ferrer, 1992):

Normal: $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$

Gumbel: $f(x) = e^{-\left\{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right\}}$

SQRT: $f(x) = e^{-\left\{-k[(+\sqrt{a*x}) * e^{-\sqrt{a*x}}]\right\}}$

GEV: $f(x) = e^{-\left\{-\left[1-k\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\right\}}$

LP III: $f(x) = \frac{\left(\frac{\log x-u}{\alpha}\right)^{k-1}}{X^{\alpha\tau(k)}} e^{-\left\{\frac{\log x-u}{\alpha}\right\}}$

Cada función de distribución tiene unos métodos de estimación de parámetros asociados (tabla 1.2.1).

Tabla 1.2.1. Clasificación de las funciones de distribución de frecuencias y métodos de estimación de parámetros que emplea CHAC.

Funciones de distribución de frecuencias	Métodos de estimación de parámetros
No paramétrica Normal	
No paramétrica Gumbel	
Normal	Momentos
Gumbel	Momentos Máxima Verosimilitud Momentos Ponderados
SQRT	Máxima Verosimilitud
GEV	Momentos Máxima Verosimilitud Momentos Ponderados
LP III	Individuo con sesgo muestral



CHAC permite obtener una representación gráfica de los valores de probabilidad asignados a cada función y método paramétrico para cada serie, de forma que en el eje de abscisas se representa la probabilidad de un valor de no ser superado o igualado y los periodos de retorno; y el eje de ordenadas muestra los caudales en metros cúbicos por segundo para esos valores. Estas funciones de probabilidad corresponden con patrones exponenciales y se presentan en “papel de Gumbel” con escala semilogarítmica, para una mejor representación de los valores que se ajustan a una recta de regresión.

Test de bondad de ajustes

Mediante estimación visual de las salidas gráficas de las diferentes funciones y métodos, y la estimación de mínimos cuadrados, se selecciona la función que mejor ajuste estadístico tiene entre los datos observados y modelados.

El estudio de mínimos cuadrados consiste en calcular la diferencia entre el ajuste que realiza CHAC y los valores que se obtienen algebraicamente de la ecuación de cada función utilizada. La diferencia entre la probabilidad de CHAC menos la probabilidad de las funciones, se eleva al cuadrado, con el objetivo de tener el mejor ajuste.

Para calcular la probabilidad de las funciones se introducen los datos de los parámetros de cada función que calcula CHAC. Estos datos se introducen en una hoja de cálculo de MS Excel para calcular todas las funciones por el método de mínimos cuadrados a través de la siguiente fórmula (tabla 1.2.2):

$$x = (P \text{ CHAC} - P \text{ Función})^2$$

Tabla 1.2.2. Valores de los ajustes de mínimos cuadrados, señalado en tono azul el mejor ajuste (GEV Máxima Verosimilitud) y en tono anaranjado el peor ajuste (LP III).

RESULTADOS AJUSTE BONDAD		Q _c	Q _{ci}
GUMBEL	Momentos	10,6870386	5,684339817
	Máxima Verosimilitud	9,6437443	3,932487022
	Momentos Ponderados	10,0947147	4,28800084
SQRT	Max. Veros	2,44026586	0,260394408
GEV	Momentos	2,11437505	0,18913085
	Máxima Verosimilitud	2,66470051	0,07607882
	Momentos Ponderados	2,88783875	0,09112143
LP III	Sesgo Indiv.	26,1322094	14,2869095



Cuantiles de caudales para distintos tiempos de retorno

Tras realizar el ajuste de mínimos cuadrados de todas las series se comprueba que la combinación GEV Máxima Verosimilitud es el mejor ajuste; y por ello los valores obtenidos de las 12 series de estudio para los diferentes periodos de retorno serán los utilizados como datos de entrada para el modelo HEC-RAS. El mejor ajuste visual de las gráficas de las rectas de regresión es GEV Momentos Ponderados (figura 1.2.19) y GEV Máxima Verosimilitud.

Proyecto: Estudio río Eresma
Estación: 2050
Ley: GEV
Método: Momentos ponderados (PWM)

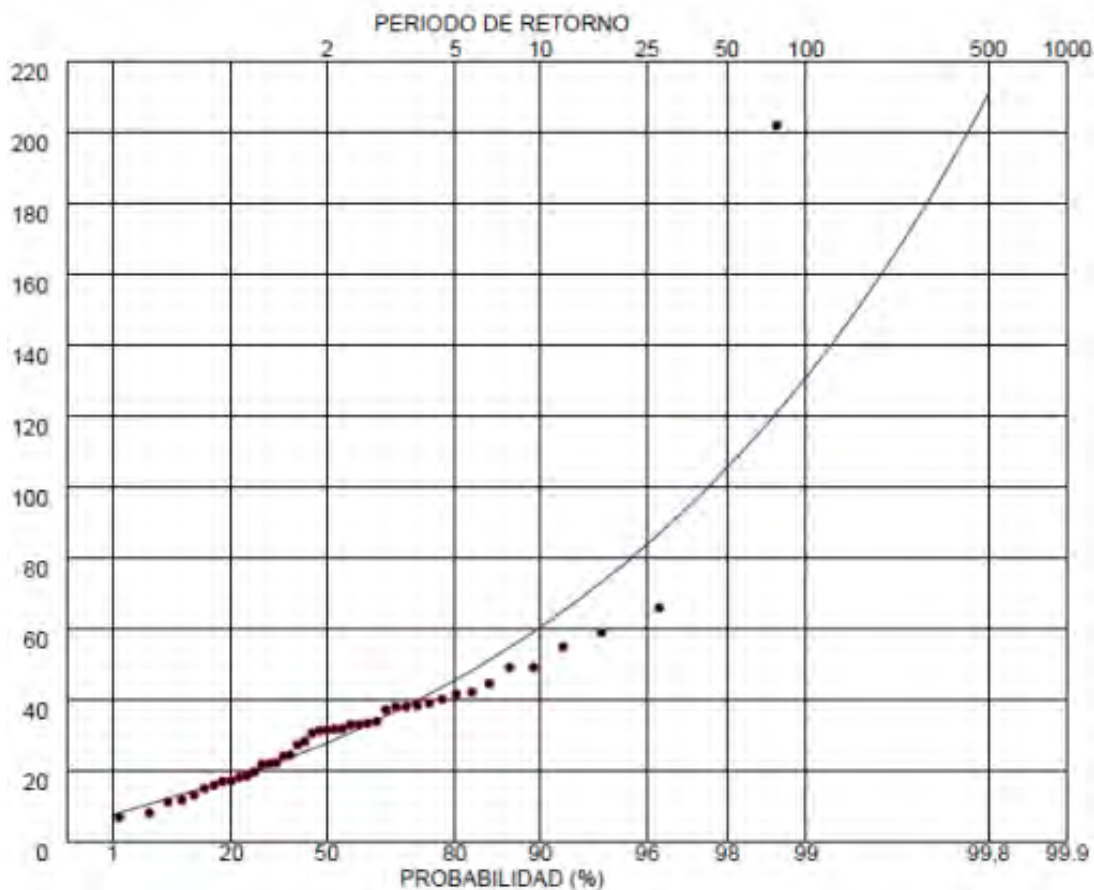


Figura 1.2.19. Ejemplo de ajuste visual de la función de distribución de GEV Momentos Ponderados, donde se observa que el ajuste en los datos inferiores es bueno, quedando el valor extremo más alejado de la función de regresión.



Por ser más objetivo el método de mínimos cuadrados se elige la combinación GEV, Máxima verosimilitud para utilizar los datos estadísticos de los caudales de los distintos periodos de retorno (tabla 1.2.3), para introducirlos en el modelo HEC-RAS.

Tabla 1.2.3. Valores de cuantiles para los distintos periodos de retorno de las 12 series estudiadas ajustadas mediante la distribución GEV Máxima Verosimilitud.

	Serie	T = 2	T = 5	T = 10	T = 25	T = 50	T = 100	T = 500	
Q _c	1	23	39	53	75	97	123	207	Completa
Q _c	2	23	39	53	76	97	123	208	Estación Aforo
Q _c	3	25	41	57	85	113	150	285	Embalse
Q _{ci}	4	28	45	59	80	98	119	180	Completa
Q _{ci}	5	29	47	61	82	100	121	181	Estación Aforo
Q _{ci}	6	31	47	61	85	108	136	230	Embalse
Q _{ci} completado	7	32	54	73	105	135	172	292	Completa
Q _{ci} completado	8	33	55	75	107	137	173	293	Estación Aforo
Q _{ci} completado	9	34	56	78	119	162	220	449	Embalse
Q _c = Q _{ci}	10	31	51	66	89	108	131	196	
Q _c = Q _{ci} completado	11	36	61	84	120	155	198	341	
2013-2014	12	29	48	63	86	106	130	200	Eventos recientes

Con el fin de comparar las series completas, junto con el cambio de la estación de aforos, y la construcción del embalse, se han empleado las series 7, 9 y los caudales punta del año 2013 y 2014 en el modelo hidráulico (tabla 1.2.4).

Tabla 1.2.4. Caudales de los cuantiles de las dos series a modelizar y del caudal punta de los eventos recientes introducidos en el modelo.

	T = 10	T = 50	T = 100	T = 500
Serie 7	73 m ³ /s	135 m ³ /s	172 m ³ /s	292 m ³ /s
Serie 9	78 m ³ /s	162 m ³ /s	220 m ³ /s	449 m ³ /s
Q punta 2013	63 m ³ /s			
Q punta 2014	79,86 m ³ /s			

* Serie 7 = Q_{ci} completados de la serie completa

* Serie 9 = Q_{ci} completados antes de la construcción del embalse

El resto de los resultados de las demás series analizadas en CHAC, pero que no se utilizan para el modelo hidráulico, se encuentran en el Apéndice III: Comparación de las series mediante CHAC.



Análisis hidrológico de los eventos más recientes

Se estudian una serie de eventos recientes (ocurridos en el último año hidrológico), de los que se dispone de hidrogramas.

El Sistema Automático del Información Hidrológica (SAIH) es un sistema de información de la Confederación Hidrográfica del Duero, encargado de recoger, transmitir, procesar y validar datos del estado hidrológico e hidráulico de la cuenca.

Durante el transcurso de la elaboración de este informe tuvo lugar un evento de crecida del río Eresma, utilizado tanto para la calibración del modelo como para determinar la relación temporal de las puntas entre las diferentes estaciones de aforo a lo largo del río Eresma (tiempos de viaje): Valsaín, la salida del Embalse del Pontón Alto, y la llegada de la crecida a la estación de aforos donde se realizó el estudio estadístico.

A partir de la correlación y comparación de los hidrogramas en las diferentes estaciones de aforo, junto con los hietogramas de lluvia, se calcularon los diferentes tiempos característicos (tiempo de viaje, tiempo de punta).

Evento del 13 al 14 de febrero de 2016

Tras un periodo invernal caracterizado por escasas precipitaciones, el día 13 de febrero el caudal se incrementó de los 6,9 m³/s que traía a las 11:00 h del mediodía del día 12 de febrero, hasta alcanzar los 32,51 m³/s a la 1:00 h del día 14 de febrero. Por tanto en 38 horas el caudal y consecuentemente el nivel de la lámina de agua aumentaron significativamente (figura 1.2.20).

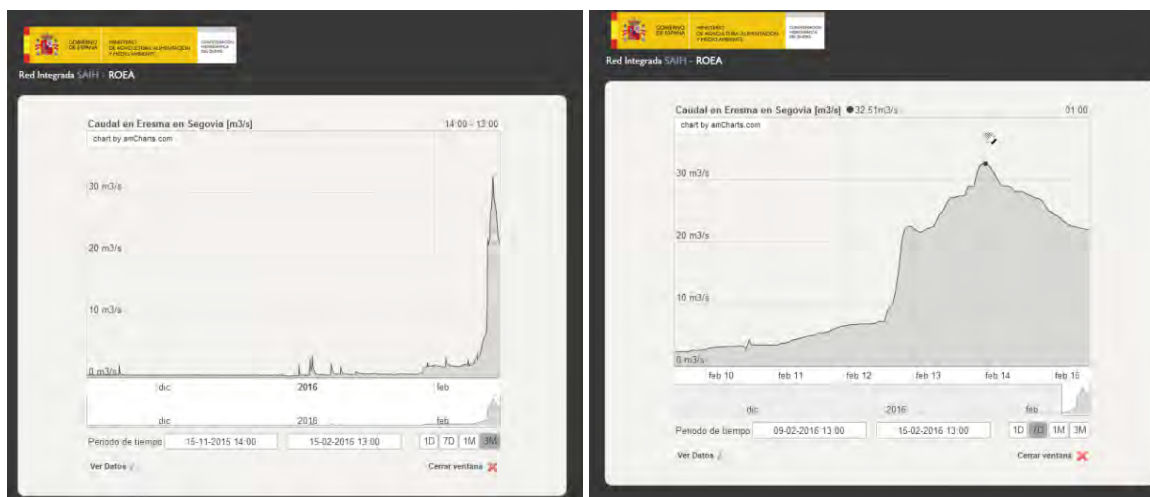


Figura 1.2.20. Hidrogramas de la estación del río Eresma en Segovia correspondientes a los periodos entre 15 de noviembre de 2015 y 15 de febrero de 2016 (izquierda) y del día 9 al 15 de febrero de 2016 (derecha). Fuente: web SAIHDuero (CHD).

Mientras que a la salida del embalse del Pontón Alto, se alcanza su pico más alto, llegando a los 27,79 m³/s a las 23:00 h, es decir, 2 horas antes de que llegue a la Casa de la Moneda (figura 1.2.21 izquierda).

Por otra parte, antes de la entrada en el embalse, se encuentra la estación de aforos de Valsaín, que recoge un máximo de 22,40 m³/s a las 21:00 h, 2 horas antes de desembalsar el máximo de caudal por el embalse (figura 1.2.21 derecha).

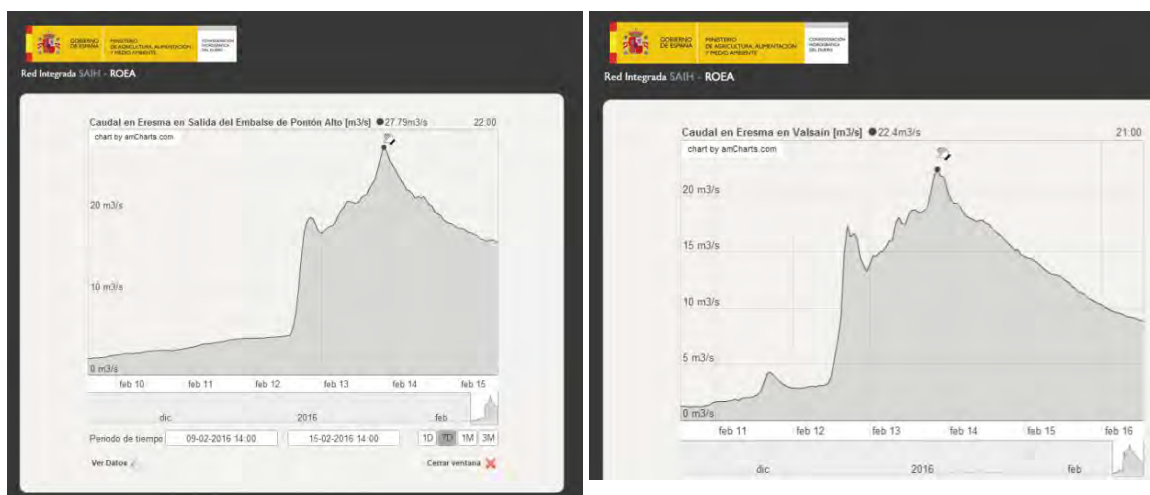


Figura 1.2.21. A la izquierda se muestra el caudal máximo a la salida del embalse del Pontón Alto; y a la derecha, solamente dos horas antes, el pico máximo de entrada en el embalse en la estación de aforos de Valsaín. (fuente: Red Integrada SAIH-ROEA, MAGRAMA).

1.2.3. Modelación hidráulica de los caudales de avenida

Geometría: levantamiento topográfico

Para la base del modelo hidráulico, es necesaria una topografía de detalle; el levantamiento topográfico se realizó completó mediante dos campañas de campo.

El instrumental utilizado la primera campaña fue un Altus APS-3 GPS vía satélite inalámbrico, para la toma de puntos significativos (figura 1.2.22). El segundo día de toma de datos se realizó con Estación Total Leica TC-605 L para acabar de completar la información necesaria para el levantamiento topográfico que no podía tomarse directamente con el GPS satelital (figura 1.2.23).



Figura 1.2.22. GPS Altus APS-3, encendidos los pilotos de conexión con un mínimo de 5 satélites.



Figura 1.2.23. Estación Total Leica TC-605L, sobre trípode.



El sistema cartográfico de referencia, en este caso es ETRS-89; y el sistema de proyección, Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) como sistema de representación cartográfica.

Para la toma de datos correspondiente al levantamiento topográfico de detalle se utilizaron los Sistemas de Navegación Global por Satélites (GNSS), mediante conexión GSM e IP a la red ITACYL con la Estación de Referencia Permanente. Los datos eran considerados aceptables cuando el mínimo de satélites eran 5 y la calidad mínima de observación era de 5 cm.

Los criterios para la ubicación de los nuevos puntos recogidos fueron: estabilidad dimensional, facilidad de acceso, permanencia de las señales y visibilidad entre vértices.

Una vez realizado el trabajo de levantamiento taquimétrico, se procedió al cálculo de los puntos levantados sobre el sistema de referencia anteriormente citado para el dibujo del contorno y curvatura del área de estudio (figura 1.2.24).



Figura 1.2.24. Curvado: la base del modelo es la topografía generada.



Condiciones de contorno: *n* de Manning

Uno de los parámetros necesarios para la modelización hidráulica es asignar un coeficiente de rugosidad (*n* de Manning) a las secciones del modelo. Para la asignación de valores se utilizó la guía visual (Arcement y Schneider, 1989) comparándolo con las campañas de campo (tabla 1.2.5).

Tabla 1.2.5. Valores de *n* de Manning utilizados para asignar la rugosidad a las diferentes secciones en la fase de modelado.

Material	Rugosidad
cemento pulido	0.012
balosas hormigón	0.014
cemento no pulido	0.014
lecho azud	0.015
camino	0.022
césped	0.03
cultivos	0.032
lecho de canal de gravas	0.035
herbáceas	0.035
cauce	0.04
roca	0.04
pinar	0.05
dispersa	0.06
saucedas	0.07
laderas	0.1
choperas	0.15
edificios	1

Modelación hidráulica: HEC-RAS

De los diferentes programas utilizados para la modelización hidráulica, se emplea HEC-RAS (HEC, USACE), aplicación con flujo unifásico (agua), unidireccional de régimen no permanente y gradualmente variado (Brunner, 2010).

Se ha utilizado de forma conjunta los programas *Arc View GIS* (ESRI) y *HEC-RAS* (USACE), mediante el módulo de extensión *HEC-GeoRAS* (USACE). De esta forma se integran los datos geométricos del cauce, procedentes del SIG, en la modelización hidráulica, así como la posterior representación en *ArcMap* de las áreas inundables mediante la interpolación de los datos de elevación de la lámina de agua de la salida del modelo hidráulico (figura 1.2.25).

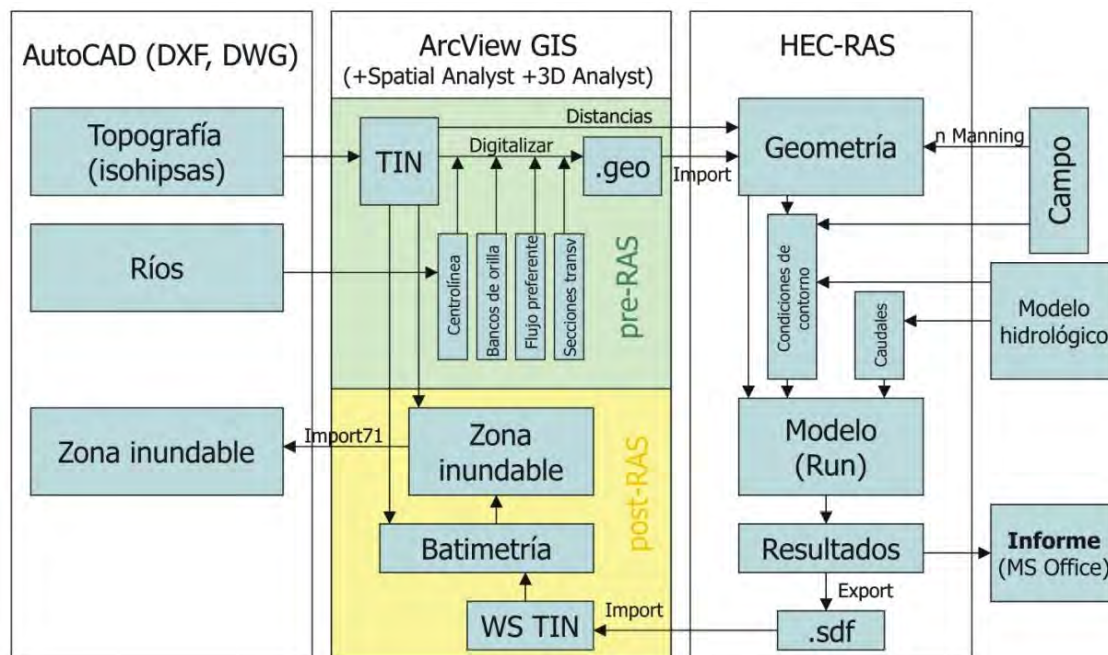


Figura 1.2.25. Esquema del procedimiento utilizado en la modelización hidráulica, que integra un PreRAS, el modelizado HEC-RAS y la fase Post-RAS (fuente: Díez Herrero et al., 2009b).

El procedimiento se realiza en tres fases: pre-RAS, HEC-RAS y post-RAS.

En el proceso pre-RAS se parte de una topografía (mapa de curvado o isohipsas) del área de estudio, a partir de la cual se elabora una red de tipo TIN en *ArcView*. Sobre esa malla se delimita el trazado del canal, los bancos de orilla, flujo preferente y se trazan las diferentes secciones transversales para la modelización hidráulica. Una vez digitalizados estos parámetros se finaliza guardando la extensión .geo que se importará a continuación en la fase HEC-RAS.

Una vez en HEC-RAS se recupera la geometría anteriormente realizada y se completa con la información de entrada de caudal, índices de rugosidad y distancias entre los bancos de orilla al canal (tabla 1.2.6). A continuación se corre el programa y los resultados se visualizan en la tercera fase: el post-RAS (San José y Mauro Gutiérrez, 2011).



Tabla 1.2.6. Datos de rugosidad y distancia introducidos en la modelización HEC-RAS.

Sección			n Manning			Distancias (m)		
Nº	Nombre	(m)	LOB	channel	ROB	LOB	channel	ROB
1	Inicio azud	438	1	0.015	0.03	20	17	6.3
2	Bajada azud	421	1	0.015	0.03	2.5	20	50.5
3	Antes Puente Moneda	401	1	0.035	0.035	3.6	3	3.8
4	Comienzo Puente Moneda	398	0.03	0.035	0.03	10.25	3	3
5	Centro Puente Moneda	395	1	0.015	1	5.2	2	2.5
6	Fin Puente Moneda	393	1	0.035	0.04	11.8	4	6.2
7	Salida Puente Moneda	389	1	0.035	0.05	18	6	5.6
8	Terraza 1	383	1	0.035	0.04	14	14	14.9
9	Terraza 2	369	1	0.035	0.04	7.2	6	7.7
10	Terraza 3	363	1	0.035	0.04	6.8	41	52.8
11	Fin Terraza	322	1	0.035	0.04	17.5	22	26
12	Fin Casa Moneda	300	1	0.035	0.04	37.8	32	28.9
13	Salida de Canales	268	1	0.035	0.03	18.5	18	17
14	Jardín	250	0.04	0.035	0.04	31.4	27	15.4
15	Pradera 1	223	1	0.035	0.04	30	26	24.6
16	Pradera 2	197	0.04	0.035	0.025	46.9	43	38
17	Pradera 3	154	0.05	0.035	0.025	42.5	43	43.7
18	Pradera 4	111	0.05	0.035	0.025	8.8	12	15.3
19	Prepuente San Marcos	99	0.05	0.035	0.025	6	7	7.3
20	Inicio Puente San Marcos	92	1	0.035	1	4.3	4	4.9
21	Centro Puente San Marcos	88	1	0.035	1	5.4	4	3.2
22	Fin Puente Marcos	84	1	0.035	1	11.3	8	9.6
23	Salida Puente Marcos	76	0.038	0.035	0.025	28	30	27.7
24	Marcos-Azud final	46	0.038	0.035	0.022	37	39.409	43.5
25	Azud final	6.591	0.05	0.015	0.03	6.5	6.591	6.5

Para finalizar el post-RAS se importa el documento .sdf para generar un nuevo TIN, y representar una batimetría y las zonas inundables para los distintos periodos de retorno modelizados en el proceso anterior.

De todo ello se obtienen las salidas gráficas en *ArcMap* para la comparativa posterior de resultados (figuras 1.2.26 a 1.2.33).

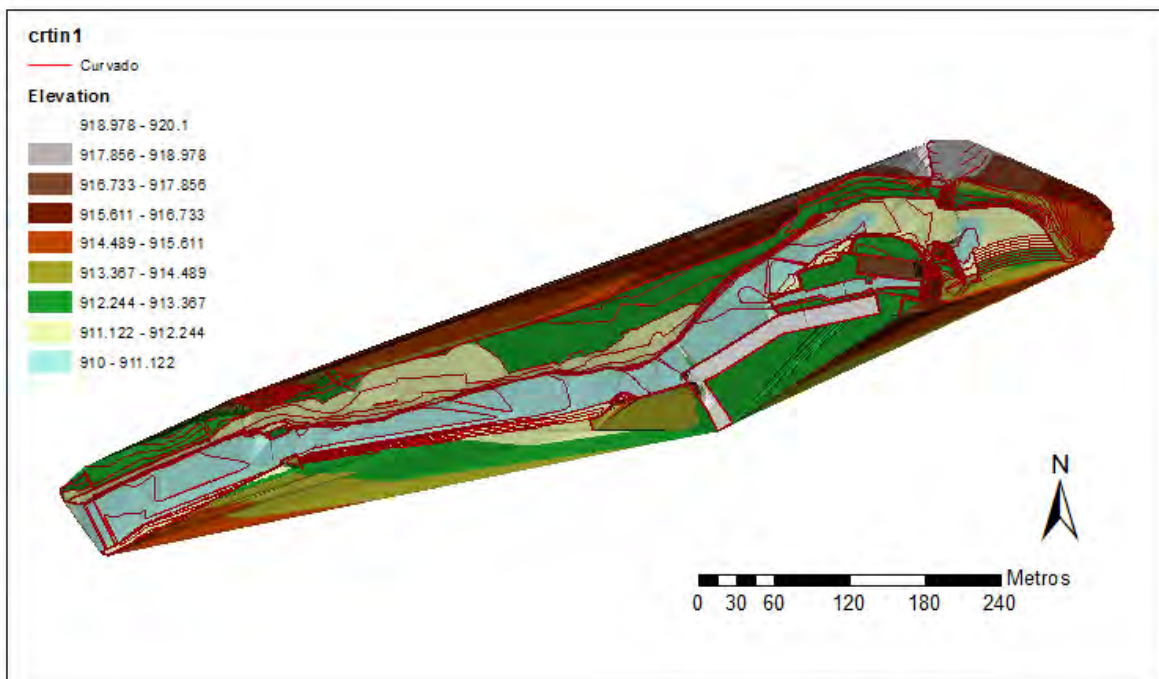
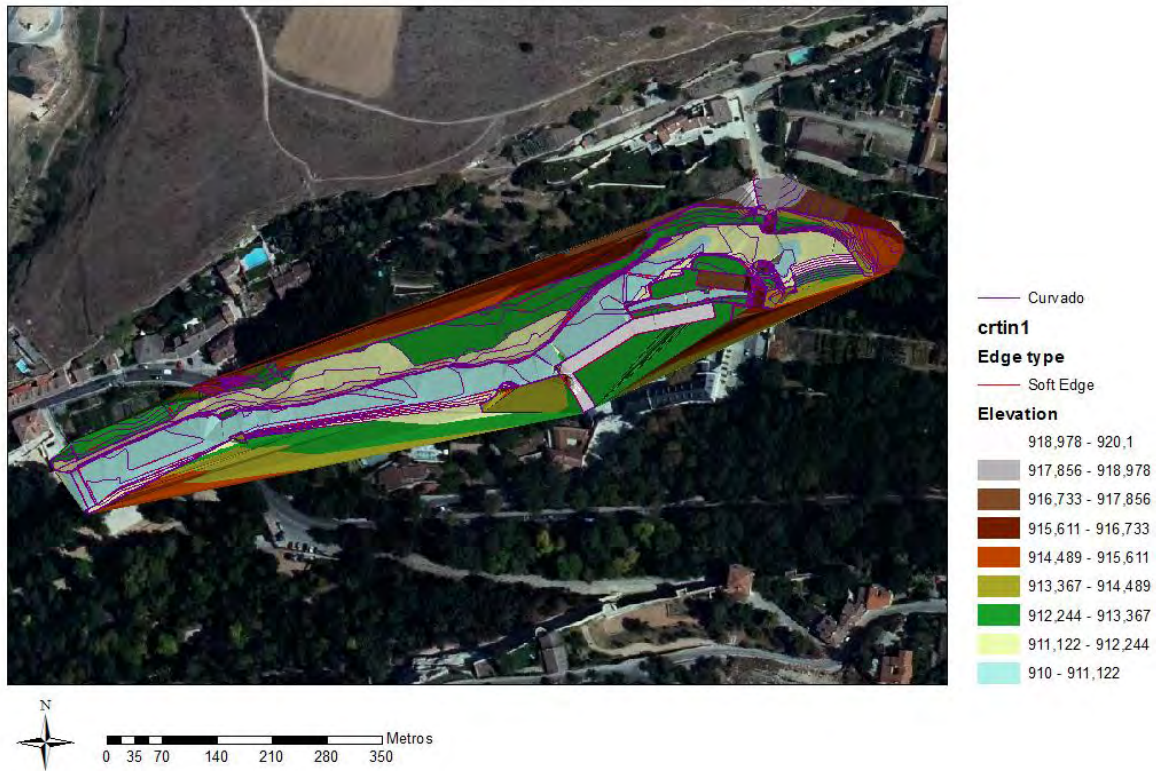


Figura 1.2.26. Modelo digital de elevaciones en modalidad vectorial de red de triángulos irregulares (TIN). Arriba sobre la ortofoto y abajo, en mayor detalle, se observa que la cota más baja en torno a los 910 msnm corresponde con el canal, mientras que las cotas más elevadas, alcanzan los 920 m s.n.m. en las laderas del modelo.

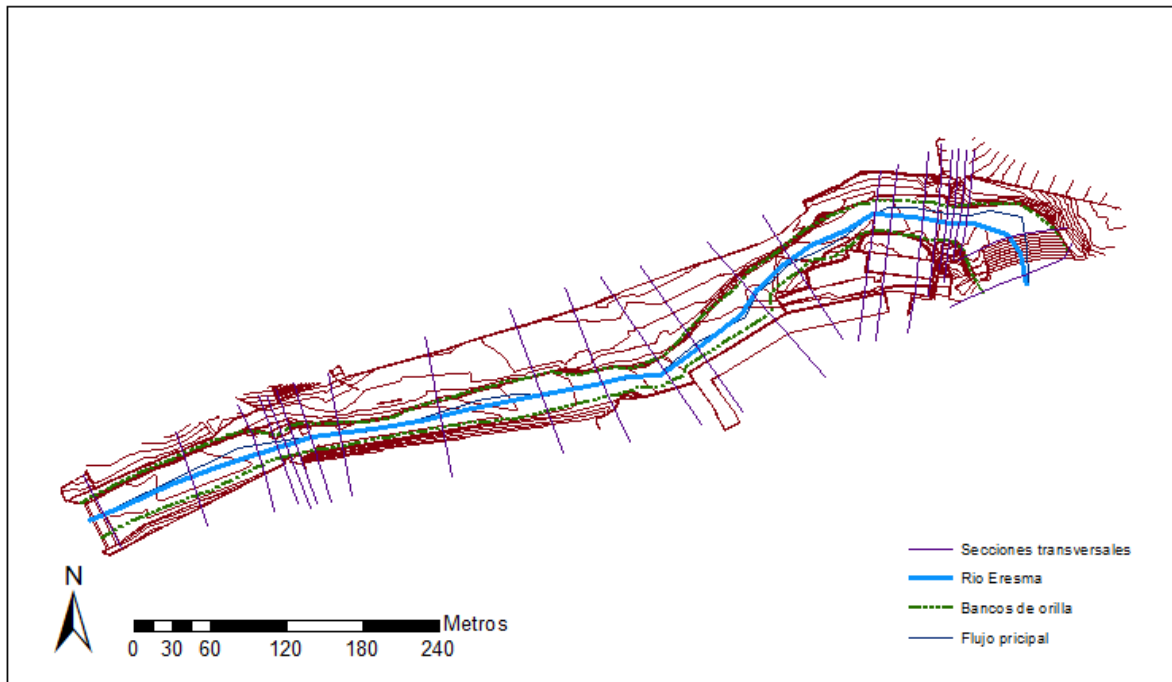


Figura 1.2.27. Representación de las 25 secciones transversales trazadas, el río Eresma y el flujo principal del río, así con los bancos de orilla en cada sección.

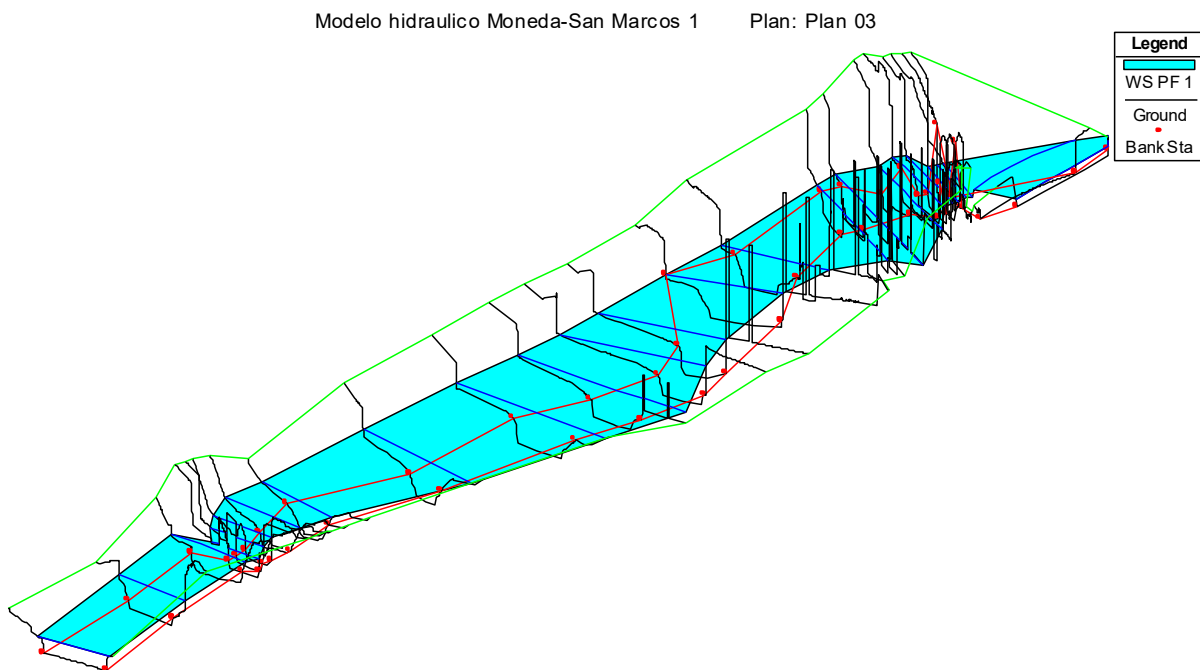


Figura 1.2.28. Bloque diagrama 3D de resultados del modelo hidráulico con un caudal de $73 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años.

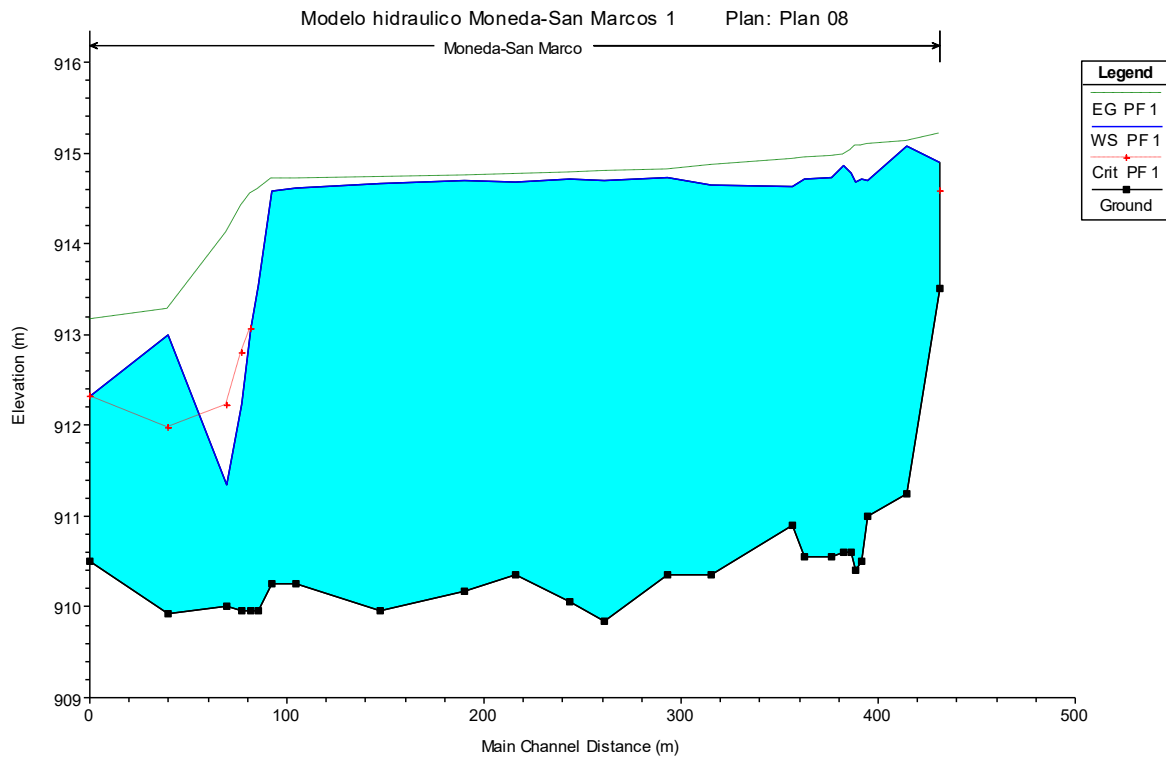


Figura 1.2.29. Perfil alcanzado por un caudal de $162 \text{ m}^3/\text{s}$. Se aprecia una elevación superior a 4 metros por encima del lecho, hasta llegar al Puente de San Marcos, donde hay un brusco descenso una vez atravesado.

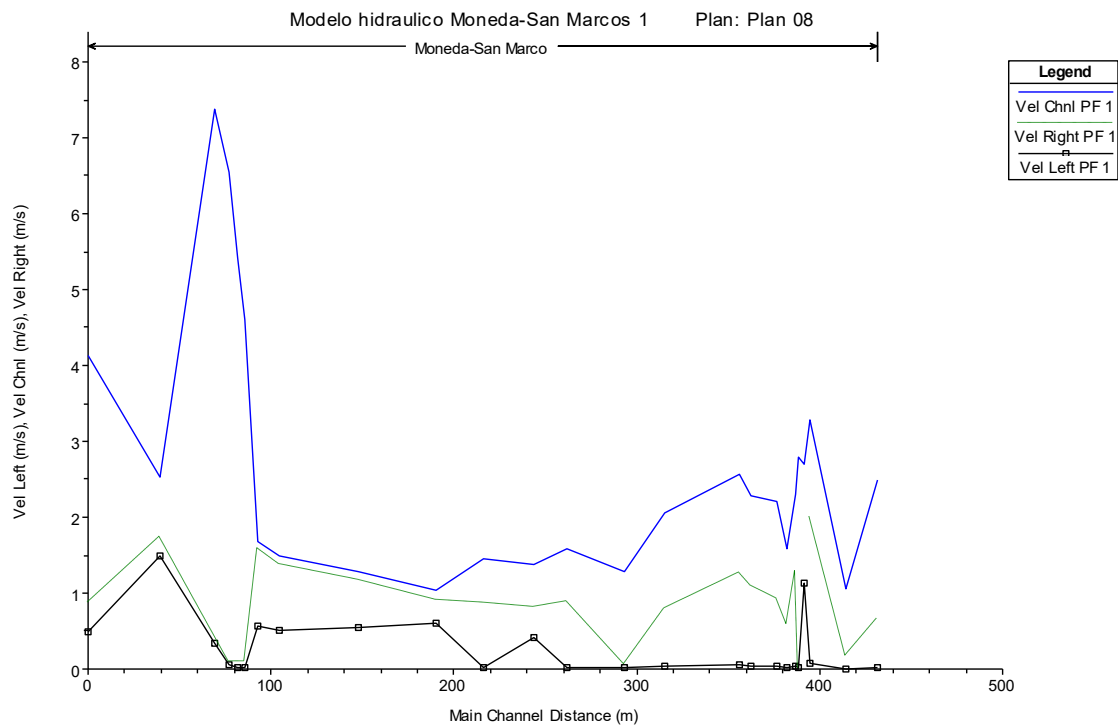


Figura 1.2.30. Perfiles de velocidades en el canal para un caudal de $162 \text{ m}^3/\text{s}$. Se aprecia el pico máximo de velocidad que coincide con la salida del Puente de San Marcos, que corresponde con la recuperación de la lámina de agua una vez pasado el estrechamiento. La velocidad supera 1 m/s en todo el trazado, excepto en la margen izquierda debido al edificio del Ingenio.

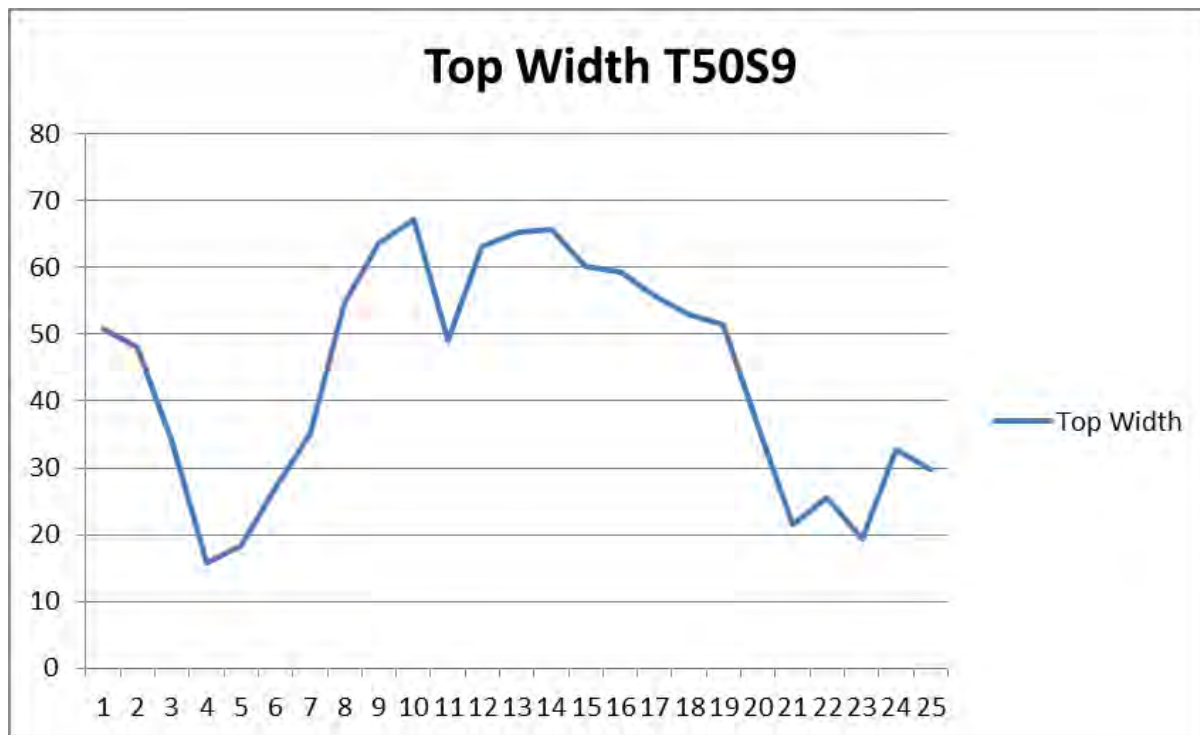


Figura 1.2.31. Relación de la anchura de la lámina de agua, para un caudal de $162 \text{ m}^3/\text{s}$ y un periodo de retorno de 50 años (en condiciones sin construcción del embalse). En este caso la anchura máxima una vez pasado el ingenio superaría los 65 m de ancho, y se producirían dos estrechamientos en los puentes, ya que la anchura máxima de éstos es de 15 m el de antes de la Casa de la Moneda y 19 m el de San Marcos.

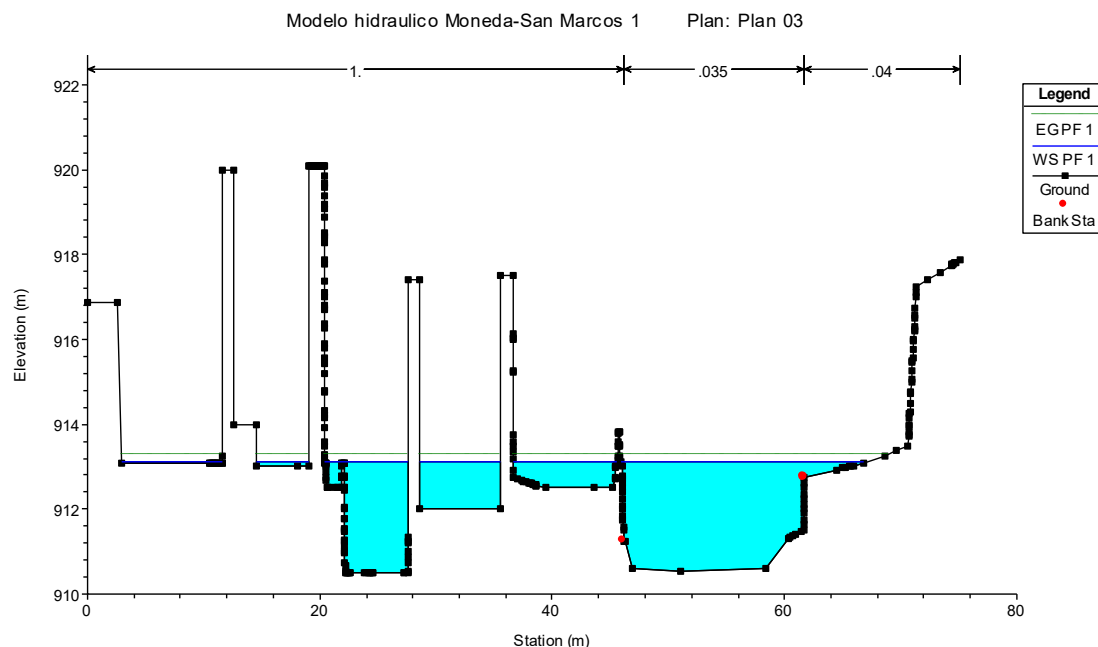


Figura 1.2.32. Niveles de agua que alcanza el calado para un periodo de retorno de 10 años para la serie S7 (serie completa) con un caudal de $73 \text{ m}^3/\text{s}$. Como se aprecia en la imagen, este caudal produce una inundación de la terraza de la cafetería del Ingenio Chico de 61 cm, en el interior de la cafetería de 1,11 m, el canal de Herrera alcanza una altura de 2,61 m y el de Sabatini de 0,61 m, incluso en la sala de la Herrería (sala Jorge Soler) con un pequeño calado de 11 cm.

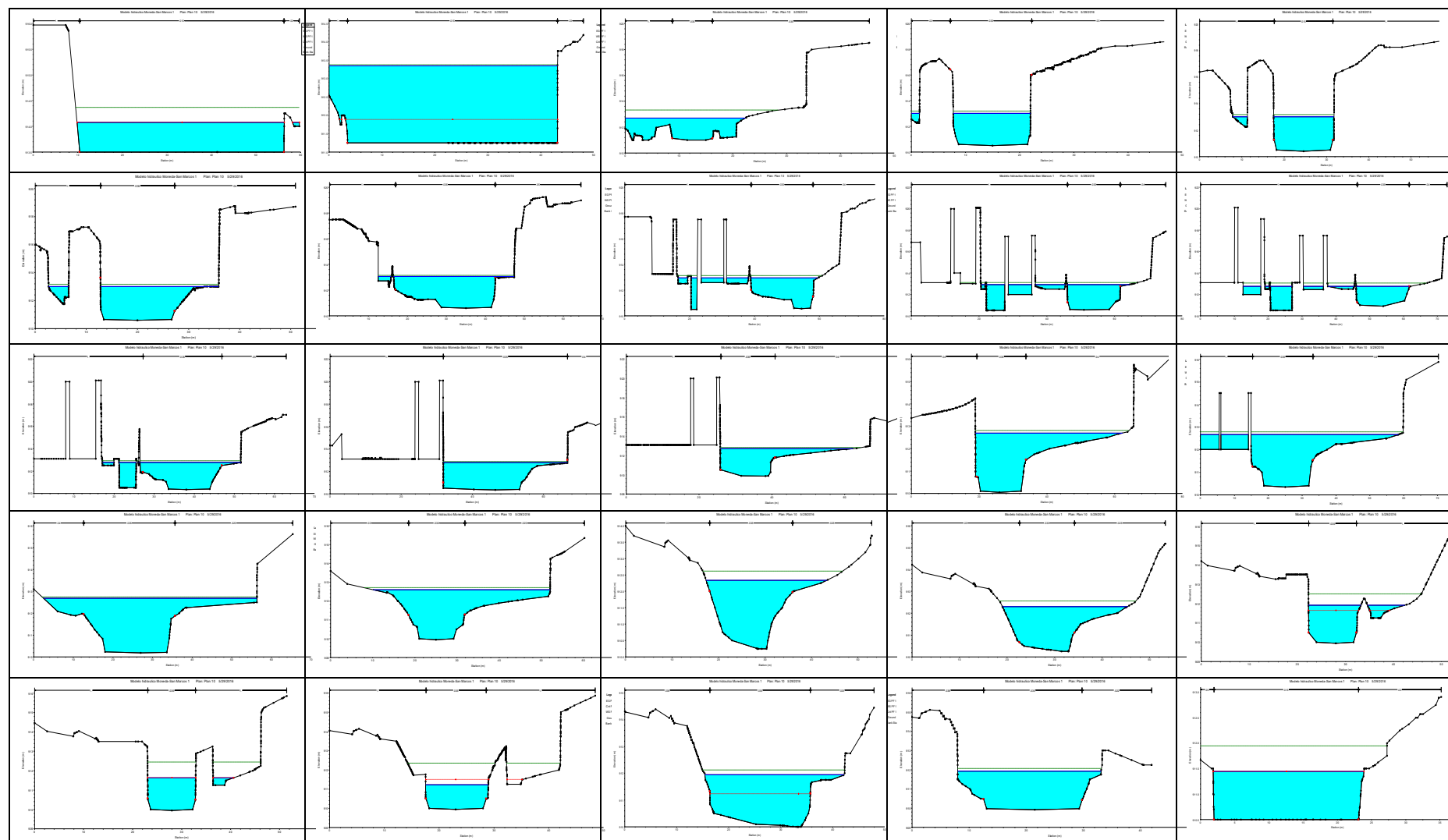


Figura 1.2.33. Las 25 secciones transversales del canal. Aguas arriba (primera imagen) azud de Casa de la Moneda y terminando (última imagen) azud aguas abajo del Puente de San Marcos. El nivel de agua corresponde a un caudal de $63 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal punta del evento del 2013.



Calibración con limnimarcas

Para la calibración del modelo hidráulico se tomaron medidas puntuales del nivel del agua de días y horas concretos, sabiendo el caudal que circulaba en ese momento por el registro en la estación de aforos (tabla 1.2.7). Ello sirve para reajustar parámetros como la geometría y las condiciones de contorno (rugosidad) y que el modelo se ajuste mejor a la realidad física.

Tabla 1.2.7. Datos de calibración, conocidos los caudales que circulaban en un determinado momento y la altura de la lámina de agua en puntos determinados del modelo.

Día	Hora	Lugar	Medida	Caudal
5/4/2016	11:30 h	Puente San Marcos	86 cm	12.30 m ³ /s
20/4/2016	17:15 h	Puente San Marcos	123 cm	17.30 m ³ /s
	17:20 h	Bajada Azud	55.5 cm	17.30 m ³ /s
23/4/2016	13:30 h	Inicio Azud	23 cm	13.98 m ³ /s
	13:45 h	Puente San Marcos	103 cm	13.98 m ³ /s

También mediante material gráfico de avenidas (fotografías, videgrabaciones...), ocurridas en los eventos recientes estudiados en el año 2013 y 2014, se hace la comparativa entre las imágenes de esos años y las diferentes secciones del modelo.

En la Tabla 1.2.8 se pueden leer resultados de la cota del canal y el nivel al que se encuentra la lámina de agua, de lo que se puede deducir la profundidad para cada sección transversal. Además de parámetros hidráulicos como la velocidad del flujo en el canal, la energía de la pendiente o el número de Froude; sabiendo los puntos en los que el flujo pasa a supercrítico, que corresponden a la salida del puente de San Marcos. En la sección 21, que corresponde a la sección trazada en el centro de este puente, el régimen siempre es crítico (1) para todos los caudales modelizados (Apéndice III: Tablas resumen para las series modelizadas con HEC-RAS).



Tabla 1.2.8. Resumen de los parámetros hidráulicos con un caudal de 73 m³/s que corresponden a un periodo de retorno de 10 años para la serie completa.

T10 S7 Q = 73 m ³ /s										
Sección	Min Ch El m	W. S. Elev m	Crit W.S. m	E-G- Elev m	E.G. Slope	VelChnl m/s	Flowarea m ²	Top With m	Froude Chl	Vel Head m
1	913.5	914.14	914.14	914.45	0.002580	2.50	29.56	48.39	1.00	0.32
2	911.25	913.57	911.95	913.60	0.000046	0.79	97.04	43.19	0.17	0.03
3	911.00	912.88		913.53	0.008396	3.93	33.12	23.30	0.92	0.65
4	910.50	913.18		913.38	0.001907	1.97	37.81	15.77	0.39	0.20
5	910.40	913.18		913.38	0.000244	1.95	40.26	17.75	0.38	0.19
6	910.60	913.20		913.37	0.001532	1.88	45.89	27.11	0.38	0.17
7	910.60	913.26		913.34	0.000717	1.26	61.57	34.76	0.27	0.08
8	910.55	913.13		913.32	0.001985	1.94	52.88	42.27	0.44	0.19
9	910.55	913.11		913.29	0.001616	1.92	66.60	57.25	0.40	0.19
10	910.90	912.93		913.26	0.004011	2.60	54.76	45.60	0.62	0.34
11	910.35	912.96		913.11	0.001537	1.76	54.92	32.71	0.39	0.16
12	910.35	913.00		913.06	0.000698	1.12	65.31	34.94	0.26	0.06
13	909.85	912.91		913.03	0.000900	1.60	55.37	39.92	0.31	0.12
14	910.05	912.91		913.01	0.000849	1.56	60.76	46.00	0.30	0.11
15	910.35	912.88		912.99	0.001013	1.55	69.30	58.51	0.32	0.11
16	910.18	912.90		912.96	0.000549	1.14	73.91	55.15	0.24	0.06
17	909.95	912.83		912.92	0.000836	1.49	58.77	46.52	0.30	0.10
18	910.25	912.62		912.85	0.002847	2.17	35.92	30.20	0.52	0.23
19	910.25	912.60		912.81	0.002172	2.20	38.81	29.07	0.48	0.21
20	909.95	912.10	911.80	912.75	0.006090	3.56	25.45	20.97	0.79	0.64
21	909.95	911.80	911.80	912.69	0.010484	4.19	19.39	15.88	1.00	0.89
22	909.95	911.34	911.65	912.60	0.021552	4.97	15.24	14.03	1.37	1.26
23	910.00	912.08	911.34	912.27	0.002235	1.97	38.60	27.27	0.46	0.19
24	909.92	912.05		912.20	0.001524	1.80	43.59	25.17	0.40	0.15
25	910.50	911.57	911.57	912.10	0.002127	3.22	23.23	24.58	0.99	0.53

Como se puede apreciar en la figura 1.2.34, la zona inundable de T10 años inunda buena parte de los canales de la Casa de la Moneda. La diferencia más significativa de T10 a T50 es la inundación por completo del patio entre el Ingenio Chico y el Ingenio Grande. No existe demasiada diferencia cartográfica para los periodos de retorno de 50 a 100 años debido al estrecho cauce; pero si con la T500, que inunda la totalidad del fondo de valle.

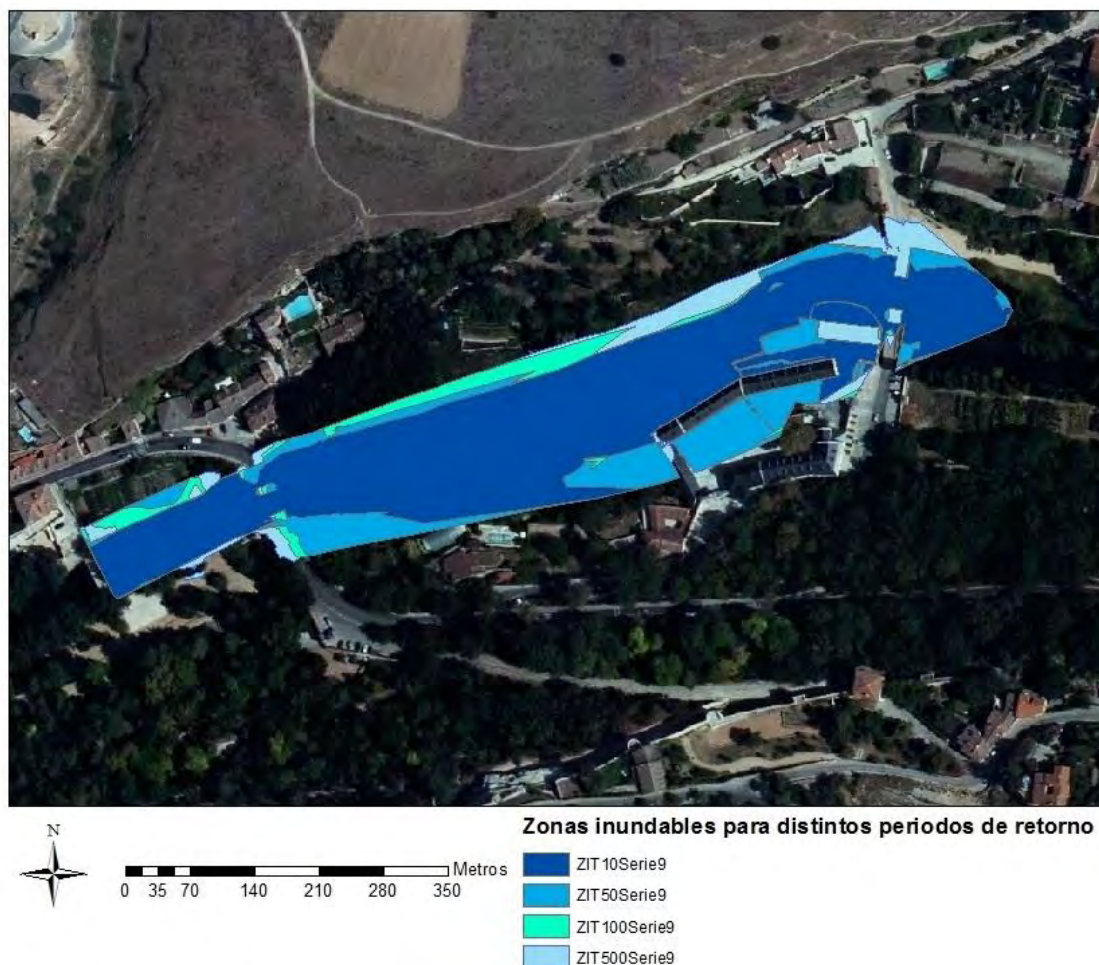


Figura 1.2.34. Zonas inundables para diferentes periodos de retorno (10, 50, 100 y 500 años). Para una situación de no construcción del embalse aguas arriba (serie 9).

Eventos del 2013 y 2014

También se ha modelizado los dos eventos ocurridos en los años 2013 y 2014 y las zonas inundables correspondientes de cada uno.

Como se observa en la figura 1.2.35, la diferencia entre el evento del 2013 y 2014, es el área mayor de incidencia del año 2014, llegando a cubrir la mayor parte de los canales. También representada en azul, la zona de inundación para un periodo de 50 años (en las mismas condiciones de construcción del embalse, ya que esas eran las condiciones cuando se produjeron los eventos). Se observa que ambas representaciones no alcanzan la misma área que la de un periodo de 50 años, por lo que tienen un periodo de retorno menor, aunque ambas se produjeran en años consecutivos.

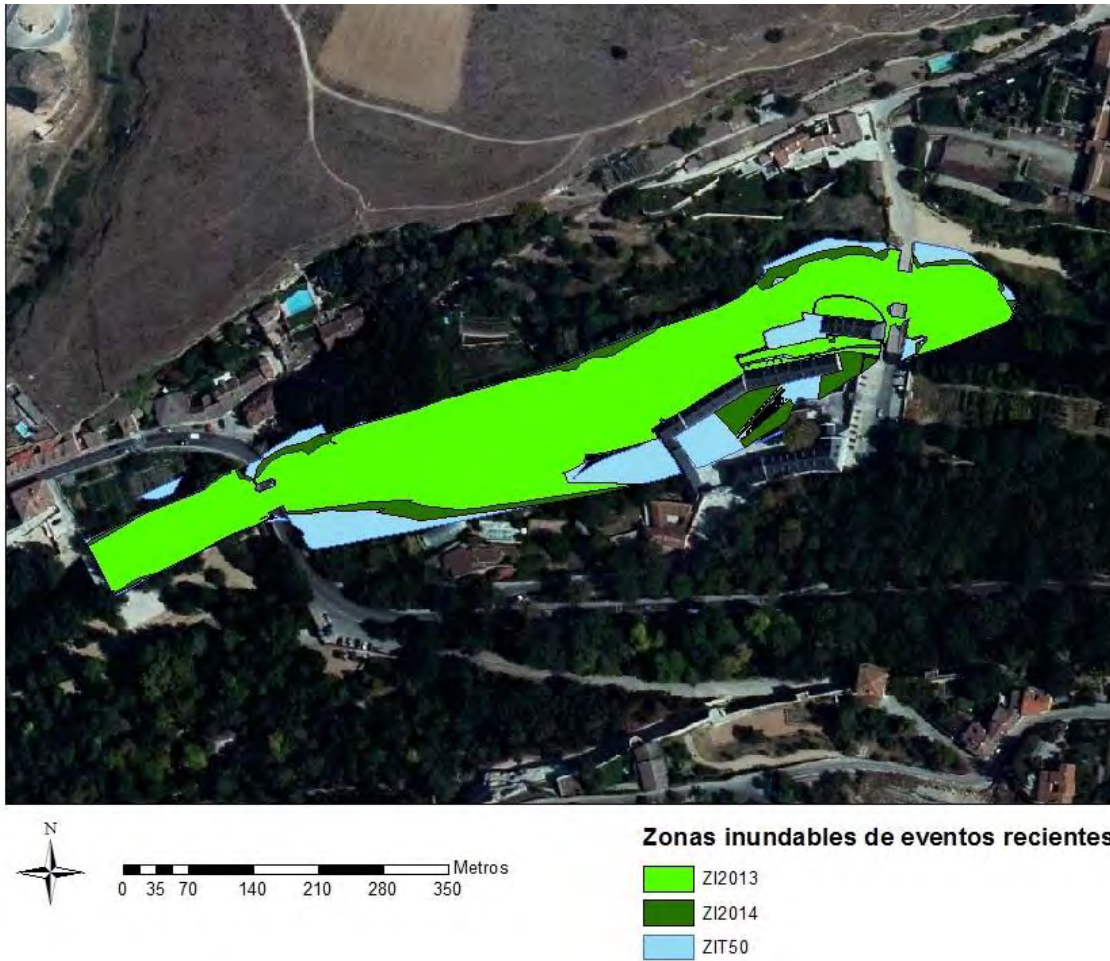
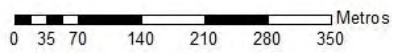


Figura 1.2.35. Mapa de zonas inundables para el evento de 2013 con un caudal de $63 \text{ m}^3/\text{s}$ y la del 2014 con un caudal de $79,86 \text{ m}^3/\text{s}$, junto con la T50 de la serie completa.

En la figura 1.2.36 se observan las máximas profundidades en todo el área comprendida entre los puentes, mientras que las menores corresponden al jardín de la Casa de la Moneda. En la imagen inferior de dicha figura, se aprecia que la altura de la lámina de agua es elevada hasta llegar al Puente de San Marcos, donde desciende.



BatT500

Value

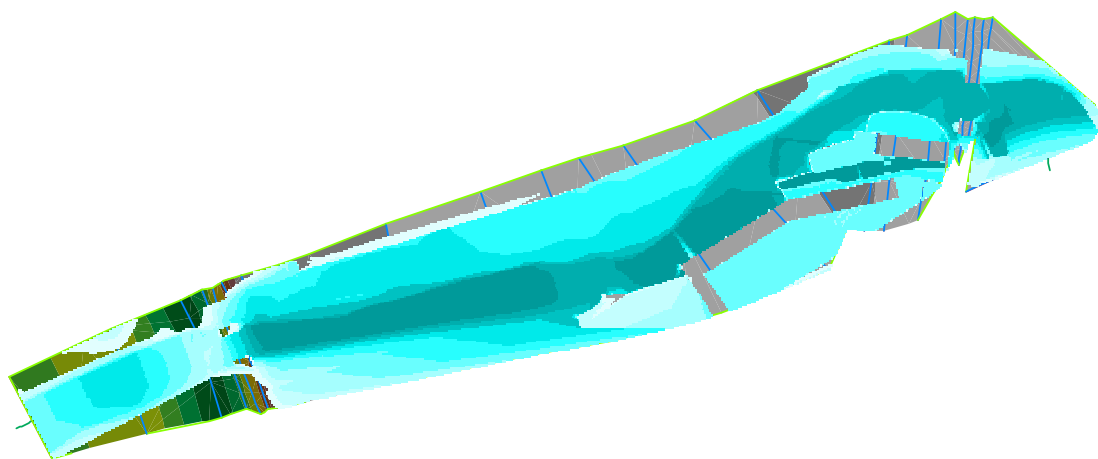


Figura 1.2.36. Mapa de la profundidad alcanzada para un caudal de $292 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 500 años. Los valores máximos superan los 6 m de profundidad.



En la resta de la batimetría de la serie completa, para los periodos de retorno T500 menos el T10 (figura 1.2.37), se observa que las mayores diferencias se producen aguas arriba del puente de San Marcos, donde alcanzan alrededor de 4 m entre las alturas de los caudales de esos periodos de retorno. A continuación, a la salida del puente, se encuentran los valores más bajos, llegando a haber un descenso de algo más de 20 cm a la salida del puente.

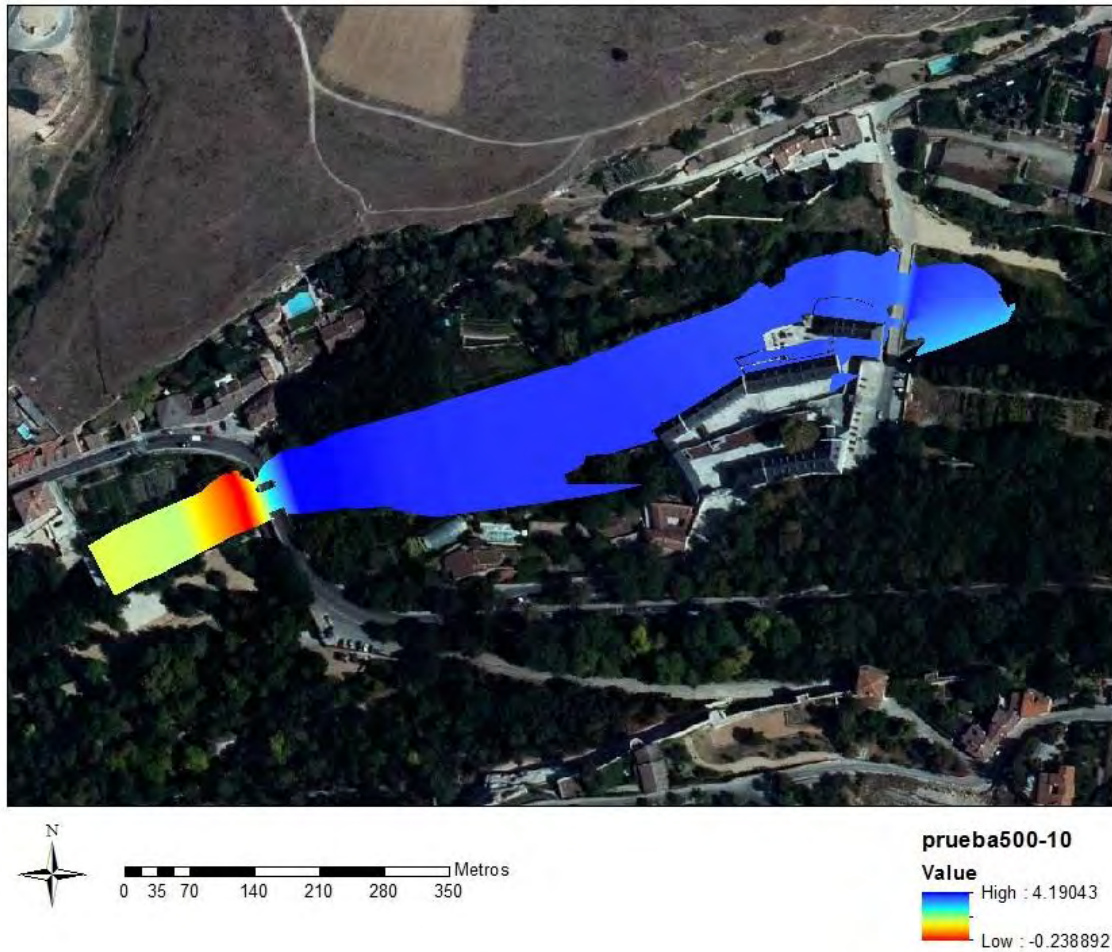


Figura 1.2.37. Resta de las batimetrías del periodo de retorno de 500 años menos la de 10 años. De esta forma se representan los valores más extremos y se puede saber la diferencia para ambas situaciones.



Comparación entre serie de datos completa y sin la construcción del embalse del Pontón

De todas las series estudiadas estadísticamente, se eligieron y modelaron dos situaciones: serie completa y serie hasta la construcción del embalse.

- Altura de la lámina de agua

Como se muestra en la figura 1.2.38, se observa que los valores para un periodo de retorno de 10 años no tienen una diferencia significativa para una situación sin embalse frente a la serie completa; pero sí para periodos de retorno superiores a 50 años.

Siempre es mayor la altura alcanzada por la lámina de agua para una situación sin embalse que para la serie completa en el mismo periodo de retorno, por lo que se deduce la construcción del embalse sí regula la altura de la lámina de agua en la zona de estudio, sobre todo para periodos de retorno elevados, ya que la diferencia para un periodo de retorno de 500 años en una situación sin embalse es de más de 2 m en algunos puntos.

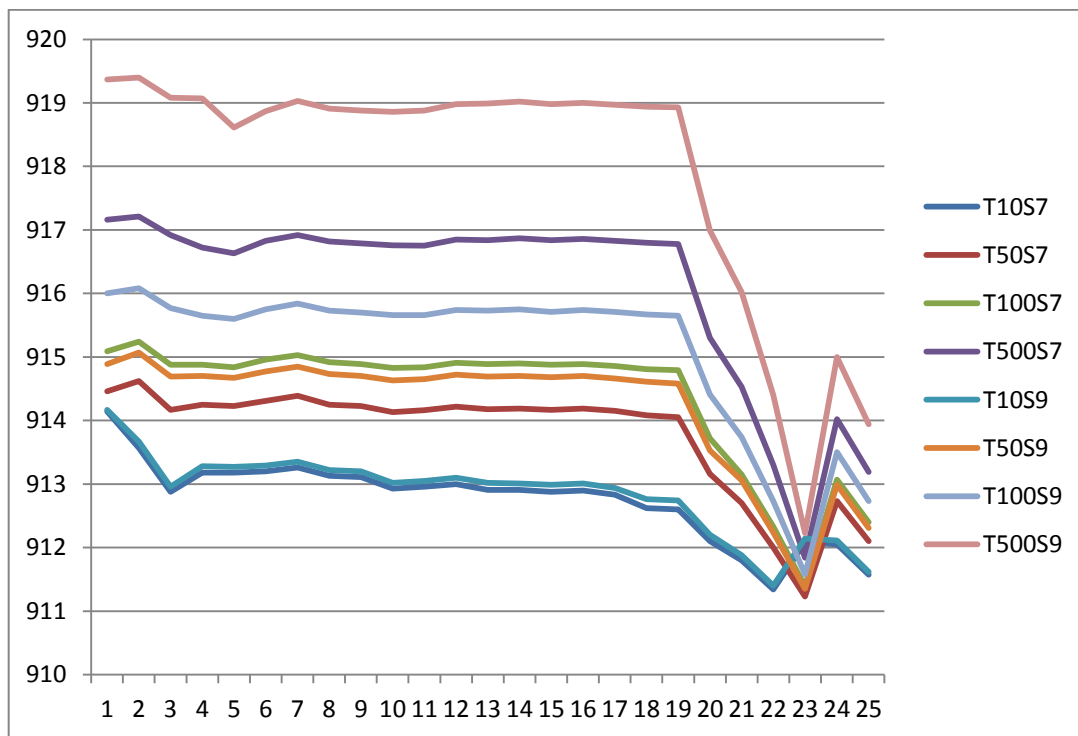


Figura 1.2.38. Relación de la altura de la lámina de agua (m s.n.m.) para todas las secciones y en todos los periodos de retorno estudiados en ambas series.



- Calado en lugares singulares del entorno

Para lugares singulares que conllevan situaciones de riesgo para personas y bienes, en la tabla 1.2.9 se pueden apreciar diferencias entre la profundidad que alcanza el agua para una situación sin embalse respecto a toda la serie completa.

Tabla 1.2.9. Relación entre la altura del calado en lugares significativos del entorno de la Casa de la Moneda, donde una situación sin embalse para periodos de retornos elevados (100 y 500 años) tienen una diferencia de altura de la lámina de agua de hasta 2 m.

Profundidad (m)		Serie completa				Serie sin embalse			
		T (años)				T (años)			
		10	50	100	500	10	50	100	500
Lugares	Terraza cafetería	0,61	1,73	2,39	4,29	0,89	2,13	3,16	6,36
	Interior cafetería	1,11	2,23	2,89	4,79	1,39	2,63	3,66	6,86
	Museo Herrería	0,11	1,23	1,89	3,79	0,39	1,63	2,66	5,86
	Jardín del Rey	0,87	2,16	2,87	4,83	0,98	2,67	3,70	6,97

Se observa que el interior de la cafetería es el lugar que mayor altura alcanza el calado para periodo de retorno de 10 años. La altura va aumentando de manera correlativa para el resto de periodos de retorno, alcanzando en el Jardín del Rey el mayor calado para un periodo de retorno de 500 años en ambas series, con una diferencia de más de 2 m de altura en comparación de la serie completa y sin embalse.

- Velocidad del cauce en el canal y márgenes

Teniendo en cuenta que se considera que por encima de 1 m/s es la velocidad necesaria para el arrastre de una persona, en casi la totalidad de las secciones se supera esa velocidad de arrastre, suponiendo un peligro para la población (figura 1.2.39).

Las secciones que tienen unas velocidades superiores corresponden a la salida del Puente de San Marcos, que hace frenar el agua a su paso y una vez sale de la infraestructura canalizada del puente, la velocidad disminuye hasta equilibrarse nuevamente.

En los Apéndices III.4 y III.5, tanto en las gráficas de velocidad de flujo como para la tabla de velocidades de las márgenes y del canal, se observa que en el canal se alcanzan las máximas velocidades de flujo. Además de la diferencia del margen derecho con valores más elevados que el margen izquierdo, por efecto de la edificación de la RCMS.

Para periodos de retornos mayores, la velocidad de flujo aumenta tanto en el canal como a ambas márgenes del río (Apéndice III, tablas de velocidad de flujo).

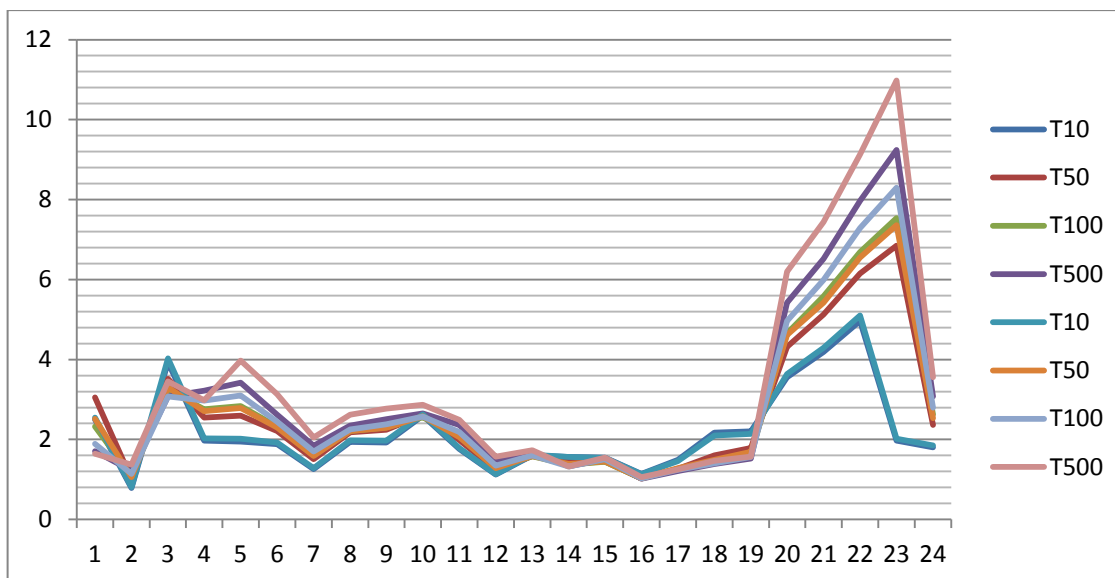


Figura 1.2.39. Gráfica de todas las series estudiadas y periodos de retorno, que muestran la velocidad del flujo principal del canal, medido en m/s. Muestran la elevada velocidad del cauce, alcanzando los valores más altos a la salida del puente de San Marcos en todas las modelizaciones, llegando a los 10,98 m/s para un periodo de retorno de 500 años sin embalse.

Como se observa, para la serie sin embalse y con un periodo de retorno de 500 años, se encuentra el valor de velocidad mayor, que corresponde a la salida del puente de San Marcos.

En la información del Apéndice III.5, tabla de velocidades para los márgenes y el canal del río, se observa cómo es superior la velocidad tanto en el cauce como en sus márgenes para la serie sin la construcción del embalse, teniendo especial relevancia para el periodo de retorno de 500 años donde sí se aprecian diferencias significativas, sobre todo la velocidad que adquiere el cauce a la salida del Puente de San Marcos, alcanzando los 10,98 m/s sin embalse, frente a los 9,24 m/s que alcanza para ese punto en la serie completa.

Durante todo el transcurso entre ambos puentes la velocidad es homogénea para todas las series y distintos periodos de retorno modelizados.

Comparación de resultados del modelo con observaciones reales

Los eventos ocurridos en los años 2013 y 2014, permiten la comparación de imágenes recogidas para esas crecidas y su representación en el modelo. En la composición de la figura 1.2.40 se observa que se inunda la primera planta del Ingenio Chico, los canales por completo, y la terraza del restaurante. Además en la terraza se puede apreciar una menor velocidad del flujo dentro de la terraza y una gran velocidad en el cauce a su derecha.

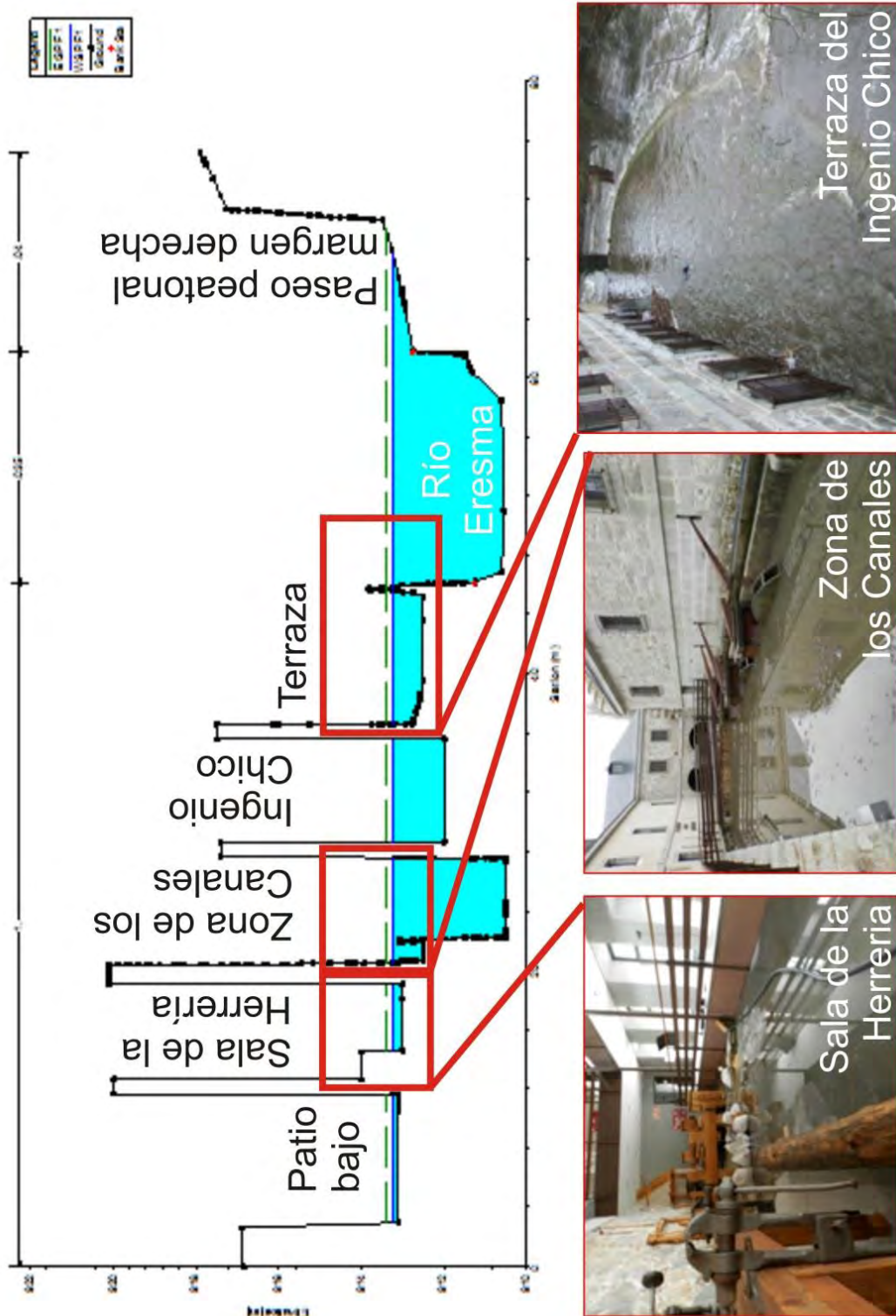


Figura 1.2.40. Comparación entre las salidas del modelo hidráulico para una sección transversal y las observaciones reales correspondientes durante la inundación. En la imagen de la izquierda se observa un bajo calado en la sala de la Herrería (Jorge Soler); en la imagen del centro, los canales inundados; y en la imagen de la derecha, la terraza de la cafetería (Ingenio Chico) inundada completamente.



La primera sección transversal (comienzo del azud; figura 1.2.41) se observa cómo desborda la lámina de agua por encima del azud para el caudal punta del evento de 2014, con $79,86 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 1.2.41. Sección transversal inicial del modelo HEC-RAS, correspondiente al azud de la RCMS, correspondiente al caudal punta del 2014 (arriba izquierda); y fotografías de la realidad observada para ese evento.

Durante el mes de abril de 2016, se tomaron medidas de la altura de la lámina de agua en diferentes secciones transversales para poder calibrar el modelo hidráulico (figuras 1.2.42 y 1.2.43).

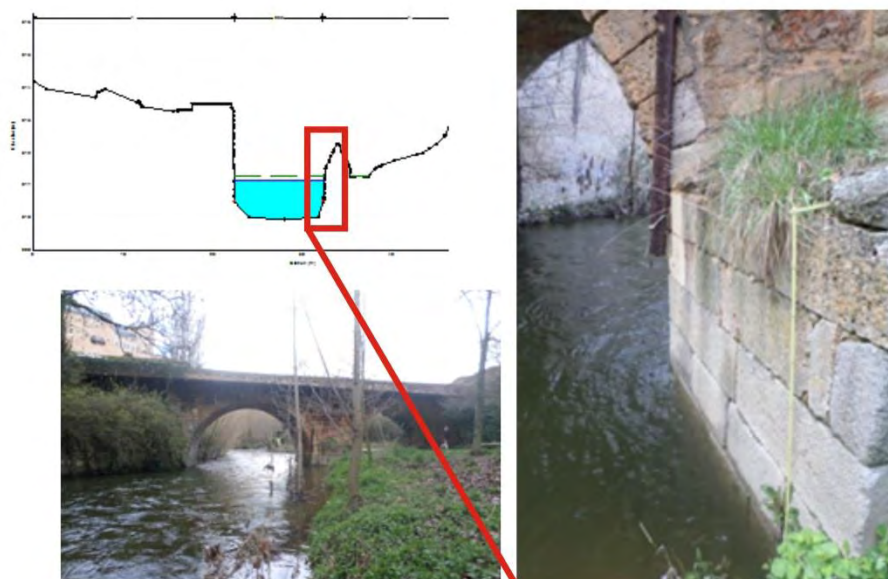


Figura 1.2.42. Resultado del modelo hidráulico en la sección transversal del puente de San Marcos para un caudal de $17,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba izquierda) y su equivalencia en las fotografías tomadas para ese mismo caudal, en el ojo izquierdo del puente por donde pasa el agua, y una imagen de detalle de la medida de la altura del calado.

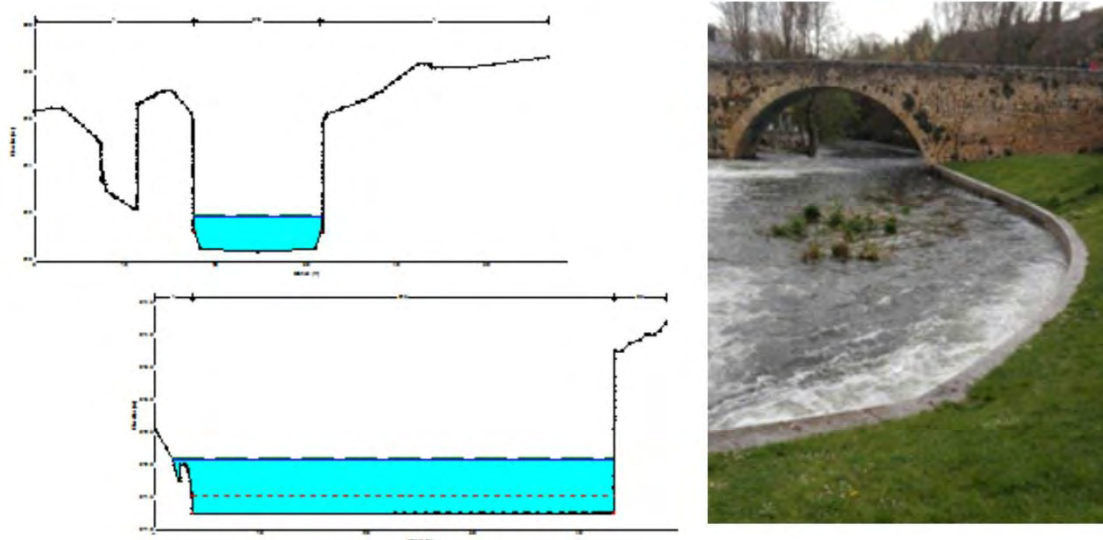


Figura 1.2.43. Resultado del modelo hidráulico en la sección transversal del puente de la Moneda para un caudal de $17,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (arriba izquierda) y su equivalencia en las fotografías tomadas para ese mismo caudal. En la sección inferior de la figura, correspondiente a la bajada del azud, se comprueba que a la lámina de agua le faltan los 55 cm medidos en campo para superar la construcción de piedra.

Comparación de mapas SNCZI (MAGRAMA) con los resultados del estudio

En el año 2009, se desarrolló el Sistema Nacional de Cartografía de las Zonas Inundables de la Cuenca del Duero (SNCZI), con el fin de elaborar mapas de peligrosidad por inundaciones que incluyeran las zonas geográficas con baja, media y alta probabilidad de inundación; así como la caracterización de la zona inundable, es decir, la extensión de la inundación, el nivel que podría alcanzar el agua y la velocidad de la corriente, parámetros necesarios para la determinación del dominio público hidráulico, la zona de peligrosidad y la vía de intenso desagüe.

Al igual que en el presente estudio, se estudiaron métodos análisis histórico, geomorfológico, hidrológico e hidráulico. El análisis hidrológico se realizó por otros métodos: CAUMAX y HEC-HMS; y el estudio hidráulico partía de la base cartográfica realizada por vuelos LIDAR, escogiendo como base para el modelo hidráulico el MDT sin incluir edificios (ya que permiten una malla uniforme) y los taludes o muros se definen mediante líneas de rotura, las edificaciones con superficies de rugosidad elevada y los puentes como elementos unidireccionales. La modelización hidráulica se realizó mediante *InfoworksRivers*, modelo de flujo bidimensional (Caballero *et al.*, 2011; figura 1.2.44).

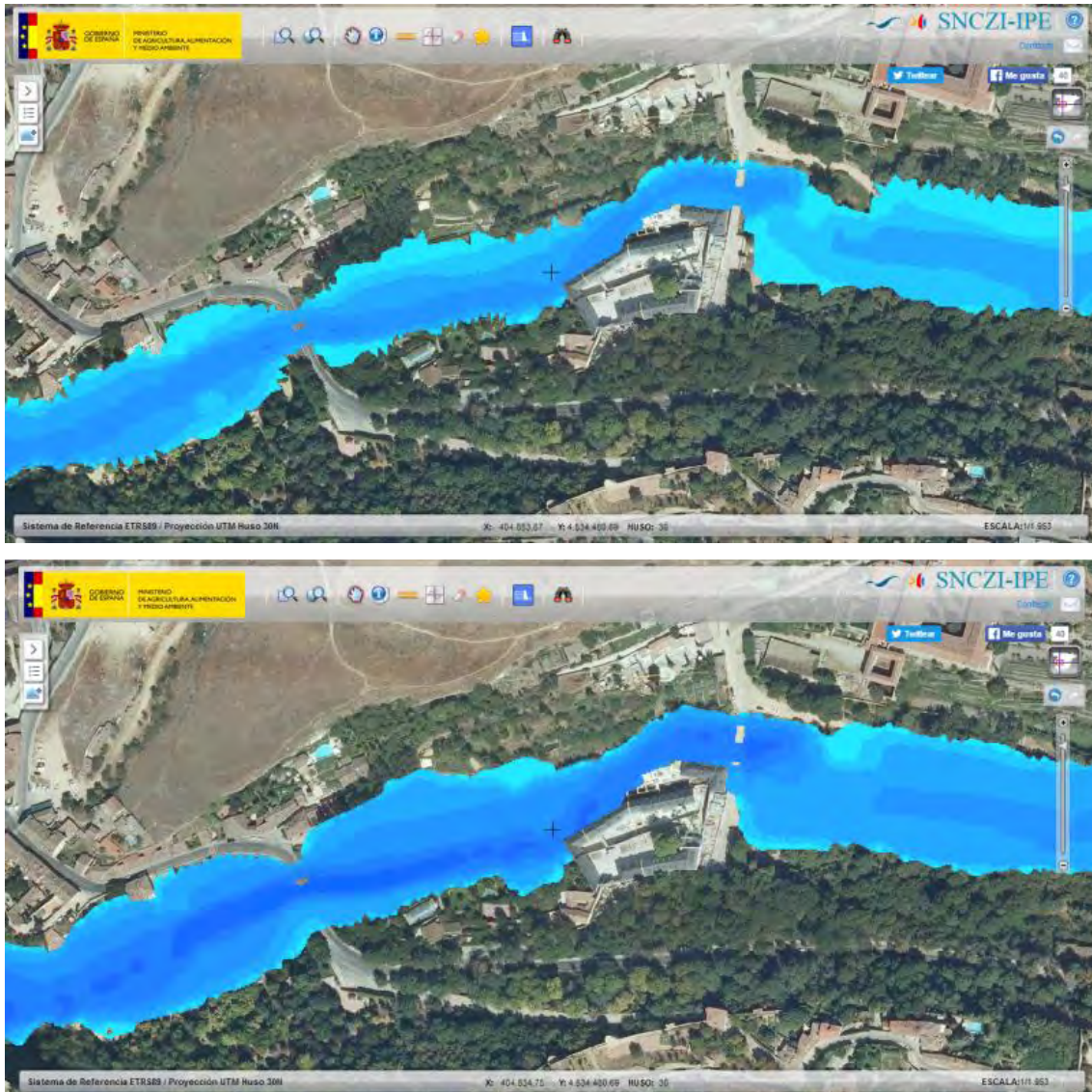


Figura 1.2.44. Imágenes del visor cartográfico del MAGRAMA del SNCZI para tiempos de retorno de 10 años arriba y 500 años debajo. La diferencia entre ambos mapas es la mayor extensión de las áreas inundables para un periodo de retorno mayor, llegando a cubrir por completo toda la pradera y la llanura de la margen derecha del río para periodos de retorno de 500 años.

En el presente estudio se ha realizado con HEC-RAS, modelo unidimensional, a diferencia de los modelos bidimensionales y la base topográfica (LIDAR) utiliza por el MAGRAMA. Por estas causas, se diferencian los mapas del MAGRAMA (figura 1.2.44) y los resultados propios (figura 1.2.45).

Entre ambos mapas, los del MAGRAMA y los propios, existen diferencias debido a la topografía y el modelo hidráulico utilizado.

Como se observa en el mapa del visor cartográfico (figura 1.2.44), el área de las zonas inundables tienen una mayor extensión, a diferencia del modelo del estudio, donde el área de inundabilidad está limitado por la última curva topográfica que tiene introducido el modelo.



Por lo contrario, en el modelo donde se utiliza el curvado, sí se representa las inundaciones en el interior del edificio. Esto se observa en la figura 1.2.45, donde para un periodo de retorno de 10 años ya se inunda la terraza del restaurante; y en cambio, en el mapa del MAGRAMA, al utilizar bloques geométricos no permiten la entrada de agua dentro del edificio; sin embargo, ya se ha demostrado en este estudio que no es cierto que no entre agua en el edificio, pues se inunda el interior de las instalaciones, por lo que realizar la modelización impidiendo la entrada de agua no es una situación real.

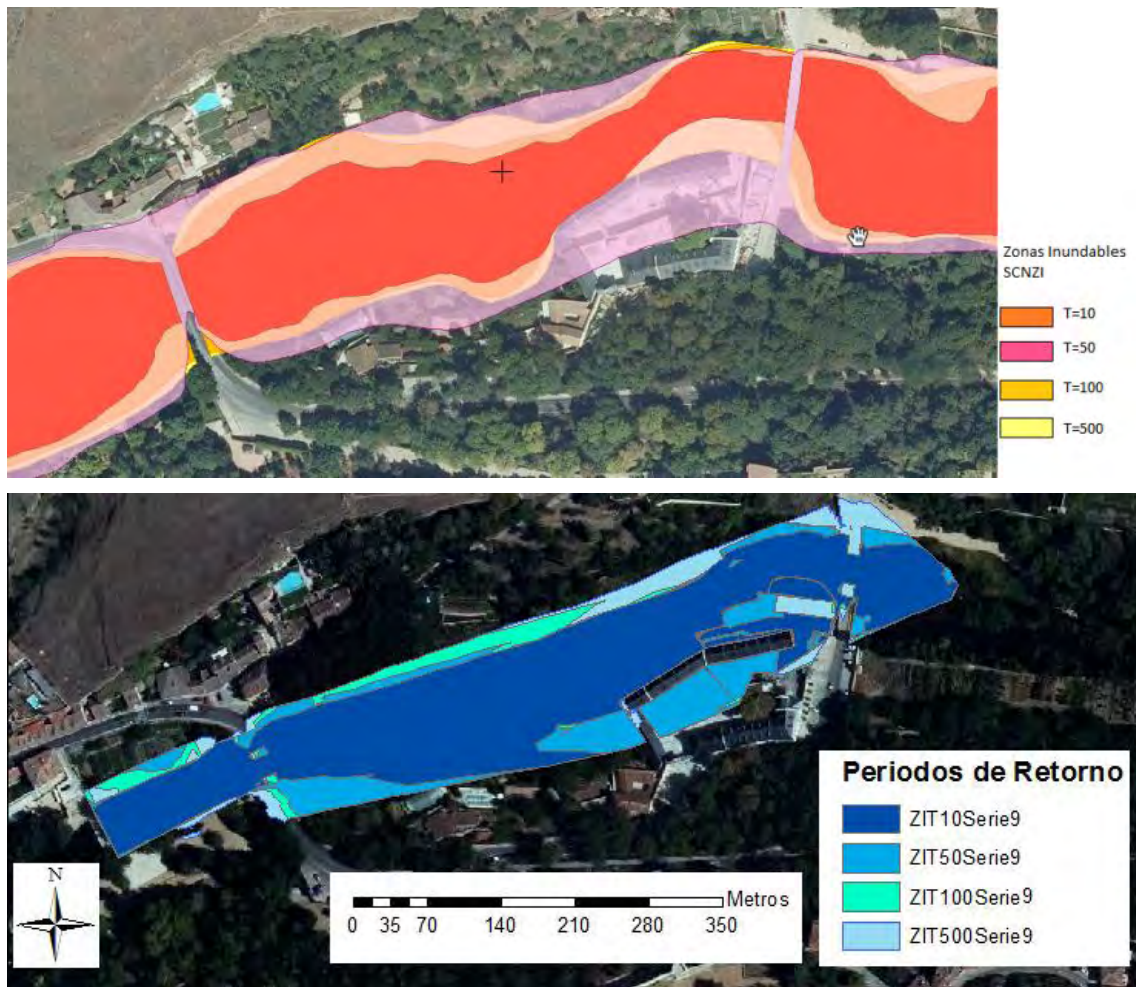


Figura 1.2.45. Arriba imagen del visor cartográfico del SNZCI donde el área para un periodo de retorno de 50 años, es mayor que para 100 o 500 y es el único que muestra inundación en la Casa de la Moneda. Abajo, mapa de zonas inundables para 10, 50, 100 y 500 realizado en este estudio, con una zona inundable condicionada por la topografía, pero que inunda el edificio del Ingenio como se ha comprobado gráficamente.



1.3. ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LAS POSIBLES FILTRACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA BASE DEL CANAL DE LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA

En este apartado se aborda un aspecto específico acerca de las inundaciones que tienen lugar en la RCMS. Este aspecto tiene que ver con la entrada de agua al recinto por la base del canal, a priori por vía subterránea.

El estudio de esta problemática requiere de una investigación específica de índole hidrogeológica, diferente a la de los capítulos anteriores en los que se tratan los aspectos de la inundación de la RCMS desde el punto de vista de las avenidas y desbordamientos del río Eresma a su paso por la zona de estudio. La descripción de los planteamientos hidrogeológicos y trabajos realizados pasan a detallarse a continuación.

1.3.1. Introducción a la problemática hidrogeológica

Los últimos episodios de desbordamientos del río que afectaron a la RCMS tuvieron lugar en los años 2009, 2013 y 2014, coincidiendo con años hidrológicos clasificados como húmedos. Los tres episodios causaron inundaciones y desperfectos en los edificios del Ingenio Chico e Ingenio Grande (en la actualidad se corresponden con el bar-restaurante y con el museo de la RCMS, respectivamente). También se describen inundaciones en el patio interior del recinto de la RCMS, aspecto que parece haberse solucionado tras la construcción de un tanque de tormentas en el subsuelo de este patio.

El caudal circulante por el río Eresma durante dichas avenidas, medido en la estación de aforos del río Eresma en Segovia (estación nº 2050 de la Confederación Hidrográfica del Duero), fue superior a 40 m³/s, con caudales punta cercanos a los 80 m³/s. La situación de la estación de aforos del río Eresma en Segovia con respecto a la Casa de la Moneda se encuentra reflejada en la figura 1.3.1.

En febrero de 2016 se registró una avenida de magnitud significativamente menor que las citadas anteriormente, concretamente el caudal máximo fue de 32 m³/s, que no produjo el desbordamiento del río, causante de los daños en el edificio del Ingenio Chico. Por el contrario, pese a no producirse desbordamiento del río, se produjo entrada de agua al edificio Ingenio Grande de la RCMS por ascenso del nivel de agua en el interior del canal hasta la altura de los ejes de las actuales ruedas que mueven los diferentes mecanismos del museo.



Figura 1.3.1. Plano de la ubicación de la estación de aforos nº 2050 del río Eresma en Segovia y Casa de la Moneda (fuente: Instituto Geográfico Nacional).

En primera instancia, se estableció un probable origen subterráneo del aporte de agua al interior del canal, ya que sus compuertas de acceso de agua, tanto a la entrada de la Casa de la Moneda desde el azud como en su salida hacia el río Eresma, aguas abajo, se encontraban cerradas.

El objeto de este apartado se centra en la determinación de la posibilidad de aporte de agua de origen subterráneo a las instalaciones de la RCMS, así como la cuantificación del caudal de agua esperable por esta vía en función de las características geológicas e hidrogeológicas del terreno sobre el que se asienta este complejo.

Actualmente se cuenta con una bomba de achique (de manera temporal se ha instalado una segunda bomba) en el fondo del canal, que entra en funcionamiento cuando el agua asciende por encima de la boya que acciona su funcionamiento. Se trata de determinar si la capacidad de bombeo es suficiente para los aportes de agua esperables, en un escenario de avenida como el acontecido en febrero de 2016, o incluso de magnitud superior.



1.3.2. Marco hidrogeológico

Se describe en este apartado el marco hidrogeológico, tanto a nivel regional como a nivel local, del entorno de la RCMS.

Hidrogeología regional

A continuación se resume la evolución de las divisiones hidrogeológicas y administrativas relacionadas con las aguas subterráneas que han tenido lugar en el área de estudio.

En una primera catalogación de los *sistemas acuíferos*, el IGME (1972) definió el sistema nº11-Cretácico calcáreo de Segovia, constituido por materiales mesozoicos, 'terciarios' y cuaternarios que rellenan la fosa tectónica situada entre las Sierras de Guadarrama y Somosierra y la alineación de afloramientos graníticos de Santa María de Nieva-Zarzuela del Pinar-Hontabilla-Pradales, extendiéndose, con una anchura de unos 30 km, en dirección SO-NE (figura 1.3.2).

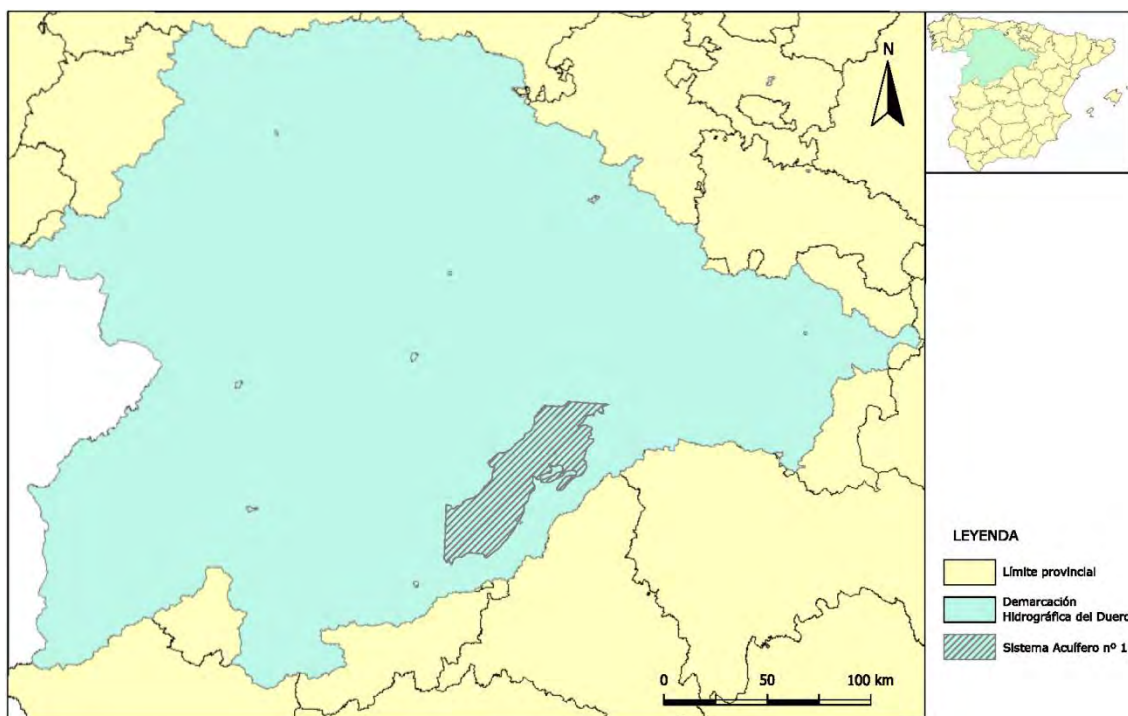


Figura 1.3.2. Sistema acuífero nº 11 (fuente: ITGE, 1993).

Después de la Ley de Aguas de 1985, la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y el Instituto Geológico y Minero de España (DGOH-IGME, 1988), definieron las *unidades hidrogeológicas*, que incluían uno o varios acuíferos que se agrupan a efectos de conseguir una administración del agua racional y eficaz.

La de mayor interés en este trabajo es la denominada Unidad Hidrogeológica 18 - Segovia, que ocupa la mayor parte de la provincia, incluyendo la capital segoviana (figura 1.3.3).

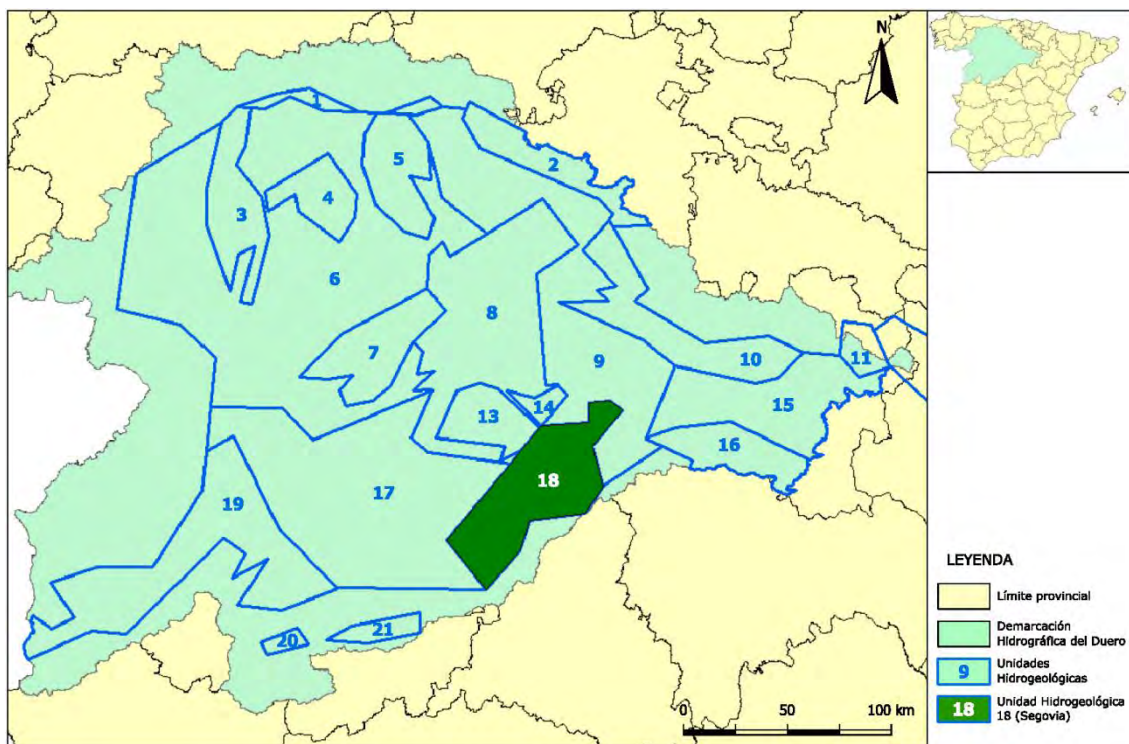


Figura 1.3.3. Unidad Hidrogeológica 18 - Segovia (fuente: servicios web de la Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

La unidad hidrogeológica nº 18 queda situada en una cubeta tectónica de base mesozoica y sobre ella dispuestos los depósitos 'terciarios'. El Mesozoico está formado por dolomías karstificadas y sobre ellas se encuentran intercalaciones de calizas y margas, superando el conjunto los 200 metros de potencia. Los materiales detríticos 'terciarios' están constituidos por conglomerados hacia el borde de la cuenca y dispuestos en estructura lenticular de arenas con matriz de grano más fino, de carácter semipermeable.

La Directiva Marco del Agua (DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, 2000) establece la Demarcación Hidrográfica como unidad principal a efectos de gestión del agua, definida como la zona marítima y terrestre compuesta por una o varias cuencas hidrográficas, así como las aguas subterráneas y costeras asociadas.

La legislación de aguas española se ha adaptado a lo recogido por la Unión Europea a través de la Directiva Marco del agua (Directiva 2000/60/CE), mediante modificaciones del texto refundido de la Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio) heredero de la ley de 1985.

En lo referente a las aguas subterráneas, las principales modificaciones se introdujeron a través de la Ley 62/2003, de 30 de diciembre de 2003, y siguiendo la Directiva europea en materia de aguas, la planificación hidrológica para las aguas subterráneas se establece en unidades básicas denominadas masas de agua subterránea (MASb), definidas como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos.

Así pues, en la Demarcación Hidrográfica del Duero (MIMAM, 2005), se definieron 31 masas de agua distribuidas en cuatro grandes grupos (rocas ígneas y metamórficas, formaciones mesozoicas, materiales 'terciarios' y niveles cuaternarios).



Concretamente, en la zona objeto de estudio quedó definida la masa de agua subterránea 020.021 - Segovia (figura 1.3.4), con una extensión de 2.880 km², que fue aprobado como unidad de gestión en el vigente Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero se aprobó por Real Decreto 478/2013, de 21 de junio (BOE nº 149, de junio de 2013), y en el recientemente aprobado Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero para el periodo comprendido entre 2015 y 2021 (Real Decreto 1/2016, de 8 de enero).

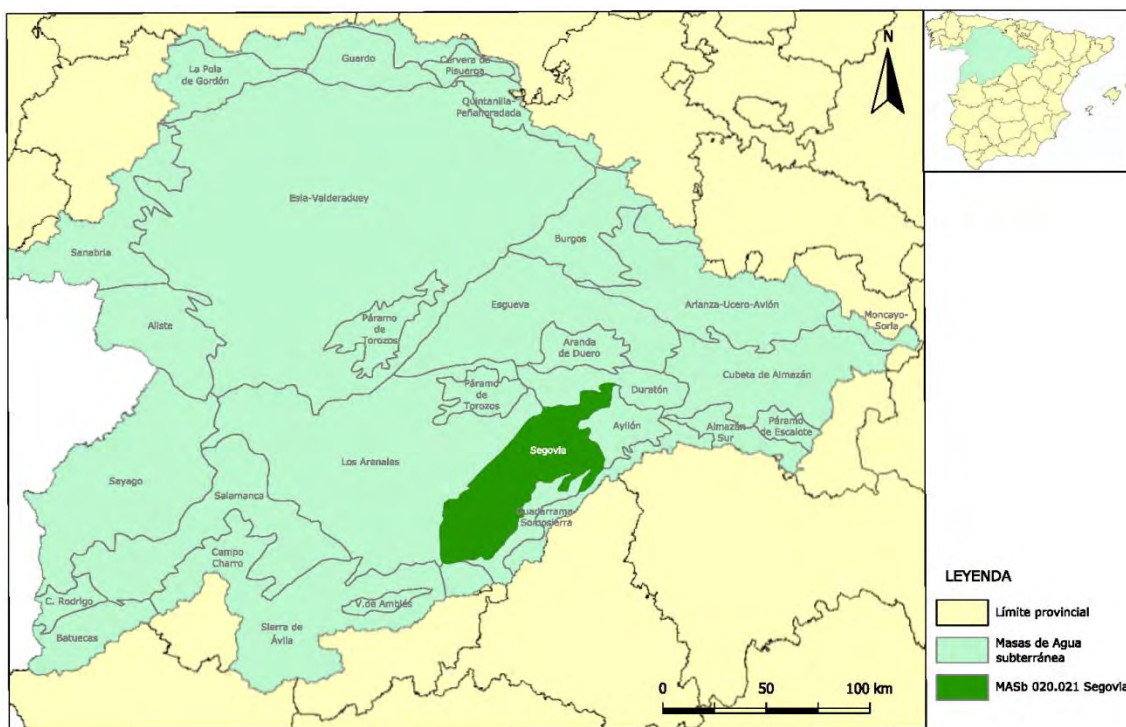


Figura 1.3.4. Masa de agua subterránea 020.021-Segovia (fuente: servicios web de la Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Ocupa parte de la provincia de Segovia, constituyendo una franja paralela a las sierras de Guadarrama y Somosierra de dirección SO-NE. Limita al Norte con el río Riaza, al Noroeste queda limitado por la alineación de los afloramientos graníticos de Santa María la Real de Nieva. Al Oeste es el río Voltoya el que limita esta masa con la masa de Los Arenales y el límite Sureste lo establece el complejo granítico y metamórfico del Sistema Central.

Geológicamente, se corresponde a una fosa tectónica paralela a las sierras de Guadarrama y Somosierra, rellena por materiales mesozoicos, 'terciarios' y cuaternarios.

Los niveles mesozoicos se componen de una formación basal de permeabilidad media y un tramo superior de calizas y dolomías que afloran en el borde Sur de la cubeta y al Norte de la misma; pueden alcanzar espesores entre 60 y 100 metros. Referente a los niveles 'terciarios', están constituidos por lentejones de arenas en una matriz areno limosa y arcillosa, que se pueden disponer de forma discordante sobre los materiales mesozoicos.



Por último, los depósitos cuaternarios aluviales están constituidos por conglomerados, gravas, arenas, arcillas y limos, asociados fundamentalmente a los ríos Duratón y Eresma.

Fundamentalmente, la recarga de esta MASb se produce por infiltración del agua de lluvia y, en menor medida, por el retorno de riegos. Por su parte, la descarga se realiza a través de los ríos y, en parte, hacia la MASb de Los Arenales, situada al Oeste.

Actualmente desde el punto de vista hidrogeológico, la zona de estudio se encuentra incluida en la Masa de Agua Subterránea (MASb) 400.057-Segovia, según la nomenclatura del Real Decreto 478/2013 del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero (figura 1.3.5).

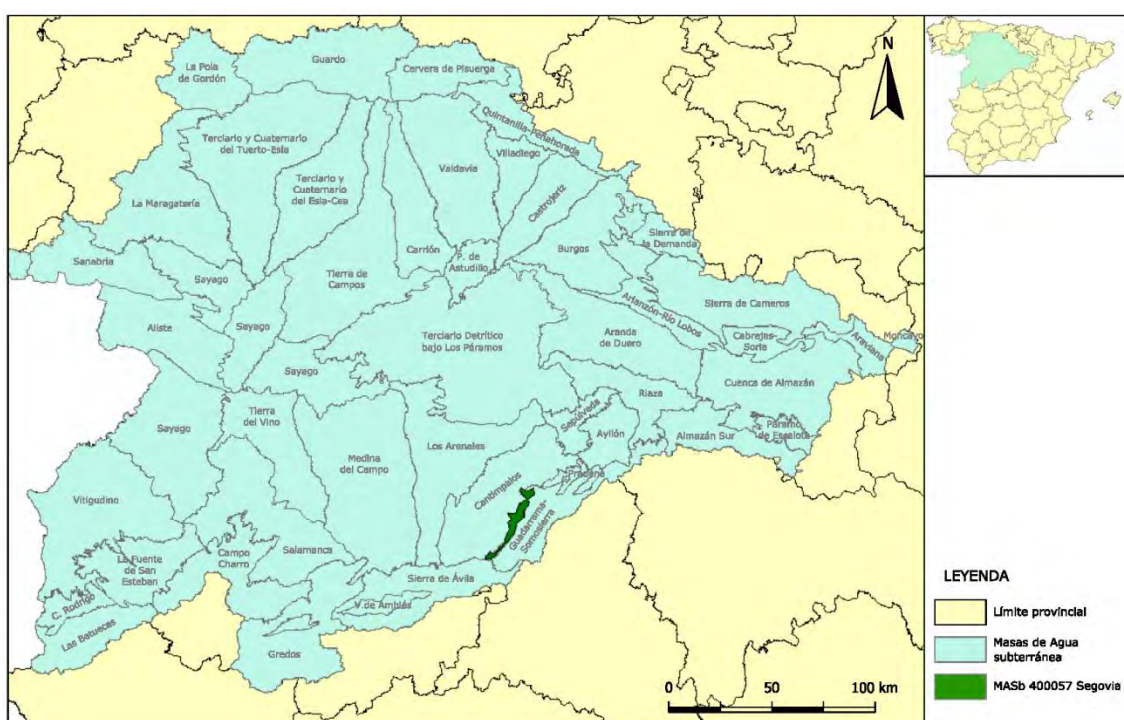


Figura 1.3.5. Masa de agua subterránea 400.057-Segovia en la que se ubica la ciudad y la zona de estudio a considerar (fuente: servicios web / Visor de la Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Hidrogeología local

La MASb 400.057-Segovia queda situada en la zona centro-meridional de la provincia de Segovia. Se trata de una banda, de unos 40 km de largo y unos 2,5 km de ancho que conforman una extensión de 122,24 km²; dispuesta geográficamente en dirección SO-NE entre las localidades de Torreiglesias al Norte y Vegas de Matute al Sur (figura 1.3.6).

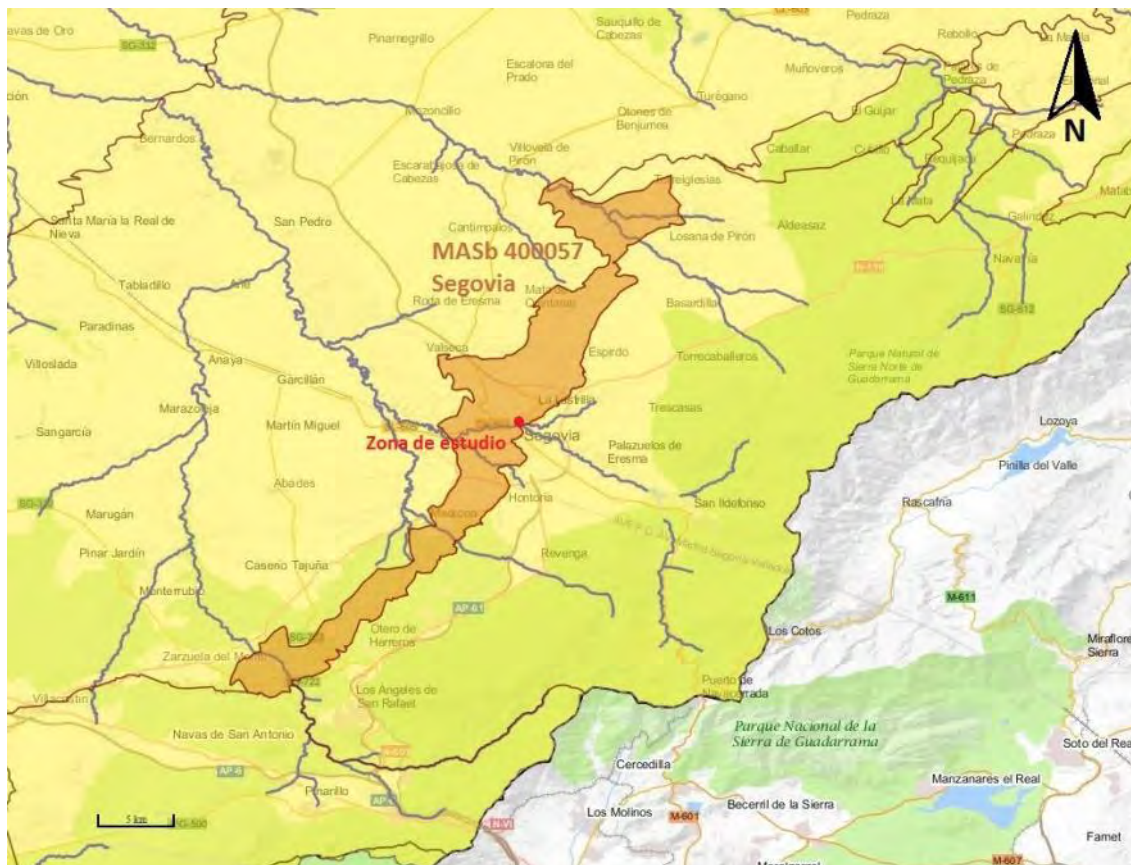


Figura 1.3.6. Masa de agua subterránea 400057-Segovia en la que se ubica la ciudad y la zona de estudio a considerar (fuente: servicios web / Visor de la Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

La MASb de Segovia limita, al Este y Sur, con la MASb Guadarrama-Somosierra, la cual marca el borde impermeable de la demarcación en este sector debido a los materiales paleozoicos de baja permeabilidad. El extremo suroeste queda marcado por la MASb Sierra de Ávila, de carácter igualmente impermeable. El límite oeste queda establecido por la cuenca terciaria del río Duero, donde se encuentran los materiales permeables de la MASb Cantimpalos; es hacia esta masa donde se produce la salida de aguas de la MASb de Segovia.

Se trata de una banda de edad fundamentalmente mesozoica dispuesta de forma discordante sobre los granitoides y gneises de las sierras de Somosierra y Guadarrama. Litológicamente y a grandes rasgos, está compuesta por secuencias de areniscas y arcillas con margas, dolomías y calizas (Cretácico superior-Paleoceno), con un buzamiento generalizado hacia el noroeste.

En cuanto al acuífero mesozoico, los materiales cretácicos apoyan sobre el zócalo y afloran a lo largo de los bordes de la cubeta, a veces incluso en el centro de la misma. Los tramos permeables arenisco-calizo-dolomítico y el dolomítico suprayacente constituyen un acuífero con unas características hidrogeológicas, por lo general, muy buenas.

En la zona de Madrona, localidad situada a unos 8 km al suroeste de la capital segoviana, se obtienen transmisividades comprendidas entre los 250 y 2000 m²/día, con caudales de 50 a 100 L/s. Sin embargo, las desviaciones son abundantes ya que en las formaciones existen variaciones litológicas y de espesor, en consecuencia los



resultados de los sondeos dependen de los tramos y espesores permeables y saturados atravesados.

La recarga se realiza generalmente por la infiltración del agua de lluvia y la descarga por bombeos, salidas laterales al 'terciario' y drenaje de ríos y manantiales.

Existe un flujo procedente de las formaciones mesozoicas de esta masa en sentido SE-NO, hacia las formaciones terciarias de la masa contigua (400.055-Cantimpalos).

La zona de estudio, concretamente en la Casa de la Moneda de Segovia, está enclavada sobre materiales aluviales y coluviales asociados al curso del río Eresma, dispuestos sobre los materiales cretácicos.

Los trabajos de campo correspondientes a los estudios geotécnicos realizados en el actual Museo de la Casa de la Moneda, los cuales han sido facilitados al IGME (GEOCISA, 2003 e INCOSA, 2007), han identificado estos niveles constituidos litológicamente por arenas, en ocasiones arenas arcillosas, de grano medio a grueso de tonalidades marrones e intercalaciones de gravas redondeadas a subredondeadas.

Son materiales a los que se le asocia una permeabilidad media a alta, aunque la permeabilidad de este nivel estará condicionada por su porcentaje de finos; en los niveles donde la proporción de finos aumenta, el carácter permeable disminuye.

A partir de los trabajos de campo de los informes previos, se ha detectado que la proporción de finos varía tanto en la vertical como en la horizontal, apareciendo tramos con muy baja proporción de finos intercalados con otros en los que ésta es mayor, reduciendo la permeabilidad.

En referencia al espesor de estos niveles, según la bibliografía consultada, no alcanzan valores importantes, del orden de 0,5 metros (GEOCISA, 2003). La presencia del nivel de agua debido a la influencia del río Eresma erosiona estos niveles, produciendo un lavado de finos del material, que puede producir asentamientos en las edificaciones apoyadas sobre los mismos o colapsos del terreno. De hecho, en los estudios geotécnicos facilitados, se localizaron asentamientos en los edificios.

1.3.3. Descripción de actuaciones

Topografía

Debido a las diferentes interrupciones constructivas de la zona donde se sitúa el sistema de canales del Museo de la Casa de la Moneda, se propuso al Excmo. Ayuntamiento de Segovia la nivelación topográfica de una serie de puntos marcados por los técnicos del IGME autores de este informe, para poder ajustar los cálculos de medida en los ensayos programados.

Las cotas topográficas con las que partimos en el presente informe han sido facilitadas por la empresa encargada de realizar la nivelación topográfica, las cuales han consistido en determinar la cota absoluta en:

- la base del fondo del canal de Herrera en distintos puntos a lo largo de toda su longitud, para determinar su pendiente.
- la cota absoluta de los ejes de las ruedas hidráulicas, para determinar con exactitud la altura máxima de admisión de la lámina de agua dentro del canal.



- la cota del canal de Sabatini, con la finalidad de determinar la diferencia de altura entre canales.
- la cota de la compuerta de entrada de agua al canal de Sabatini, para determinar, desde un punto fijo, la altura de la lámina de agua del río Eresma.
- diferentes puntos en las terrazas de la cafetería del Ingenio Chico.

Implicaciones hidrogeológicas del sistema de canales

El canal original se construyó (1583-1590) con una base de sillares, una capa de arena bajo un lecho de madera, culminando con un manto de gravas, siguiendo las directrices de uno de los arquitectos más influyentes de la historia de España, Juan de Herrera.

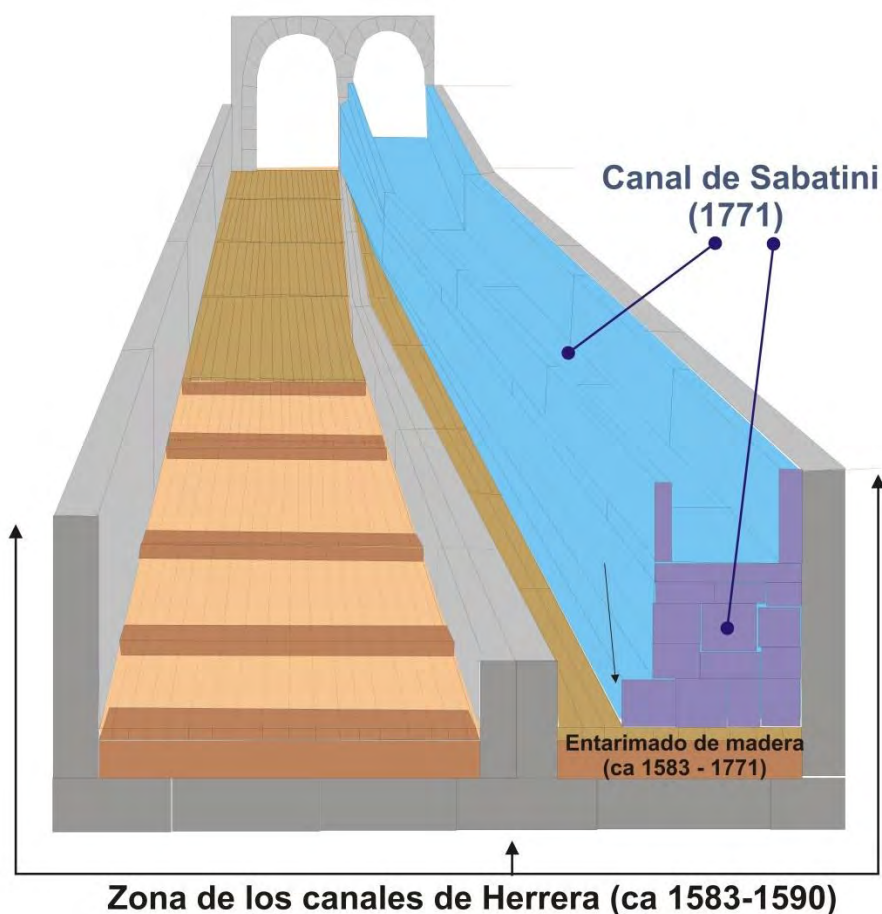


Figura 1.3.7. Reconstrucción del sistema de canales existentes en la actualidad (fuente: Díez Herrero et al., 2015).

Este entaramado que cubría el antiguo canal de roca fue sustituido en 1771, por una estructura de mampostería y sillería suprayacente, que se corresponde con el denominado canal de Sabatini, de menores dimensiones que el original. Por lo tanto, la infraestructura hidráulica incluye el azud, aliviaderos y el denominado canal de Sabatini (figura 1.3.7).



Se debe hacer mención en este caso, a que la construcción del canal de Sabatini implica la sobreelevación de la base del nuevo canal con respecto al antiguo (canal de Herrera), con objeto de obtener un mayor salto de agua capaz de accionar un mayor número de ruedas. Implícitamente, la sobreelevación de la base del canal conlleva la modificación del azud en altura, y la reorganización de la estructura de los canales antes de su entrada a la RCMS.

En esta situación, el azud tiene salida únicamente hacia el arco del canal de Sabatini (figura 1.3.8), condenándose el segundo de los arcos de admisión hacia el canal de Herrera original. La importancia de este aspecto se debe a las implicaciones hidráulicas que tendrán las modificaciones constructivas en el origen del problema, tal y como se explicará más adelante.

Para la protección del sistema hidráulico se instalaron compuertas en el exterior del canal de Sabatini, para permitir o impedir el paso de agua al interior del canal responsable del movimiento de las ruedas hidráulicas. Estas compuertas se abren parcialmente para dejar paso a un caudal variable en función de las necesidades puntuales (accionamiento de un mayor o menor número de ruedas). En los periodos en los que se prevén lluvias importantes que pueden originar episodios de avenida, la compuerta de acceso al canal de Sabatini queda cerrada (figura 1.3.10).

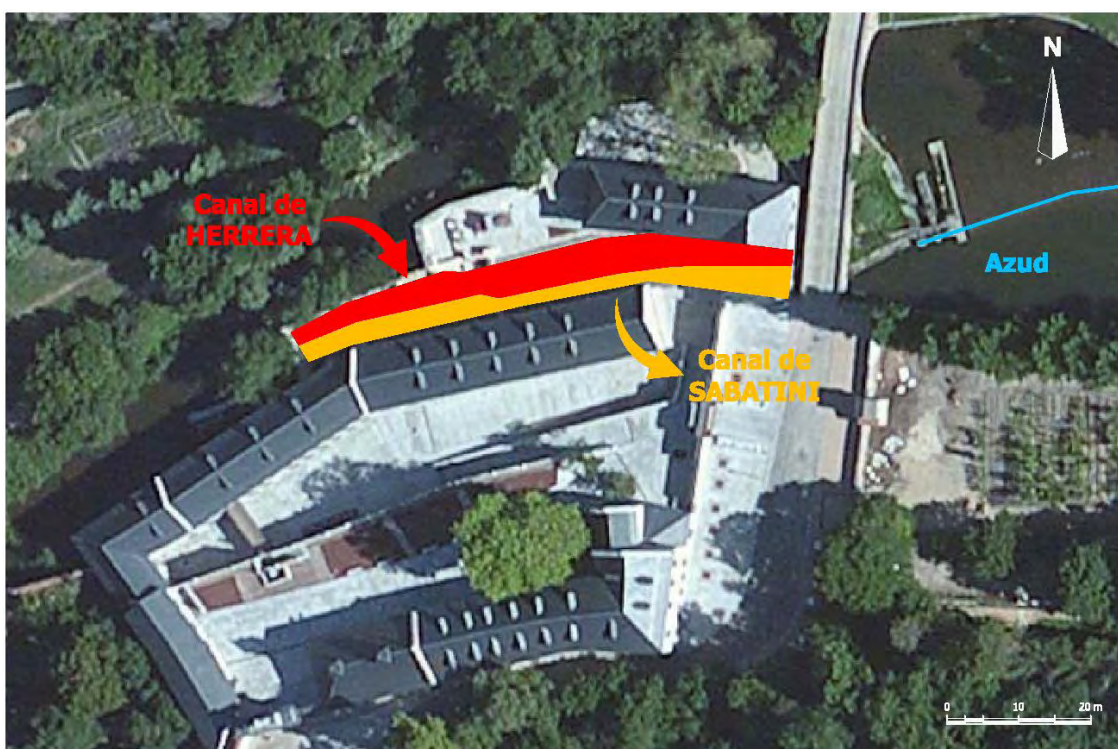


Figura 1.3.8. Situación de los canales de la RCMS (fuente: Visor Bing Maps de Microsoft 2016).

En la actualidad, a partir de la documentación existente y de los planos históricos, se ha reproducido el sistema de canales de madera, así como tres de las ruedas hidráulicas con sus saetines (figura 1.3.9), que ponen en funcionamiento los elementos reconstruidos de la maquinaria de la herrería (fuelle de la fragua, martinete y torno).



Figura 1.3.9. Sistema de canales existentes en la actualidad.

Actualmente el antiguo canal de Herrera no tiene acceso de agua, habiéndose cegado en su arco de entrada con sillares de granito y mampostería.

En la zona de evacuación de los canales se han instalado, igualmente, compuertas de apertura y cierre (canales de Sabatini y Herrera). Se pretende así cerrar las compuertas durante los periodos de avenida en el río Eresma, evitando los retornos de agua hacia el interior de los canales cuando la lámina de agua en el río se encuentra por encima de la cota de desagüe de los canales.

En planta, el sistema de canales (canal de Herrera y canal de Sabatini) cuenta con una superficie en torno a los 520 m², a los que habría que descontar los numerosos muros y compartimentaciones existentes en su recorrido. En líneas generales, su forma es alargada con su eje longitudinal, de dirección Este-Oeste, ligeramente arqueado como continuación de la curvatura del río Eresma unos metros más al norte del canal.

Posee una longitud máxima en su perfil longitudinal de unos 72 metros y una anchura variable entre 7,0 y 7,5 metros, teniendo en cuenta la distribución en planta del sistema de canales.

En la figura 1.3.10, se presenta la disposición actual de los diferentes canales, que han sido sombreados para su mejor visualización, diferenciándose los distintos muros de compartimentación de los mismos. Realmente, el canal de Sabatini, en su tramo final, se corresponde con el canal original (canal de Herrera), aunque en la figura se haya sombreado de color anaranjado, mejorando la comprensión visual.

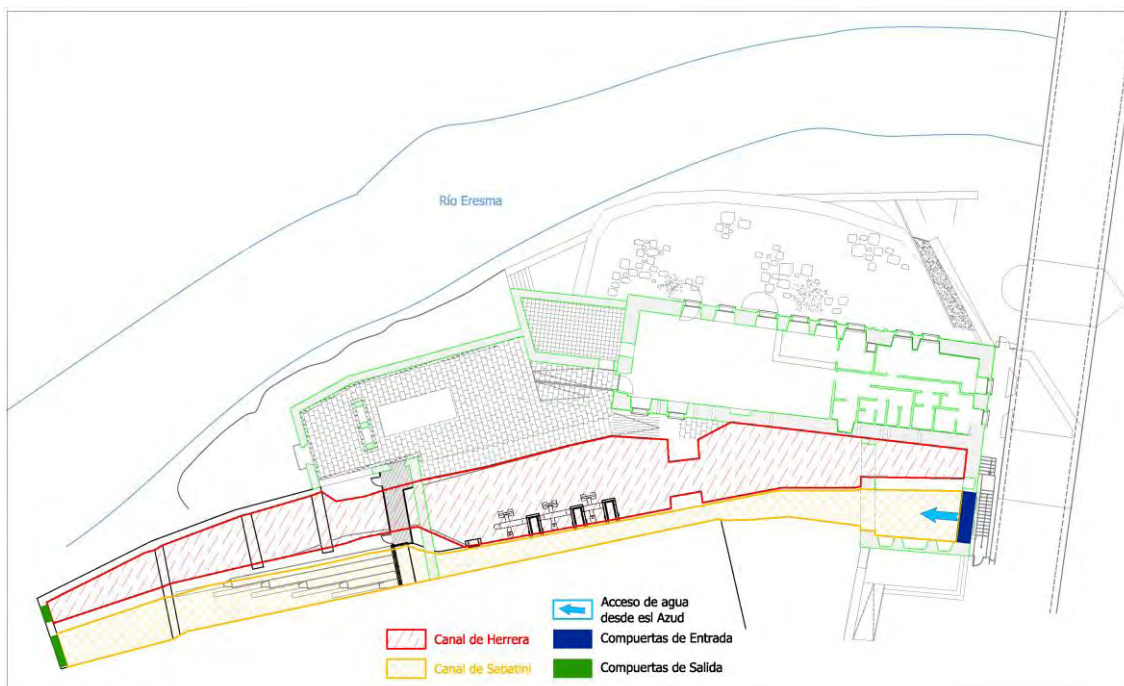


Figura 1.3.10. Vista en planta del sistema de canales actual (fuente: Excmo. Ayuntamiento de Segovia).

El funcionamiento actual de los mecanismos instalados en la Casa de Moneda de Segovia es el siguiente: en la zona de entrada de agua al interior del recinto, el río Eresma presenta una importante columna de agua retenida por efecto del azud existente inmediatamente aguas arriba; las compuertas de acceso al canal de Sabatini dan entrada a un caudal variable de agua, que circula por dicho canal hasta chocar contra las palas de las ruedas, impulsando su movimiento rotatorio y consiguiendo así el funcionamiento de los mecanismos existentes; el agua que acciona las ruedas se vierte sobre el canal de Herrera y circula por este hasta ser evacuada hacia el río Eresma, aprovechando la pendiente del canal.

En el reciente episodio de inundación de febrero de 2016, a pesar de que el río no alcanzó un caudal capaz de desbordar el cauce, se produjo el acceso de agua al edificio del Museo (Ingenio Grande) a través de los ejes de las ruedas, debido al ascenso del nivel de agua en el interior de los canales. La cota del eje de la rueda más baja se considerará, en adelante, como la cota límite que puede alcanzar la altura de lámina de agua en el interior de los canales para evitar su entrada en el edificio del Museo (Ingenio Grande). Se sitúa a 1,23 m de altura desde la base del canal de Herrera.

Existe un sistema de evacuación de agua desde el edificio de la cafetería (Ingenio Chico) hacia el Canal de Herrera en el margen del canal opuesto a las ruedas. En este sistema de evacuación de agua, cuando la altura de la lámina de agua en el canal es elevada, se convierte en un punto de acceso de agua al edificio de la cafetería. La admisión de agua dentro del canal se sitúa unos 82 cm por encima de la base del canal, más baja que la cota del eje de la rueda inferior anteriormente citada. Para la ejecución de la prueba de llenado no se tuvo en consideración esta altura límite, puesto que se cuenta con un sistema de retención de la entrada de agua utilizado en los periodos de previsión de crecidas del río.



Para evitar este problema, se instaló una primera bomba de achique en el tramo final del canal de Herrera (Apéndice V, reportaje fotográfico) con una capacidad nominal de bombeo de 74 L/s, que vierte el caudal evacuado directamente al río Eresma, al otro lado del muro. Recientemente se ha instalado una segunda bomba, de capacidad 67 L/s que, igualmente, vierte el agua evacuada al río. El accionamiento y parada de ambas bombas es automático mediante boyas flotantes, estando la segunda bomba colocada ligeramente más alta que la primera, de forma que es la primera bomba la que trabaja sistemáticamente y la segunda entra en funcionamiento cuando la capacidad de evacuación de la primera es insuficiente.

Trabajos realizados en el canal

Los días 25 y 26 de abril de 2016 se llevan a cabo diferentes ensayos de evaluación hidrogeológica para determinar la procedencia del origen del agua que accede al interior de los canales de la Casa de la Moneda. El acceso de agua al interior de los canales se produce con las compuertas cerradas, tanto de acceso como de salida a los canales, por lo que, en primera instancia, se pretende evaluar la posibilidad de un posible origen subterráneo del agua.

Como primera medida, se piensa en hacer un seguimiento del vaciado y llenado de los canales, para determinar la velocidad de acceso del agua al interior del canal de Herrera. En la mañana del día 25 de abril el escenario de partida es el siguiente:

- Las compuertas de acceso y salida de agua a los canales se encuentran cerradas desde los días previos. Se pretende llevar a cabo los ensayos partiendo de un estado de equilibrio hidráulico del interior del canal con el entorno.
- Las intensas lluvias que tuvieron lugar durante los días previos a la ejecución de los ensayos hizo necesario el accionamiento del sistema de achique por bombeo para evitar el ascenso de agua dentro de los canales. Se cuenta con un escenario de partida, por tanto, donde el canal de Herrera posee la mínima cota de agua que permite el achique mediante bombas de drenaje instaladas.
- Con el canal en su estado de mínima altura de agua debido al achique, se observa un aporte de agua constante en el antiguo acceso de agua al canal de Herrera, actualmente sellado por un muro de mampostería y sillares de hormigón. El agua accede al canal por la pared y por su base (figura 1.3.11).



Figura 1.3.11. Filtraciones de agua por la base del canal de Herrera.

Aforo en el canal de Herrera

Ante este escenario se opta, en primer lugar, por hacer una medición del caudal de agua que accede al interior del canal a partir de las filtraciones de agua detectadas. Para ello se hacen diferentes medidas de aforo con micromolinetes, en una sección regular dentro del canal por el que circula exclusivamente el agua procedente de las filtraciones (figura 1.3.12).

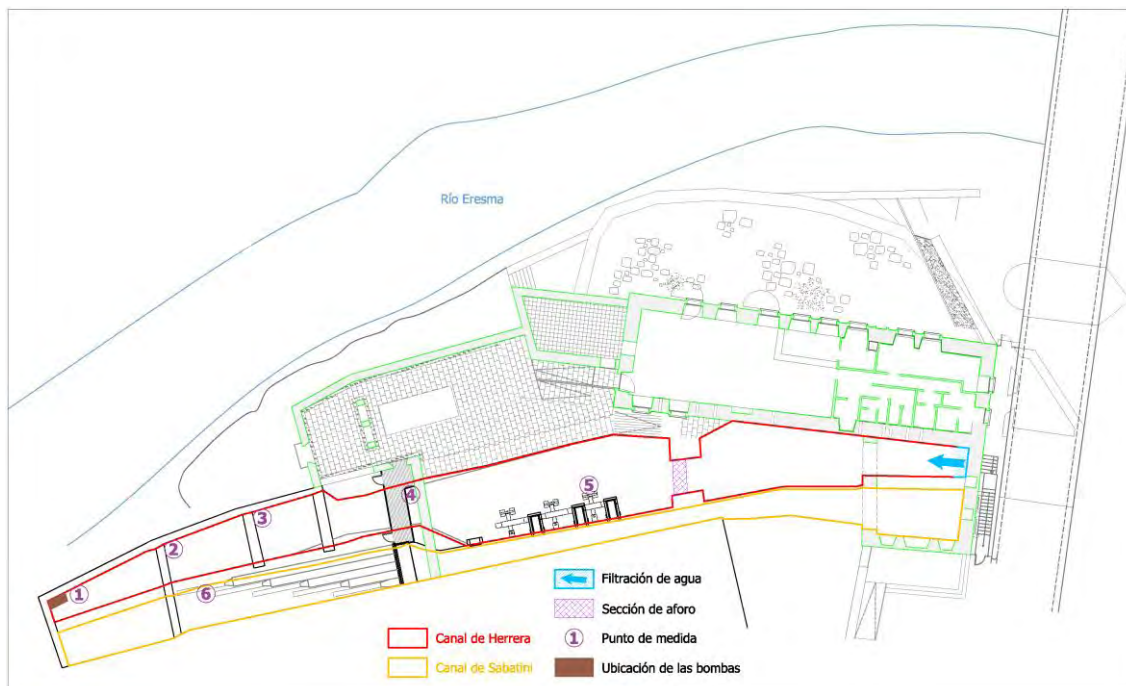


Figura 1.3.12. Ubicación de la entrada de agua por la base del canal de Herrera y situación de la sección de aforo.

Este caudal se mide en diferentes momentos para determinar posibles variaciones de la magnitud del caudal de entrada con respecto a las variaciones de los condicionantes externos. Con posterioridad a los días 25 y 26 de abril, se hace una nueva medición el día 8 de mayo para contrastar los resultados inicialmente medidos y comparar posibles escenarios diferentes.

Los resultados de las diferentes mediciones de caudal se recogen en la tabla 1.3.1.

Tabla 1.3.1. Resultados de los ensayos de aforo con molinete en el Canal de Herrera.

Fecha	25 abril 2016	26 abril 2016	8 mayo 2016
Hora	11:00 h	10:00 h	13:00 h
Q aforado en el Canal de Herrera (L/s)	50	40	50

Ensayo de llenado y vaciado de los canales

A continuación se realizó un ensayo de llenado, en el que se parte del escenario inicial, esto es, con la mínima cota de agua que permiten las bombas, y, un posterior achique mediante las bombas instaladas en el interior del canal.

El seguimiento de las pruebas se registró mediante las lecturas periódicas de altura de lámina de agua desde la base del canal, en 6 puntos en diferentes secciones, equipados con escalas limnimétricas (figuras 1.3.12 y 1.3.13).



Figura 1.3.13. Puntos de medida 1-2-3-4-5 en el ensayo de llenado y vaciado de los canales.

No existe posibilidad del control del caudal de achique durante la prueba de bombeo, dado que las dos bombas vierten directamente al río sin posibilidad de medida intermedia (Apéndice V, reportaje fotográfico). Se trabaja, por tanto, con las capacidades nominales de bombeo de cada una de ellas.

Para el ensayo de llenado del canal, se detiene el bombeo de achique en un momento determinado y se comienza a registrar la altura de lámina de agua en cada punto de medida a intervalos de tiempo regulares, tomando como punto de partida la hora de parada de las bombas.

En la figura 1.3.14 se refleja la altura de la lámina de agua en cada uno de los puntos de medida, durante la ejecución de las pruebas de llenado y posterior achique del canal. En el proceso de entrada de agua al canal, se adopta la premisa de que la altura de la lámina de agua no debe sobrepasar la altura del eje de la rueda pequeña, por lo que las bombas se vuelven a conectar para el ensayo de vaciado cuando la altura de la lámina de agua se aproxima a los ejes, con un margen de seguridad suficiente (minuto 140 desde el comienzo del ensayo).

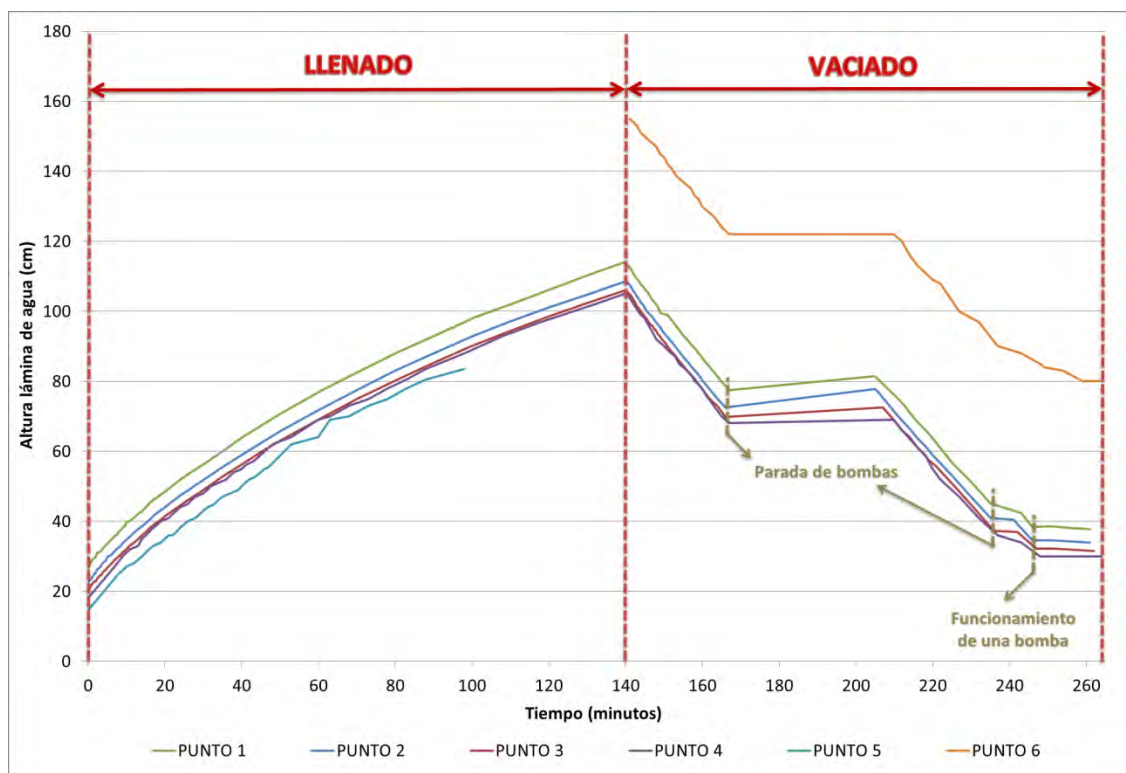


Figura 1.3.14. Registro de nivel de agua en los diferentes puntos de medida, durante el ensayo de llenado y vaciado del canal.

A partir del minuto 140 se conectan las bombas y comienza el periodo de achique o vaciado del canal, con un rápido descenso de la altura de agua en el interior de los canales.

En este punto del ensayo, se instala una nueva escala limnimétrica (punto nº 6), correspondiente al tramo final del canal de Sabatini (figura 1.3.12). Este tramo en realidad pertenece al canal de Herrera original, dado que el canal de Sabatini sobreelevado finaliza unos metros más arriba (ver Apéndice V, reportaje fotográfico).

A efectos constructivos este apéndice del canal estaría independizado del canal de Herrera por un muro de separación, y no tendría conexión efectiva con el canal de Sabatini. Sin embargo, visualmente se aprecia conexión hidráulica con el canal de Herrera. Se instala una escala limnimétrica en su interior para comprobar si el proceso de vaciado en el canal de Herrera se ve reflejado en él, y de qué modo lo hace.

La prueba de bombeo iniciado en el minuto 140 sufre varias interrupciones debidas al corte de alimentación eléctrica de las bombas, quedando reflejado en las gráficas de evolución en los minutos 167 y 238, momentos en los que la altura del agua en el canal vuelve a ascender. Una vez restablecido el sistema de alimentación, el descenso de lámina de agua continúa de forma descendente hasta el minuto 246 en el que la altura de lámina de agua hace que se pare una de las bombas, y el descenso se torne más lento debido al funcionamiento de una sola bomba.



Análisis de resultados

Aforos de caudal de entrada al canal

El caudal de entrada a los canales, aforado en diferentes días, ha permitido identificar una variación de la magnitud del caudal en función del momento de medida (50 L/s el 25 de abril de 2016 a las 11:00 h, y 40 L/s el 26 de abril de 2016 a las 10:00 h.).

Esta variación se puede correlacionar con los condicionantes hidráulicos que afectan al sistema en el momento de medición, concretamente con el caudal instantáneo que presenta el río Eresma en el momento de medida.

Para ello se han consultado los datos de caudal instantáneo publicados por el SAIH del Duero en las fechas y horas en cuestión, en la estación de aforo nº 2050 Río Eresma en Segovia, incluidos en la figura 1.3.15, en la que observa el rápido ascenso de caudal para posteriormente ir decreciendo de forma paulatina y continuada.



Figura 1.3.15. Datos del SAIH Duero (fuente: Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Duero).

En la tabla 1.3.2 se recogen los valores de caudal registrados por el SAIH y se incluye una estimación de caudal en la RCMS a partir de los valores registrados en la estación de aforos anterior, situada aguas abajo (valores en azul).

Esta estimación se hace por la circunstancia del rápido incremento de caudal durante los picos de crecida, a diferencia del lento decrecimiento de caudal durante las fases de bajada. El desfase de posición entre el punto de medida (estación de aforos nº 2050) y el canal de la RCMS podría inducir a un error en la estimación de caudal circulante por el río, durante la medida de caudal en el canal.



Para una correcta interpretación, se ha estimado un valor de caudal para la RCMS a partir de los caudales circulantes por la estación de aforos en las horas anterior y posterior al aforo en el canal.

Tabla 1.3.2. Comparativa entre los caudales aforados en el canal de Herrera y los caudales aforados en el río Eresma.

Fecha	Ud	25 abril 2016		26 abril 2016		8 mayo 2016	
Hora		11:00 h	12:00 h	10:00 h	11:00 h	13:00 h	14:00 h
Q en Estación Río Eresma-Segovia (SAIH)	m ³ /s	10,34	10,10	8,99	8,93	8,75	10,56
Hora		11:00 h		10:00 h		13:00 h	
Q en Casa de la Moneda (estimado)	m ³ /s	10,2		8,9		10,3	
Q aforado en el Canal de Herrera	L/s	50		40		50	

A partir de los resultados obtenidos se identifica una cierta correlación entre el caudal instantáneo circulante por el río Eresma y el caudal de entrada a los canales de la RCMS a través de los puntos de filtración identificados. Se dispone de pocos datos para establecer una correlación certera en cuanto a su forma y pendiente. No obstante, se propone una correlación lineal a partir de las medidas estimadas (valores en azul de la tabla 1.3.2). Esta supuesta tendencia lineal se representa punteada en rojo dentro de la figura 1.3.16.

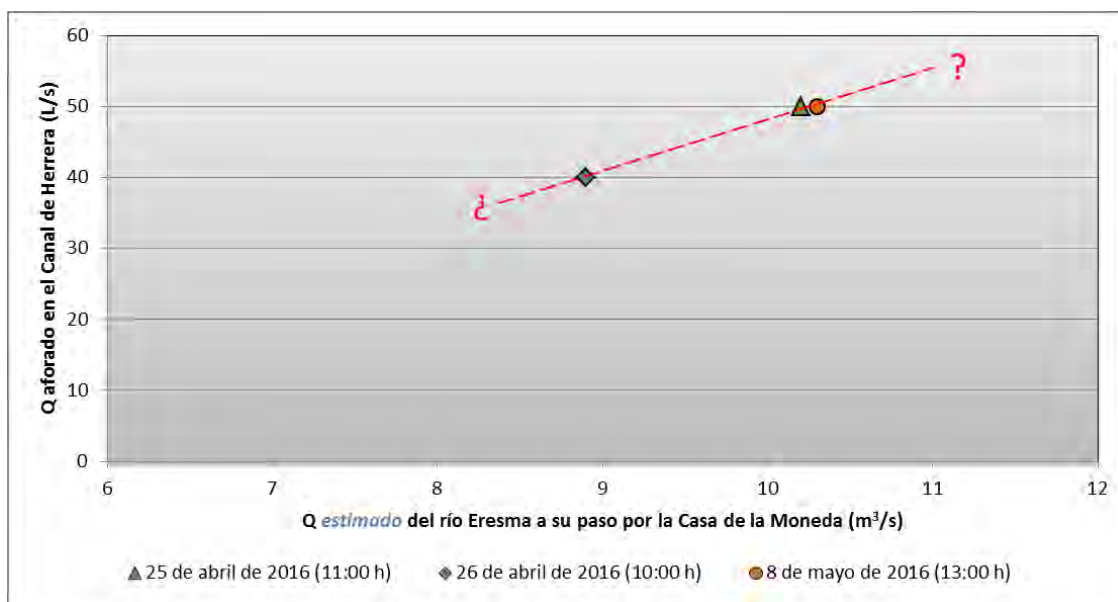


Figura 1.3.16. Correlación de datos de caudales estimados y calculados.



Ensayo de llenado y vaciado del canal

La prueba de llenado y vaciado del canal de Herrera ha permitido identificar el origen del problema en la entrada de agua al recinto de los canales de la RCMS.

Por un lado, del ensayo de llenado del canal se ha podido cuantificar la velocidad del ascenso de agua en su interior, una vez que su recinto se encuentra con las compuertas de acceso cerradas, tanto las de entrada como las de salida. En los 140 minutos en los que las bombas han estado paradas se ha cuantificado un ascenso medio de 86,7 cm.

A partir de los datos del estudio topográfico descritos al comienzo de este capítulo, se ha podido calcular la pendiente y forma de los diferentes compartimentos del canal, información fundamental para el cálculo de superficies y volúmenes de agua (figura 1.3.17). Una vez tenidos en cuenta todos los factores que afectan al canal (pendiente, irregularidades, morfología, muros, etc.), se obtiene que en el tiempo de llenado del canal (140 minutos y un ascenso de 86,7 cm) se acumulan 310,2 m³ de agua.

El caudal de entrada durante la ejecución del ensayo (25/04/2016 de 11:52 h a 16:16 h) procedente de las filtraciones de agua, es de 50 L/s medidos en la sección de aforo de la figura 1.3.17. Este caudal, acumulado durante un tiempo de 140 minutos, resulta un volumen de agua de 420 m³, que supone un 35% más del volumen acumulado en la práctica. Para la misma superficie y morfología de canal empleada en el cálculo anterior, se obtiene que para un volumen de entrada de 420 m³ el ascenso en el interior de los canales debiera ser de 113 cm.

De los cálculos anteriores se puede concluir que el caudal de agua procedente de las filtraciones identificadas en la cabecera del canal de Herrera (50 L/s el día de la prueba) genera un volumen de agua mayor que el realmente almacenado durante el ensayo.

Por tanto, el principal aporte de agua al canal procede de las filtraciones en el canal de Herrera. Cualquier otra posibilidad del origen de la entrada de agua (agua subterránea, filtraciones desde el canal de Sabatini, etc.) supondría un volumen despreciable con respecto al procedente de las filtraciones identificadas.

No todo el volumen de agua que entra en el canal queda retenido en el mismo. Se ha contabilizado una pérdida en torno al 35 %, ya sea a través de comunicaciones con el río a través de los muros, o bien de forma subterránea a través del terreno aluvial sobre el que se asienta el canal.

Por otro lado, y no menos importante, durante el ensayo de llenado del canal se ha tenido la posibilidad de registrar la diferencia de alturas entre la lámina de agua en el interior del canal y la lámina de agua del río Eresma en la zona de las compuertas de salida (figura 1.3.17 y Apéndice IV). De esta forma, se constata que al inicio del ensayo (mínima columna de agua en el interior del canal, 910,61 m s.n.m.) la altura de lámina de agua del río Eresma está por encima de la altura del agua en el canal. Tras los 140 minutos de la prueba de llenado, la lámina de agua en el canal asciende hasta su altura máxima (cota 911,47 m s.n.m.), quedando por encima de la altura de la lámina de agua en el río (910,95 m s.n.m.).

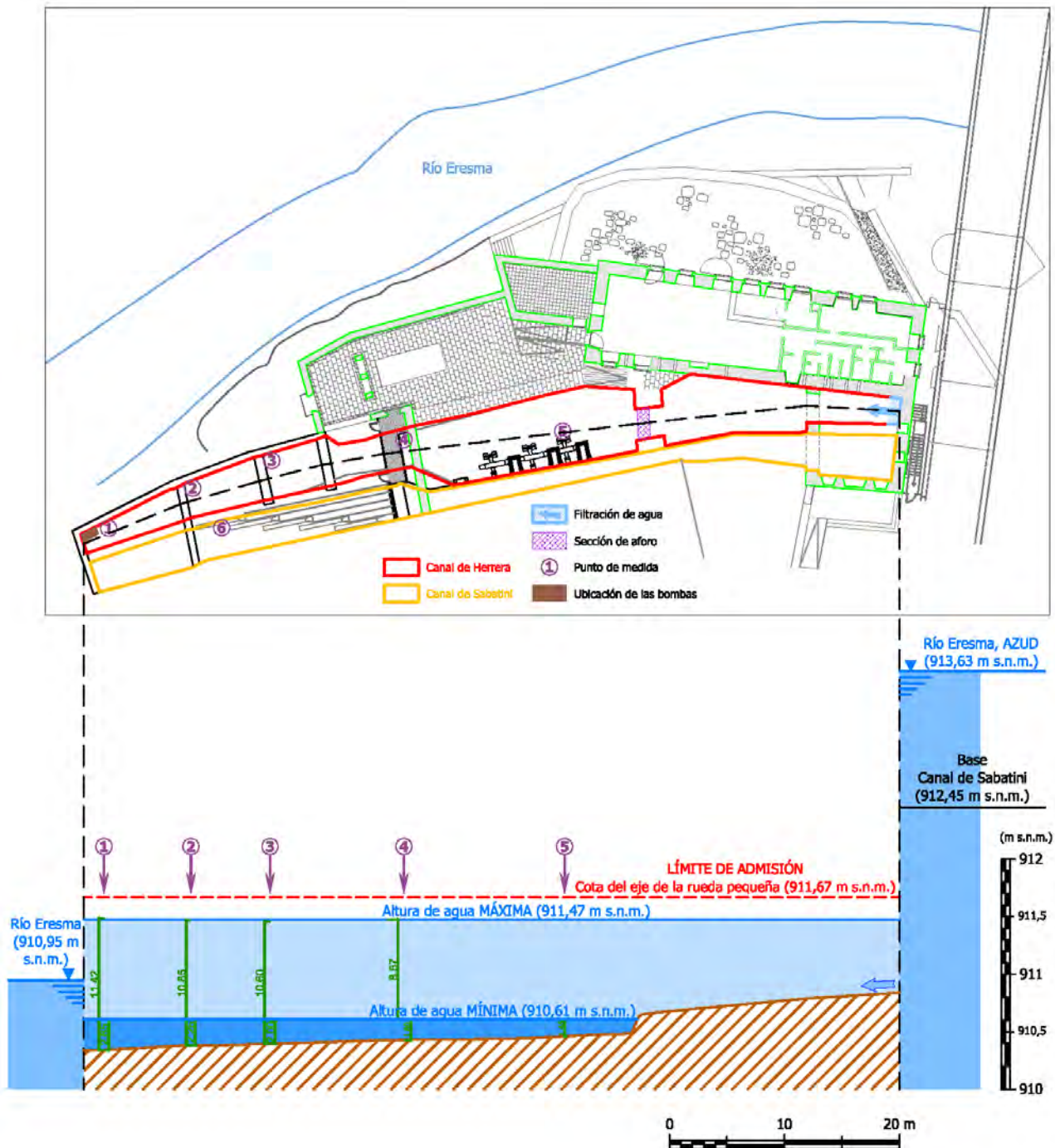


Figura 1.3.17. Perfil longitudinal en el canal de Herrera (fuente: Excmo. Ayuntamiento de Segovia).

Puesto que la procedencia del agua de entrada al canal se ha limitado a las filtraciones de agua localizadas en la cabecera del canal de Herrera, y que el nivel de agua dentro de este alcanza una cota que rebasa la cota de lámina de agua del río Eresma, se puede afirmar que el agua de las filtraciones procede del azud de la RCMS, en el que la altura de lámina de agua en el día de la prueba es de 913,63 m s.n.m.



Esta altura supone una diferencia de potencial hidráulico de 3 metros con respecto a la cota de la lámina de agua en el canal de Herrera al comienzo de la prueba (910,61 m s.n.m.).

La filtración de agua se produciría a través de los materiales empleados en el cierre y sellado del canal de Herrera original para reconducir el agua hacia el canal de Sabatini, más moderno. Según la información facilitada por personal técnico del Excmo. Ayuntamiento de Segovia, el canal de Sabatini ha sufrido una modificación reciente (agosto de 2015), en un intento de impermeabilizar una posible entrada de agua a través de su estructura. Esta modificación consistió en la impermeabilización, mediante tela asfáltica, del lecho y márgenes del canal de Sabatini, desde el muro del complejo del Museo (compuertas del canal) hasta una distancia de 1 metro aguas arriba de los pilares del puente.

A juicio de los autores de este informe, y sin posibilidad de comprobación de lo afirmado, la impermeabilización de este tramo del canal de Sabatini no ha hecho sino trasladar las filtraciones aguas arriba, redirigiendo y concentrando su dirección de avance hacia el muro y base del lecho del canal de Herrera original (figura 1.3.11).



1.4. CONCLUSIONES

Una vez analizada la problemática de las inundaciones en la Real Casa de la Moneda de Segovia, desde el punto de vista de las inundaciones pretéritas y la inundabilidad por desbordamiento del río Eresma, podrían extraerse las siguientes conclusiones:

- ✓ El registro geológico y geomorfológico de depósitos y marcas nos permite deducir que el río Eresma ha tenido importantes eventos de avenidas e inundaciones en sus márgenes desde hace, al menos, 60.000 años, y hasta la actualidad.
- ✓ El registro documental de inundaciones históricas nos permite concluir que, desde inicio del siglo XIV hasta la actualidad, se han producido al menos una treintena de eventos de avenida e inundación reseñables, con periodos de máxima concentración de eventos (finales del siglo XVI y principios del siglo XVII) y otros aparentemente con menos frecuencia (primera mitad del siglo XX).
- ✓ El registro dendrocronológico en elementos constructivos de la RCMS permite corroborar los efectos de las avenidas e inundaciones históricas que afectaron al edificio entre los siglos XVI y XVIII.
- ✓ El análisis hidrometeorológico de los eventos recientes de inundación permite establecer patrones comunes en el desencadenamiento a partir del paso sucesivo de frentes atlánticos y la influencia de la fusión repentina de la nieve en la cuenca; así como el relevante papel de la gestión de los desembalses de la presa del Pontón Alto.
- ✓ El análisis estadístico de los valores extremos de una docena de series de caudales máximos ha permitido ajustar los cuantiles para diferentes periodos de retorno, que para la serie completa actual adoptan valores de: $Q_{T10} = 73 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{T50} = 135 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{T100} = 172 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{T500} = 292 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ✓ La modelación hidráulica de los caudales en condiciones unifásicas, unidimensionales en régimen gradualmente variado permite comprobar que los caudales de periodo de retorno de tan solo 10 años, inundan las dependencias del Ingenio Chico y alcanzan el patio bajo de la RCMS; y la avenida de 50 años cubre prácticamente toda la llanura de inundación y fondo del valle.
- ✓ El régimen de calados y velocidades de la simulación de caudales elevados, por encima de 100 años de periodo de retorno, permiten ver el importante papel del puente de San Marcos, generando una curva de remanso aguas arriba y un pico de aumento de velocidades aguas abajo. Las condiciones de zona peligrosa para las personas se alcanzan en todo el tramo tanto en el canal como en la margen derecha del río.
- ✓ El embalse del Pontón Alto ha supuesto un efecto en la reducción de los caudales de los cuantiles, especialmente patente para los valores de mayor periodo de retorno, con plasmación en calados y velocidades sustancialmente menores en la situación actual respecto a las registradas en la situación pre-embalse.



- ✓ Los eventos de inundación recientes, como los acontecidos en 2013 y 2014, y los de menor magnitud de 2015 y 2016, han servido para calibrar y validar los modelos y resultados, concretándose en una excelente correlación entre las zonas inundables y los calados, con respecto a la realidad observada.
- ✓ Las cartografías de zonas inundables de este estudio respecto a las obtenidas en el SNCZI tienen muchos elementos en común, pero las diferencias se asocian al empleo de diferentes topografías para la geometría del cauce y de distintas aplicaciones en la modelación hidráulica.

Las conclusiones más relevantes en relación a las filtraciones de agua en el interior del canal de la RCMS serían:

- ✓ Se identifican, de forma muy localizada, varios puntos en la zona de cabecera del canal de Herrera, a través de los cuales se produce la entrada de agua de forma constante al interior del canal. El día 25 de abril de 2016 la entrada de agua se cuantifica en 50 L/s.
- ✓ Se ha comprobado, en medidas posteriores, que el caudal de entrada de agua a partir de estos puntos varía a lo largo del tiempo, probablemente en función del caudal puntual de agua circulante por el río Eresma. Los trabajos realizados hasta la fecha apuntan a la existencia de una relación directa entre el caudal puntual del río Eresma y el caudal de filtración de agua al interior de la RCMS. Resultaría recomendable llevar a cabo un seguimiento sistemático de pares de medidas $Q_{\text{aforado canal}} - Q_{\text{estimado río Eresma}}$ para verificar esta hipótesis por completo.
- ✓ Se comprueba que la entrada de agua al interior del canal de la RCMS procede, prácticamente en su totalidad, de las filtraciones de agua identificadas. No existen, o son irrelevantes, entradas de agua a partir de otros orígenes, entre ellas las de tipo subterráneo.
- ✓ El volumen de agua procedente de las filtraciones es mayor del realmente acumulado en el interior del canal. Se puede afirmar que, parte del agua que entra, se pierde por otras vías (filtraciones a través muros hacia el río o, de forma subterránea, hacia el terreno aluvial).
- ✓ La altura de agua que se alcanza en el interior del canal (una vez que se deja ascender libremente) es superior a la altura de lámina de agua del río Eresma al otro lado de los muros. El recinto de canales de la RCMS actúa a modo de vaso comunicante (con pérdidas), cuya altura de agua se tiende a igualar con la altura piezométrica de la lámina de agua en el azud de la RCMS (diferencia de potencial de hasta 3 metros).
- ✓ La filtración de agua se produciría en el exterior de la RCMS, bajo el terreno aportado para el cegado del antiguo canal de Herrera posteriormente a la construcción del más moderno canal de Sabatini. La reciente impermeabilización de un tramo del canal de Sabatini podría haber concentrado y/o redirigido las filtraciones hacia la cabecera del canal de Herrera, punto donde se aprecian las filtraciones actuales.
- ✓ Por último, con respecto a la cuestión inicial a partir de la cual se planteaban los trabajos hidrogeológicos, la suficiencia o no de la capacidad de las bombas existentes para evacuar el caudal de entrada de agua en el recinto de canales de la RCMS, cabe decir lo siguiente:



-
- Con respecto a las mediciones de abril de 2016 de 50 L/s de caudal de entrada al recinto, las dos bombas actuales con capacidad de 74 y 67 L/s respectivamente, se puede afirmar que la capacidad es totalmente suficiente, superando en un 280% la capacidad de bombeo con respecto al caudal de entrada.
 - Tal y como se ha comprobado, existe una relación entre el caudal de entrada al canal de la RCMS y el caudal puntual circulante por el río Eresma. Esta relación se ha comprobado con caudales del río Eresma de en torno a 9-10 m³/s. No se conoce como afectaría a esta relación caudales mayores para el río Eresma, habida cuenta que en las avenidas de los últimos años se han registrado caudales punta de hasta 80 m³/s. Se desconoce, por tanto, cuanto puede variar el caudal de entrada en función del caudal del río.
 - Tampoco se puede afirmar que para unas condiciones de caudal del río Eresma dadas, el caudal de filtración de agua hacia la RCMS se mantenga constante en el tiempo. Dependerá del estado de los materiales a través de los que se filtra el agua hasta la pared del canal (lavado de finos, propiedades geotécnicas, etc.).
 - Por todo esto, la afirmación acerca de la suficiencia o no de la capacidad de las bombas con respecto a la entrada de agua (actual o futura), es muy relativa, si bien la capacidad actual supera ampliamente los caudales de agua de entrada registrados.



2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA PREVENCIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIONES EN LA REAL CASA DE LA MONEDA DE SEGOVIA

Una vez analizada la problemática de las inundaciones en la RCMS, y realizado un exhaustivo análisis de la inundabilidad, tanto la asociada al desbordamiento del río Eresma como la asociada a las filtraciones subsuperficiales en el interior del canal, se considera oportuno apuntar, aunque sea sin un desarrollo en profundidad, posibles medidas de mitigación del riesgo o, al menos, de minimización de los daños asociados a las inundaciones.

2.1. RECOMENDACIONES GENERALES

Con carácter general se formulan a continuación una serie de propuestas, en su mayor parte administrativas y normativas, que podrían minimizar el riesgo y reducir los daños a medio y largo plazo.

2.1.1. Coordinación institucional entre la Confederación Hidrográfica del Duero y el Ayuntamiento de Segovia en materia de gestión del riesgo de inundación

Dado que la gestión de la RCMS corresponde al Excmo. Ayuntamiento de Segovia, a través de las Concejalías de Patrimonio Histórico y Turismo; y por otro lado la gestión del riesgo de inundación corresponde a la Confederación Hidrográfica del Duero (dependiente de la Dirección General del Agua, MAGRAMA, Gobierno de España), sería deseable una coordinación institucional y un intercambio de información fluido y normalizado entre ambas instituciones.

Esta coordinación, que incluso se podría plasmar en un convenio marco de colaboración con su clausulado, se concretaría en herramientas preventivas tan importantes como el plan de gestión del riesgo de inundación que se elaborará en los próximos años para este tramo fluvial que, al estar declarado ARPSI por la CHD en el Plan de Cuenca, precisa la adopción de medidas específicas de predicción, prevención y corrección.

Dicho plan de gestión del riesgo de inundación elaborado y ejecutado por la CHD tiene que ser acorde y compatible con el plan general de ordenación urbana de Segovia, con los planes parciales y especiales que afecten a la zona (como el plan especial de áreas históricas, PEAHIS), incluso con la normativa y reglamentación municipal en materia de medio ambiente, arbolado urbano, gestión de residuos, etc.

Dentro de dicho plan de gestión del riesgo de inundación para esta ARPSI, a la vista de los resultados del análisis de inundabilidad, se sugiere potenciar determinadas medidas que se estiman con una mejor relación coste-beneficio, como:



- *Medidas preventivas no estructurales:* aumento de la percepción y educación en el riesgo para los técnicos municipales y el personal encargado del mantenimiento y explotación de la RCMS. Se trata de ajustar la percepción del riesgo al riesgo real y enseñar a los agentes más implicados a convivir con el riesgo. Se debe asumir que, a pesar de que se adopten medidas severas de índole estructural, el riesgo cero no existe y determinadas zonas del complejo de la RCMS se van a continuar inundando con relativa alta frecuencia. Por lo tanto, el personal tiene que estar concienciado, preparado para actuar, y convivir con esta situación con normalidad, como parte de la dinámica de la gestión del edificio.
- *Medidas estructurales puntuales:* se podrán adoptar medidas infraestructurales concretas, puntuales y para elementos y situaciones consolidadas y que requieren protección específica, pero siempre coordinadas con el PGOU, el PEAHIS y los planes del Servicio de Parques y Jardines (Concejalía de Medio Ambiente), que deberá emitir un informe favorable de cada actuación diseñada por la CHD.

2.1.2. Articulación de un protocolo ágil de comunicación en emergencias entre la Confederación Hidrográfica del Duero y el Ayuntamiento de Segovia

Se propone mejorar los mecanismos de comunicación y coordinación entre el sistema de avisos y alertas durante eventos de crecida y avenida que puedan dar lugar a inundaciones. Para ello, siguiendo los protocolos de aviso de los planes nacional, autonómico (InunCyL) y de ámbito local (Segovia), se trata de modernizar los canales de comunicación, complementando las vías tradicionales (mensaje por fax, llamadas a teléfonos fijos...) por otras más modernas y versátiles (llamadas a teléfonos móviles, mensajes de correo electrónico, mensajes SMS, mensajes de whatsapp, etc.). De esta forma se evita que si los eventos ocurren en días no laborables o en horarios fuera del horario de oficina habitual de las dependencias públicas (como los eventos de 2013 y 2014), la información pueda llegar de forma efectiva a los destinatarios.

Especialmente importante es esta modernización de los canales de comunicación entre las administraciones en el caso de los avisos por desembalse del Pontón Alto durante eventos de emergencia; y en la transmisión de los datos en tiempo real procedentes del sistema automático de información hidrológica (SAIH). Sería deseable que esta transmisión de información sea fluida y en tiempo real, evitando que los gestores municipales tengan que consultar la página web del SAIH y realizar las interpretaciones y predicciones de los datos, sin tener la formación para ello. Además, así se evitan los desfases entre la aparición de los datos en la web del SAIH y la situación de la emergencia, que en ocasiones tiene una demora de varias horas; como ocurrió en el evento de 2016, donde la web mostraba como última información la correspondiente a las 07:00 h, mientras que la hora real eran las 10:30 h, o sea, 3 horas y 30 minutos de desfase.



2.1.3. Adecuación del plan de explotación de la presa del Pontón Alto para optimizar su papel en la laminación de avenidas y crecidas

Según el proyecto de construcción y el plan de explotación de la presa y embalse del Pontón Alto, el uso exclusivo de la presa es el abastecimiento de agua a Segovia y su alfoz. Esta circunstancia conlleva que otros usos no consuntivos, como la laminación de avenidas para evitar o minimizar inundaciones, ni siquiera tengan cabida en la gestión de la presa. Por ello, aunque el análisis hidrometeorológico de los eventos recientes (2013 y 2014) demuestran que se conocía con antelación que la previsión meteorológica pronosticaba abundantes e intensas precipitaciones con hasta una semana de antelación, no se pudo gestionar la capacidad de laminación del embalse realizando desembalses previos para generar un margen de maniobra. Se priorizó mantener la presa llena en prevención del posible desabastecimiento de Segovia, frente a maniobrar con la capacidad de la presa y conseguir laminar la punta de la crecida. Cuestión ésta que se ha demostrado muy efectiva cuando se maneja con racionalidad, por ejemplo, en el caso de la presa de Puentes en las avenidas del río Guadalentín, en Lorca.

Por lo tanto, si se quiere emplear esta gestión de los desembalses para tener capacidad de laminación, lo primero que habría que solicitar sería un cambio de uso de la presa y embalse del Pontón Alto para que, manteniendo el uso consuntivo de abastecimiento a Segovia en primer lugar del orden de prelación, admita otros usos, entre ellos la laminación de avenidas y crecidas. Para conseguir racionalizar esta gestión con dos usos perfectamente compatibles, sería fundamental articular unos protocolos entre los responsables de explotación de la presa en la sede de la CHD en Valladolid y el operador de presa; reemplazando al responsable de explotación la sala de emergencias del SAIH, donde los sistemas de apoyo a la decisión y sistemas expertos pueden ayudar a la operación de la presa.



2.2. RECOMENDACIONES ESPECÍFICAS

Además de las recomendaciones generales antes expuestas, existen otras medidas de mitigación del riesgo o minimización de daños de pequeña entidad (en cuanto a presupuesto y plazos de ejecución), que pueden tener alta efectividad a corto plazo.

2.2.1. Mejora del sistema de drenaje durante crecidas

Uno de los principales problemas que generan que caudales, incluso bajos asociados a pequeños periodos de retorno, lleguen a inundar algunas dependencias de la RCMS, es la escasa capacidad de drenaje del río Eresma en el tramo a su paso junto a la RCMS. Para aumentar la capacidad de drenaje, dado que el caudal es el producto del área de la sección transversal por la velocidad, cabría realizar dos tipos de actuaciones: incrementar la sección transversal del cauce o aumentar la velocidad del flujo.

Actuaciones para incrementar la sección transversal

El incremento de la sección transversal del cauce (aumento del área mojada o efectiva para la evacuación de caudales) puede conseguirse con dos tipos de actuaciones: dragado en el lecho y/o ensanchamiento de márgenes (con eliminación de obstáculos).

La primera medida ha sido hartamente discutida por sus efectos ambientales, problemática técnica y discutible ratio coste-beneficio; véase al efecto las consideraciones de Ollero (2013) o el Apéndice VI.

Pero lo que sí que se puede mejorar es la capacidad de drenaje mediante el ensanchamiento de la sección. Dado que determinados elementos que suponen obstáculos y reducen el área de la sección transversal son bienes de interés cultural y tienen protección patrimonial (Ingenio Chico, Ingenio Grande, puente de la Casa de la Moneda...), la actuación debe centrarse en otros elementos sin interés patrimonial.

Es el caso del propio muro perimetral de la terraza de la cafetería del Ingenio Chico, que si bien evita la inundación de la cafetería para caudales bajos, para caudales medios y altos supone un estrechamiento de la sección transversal que sobre eleva la lámina de agua y supone que alcance los huecos (ventanas, canales) de otras dependencias de la RCMS. Por ello, en el futuro se sugiere que se replantee el trazado y grado de permanencia de este muro perimetral de la cafetería, proponiendo alternativas imaginativas como un muro temporal portátil de elementos modulares prefabricados, que pudiera instalarse en verano-otoño, y desmontarse en invierno-primavera para posibilitar la circulación del agua por la superficie de la terraza, aumentando la anchura de la sección y por lo tanto rebajando la altura de la lámina de agua. También se puede pensar en retranquear el muro, aproximándolo más al edificio del Ingenio Chico, y generando una terraza en dos sectores, una tras el muro y otra abierta al río.

Algo semejante ocurre con la nueva mampara de cristal blindado que se ha añadido en la parte superior del muro perimetral de la terraza. Podría ser reemplazado por elementos móviles o portátiles, que se pudieran instalar o desmontar según fuera la previsión de caudales circulantes, permitiendo incluso la inundación intencionada de la terraza para rebajar la altura de lámina de agua.



También se puede incrementar la capacidad de drenaje aumentando la sección de circulación aguas abajo, evitando así el efecto de la curva de remanso que, para determinados caudales, produce el aumento del nivel de la lámina de agua aguas arriba, y la posible inundación de las dependencias de la RCMS. Es el caso del puente de San Marcos, cuyo efecto para altos caudales con elevados periodos de retorno ha quedado demostrado en el modelo hidráulico. Por ello, tal y como se ha sugerido en reiteradas ocasiones en los medios de comunicación desde diversas instancias, sería necesario adecuar el drenaje en el ojo derecho del puente de San Marcos, rebajando el relleno por el que discurre el camino peatonal o sustituyendo el camino por una pasarela volada en este tramo, para que incluso para bajos caudales, este ojo del puente sea operativo.

Actuaciones para aumentar la velocidad del flujo

Por lo que respecta al aumento de la velocidad, se puede conseguir igualmente a través de dos actuaciones: aumentar la pendiente longitudinal del lecho del canal y/o disminuir la rugosidad del lecho y márgenes.

El aumento de la pendiente longitudinal del lecho no es viable en este tramo de río, ni siquiera con dragados puntuales, dado que existen dos puntos cuya cota no se puede modificar, uno aguas arriba (base del azud de la RCMS) y otro aguas abajo (tramo encajado excavado de la corta artificial de meandro de La Fuencisla; ver figura 1.1.1). Por ello, aunque se dragase el cauce en el tramo por el que circula en las proximidades de la RCMS, el aumento de velocidad se reduciría aguas abajo al llegar al lecho rocoso; a parte de los posibles efectos de la erosión remontante en la cimentación del azud; y de la necesidad de continuas labores de reexcavación por la capacidad del río para regularizar su perfil con los sedimentos que transporta (ver Apéndice VI).

Tampoco es sencillo reducir la rugosidad del lecho y las márgenes, disminuyendo la fricción del agua con los elementos existentes (material detrítico, vegetación, etc.). Como se ha demostrado en muchos casos de estudio, la eliminación de la vegetación arbórea no consigue el efecto deseado, o no al menos con la magnitud pretendida; aparte de muchos otros efectos ambientales no deseados (erosión de márgenes, deslizamiento de orillas, etc.). Sí que es conveniente eliminar los obstáculos o acumulaciones de objetos no naturales (restos de obras y escombros) o restos de vegetación muerta y acumulada por eventos de avenida; pero sin que ello suponga un dragado o alteración del sustrato del cauce.



2.2.2. Gestión de la inundación en el interior del canal

En relación a las conclusiones establecidas en este informe, y a las circunstancias hidráulicas que afectan al entorno de los canales de la RCSM, cabe hacer las siguientes consideraciones y/o recomendaciones:

- ✓ Se recomienda hacer un seguimiento periódico del caudal filtrado en el canal de Herrera, en la medida de lo posible en la misma sección de aforo empleada para la medición de caudales en este trabajo. Los resultados se deben correlacionar con el caudal del río Eresma en el momento de la medida. Se pretende así determinar la relación existente entre ambas variables que permita predecir el caudal de entrada de agua al canal, y consecuentemente la evaluación de la capacidad suficiente de las bombas.
- ✓ El sistema de gestión del canal de la RCMS podría mejorarse en base a los conocimientos que se han adquirido a partir de los trabajos realizados. Cabe destacar lo siguiente:
 - Se tomará como cota de lámina de agua máxima admisible la cota del eje de la rueda más baja (911,67 m s.n.m.), con un determinado margen de seguridad.
 - El sistema de canales de la RCSM actúa como un vaso comunicante con el nivel del azud, en el momento que se encuentran cerradas sus compuertas de entrada y salida de agua. Con las compuertas de salida abiertas, siempre que la cota de lámina de agua del río no se aproxime a la cota límite (911,67 m s.n.m. o a su margen de seguridad), el agua del canal no rebasará nunca la cota de lámina de agua del río. Sería conveniente, por tanto, disponer de un punto de medida de lámina de agua en el río, ahorrándose horas de bombeo innecesarias.
 - Se entiende que el sistema de bombas sólo es efectivo con el canal cerrado en ambos extremos. En este caso, si se sube la posición de las bombas a cotas más próximas a la cota límite de referencia, el tiempo de funcionamiento de estas se podría reducir considerablemente, con el consiguiente ahorro de energía eléctrica y horas operativas de bombeo.
- ✓ Se recomienda incorporar un sistema de avisos automatizado, de forma que cualquier fallo en el sistema (energía eléctrica, funcionamiento de bombas, estado de compuertas, etc.) pueda ser detectado con suficiente tiempo de reacción y/o disponer de medidas complementarias.
- ✓ Por último, como medida de carácter hidráulico a estudiar, en caso de ser viable, se propone la colocación de una tubería de diámetro adecuado, conectada a uno de los muros del extremo final del canal de Herrera, equipada con sistema de apertura y cierre. La tubería podría apoyarse sobre el lecho del río, y quedar sumergida bajo el agua para evitar su impacto visual, aguas abajo de la Casa de la Moneda. Se pretende que su extremo quede lo más alejado posible del recinto de la RCMS (en este punto el río tendrá una cota topográfica significativamente menor que la cota topográfica del canal). Con el sistema de compuertas cerrado, esta tubería actuará de drenaje por gradiente hidráulico, sin necesidad de funcionamiento de bombeo automatizado, y con un caudal de evacuación directamente proporcional al diámetro de la tubería. Este sistema podría reducir el empleo del bombeo eléctrico, bajo ciertas condiciones y, a la larga, supondría un ahorro económico considerable.



2.2.3. Otras recomendaciones menores

A continuación se enumeran, de forma resumida, otras recomendaciones o medidas menores para la mitigación del riesgo por inundaciones, no por ser menos efectivas o eficientes, sino por la reducida entidad y presupuesto que supone su adopción o implantación.

Instalación de limnimarcas de eventos pretéritos

Se recomienda la instalación de limnimarcas del nivel alcanzado por las aguas en el momento de la punta de la avenida de eventos pretéritos, tanto recientes (inundaciones de 2009, 2013 y 2014), como históricos que puedan llegar a deducirse o calcularse (por ejemplo, para avenidas como la de 1733).

Para ello bastaría con ubicar en los muros, tabiques o en postes verticales, placas o inscripciones grabadas o pintadas, indicando el nivel y la fecha del evento. Se recomienda buscar diseños y materiales acordes con los propios de la decoración de interiores de los edificios, o bien alusivos y representativos de la época en la que se produjeron dichos eventos. Por ejemplo, para los eventos del siglo XXI podrían instalarse planchas de acero corten, con una línea horizontal y la fecha troquelada; las correspondientes a los siglos XVI y XVII podrían ser de cobre, como la moneda de vellón que se acuñó en la RCMS; las del siglo XVIII podrían ser de vidrio grabado, en alusión a la instalación de la Real Fábrica de Cristales de San Ildefonso; mientras que para inundaciones del siglo XIX pueden emplearse azulejos y piezas de loza.

La instalación de estos elementos cumple una función múltiple de cara a la reducción del riesgo por inundación: por un lado sirve de elemento recordatorio y disuasorio para los gestores y visitantes del complejo, de cara a aumentar su percepción del riesgo, mejorar la resiliencia, y producir autocensura en la implantación de usos inadecuados en espacios inundables; y por otra parte sirven como elemento de apoyo en la mejora del análisis de la peligrosidad, ya que esos niveles son utilizados como puntos de calibración y validación de los modelos hidráulicos.

Por este motivo, dentro del complejo, deberían instalarse en los lugares más transitados por el público, consiguiendo el máximo efecto en la percepción del riesgo, como por ejemplo en la planta baja de la cafetería-restaurante del Ingenio Chico, la zona de los canales o la sala de la herrería (nueva sala Jorge Soler).

Suscripción de una póliza de seguro ajustada a las pérdidas

Debido al especial régimen de aseguramiento y reaseguro que tenemos en España, con la participación del Consorcio de Compensación de Seguros, resulta imprescindible que los espacios inundables de la RCMS dispongan de una póliza de seguro con una compañía privada, y que ésta cubra la afección de inundaciones. Pero igual de imprescindible es que dicha póliza tenga adecuadamente ajustadas las cuantías de los bienes asegurados (del continente y contenido) a los elementos en riesgo en cada uno de los espacios de la RCMS.

Por ello, se recomienda la realización de un verdadero análisis de riesgo económico por inundaciones de las diferentes estancias del complejo, que permita ajustar las cuantías aseguradas a la previsión de pérdidas para diferentes probabilidades (o periodos de retorno) y escenarios, adoptando una estrategia de aseguramiento a través de un sencillo análisis coste-beneficio.



Empleo y sustitución de materiales y elementos sumergibles e impermeables

En sucesivas reformas, renovaciones o cambios en el diseño y decoración de la arquitectura de interiores de los espacios inundables del complejo, se tratará de emplear o sustituir los materiales y elementos actuales, por otros más resistentes a su inmersión en agua. Por ejemplo, se tratará de evitar la presencia de maderas y tarimas en las plantas bajas inundables, no recomendando reponer la tarima flotante de la cafetería (que ya ha tenido que ser repuesta en dos ocasiones) sino cubrir el suelo con roca tratada, resinas, gres o cualquier otro elemento impermeable o sumergible.

Del mismo modo, los cubre-radiadores, rodapiés, frisos, mesas y sillas se tratará que sean metálicos inoxidables (derivados plásticos, aluminio, acero inoxidable...) en lugar de madera.

Algo semejante tiene que considerarse con el diseño y los materiales de las puertas, ventanas y cierres de huecos, para los cuales hay que evitar que la inundación impida su apertura o cierre por humectación o por las presiones hidrostáticas a un lado u otro.

Potenciar la movilidad y trasladabilidad de los elementos de las plantas bajas

Todos los elementos de mobiliario y decoración de las plantas bajas en zonas inundables se tratará que sean portátiles y móviles, para posibilitar su traslado previamente a la inundación o durante la misma.

De esta forma, se instalarán cubre-radiadores no anclados sino superpuestos y ligeros; las mesas y sillas serán móviles y fácilmente trasladables; incluso las cámaras frigoríficas, estanterías y armarios se instalarán con ruedas o sistemas que faciliten su traslado. En este sentido, sería deseable que todas las plantas bajas dispusieran de acceso por rampa a un ascensor, montacargas, grúa o polea con los que trasladar por elevación todos estos elementos a las plantas superiores.

Elevación de las redes de energía y sistemas de comunicación sobre el nivel inundable

Las líneas de energía (cableado eléctrico, tuberías de conducción de gas...), sistemas de seguridad (alarmas) y puntos de toma (enchufes, llaves, bocas, grifos...) se trazarán sobre elevados respecto a los niveles alcanzados habitualmente por las aguas durante la inundación, por ejemplo para la avenida de periodo de retorno de 50 años.

Igualmente la instalación de telefonía fija, los puntos de red WIFI y similares, estarán sobre elevados considerando la altura que puede alcanzar el agua para periodos de retorno medios (50-100 años).



Inclusión de elementos expositivos alusivos a las inundaciones en el discurso museográfico y los productos promocionales

Se recomienda, en futuras ampliaciones o modificaciones del discurso museográfico del complejo, la inclusión de elementos alusivos a las inundaciones históricas y la importancia de la relación entre el río y la ceca en su devenir histórico.

De esta forma, lo que aparentemente pudiera parecer un problema o *handicap*, se transforma en un recurso expositivo. Por ejemplo, podría instalarse en la planta baja de la cafetería o en la sala de la herrería, un panel explicativo sobre las fluctuaciones del caudal del río y su influencia en la acuñación; grabados o fotografías de inundaciones históricas; y hasta elementos decorativos alusivos a la inundabilidad, como gresite en tonos azulados para las paredes de los servicios o baños.

Incluso la inundabilidad periódica del edificio puede ser un lema o motivo para los productos promocionales (*merchandising*), como ya han hecho otros museos ubicados en zonas inundables históricamente; un ejemplo paradigmático es el monasterio de Santa Clara la Vieja de Coimbra (Portugal), donde se venden en la tienda desde marcapáginas, camisetas, chapas, cuadernos y otros recuerdos, todos ellos con graciosos dibujos del edificio inundado y sus inquilinas afectadas.



3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET (2013). *Marzo, extremadamente lluvioso, con más del triple de precipitaciones*. Página web de la Agencia Española de Meteorología, sección Noticias, 02-04-2013: <http://www.aemet.es/es/noticias/2013/04/climatologicomarzo2013>
- Álvarez Alonso, D., Andrés Herrero, M. de., Díez-Herrero, A. y Rojo Hernández, J. (2013). El Abrigo del Molino (Segovia, España). Ocupaciones neandertales en el norte del Sistema Central. En: Baena, J., Guerrero, I. y Fernández, J.J. (eds.), *El Cuaternario en el siglo XXI. VIII Reunión de Cuaternario Ibérico*, Sevilla, 91-94.
- Álvarez-Alonso, D., Andrés Herrero, M. de., Díez Herrero, A., Rojo, J., Medialdea, A., Benito, G. y Vegas, J. (2014a). Geoarqueología del yacimiento musteriense del Abrigo del Molino (Segovia). En: Schnabel, S. and Gómez Gutiérrez, A. (eds.) *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*, XIII Reunión Nacional de Geomorfología, Cáceres, 446-449.
- Álvarez-Alonso, D., De Andrés-Herrero, M., Díez-Herrero, A. y Rojo, J. (2014b). El Abrigo del Molino (Segovia, España). Un nuevo yacimiento musteriense en el interior de la Península Ibérica. En: González de la Fuente, F.J., Paniagua Vara, E. y de Inés Sutil, P. (Coords.), *Investigaciones Arqueológicas en el valle del Duero: Del Paleolítico a la Antigüedad Tardía*. Actas de la I Asociación Científico-Cultural Zamora Protohistórica. Edita: Arbotante Patrimonio e Innovación, S.L. y Glyphos Publicaciones, 17-29.
- Arcement, G. J. y Schneider, V. R.; (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. USGS, Denver.
- Asenjo, M. (1987). *Segovia, la Ciudad y su Tierra a fines del Medievo*. Diputación Provincial de Segovia, Segovia, 709 pp.
- Bartolomé, B. y Sánchez, C. (1996). Nuestra Señora de las Aguas, una olvidada advocación segoviana. *Estudios Segovianos*, 94, 153-170.
- Benito, G., Sánchez-Moya, Y. and Sopena, A. (2003). Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain. *Sedimentary Geology*, 157, 107-132.
- BOE (2012). Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. *BOE*, nº 227 (20 septiembre 2012). 66167-66192.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1*. U.S. Army Corps. of Engineers, Davis.
- Bullón, T. (1999). Dinámica geomorfológica en la Sierra de Guadarrama a través de fuentes históricas y documentales. En: *El territorio y su imagen*, vol. I, 57-67, Asociación de Geógrafos Españoles, Departamento de Geografía de la Universidad de Málaga, Málaga.
- Caballero Jiménez, F. J., Perotas Van Herckenrodel, H., Guerrero González, J., Martínez Catllá, B., Fernández Arias, I., Goya Azañedo, R. y Cuadrado Rica, M. A. (2011). El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la Demarcación Hidrográfica del Duero. *II Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2011)*, Barcelona, 12 pp.
- CHD (2013). *Anuario de Aforos 2012-2013*. Página web <http://www.chduero.es>
- Colmenares, D. (1637). *Historia de la Insigne Ciudad de Segovia y Compendio de las Historias de Castilla*. Diego Díez impresor, Segovia, 652 pp.
- DGOH-IGME. (1988). Delimitación de las unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. 02 Cuenca del Duero. Dirección General de Obras Públicas - Instituto Geológico y Minero de España.



- DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. L 327, pp. 1-73.
- Díez Herrero, A. (2008a). *Breve informe de la visita de reconocimiento realizada a las excavaciones de las obras en la Casa de Moneda de Segovia (julio 2008)*. Informe para el Comité Científico asesor del proyecto museográfico, Segovia, 12 pp. (inédito).
- Díez Herrero, A. (2008b). Taller: ¡Doctor, doctor... que se me inunda la casa! *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16.1, 35-42.
- Díez-Herrero, A., Álvarez-Alonso, D., Andrés Herrero, M. de, Benito, G., Rojo, J., Medialdea, A. and Vegas, J. (2014). Pleistocene flood deposits at the archaeological site of Abrigo del Molino (Segovia, central Spain). *Proceedings of Hydrological extreme events in historic and prehistoric times* (HEX 2014), June 9-15th, Bonn (Germany), 58.
- Díez Herrero, A., García Peirotn, E., Laín Huerta, L., Martín Duque, J. F., Martín Moreno, C., Sacristán Arroyo, N. y Vicente Rodado, F. (2014). *A todo riesgo VIII. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2014. IGME y UNED-Segovia, Madrid-Segovia, 72 pp.
- Díez Herrero, A., García Peirotn, E., Laín Huerta, L., Martín Duque, J. F., Martín Moreno, C., Sacristán Arroyo, N. y Vicente Rosado, F. (2015): *A todo riesgo IX. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2015. IGME y UNED, Madrid-Segovia, 74 pp.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín-Duque, J. F. y Vicente Rodado, F. (2008a). *A todo riesgo II. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2008. IGME, UCM e IE Universidad, Madrid-Segovia, 42 pp.
- Díez-Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín-Duque, J. F. y Vicente Rodado, F. (2009a). *A todo riesgo III. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. IGME, UCM and IE University, Madrid-Segovia, 44 pp.
- Díez-Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín-Duque, J. F. y Vicente Rodado, F. (2010). *A todo riesgo IV. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. IGME, UCM, IE University y UNED, Madrid-Segovia, 68 pp.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín-Duque, J. F., Sacristán, N. y Vicente Rodado, F. (2011). *A todo riesgo V. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2011. IGME, UCM, UVa, UNED-Segovia y RSEHN, Segovia, 70 pp.
- Díez Herrero, A.; Laín Huerta, L.; Martín-Duque, J.F.; Sacristán, N.; y Vicente Rodado, F. (2012). *A todo riesgo VI. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2012. IGME, UNED-Segovia y Universidad de Valladolid, Madrid-Segovia, 68 pp.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., Martín Duque, J. F., Sacristán, N. y Vicente Rodado, F. (2013). *A todo riesgo VII. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guion de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2013. IGME, UNED y Universidad de Valladolid, Madrid-Segovia, 72 pp.
- Díez Herrero, A., Llorente, M., Ballesteros, J. A. y Ruiz, V. (2009b): Riesgos por avenidas e inundaciones fluviales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.3 (Monográfico: Riesgos geológicos externos), 254-263.
- Díez, A. y Martín, J. F. (1993a). Geología, geomorfología y paleontología. En: Abella, J.A. y Yoldi, L. (Coord.). Varios autores (1993). *Segovia: ecología y paisaje*. Guía para una comprensión integral de la Ciudad, 416 pp., Ed. MOPT, MEC, MAP y otros, Valladolid.
- Díez, A. y Martín, J. F. (1993b). Hidrología e hidrogeología. En: Abella, J. A. y Yoldi, L. (Coord.). Varios autores (1993). *Segovia: ecología y paisaje*. Guía para una comprensión integral de la Ciudad, 416 pp., Ed. MOPT, MEC, MAP y otros, Valladolid.



- Diez, A., Martín, J. F. y Vicente, F. (1993). *Guiones y prácticas de Geología Ambiental*, 100 pp., Segovia; D.L. SG-158/93.
- Díez Herrero, A., Martín-Duque, J. F. y Vicente Rodado, F. (2007). *A todo riesgo. Convivir con los desastres geológicos cotidianos*. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2007. IGME, UCM y USEK, Madrid-Segovia, 69 pp. (inédito). Consultable en www.riada.es. Material didáctico.
- Díez-Herrero, A., Martín Duque, J. F. y Vicente Rodado, F. (2008b). Propuesta de actividad didáctica de campo sobre riesgos geológicos en la zona centro de la península Ibérica. En: A. Calonge, L. Rebollo, M.D. López-Carrillo, A. Rodrigo E I. Rábano (Eds.), *Actas del XV Simposio sobre Enseñanza de la Geología*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Cuadernos del Museo Geominero, nº 11, 109-118.
- Díez-Herrero, A., Sopena, A., Sánchez-Moya, Y., Benito, G., Álvarez-Alonso, D., De Andrés-Herrero, M., Rojo, J., Hernández, M. y Sánchez-Torralbo, S. (2016). Actuaciones para la conservación y estudio de los depósitos de paleoinundaciones en el yacimiento arqueológico musteriense del Abrigo del Molino (Segovia). En: Duran, J.J., Montes, M., Robador, A. y Salazar, A. (Eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Geología y Geofísica nº 5, 187-194, Madrid, 766 pp.
- Ferrer, J. (1992): *Análisis estadístico de caudales de avenida*. Monografías, M26. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX, MOPT), Madrid, 42 pp.
- García de Castro, E. (2009). *Informe sobre la crecida del río Eresma a su paso por Segovia durante los últimos días de enero de 2009, y sus efectos sobre la Casa de la Moneda*. Concejalía de Urbanismo, Obras y Servicios, Excmo. Ayuntamiento de Segovia, 6 pp.
- Génova, M. M., Díez-Herrero, A., Martínez-Vallejo, B. y Ballesteros, J. A. (2010). Correlación entre avenidas históricas del registro documental y la datación dendrocronológica de maderas en la Casa de la Moneda de Segovia. En: X. Úbeda, D. Vericat, R. J. Batalla (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010*. pp. 495-498. XI Reunión Nacional de Geomorfología, 20-24 septiembre de 2010. UB, CTFC, ULI y SEG, Solsona (Lérida).
- Génova, M., Ballesteros-Cánovas, J. A., Díez-Herrero, A. and Martínez-Callejo, B. (2011). Historical floods and dendrochronological dating of a wooden deck in the old Mint of Segovia, Spain. *Geoarchaeology: An International Journal*, 26 (5), 786-808.
- GEOCISA (2003). Informe Geotécnico Casa de la Moneda (Segovia). Documento 61.801. 38 pp.
- IGME (1972). Mapa hidrogeológico nacional. Memorias del IGME, tomo 81, 44 pp. 3 mapas.
- INCOSA (2007). Caracterización de muros y cimentación del Edificio Cultural de la Casa de la Moneda (Segovia). Informe 07/3779. Madrid, 77 pp.
- ITGE (1993). Las aguas subterráneas en España. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 591 pp. + 12 mapas.
- López, M. T., Martín, M. A., Marcos, G. J., Misiego, J. C., Sanz, F. J., Villanueva, L. A., García, P. F. y Doval, M. (2005). *El antiguo Monasterio Premonstratense de Santa María de Los Huertos (Segovia)*. Memorias, Arqueología en Castilla y León, 13, Junta de Castilla y León, Valladolid, 69 pp.
- MAGRAMA (2016). MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Z.I. con probabilidad baja o excepcional (T=500 años). Z.I. con probabilidad media u ocasional (T=100 años), Z.I. de inundación frecuente (T=50 años) y Z.I. con alta probabilidad de inundación (T=10 años). Recuperado de: <http://www.sig.magrama.es>
- Maldonado, Notario (1611). *Probanza de los sucesos milagrosos que Nuestro Señor ha obrado con los devotos de Nuestra Señora de la Fuencisla*. Manuscrito, Facsímil con estudio introductorio, transcripción y edición crítica, Librería Cervantes, Segovia, 42 pp.



- Marín, J. A. (1733-1962). Gran crecida del Clamores 1733. *Collectanea Historica. Estudios Segovianos*, t. XIV (XV), 281-287. Manuscrito de la biblioteca de la Real Academia de Historia y Arte de San Quince, Segovia.
- MIMAM (2005). Informe Resumen de los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Demarcación Hidrográfica del Duero. Capítulo 2. Caracterización de la Demarcación Hidrográfica. Versión 7.1. Ministerio de Medio Ambiente. Marzo 2005, 113 pp.
- Murray, G. S. (2006). *La Historia del Real Ingenio de la Moneda de Segovia y el proyecto para su rehabilitación*. Ed. Fundación Real Ingenio de la Moneda de Segovia, 119 pp.
- Murray, G. S., Izaga, J. M. y Soler, J. M. (2006). *El Real Ingenio de la Moneda de Segovia. Maravilla tecnológica del siglo XVI*. Ed. Fundación Juanelo Turriano, Madrid, 353 pp.
- Murray, G. S. (2008). *El Real Ingenio de la Moneda de Segovia, Fábrica industrial más antigua, avanzada y completa que se conserva de la Humanidad. Razonamiento científico de la propuesta para su declaración como Patrimonio de la Humanidad*. Cámara de Comercio e Industria de Segovia, Segovia, 90 pp.
- Ollero, A. (2013). *¿Por qué NO hay que limpiar los ríos?* online disponible en: <http://river-keeper.blogspot.ch/2013/01/por-que-no-hay-que-limpiar-los-rios.html>
- Ruiz de Castro, G. (1551-1988). *Comentario sobre la primera y segunda población de Segovia*. Transcripción y notas, José Antonio Ruiz Hernando. Excma. Diputación Provincial de Segovia, Valladolid, 65 pp.
- Sacristán Marcos, N. (2016). *Estudio hidrológico, documental e hidráulico de la peligrosidad por inundaciones del río Eresma a su paso por la Casa de la Moneda (Segovia)*. Trabajo Fin de Master. Máster en Geología Ambiental. Especialidad de hidrología, suelos y geomorfología. Madrid, 44 pp.+ anexos.
- SAIH Duero (2013). *Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Duero*. Página web: <http://www.saih.chduero.es/>
- SAIH Duero (2016). *Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Duero*. Página web: <http://www.saih.chduero.es/>
- San José A. y Maruro Gutiérrez F. (2016): *Metodología para procesar datos LIDAR con ArcGIS Desktop 10*. Trabajo Final de Máster. UCM, Madrid.
- Sánchez Torralbo, S. (2016). *Paleohidrología de inundaciones en el yacimiento neandertal del Abrigo del Molino (Segovia)*. Trabajo Fin de Master. Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos. Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos. Alcalá de Henares, 42 pp. (inédito).



APÉNDICE I

EL REGISTRO DE PALEOINUNDACIONES EN EL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO DEL ABRIGO DEL MOLINO



El registro de paleoinundaciones en el yacimiento arqueológico del Abrigo del Molino

El yacimiento arqueológico musteriense del Abrigo del Molino, descubierto en el año 2012, está situado en las proximidades de la ciudad de Segovia, aproximadamente un kilómetro aguas abajo de la Real Casa de la Moneda de Segovia. Se localiza en el tramo inferior de la ladera izquierda del cañón meandriforme asimétrico que el río Eresma traza en el piedemonte calcáreo de la sierra de Guadarrama, aguas abajo de su confluencia con el arroyo Clamores, hacia el oeste de la ciudad (figura I.1).

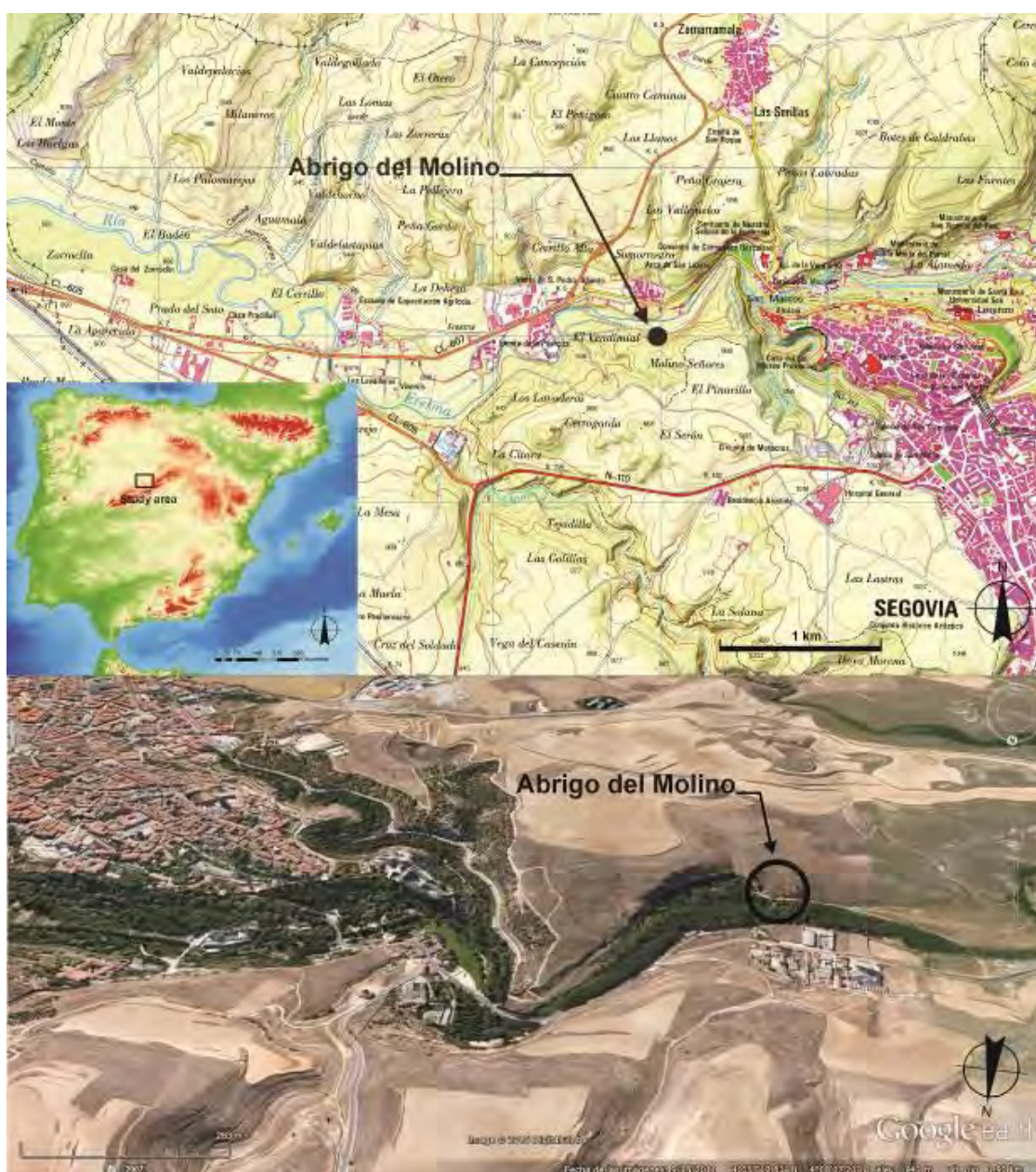


Figura I.1. Mapa y vista aérea oblicua de situación del yacimiento arqueológico del Abrigo del Molino, a las afueras de la ciudad de Segovia, en el valle del río Eresma (fuente de la base topográfica e imagen: Iberpix (IGN) y GoogleEarth).



Se trata de una cavidad de origen fluviokárstico desarrollada en materiales cretácicos, con escaso desarrollo espeleológico y rellena por materiales detríticos en los que se han definido tres conjuntos sedimentarios (ver más detalles del contexto geomorfológico y de geoarqueología en Álvarez-Alonso *et al.*, 2013, 2014a y 2014b). De ellos, el conjunto inferior es una alternancia de limos, arenas y conglomerados calcáreos, correspondiente a depósitos coluvionares y de paleoinundaciones (figura I.2).



Figura I.2. Afloramiento del conjunto inferior del relleno del yacimiento arqueológico del Abrigo del Molino, con los niveles alternantes de depósitos conglomeráticos de origen coluvionar y los niveles detríticos finos correspondientes a las paleoinundaciones.

Los niveles de depósitos de paleoinundaciones del conjunto inferior presentan facies y secuencias típicas de sedimentación en zonas de remanso asociadas a barras de remolino. Las excepcionales condiciones de afloramiento en el frente verticalizado de la excavación arqueológica, la magnífica representación de las estructuras sedimentarias (diferentes tipos de rizaduras de corriente asimétricas, ascendentes, laminaciones paralelas, estructuras de escape de fluidos, etc.) y su enorme potencialidad para su uso científico, didáctico y divulgativo, lo hacen merecedor de ser catalogado como lugar de interés geológico de ámbito supramunicipal a regional.

El esquema metodológico general del estudio paleohidrológico realizado por Díez-Herrero *et al.* (2016) puede verse sintetizado en la figura I.3. A grandes rasgos, presenta tres tareas principales:

- 1) Realización de láminas de réplica y muestreos. La técnica utilizada permite extraer una lámina superficial milimétrica del perfil del sedimento adherida a una tela de gasa mediante barniz-laca 'estratigráfica' (figura I.4). Es un método muy extendido para la conservación y estudio de depósitos litorales no consolidados (playas, llanuras de marea...), pero algo menos utilizada en el caso de depósitos fluviales cuaternarios. El número, posición y tamaño de las cuatro grandes láminas de réplica realizadas trataron de combinar el máximo aprovechamiento del volumen del depósito a muestrear, con la mínima interferencia con la dinámica de la excavación arqueológica.



- 2) Estudio sedimentológico de las láminas de réplica. A partir de las láminas de réplica se realizan análisis microsedimentológicos de facies, secuencias y estructuras que, combinados con los estudios granulométricos (torre de tamices y Sedigraph), permiten obtener valiosa información sobre las condiciones de las paleoinundaciones (número de eventos y pulsos dentro de los eventos, calado y velocidad de la corriente, carga transportada y turbidez, etc.).
- 3) Estudio paleohidráulico de los eventos. Estos datos, combinados con modelos paleohidráulicos (desde simples ecuaciones de régimen uniforme como la fórmula de Manning a complejos modelos numéricos bidimensionales), ayudan al conocimiento de la magnitud de avenidas en el pasado y a la mejora del análisis de la frecuencia de inundaciones futuras.

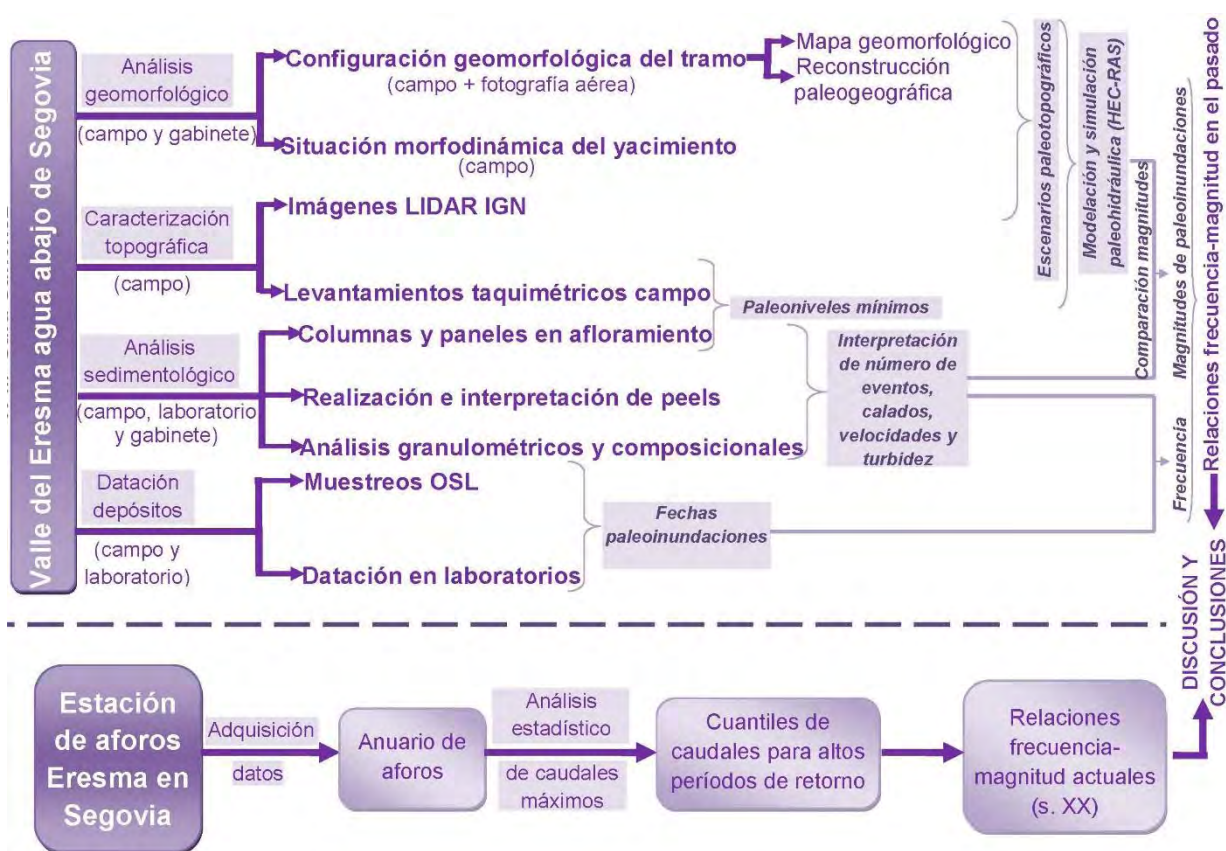


Figura I.3. Esquema metodológico general del estudio, tanto de la paleohidrología de las paleoinundaciones en el valle del río Eresma (parte superior del esquema), como su comparación con la hidrología de avenidas actual (parte inferior).



Figura I.4. Secuencia gráfica de las fases de realización de una lámina de réplica en el afloramiento de depósitos de paleoinundaciones del conjunto inferior, en el yacimiento del Abrigo del Molino (Segovia).

Fases: 1) desbrozado de la vegetación con tijeras de podar; 2) perfilado con cuchillo de hoja ancha; 3) eliminación de las raicillas con tijeras-cortauñas; 4) colocación de la canaleta para recogida de la laca excedente sin contaminar el sedimento circundante, y permitiendo reaprovechar la laca sobrante; 5) bote de laca estratigráfica Carpo (referencia 54001013MR) de 12,5 litros; 6) rociado del perfil con laca estratigráfica, desde la parte superior por escurrimiento en manto; 7) colocación del lienzo de gasa de algodón sobre el perfil, fijándolo con agujas metálicas (pinchos de barbacoa); 8) medida de la dirección y buzamiento del plano del perfil con brújula geológica con clinómetro; 9) vertido de laca estratigráfica por escurrimiento desde arriba, sobre la gasa que cubre el perfil; 10) reparto homogéneo de la laca utilizando una brocha; 11) cortado con cuchillo de una loncha o filete de sedimento adherido a la gasa; 12) separación del filete apoyando la superficie de la gasa sobre una plancha de madera; 13) Pulverizado de agua sobre el filete de sedimento del perfil de réplica, para lavar por escurrimiento el sedimento no adherido a la gasa con la laca; 14) aplicación de la cola blanca de carpintero sobre la tabla de madera para adherir la gasa con la lámina de réplica; 15) adhesión de la lámina de réplica y secado lento al aire libre.



Como resultado de las tareas, se han obtenido cuatro láminas de réplica de considerables dimensiones (figura I.5); tres de ellas de afloramientos de dirección subparalela a la dirección del flujo actual del río Eresma; y solo una perpendicular a la misma.

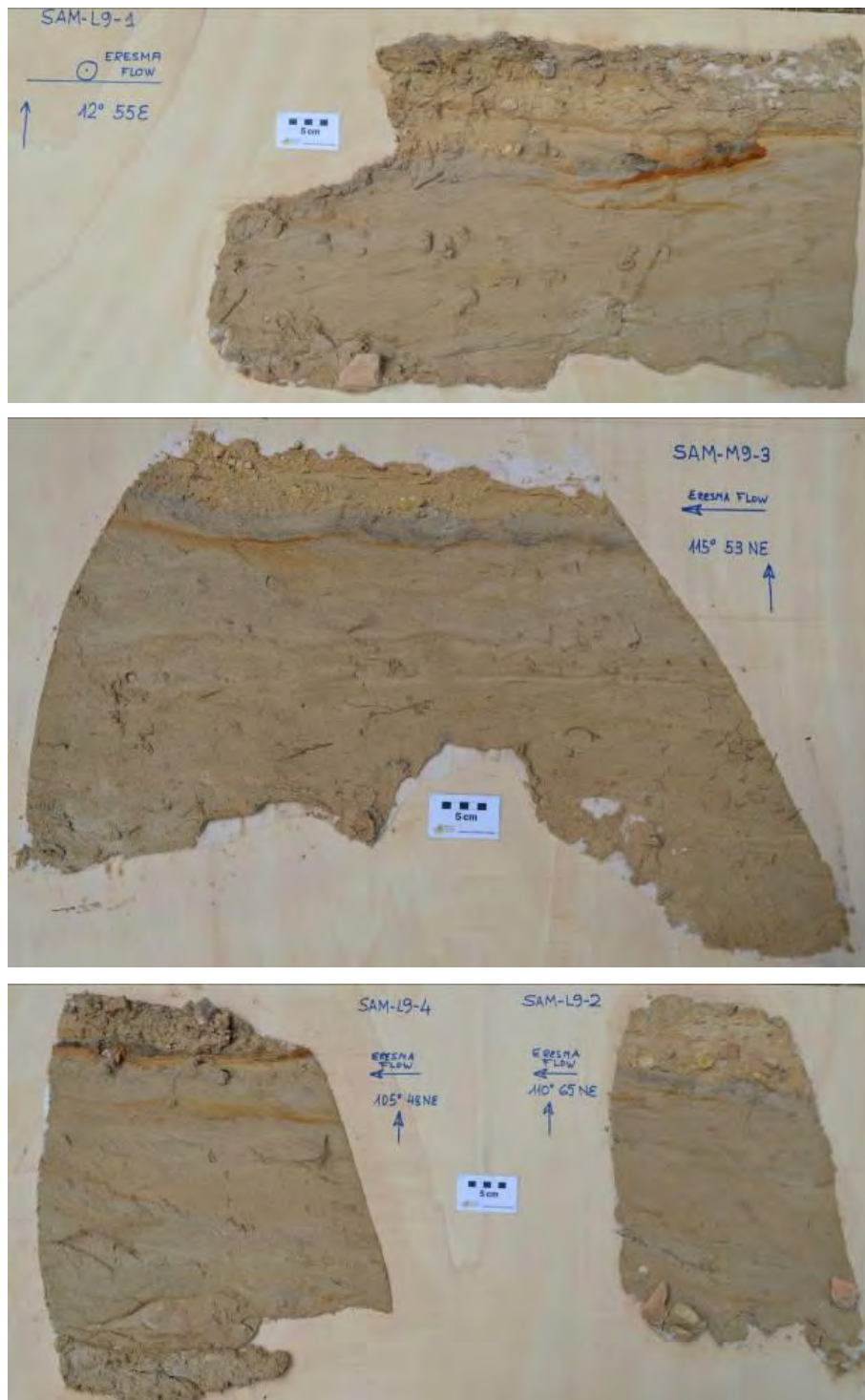


Figura I.5. Láminas de réplica resultantes del muestreo del Abrigo del Molino, con siglado correlativo (SAM, Sedimentología del Abrigo del Molino; L9 ó M9, cuadrícula del yacimiento; y 1 a 4, número correlativo de la lámina). Además, aparece la dirección, buzamiento y dirección de buzamiento del plano de la lámina de réplica; y la dirección y sentido de la corriente actual del río Eresma.



Los resultados del análisis sedimentológico muestran facies con abundantes conjuntos (sets) de espesor centimétrico (entre 2 y 5 cm de potencia media), de arenas finas y limos con estructuras sedimentarias de corriente, como rizaduras de cresta ondulada, de cresta recta y cabalgantes (climbing ripples); así como niveles de laminación horizontal y subhorizontal, tanto de alta como de baja energía. Muchas de las estructuras indican un sentido de la corriente inverso al actual de circulación del río Eresma, o sea, aguas arriba. Si bien se observan superficies de reactivación ligeramente erosivas respecto a los sets infrayacentes, parecen corresponder a diferentes pulsos de un mismo evento, y no hay criterios para separar diferentes eventos de inundación en este conjunto detrítico (figuras I.6 y I.7).



Figura I.6. Trazado e interpretación de las laminaciones y estructuras sedimentarias y de los distintos conjuntos (sets) y secuencias en una de las láminas de réplica del Abrigo del Molino.

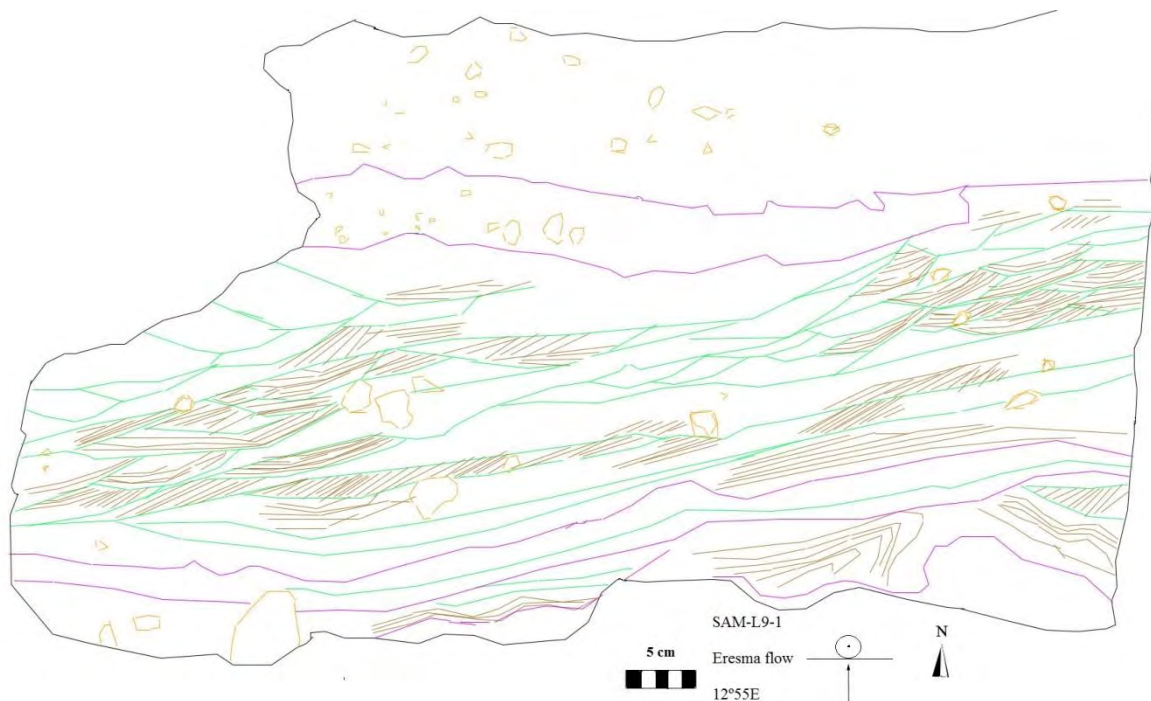


Figura I.7. Panel con las principales estructuras sedimentarias de uno de las láminas de réplica de los depósitos de paleoinundaciones del Abrigo del Molino.

La secuencia más característica es semejante a la descrita por Benito *et al.* (2003) como BSO_b o incluso, puntualmente, a la BSO_a. Ambas secuencias son características de medios sedimentarios fluviales, en los que durante los eventos de avenidas, se originan en el margen de los canales áreas de flujo inefectivo. Son, por ejemplo, los depósitos de barras de remolino (*eddybars*; Díez-Herrero *et al.*, 2014), situados tras un obstáculo, por divergencia del flujo.

A partir de los análisis paleohidráulicos de estas estructuras y de las distribuciones granulométricas obtenidas con torre de tamices y Sedigraph (figura I.8), se pueden deducir rangos de calado inferiores a medio metro de profundidad y velocidades de corriente en el momento de producirse el depósito, inferiores a 1 m/s; eso sí, con una elevada carga sedimentaria transportada (elevada turbidez).

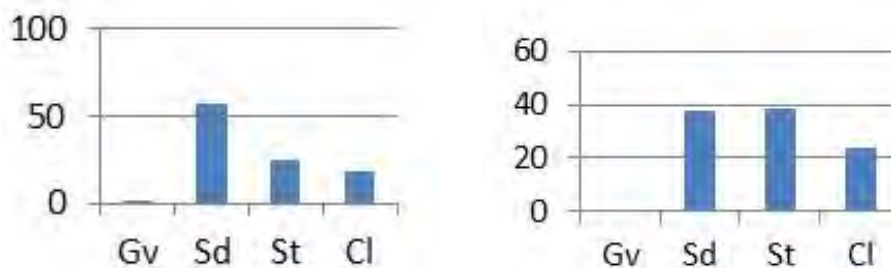


Figura I.8. Diagramas de barras de la distribución granulométrica porcentual en las clases de gravas (Gv), arenas (Sd), limos (St) y arcillas (Cl), obtenido por análisis con torre de tamices y Sedigraph, para el techo (izquierda) y la base (derecha) del nivel de depósitos de paleoinundación.



Finalmente, los órdenes de magnitud de los paleocaudales que enrasan con el techo de la unidad de los depósitos a partir de las simulaciones paleohidráulicas, varían sustancialmente dependiendo de la geometría del cauce que se suponga (escenarios paleotopográficos) que, según los cálculos del TFM de Sánchez Torralbo (2016), oscilan entre unos 1625 m³/s (lecho a altura equivalente a la terraza +11 m) a los 4500 m³/s (topografía actual; figuras I.9 y I.10).

Estos valores son un orden de magnitud mayores que los máximos del registro sistemático de caudales de la estación de aforos en el último siglo, en el que el máximo se registró en el año 1956, con un caudal punta inicialmente estimado en 292 m³/s y posteriormente recalculado a 202 m³/s.

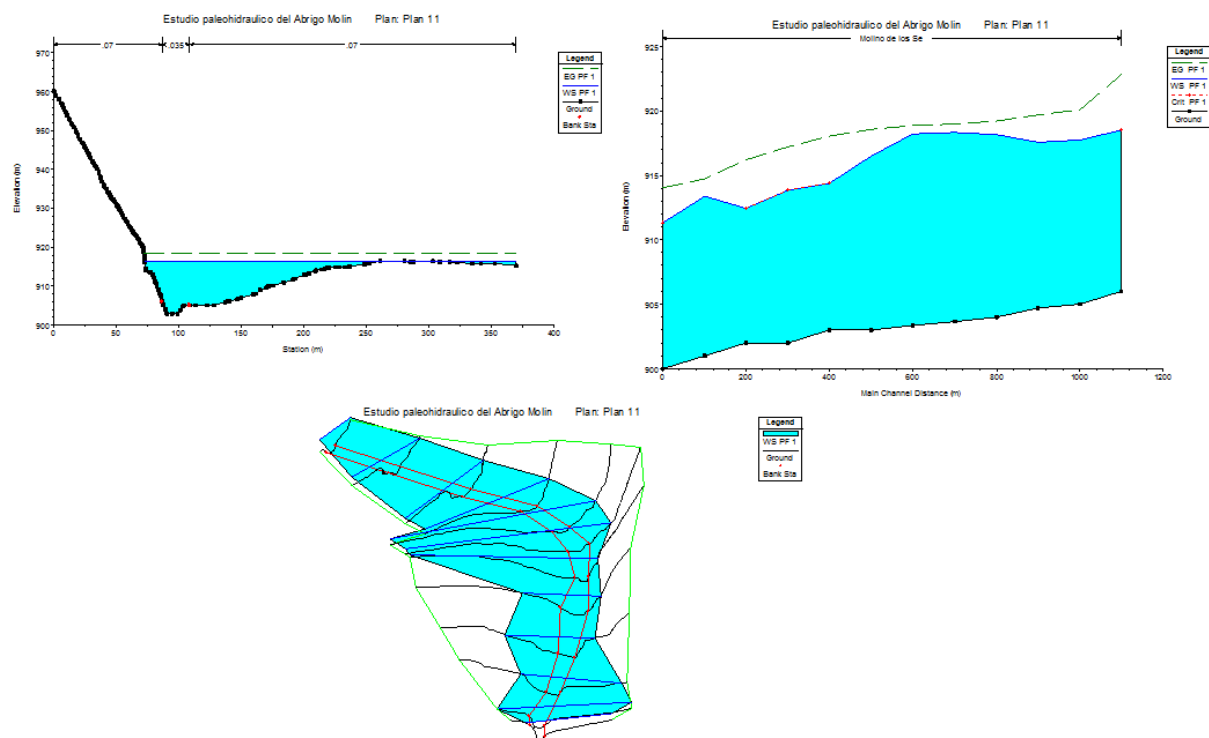


Figura I.9. Salida de resultados del modelo hidráulico de las paleoinundaciones del Eresma registradas en el Abrigo del Molino, simuladas con el software HEC-RAS y topografía actual: sección transversal donde se sitúan los depósitos (arriba izquierda); perfil longitudinal del lecho y la lámina de agua (arriba derecha); y bloque diagrama 3D con las 25 secciones transversales y la altura de lámina de agua interpolada (abajo).

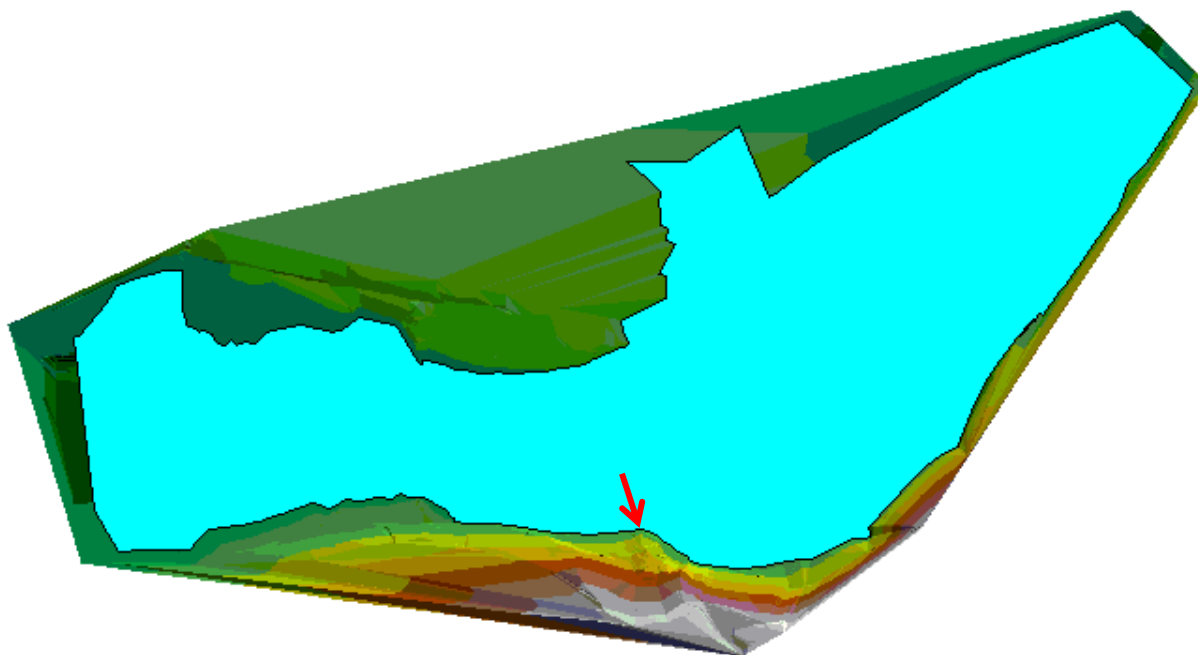


Figura I.10. Mapa del área supuestamente inundable por la paleoinundación registrada en el Abrigo del Molino a partir de la topografía actual y para un caudal que enrasa el techo de los depósitos de paleoinundaciones (flecha roja).



APÉNDICE II

EL REGISTRO DE INUNDACIONES EN EL MONASTERIO DE SANTA MARÍA DE LOS HUERTOS



El registro de inundaciones históricas en el Monasterio de Santa María de los Huertos

El antiguo Monasterio premostratense de Santa María de los Huertos se ubicaba en la llanura de inundación de la margen derecha del río Eresma a su paso por la Alameda del Parral, próximo a la denominada Huerta Grande, apenas un centenar de metros aguas arriba de la Real Casa de la Moneda de Segovia (figuras II.1 y II.2).

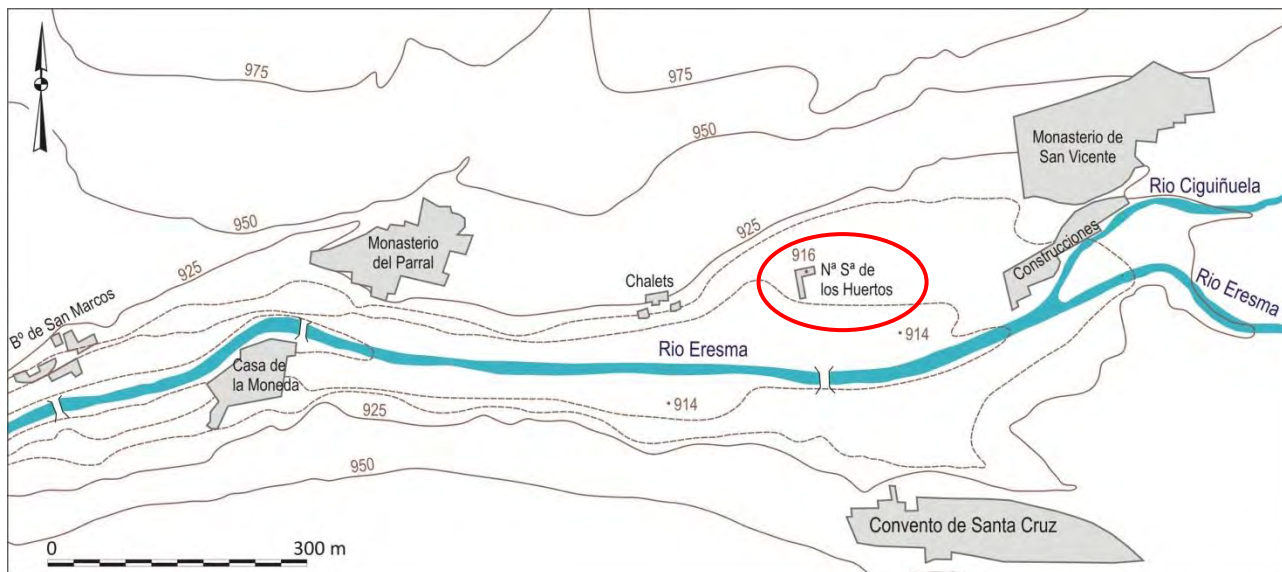


Figura II.1. Croquis-plano de situación del antiguo monasterio de Santa María de los Huertos, rodeado por otros muchos edificios religiosos ubicados en el valle del Eresma.



Figura II.2. Vista del tránsito del río Eresma por la Alameda del Parral. A la derecha, entre los árboles, se vislumbra un edificio de tonos claros (señalado por la flecha roja), correspondiente a la ermita de Santa Ana, que ocupa un lugar próximo al antiguo monasterio de Santa María de los Huertos.

Este establecimiento religioso, ubicado allí desde la Baja Edad Media (López *et al.*, 2005), sufrió reiteradamente los efectos de las inundaciones por efecto del desbordamiento del río, hasta el punto que condicionó el abandono definitivo de su ubicación original en el siglo XVII (figuras II.3 y II.4).



La inundación más antigua de la que se tiene noticia data del año 1304, siendo abad Arnaldo, a causa del desbordamiento del río Eresma, que "inundó la iglesia y claustros de él". Según la tradición, durante esta inundación se produjo el hecho milagroso de la llegada a la abadía de la imagen de Nuestra Señora de las Aguas, venerada desde entonces en la iglesia monasterial, depositada en la caja de marfil y plata en la que había llegado (actualmente propiedad de la Excm. Diputación Provincial de Segovia). Aunque esta circunstancia ha sido puesta en duda a través de estudios histórico-artísticos de la talla (Bartolomé y Sánchez, 1996; figura II.5).

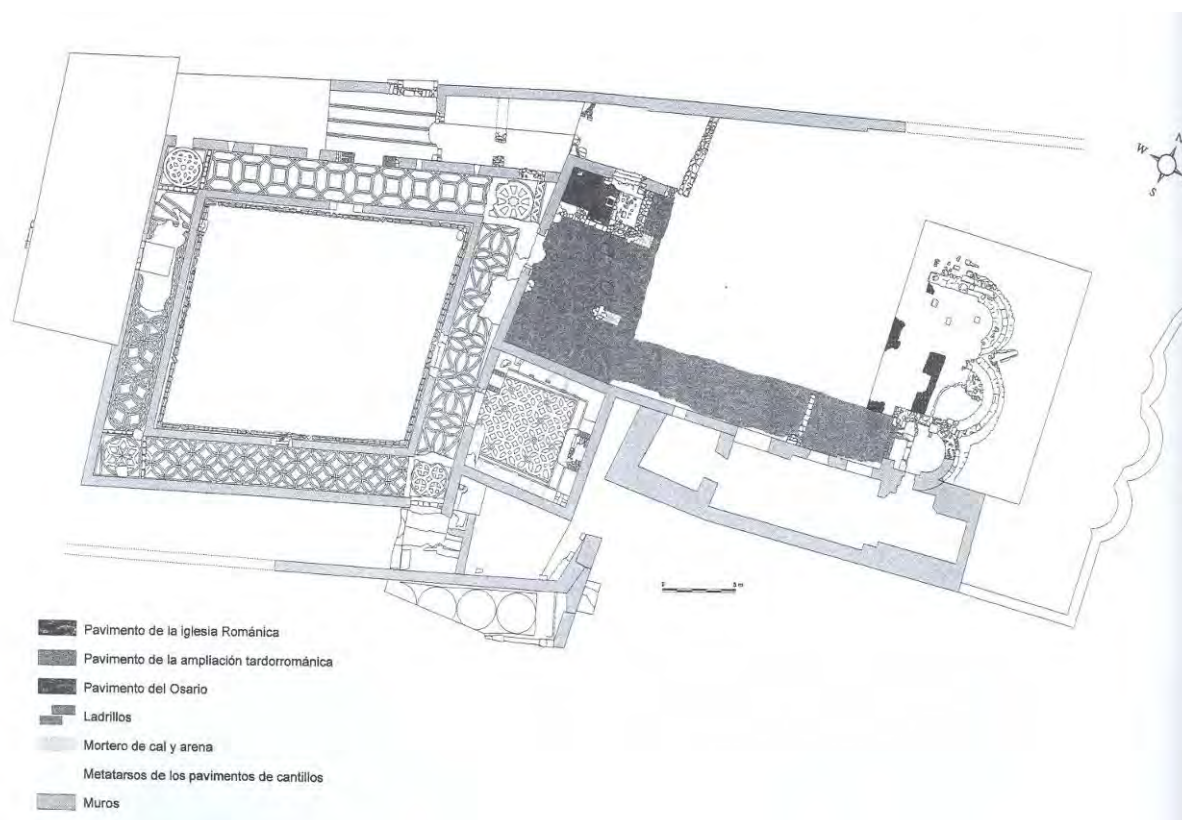


Figura II.3. Plano general de las dependencias del Monasterio de Santa María de los Huertos (López et al., 2005)

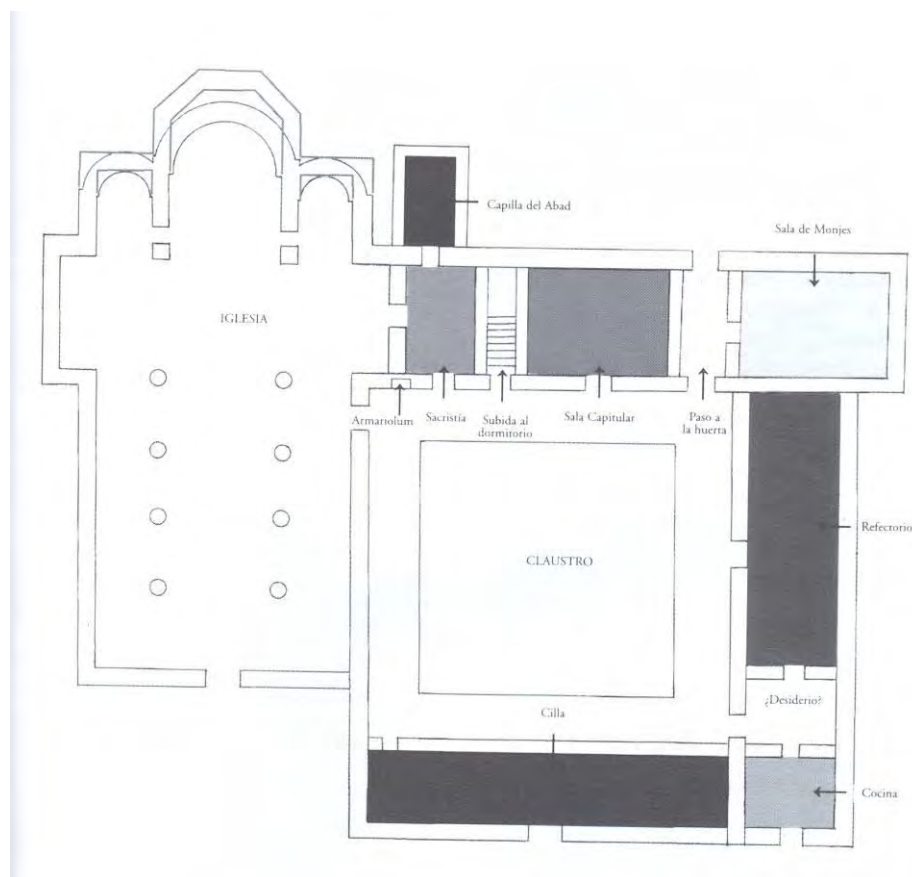


Figura II.4. Plano general de un monasterio premonstratense tipo (López et al., 2005)

"Ay un testimonio en papel blanco del día i año en que llego a nuestro convento antiguo la Milagrosissima y prodigiosissimaymagen de nuestra señora de las aguas. Asi llamada por aver venido en el Rio Eresma en tiempo que creçio tanto que hentro en nuestro dicho convento una barra en alto sobre el altar maior, y esta santa ymagen vino sobre las aguas en una caja de marfil guarnecida de plata y a des horas de la noche, acompañada de una creçida antorcha que pasmaba quantos la miraban y sin hundirse siendo materia tan pesada la de la Santa ymagen y la caxa. Y de esta suerte se entro en nuestra yglesia y al bajar el rio se quedo sobre el ara del altar maior como diçe el testimonio que tiene su fecha en [blanco]..."

(Libro del Beçerro..., fol. 7 vtº; Noriega, E. de, *Dissertatioapologetica...*, fol 138-139)

Tras la inundación del 25 de agosto de 1540, que alcanzó tres varas en la iglesia del Monasterio (Colmenares, 1637), quizás las inundaciones del monasterio mejor documentadas son las acontecidas a finales del siglo XVI e inicios del siglo XVII, agravadas por el recrecimiento del azud de la Real Casa de la Moneda. La inundación de 1598 obligó a los frailes a abandonar el Monasterio; y al año siguiente (1599) se produce una nueva inundación (Bullón, 1999). La de los primeros días de enero de 1627 debió de ser la más grave, ya que el nivel de las aguas se situó por encima de las gradas del altar mayor, teniendo los religiosos que ponerse a salvo saltando por la ventana. La detallada descripción que hizo el escribano de Segovia (D. Eugenio Velázquez) de la narración hecha por los monjes de la inundación de la víspera del Día de Difuntos del año 1629, contiene una pormenorizada relación de niveles de agua ("tres cuartas de vara") y su evolución a lo largo de los días que duró el anegamiento.



Las excavaciones arqueológicas realizadas por el actual propietario de la finca a finales de los años 90, permitieron sacar a la luz el antiguo claustro e iglesia (López *et al.*, 2005), y reconocer los arranques de los muros (figura II.6), con lo cual se podrán en un futuro próximo reconstruir los órdenes de magnitud de los caudales que produjeron dichas inundaciones, mediante modelaciones hidráulicas detalladas de esta zona.



Figura II.5. Talla de la Virgen de las Aguas, una de las imágenes con advocación en el Monasterio; consiste en una talla de marfil sobre olas de plata.



Figura II.6. Restos del antiguo claustro y arranque de los muros del Monasterio, que permitirán reconstruir con precisión los niveles de inundación descritos en los documentos.

Este registro documental de inundaciones ha servido de excusa para el diseño de un ejercicio práctico de análisis del riesgo de inundación, que se ha empleado para enseñar las técnicas básicas de análisis estadístico a alumnos universitarios, máster y postgrados y profesores de enseñanza secundaria (Díez Herrero, 2008b).

La frecuencia de inundaciones en el Monasterio era tal que los monjes, hartos de sufrir repetidamente las consecuencias de las inundaciones, decidieron solicitar al Concejo de la Ciudad la cesión de unos nuevos terrenos, para ubicar el nuevo convento en una zona alejada del río y sus inundaciones. Así, en el siglo XVII se fundó un nuevo convento con el mismo nombre (Santa María de los Huertos), primero en las inmediaciones de Santa Eulalia, y luego en la parte más alta de la ciudad, próximo al torreón de Arias Dávila. Las desamortizaciones del siglo XIX y las reformas en el urbanismo de la Ciudad hicieron que posteriormente fuera demolido, dando lugar a la conocida Plaza de los Huertos de Segovia (figuras II.7, II.8 y II.9).

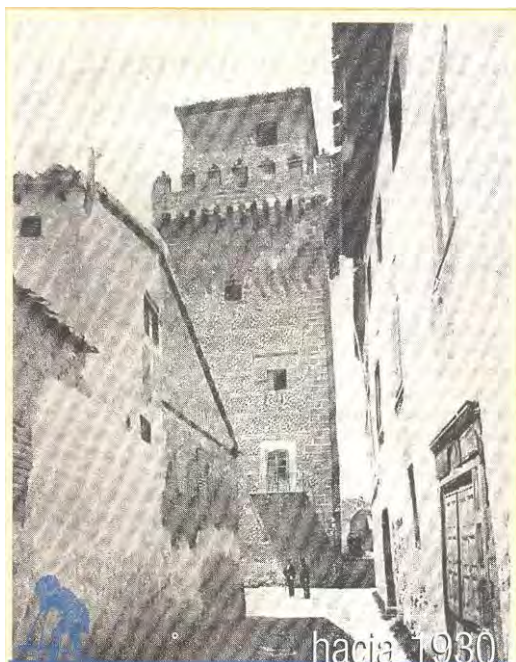


Figura II.7. Fachada del antiguo monasterio de Santa María de los Huertos en su tercera ubicación, cerca del torreón de Arias Dávila (al fondo), hacia el año 1930. Fuente: Gente de Segovia.



Figura II.8. Aspecto de la actual Plaza de los Huertos, donde se ubicó el convento trasladado.



Figura II.9. Placa en la que se alude al origen del nombre de la Plaza.



APÉNDICE III

RESULTADOS PORMENORIZADOS DE LOS ANÁLISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS



Resultados pormenorizados de los análisis de datos hidrológicos e hidráulicos

- ❖ **Apéndice III.1:** Comparación de las series mediante CHAC

- ❖ **Apéndice III.2:** Tablas resumen para las series modelizadas con HEC-RAS

- ❖ **Apéndice III.3:** Diagramas 3D para las series de estudio

- ❖ **Apéndice III.4:** Diagramas de velocidad de flujo para márgenes y canal

- ❖ **Apéndice III.5:** Tabla de velocidades para margen izquierda, derecha y canal del río



Apéndice III.1: Resultados obtenidos de las diferentes series utilizando el programa CHAC para los periodos de retorno indicados dependiendo de las funciones de distribución y métodos de estimación paramétrica que se utilicen.

Comparación de las series mediante CHAC

ESTUDIO Q_c

Serie 1
Completa

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No param Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para. Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	31	63	80	98	110	120	141
GUMBEL	Momentos	25	58	81	109	130	151	200
	Máxima Verosimilitud	26	42	52	65	75	84	107
	Momentos Ponderados	27	47	60	77	90	102	131
SQRT	Máxima Verosimilitud	24	40	52	70	85	100	141
GEV	Momentos	21	48	70	105	136	173	288
	Máxima Verosimilitud	23	39	53	75	97	123	207
	Momentos Ponderados	22	38	55	85	117	161	333
LP III	Individ.sesgomuestral	21	40	56	86	117	155	285
		24,44	46,11	62,11	85,56	106,33	129,89	203,67

Serie 2
Estación
Aforo

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No param Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para. Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	31	64	81	100	112	122	144
GUMBEL	Momentos	25	60	82	111	133	154	203
	Máxima Verosimilitud	26	42	53	66	76	85	108
	Momentos Ponderados	28	48	62	79	91	104	133
SQRT	Máxima Verosimilitud	24	40	53	70	86	102	143
GEV	Momentos	22	49	72	107	139	176	292
	Máxima Verosimilitud	23	39	53	76	97	123	208
	Momentos Ponderados	22	39	55	86	120	166	348
LP III	Individ.sesgomuestral	22	40	57	88	120	159	295
		24,78	46,78	63,11	87,00	108,22	132,33	208,22

Serie 3
Embalse

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No param Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para. Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	35	70	89	109	122	134	157
GUMBEL	Momentos	28	65	90	122	145	168	222
	Máxima Verosimilitud	29	46	57	71	81	91	115
	Momentos Ponderados	30	53	68	87	101	115	147
SQRT	Máxima Verosimilitud	26	42	54	71	85	100	140
GEV	Momentos	24	54	79	118	152	193	316
	Máxima Verosimilitud	25	41	57	85	113	150	285
	Momentos Ponderados	24	41	59	94	134	190	432
LP III	Individ.sesgomuestral	23	41	60	99	144	206	466
		27,11	50,33	68,11	95,11	119,67	149,67	253,33



ESTUDIO Q_{ci}

Serie 4		Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
Completa	No param Normal			-	-	-	-	-	-	-
	No para. Gumbel			-	-	-	-	-	-	-
	Normal		Momentos	34	59	72	85	94	102	118
	GUMBEL		Momentos	29	55	72	94	110	126	163
			Máxima Verosimilitud	30	46	57	71	81	91	114
			Momentos Ponderados	31	50	62	78	89	101	128
	SQRT		Máxima Verosimilitud	28	46	60	80	96	114	159
	GEV		Momentos	27	48	65	92	115	143	225
			Máxima Verosimilitud	28	45	59	80	98	119	180
			Momentos Ponderados	28	45	60	84	105	131	211
	LP III		Individ. sesgomuestral	27	47	62	85	105	128	190
					29,11	49,00	63,22	83,22	99,22	117,22

Serie 5		Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
Estación Aforo	No param Normal			-	-	-	-	-	-	-
	No para. Gumbel			-	-	-	-	-	-	-
	Normal		Momentos	35	60	74	88	97	105	122
	GUMBEL		Momentos	30	57	74	97	113	129	167
			Máxima Verosimilitud	31	48	59	73	83	93	117
			Momentos Ponderados	32	51	64	80	92	104	131
	SQRT		Máxima Verosimilitud	29	48	62	83	100	118	165
	GEV		Momentos	28	50	67	94	118	146	230
			Máxima Verosimilitud	29	47	61	82	100	121	181
			Momentos Ponderados	28	47	62	86	109	135	219
	LP III		Individ. sesgomuestral	28	48	64	87	107	129	190
					30,00	50,67	65,22	85,56	102,11	120,00

Serie 6		Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
Embalse	No param Normal			-	-	-	-	-	-	-
	No para. Gumbel			-	-	-	-	-	-	-
	Normal		Momentos	39	67	82	98	108	117	136
	GUMBEL		Momentos	34	63	83	108	126	145	187
			Máxima Verosimilitud	34	50	60	72	82	91	113
			Momentos Ponderados	35	55	68	85	97	109	138
	SQRT		Máxima Verosimilitud	33	47	59	75	88	101	136
	GEV		Momentos	31	55	75	106	132	164	257
			Máxima Verosimilitud	31	47	61	85	108	136	230
			Momentos Ponderados	30	47	63	93	123	164	317
	LP III		Individ. sesgomuestral	29	46	64	97	134	184	379
					32,89	53,00	68,33	91,00	110,89	134,56



ESTUDIO Q_{ci} Completado

Serie 7 Completa

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	43	87	110	134	150	164	193
GUMBEL	Momentos	34	80	111	149	178	206	272
	Máxima Verosimilitud	36	58	72	90	103	116	147
	Momentos Ponderados	38	65	84	107	124	141	180
SQRT	Máxima Verosimilitud	33	55	72	96	116	137	193
GEV	Momentos	30	66	96	143	185	236	393
	Máxima Verosimilitud	32	54	73	105	135	172	292
	Momentos Ponderados	31	53	76	117	162	221	456
LP III	Individ. sesgomuestral	30	55	78	119	161	213	391
		34,11	63,67	85,78	117,78	146,00	178,44	279,67

Serie 8 Estación Aforo

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	44	89	112	137	153	167	197
GUMBEL	Momentos	35	82	113	152	182	210	277
	Máxima Verosimilitud	37	59	74	92	106	119	150
	Momentos Ponderados	39	67	86	109	127	144	184
SQRT	Máxima Verosimilitud	34	56	74	99	119	141	198
GEV	Momentos	31	67	98	146	189	241	401
	Máxima Verosimilitud	33	55	75	107	137	173	293
	Momentos Ponderados	31	54	77	120	166	227	471
LP III	Individ. sesgomuestral	31	56	80	122	164	217	396
		35,00	65,00	87,67	120,44	149,22	182,11	285,22

Serie 9 Embalse

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	48	96	122	149	166	182	214
GUMBEL	Momentos	38	89	123	166	197	229	301
	Máxima Verosimilitud	40	63	77	96	109	123	155
	Momentos Ponderados	42	72	92	118	136	155	198
SQRT	Máxima Verosimilitud	37	57	73	95	113	131	181
GEV	Momentos	34	74	107	159	206	262	432
	Máxima Verosimilitud	34	56	78	119	162	220	449
	Momentos Ponderados	33	55	79	127	181	258	593
LP III	Individ. sesgomuestral	32	56	81	133	194	281	655
		37,56	68,67	92,44	129,11	162,67	204,56	353,11



Serie 10
Coincidencia
 Q_c/Q_{ci}

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	38	66	81	96	106	116	134
GUMBEL	Momentos	33	62	82	106	124	143	184
	Máxima Verosimilitud	34	51	63	78	89	101	126
	Momentos Ponderados	34	55	69	87	100	113	143
SQRT	Máxima Verosimilitud	31	52	67	89	108	128	179
GEV	Momentos	30	54	74	104	131	161	251
	Máxima Verosimilitud	31	51	66	89	108	131	196
	Momentos Ponderados	30	50	67	95	122	155	267
LP III	Individ. sesgomuestral	30	52	69	95	119	144	213
		32,33	54,78	70,89	93,22	111,89	132,44	188,11

Serie 11
Coincidencia
 Q_c/Q_{ci}
completado

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	40	101	129	158	177	194	229
GUMBEL	Momentos	38	94	131	177	211	245	324
	Máxima Verosimilitud	41	66	82	103	118	134	169
	Momentos Ponderados	43	75	96	123	143	163	208
SQRT	Máxima Verosimilitud	37	62	81	110	132	157	222
GEV	Momentos	33	75	111	168	219	281	475
	Máxima Verosimilitud	36	61	84	120	155	198	341
	Momentos Ponderados	34	60	86	135	187	259	544
LP III	Individ. sesgomuestral	34	62	89	136	184	244	447
		37,33	72,89	98,78	136,67	169,56	208,33	328,78

Serie 12
Valores
actuales
2013-2014

Funciones	Métodos	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100	T=500
No para Normal		-	-	-	-	-	-	-
No para Gumbel		-	-	-	-	-	-	-
Normal	Momentos	36	61	74	88	97	105	121
GUMBEL	Momentos	31	57	75	97	113	129	166
	Máxima Verosimilitud	32	49	60	75	86	96	121
	Momentos Ponderados	32	52	66	83	95	108	136
SQRT	Máxima Verosimilitud	30	49	64	85	103	121	170
GEV	Momentos	29	50	68	95	118	145	226
	Máxima Verosimilitud	29	48	63	86	106	130	200
	Momentos Ponderados	29	48	64	89	113	141	229
LP III	Individ. sesgomuestral	29	49	66	90	111	134	197
		30,78	51,44	66,67	87,56	104,67	123,22	174,00



Apéndice III.2

Tablas resumen para las series modelizadas con HEC-RAS

Periodos de retorno de 10 años:

	T10 S7 Q = 73 m ³ /s										
	Sección	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
		m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
438	1	913.50	914.14	914.1	914.45	0.0026	2.50	29.56	1.00	0.32	48.39
421	2	911.25	913.57	912.0	913.60	5E-05	0.79	97.04	0.17	0.03	43.19
401	3	911.00	912.88		913.53	0.0084	3.93	33.12	0.92	0.65	23.30
398	4	910.50	913.18		913.38	0.0019	1.97	37.81	0.39	0.20	15.77
395	5	910.40	913.18		913.38	0.0002	1.95	40.26	0.38	0.19	17.75
393	6	910.60	913.20		913.37	0.0015	1.88	45.89	0.38	0.17	27.11
389	7	910.60	913.26		913.34	0.0007	1.26	61.57	0.27	0.08	34.76
383	8	910.55	913.13		913.32	0.0020	1.94	52.88	0.44	0.19	42.27
369	9	910.55	913.11		913.29	0.0016	1.92	66.60	0.40	0.19	57.25
363	10	910.90	912.93		913.26	0.0040	2.60	54.76	0.62	0.34	45.60
322	11	910.35	912.96		913.11	0.0015	1.76	54.92	0.39	0.16	32.71
300	12	910.35	913.00		913.06	0.0007	1.12	65.31	0.26	0.06	34.94
268	13	909.85	912.91		913.03	0.0009	1.60	55.37	0.31	0.12	39.92
250	14	910.05	912.91		913.01	0.0008	1.56	60.76	0.30	0.11	46.00
223	15	910.35	912.88		912.99	0.0010	1.55	69.30	0.32	0.11	58.51
197	16	910.18	912.90		912.96	0.0005	1.14	73.91	0.24	0.06	55.15
154	17	909.95	912.83		912.92	0.0008	1.49	58.77	0.30	0.10	46.52
111	18	910.25	912.62		912.85	0.0028	2.17	35.92	0.52	0.23	30.20
99	19	910.25	912.60		912.81	0.0022	2.20	38.81	0.48	0.21	29.07
92	20	909.95	912.10	911.8	912.75	0.0061	3.56	25.45	0.79	0.64	20.97
88	21	909.95	911.80	911.8	912.69	0.0105	4.19	19.39	1.00	0.89	15.88
84	22	909.95	911.34	911.7	912.60	0.0216	4.97	15.24	1.37	1.26	14.03
76	23	910.00	912.08	911.3	912.27	0.0022	1.97	38.60	0.46	0.19	27.27
46	24	909.92	912.05		912.20	0.0015	1.80	43.59	0.40	0.15	25.17
6.591	25	910.50	911.57	911.6	912.10	0.0021	3.22	23.23	0.99	0.53	24.58



T10 S9 Q = 78 m ³ /s											
	Sección	Min Ch	W. S.	Crit	E-G-	E.G.	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel	Top
		El	Elev	W.S.	Elev	Slope					
		m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
438	1	913.50	914.17	914.17	914.50	0.00251	2.55	31.06	1.00	0.33	48.58
421	2	911.25	913.67	911.98	913.71	4.5E-05	0.81	101.77	0.17	0.03	43.19
401	3	911.00	912.96		913.64	0.00831	4.03	35.06	0.93	0.68	24.17
398	4	910.50	913.28		913.48	0.00196	2.03	39.25	0.40	0.21	15.77
395	5	910.40	913.27		913.48	0.00025	2.02	41.86	0.39	0.21	17.89
393	6	910.60	913.29		913.47	0.00153	1.92	48.46	0.38	0.18	27.11
389	7	910.60	913.35		913.44	0.00071	1.28	64.93	0.27	0.08	34.78
383	8	910.55	913.22		913.42	0.00193	1.98	56.85	0.44	0.20	43.29
369	9	910.55	913.20		913.39	0.00162	1.97	71.85	0.40	0.19	58.57
363	10	910.90	913.02		913.36	0.00386	2.63	59.01	0.61	0.34	47.24
322	11	910.35	913.05		913.22	0.00150	1.79	58.08	0.39	0.16	32.83
300	12	910.35	913.10		913.17	0.00067	1.13	68.80	0.26	0.07	57.04
268	13	909.85	913.02		913.14	0.00087	1.62	59.52	0.30	0.12	41.17
250	14	910.05	913.01		913.12	0.00081	1.56	65.64	0.30	0.10	46.69
223	15	910.35	912.99		913.10	0.00094	1.54	75.61	0.32	0.11	58.52
197	16	910.18	913.01		913.06	0.00051	1.13	79.91	0.23	0.06	55.79
154	17	909.95	912.94		913.03	0.00076	1.46	64.11	0.28	0.09	48.32
111	18	910.25	912.76		912.97	0.00242	2.10	40.12	0.49	0.21	32.11
99	19	910.25	912.74		912.94	0.00188	2.14	42.86	0.45	0.20	30.18
92	20	909.95	912.20	911.88	912.87	0.00601	3.64	27.42	0.79	0.67	21.82
88	21	909.95	911.88	911.88	912.81	0.01034	4.29	20.69	1.00	0.93	16.68
84	22	909.95	911.40	911.73	912.72	0.02141	5.10	16.04	1.38	1.32	14.12
76	23	910.00	912.14	911.39	912.34	0.00225	2.02	40.33	0.46	0.20	27.39
46	24	909.92	912.11		912.28	0.00156	1.85	45.15	0.40	0.16	25.21
6.591	25	910.50	911.62	911.62	912.17	0.00208	3.28	24.48	0.99	0.55	25.49



Periodos de retorno de 50 años:

T50 S7 Q = 135 m³/s										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	914.46	914.5	914.93	0.0022	3.05	45.72	0.99	0.47	50.31
2	911.25	914.62	912.3	914.67	5E-05	1.01	146.00	0.17	0.05	48.09
3	911.00	914.17		914.63	0.0033	3.52	72.39	0.63	0.46	33.65
4	910.50	914.25		914.58	0.0023	2.55	54.70	0.43	0.32	15.83
5	910.40	914.23		914.57	0.0003	2.60	59.23	0.43	0.34	18.30
6	910.60	914.31		914.54	0.0013	2.21	76.16	0.37	0.23	27.24
7	910.60	914.39		914.50	0.0006	1.51	100.90	0.26	0.11	34.98
8	910.55	914.25		914.48	0.0014	2.18	110.80	0.40	0.23	54.60
9	910.55	914.23		914.46	0.0013	2.24	135.20	0.38	0.23	63.46
10	910.90	914.13		914.45	0.0020	2.61	131.30	0.48	0.31	67.10
11	910.35	914.16		914.35	0.0011	1.99	111.30	0.35	0.19	48.99
12	910.35	914.22		914.30	0.0004	1.24	137.50	0.23	0.08	61.42
13	909.85	914.18		914.29	0.0005	1.59	133.60	0.25	0.10	65.19
14	910.05	914.19		914.27	0.0004	1.44	129.70	0.23	0.08	65.10
15	910.35	914.17		914.26	0.0005	1.45	145.00	0.24	0.08	58.59
16	910.18	914.19		914.24	0.0002	1.03	146.70	0.17	0.05	56.41
17	909.95	914.15		914.22	0.0004	1.27	125.90	0.21	0.07	52.17
18	910.25	914.08		914.20	0.0007	1.60	98.62	0.28	0.12	52.99
19	910.25	914.05		914.19	0.0007	1.79	92.71	0.30	0.14	49.40
20	909.95	913.16		914.10	0.0052	4.32	50.22	0.78	0.94	24.77
21	909.95	912.70	912.7	914.03	0.0091	5.13	36.32	1.00	1.33	19.68
22	909.95	912.00	912.5	913.92	0.0193	6.15	26.95	1.39	1.92	24.28
23	910.00	911.23	912.0	913.62	0.0600	6.85	19.72	2.16	2.39	19.31
24	909.92	912.73	911.8	912.99	0.0018	2.36	62.41	0.45	0.26	30.70
25	910.50	912.10	912.1	912.87	0.0018	3.90	37.63	0.98	0.76	28.03



T50 S9 Q = 162 m ³ /s										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	914.89	914.58	915.21	0.00093	2.52	67.21	0.68	0.32	50.76
2	911.25	915.07		915.12	4.3E-05	1.06	167.42	0.17	0.06	48.09
3	911.00	914.69		915.09	0.00237	3.30	89.90	0.55	0.40	33.66
4	910.50	914.70		915.07	0.00244	2.71	61.79	0.43	0.37	15.87
5	910.40	914.67		915.06	0.00028	2.79	67.23	0.44	0.40	18.36
6	910.60	914.77		915.01	0.00124	2.30	88.76	0.36	0.24	27.29
7	910.60	914.85		914.98	0.00056	1.59	117.25	0.26	0.12	35.02
8	910.55	914.73		914.96	0.00115	2.21	136.84	0.37	0.23	54.75
9	910.55	914.70		914.95	0.00116	2.29	165.34	0.37	0.24	63.61
10	910.90	914.63		914.93	0.00162	2.58	164.82	0.44	0.30	67.22
11	910.35	914.65		914.85	0.00095	2.06	135.32	0.34	0.21	49.09
12	910.35	914.72		914.80	0.00039	1.28	168.47	0.22	0.08	63.14
13	909.85	914.69		914.79	0.00046	1.59	166.64	0.24	0.10	65.23
14	910.05	914.70		914.77	0.00034	1.39	163.34	0.21	0.07	65.64
15	910.35	914.68		914.76	0.00041	1.45	174.91	0.23	0.08	60.10
16	910.18	914.70		914.75	0.00021	1.03	175.99	0.16	0.05	59.36
17	909.95	914.66		914.73	0.00030	1.28	153.40	0.19	0.07	55.75
18	910.25	914.61		914.71	0.00049	1.49	126.64	0.25	0.10	52.99
19	910.25	914.58		914.70	0.00054	1.69	119.89	0.26	0.12	51.48
20	909.95	913.53		914.60	0.00509	4.61	61.05	0.79	1.07	36.05
21	909.95	913.06	913.06	914.54	0.0086	5.42	43.55	0.99	1.48	21.42
22	909.95	912.24	912.80	914.42	0.01878	6.55	33.09	1.40	2.18	25.49
23	910.00	911.35	912.22	914.11	0.06040	7.36	22.00	2.20	2.76	19.40
24	909.92	912.99	911.97	913.28	0.00184	2.53	70.80	0.46	0.29	32.86
25	910.50	912.31	912.31	913.16	0.00174	4.13	43.57	0.98	0.85	29.81



Periodos de retorno de 100 años:

T100S7 Q = 172 m ³ /s										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	915.09	914.6	915.37	0.00	2.32	77.81	0.59	0.27	50.98
2	911.25	915.24		915.30	0.00	1.08	175.80	0.17	0.06	48.09
3	911.00	914.88		915.26	0.00	3.24	96.44	0.53	0.38	33.66
4	910.50	914.88		915.26	0.00	2.76	64.60	0.43	0.38	15.88
5	910.40	914.84		915.25	0.00	2.84	70.41	0.44	0.41	18.38
6	910.60	914.96		915.20	0.00	2.32	93.72	0.36	0.24	27.31
7	910.60	915.03		915.16	0.00	1.60	123.60	0.25	0.13	35.05
8	910.55	914.92		915.15	0.00	2.21	147.10	0.36	0.23	54.81
9	910.55	914.89		915.13	0.00	2.30	177.20	0.36	0.24	63.68
10	910.90	914.83		915.12	0.00	2.56	177.80	0.43	0.29	67.27
11	910.35	914.84		915.05	0.00	2.08	144.70	0.33	0.21	49.15
12	910.35	914.91		915.00	0.00	1.29	180.70	0.21	0.08	63.67
13	909.85	914.89		914.98	0.00	1.58	179.40	0.23	0.10	65.23
14	910.05	914.9		914.97	0.00	1.37	176.30	0.20	0.07	65.64
15	910.35	914.88		914.96	0.00	1.44	186.70	0.22	0.08	60.42
16	910.18	914.89		914.94	0.00	1.03	187.80	0.16	0.05	60.65
17	909.95	914.86		914.93	0.00	1.27	164.60	0.19	0.07	57.05
18	910.25	914.81		914.91	0.00	1.46	137.40	0.23	0.10	52.99
19	910.25	914.79		914.90	0.00	1.65	130.50	0.25	0.12	51.88
20	909.95	913.72		914.80	0.00	4.65	67.94	0.77	1.08	38.64
21	909.95	913.15	913.2	914.72	0.01	5.58	45.60	1.00	1.57	22.26
22	909.95	912.33	912.9	914.60	0.02	6.69	35.36	1.40	2.27	25.69
23	910.00	911.39	912.3	914.29	0.06	7.54	22.82	2.22	2.90	19.47
24	909.92	913.07	912.0	913.39	0.00	2.63	73.50	0.48	0.31	34.00
25	910.50	912.40	912.4	913.26	0.00	4.17	46.16	0.97	0.86	30.64



T100S9 Q = 220 m ³ /s										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	916.00	914.82	916.18	0.00024	1.89	124.55	0.38	0.18	59.71
2	911.25	916.08		916.14	3.6E-05	1.14	216.00	0.17	0.07	48.09
3	911.00	915.77		916.11	0.00146	3.08	126.24	0.45	0.34	33.67
4	910.50	915.65		916.09	0.00256	2.97	76.96	0.42	0.44	15.96
5	910.40	915.60		916.09	0.00026	3.10	84.80	0.44	0.49	19.95
6	910.60	915.75		916.02	0.00105	2.44	115.75	0.35	0.27	28.94
7	910.60	915.84		915.98	0.00048	1.70	152.00	0.25	0.14	37.60
8	910.55	915.73		915.97	0.00086	2.25	191.81	0.34	0.24	55.07
9	910.55	915.70		915.95	0.00093	2.38	228.91	0.34	0.25	63.94
10	910.90	915.66		915.94	0.00114	2.57	233.67	0.39	0.29	67.47
11	910.35	915.66		915.89	0.00078	2.19	185.09	0.32	0.23	50.20
12	910.35	915.74		915.84	0.00031	1.35	234.46	0.20	0.09	66.53
13	909.85	915.73		915.82	0.00035	1.60	234.72	0.22	0.10	68.95
14	910.05	915.75		915.81	0.00023	1.32	234.83	0.18	0.06	74.30
15	910.35	915.71		915.80	0.00033	1.51	239.73	0.21	0.09	68.19
16	910.18	915.74		915.78	0.00015	1.03	241.04	0.14	0.05	65.44
17	909.95	915.71		915.77	0.00021	1.24	214.78	0.17	0.06	60.25
18	910.25	915.67		915.76	0.00031	1.40	182.61	0.20	0.09	52.99
19	910.25	915.65		915.75	0.00034	1.56	176.14	0.22	0.10	53.30
20	909.95	914.41		915.63	0.00438	4.97	100.10	0.76	1.23	49.50
21	909.95	913.74	913.74	915.55	0.00803	5.99	61.87	0.99	1.81	34.61
22	909.95	912.73	913.43	915.41	0.01790	7.29	45.82	1.41	2.69	27.30
23	910.00	911.58	912.60	915.09	0.05999	8.30	26.55	2.26	3.51	19.88
24	909.92	913.50	912.38	913.85	0.00183	2.80	87.98	0.48	0.35	34.01
25	910.50	912.73	912.73	913.72	0.00155	4.48	57.09	0.96	0.98	34.23



Periodos de retorno de 500 años:

T500S7 Q = 292 m ³ /s										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	917.16	915.1	917.31	0.0001	1.71	194.1	0.29	0.15	59.71
2	911.25	917.21		917.29	3E-05	1.22	270.6	0.16	0.07	48.09
3	911.00	916.92		917.26	0.0011	3.08	164.9	0.40	0.34	33.69
4	910.50	916.72		917.23	0.0025	3.22	95.99	0.43	0.51	21.98
5	910.40	916.63		917.22	0.0003	3.42	108.3	0.44	0.60	29.65
6	910.60	916.83		917.13	0.0009	2.62	148.2	0.34	0.30	31.31
7	910.60	916.92		917.09	0.0004	1.84	194.5	0.24	0.17	42.83
8	910.55	916.82		917.08	0.0007	2.35	252.2	0.32	0.25	55.40
9	910.55	916.79		917.07	0.0008	2.51	298.7	0.32	0.28	64.31
10	910.90	916.76		917.06	0.0009	2.65	308.1	0.36	0.30	67.75
11	910.35	916.75		917.01	0.0007	2.36	243.7	0.31	0.26	58.87
12	910.35	916.85		916.96	0.0003	1.44	313.5	0.19	0.10	73.93
13	909.85	916.84		916.95	0.0003	1.68	316.4	0.21	0.10	73.54
14	910.05	916.87		916.93	0.0002	1.33	320.0	0.16	0.06	75.94
15	910.35	916.84		916.92	0.0003	1.50	318.6	0.19	0.08	70.24
16	910.18	916.86		916.91	0.0001	1.02	314.6	0.13	0.05	65.44
17	909.95	916.83		916.90	0.0002	1.21	282.7	0.15	0.06	60.25
18	910.25	916.80		916.89	0.0002	1.39	242.5	0.18	0.09	52.99
19	910.25	916.78		916.88	0.0002	1.52	236.6	0.19	0.10	53.30
20	909.95	915.30		916.75	0.0041	5.42	145.2	0.75	1.44	51.25
21	909.95	914.53	914.5	916.66	0.0074	6.52	95.5	0.98	2.13	46.21
22	909.95	913.30	914.2	916.50	0.0166	7.97	62.2	1.40	3.20	29.58
23	910.00	911.84	913.0	916.16	0.0591	9.24	32.2	2.31	4.32	25.37
24	909.92	914.02	912.9	914.44	0.0018	3.08	105.6	0.49	0.42	34.43
25	910.50	913.19	913.2	914.31	0.0014	4.82	73.1	0.94	1.11	35.17



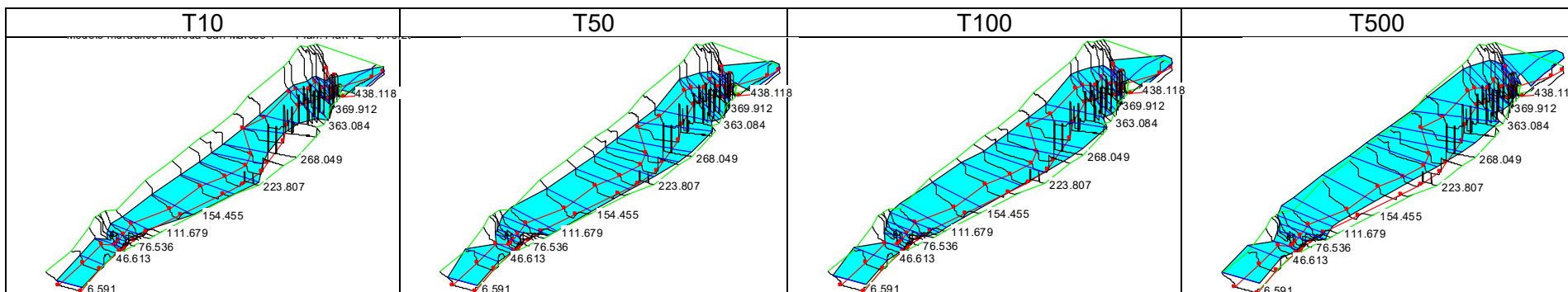
T500S9 Q = 449 m ³ /S										
	Min Ch El	W. S. Elev	Crit W.S.	E-G- Elev	E.G. Slope	VelChnl	Flowarea	FroudeChl	Vel Head	Top Width
Sección	m	m	m	m		m/s	m ²		m	m
1	913.50	919.37	915.61	919.51	5.7E-05	1.64	326.01	0.22	0.13	59.71
2	911.25	919.40		919.49	2.6E-05	1.37	375.83	0.15	0.09	48.09
3	911.00	919.08		919.46	0.00091	3.45	247.79	0.39	0.38	45.39
4	910.50	919.07		919.46	0.00136	2.98	180.15	0.33	0.39	46.67
5	910.40	918.61		919.41	0.00023	3.97	187.68	0.44	0.80	55.10
6	910.60	918.87		919.30	0.00092	3.13	226.60	0.35	0.43	50.92
7	910.60	919.03		919.23	0.00035	2.05	299.59	0.23	0.20	60.95
8	910.55	918.91		919.22	0.00058	2.62	386.20	0.30	0.31	74.83
9	910.55	918.88		919.21	0.00065	2.77	446.75	0.31	0.32	72.85
10	910.90	918.86		919.20	0.00070	2.87	454.78	0.33	0.35	70.87
11	910.35	918.88		919.16	0.00051	2.49	372.48	0.28	0.28	60.62
12	910.35	918.98		919.10	0.00020	1.57	470.99	0.18	0.12	73.98
13	909.85	918.99		919.09	0.00022	1.73	473.91	0.19	0.11	73.62
14	910.05	919.02		919.07	0.00013	1.32	482.99	0.14	0.05	75.94
15	910.35	918.98		919.07	0.00018	1.55	469.09	0.17	0.09	70.24
16	910.18	919.00		919.05	8.5E-05	1.06	454.70	0.12	0.05	65.44
17	909.95	918.97		919.05	0.00012	1.25	411.64	0.14	0.07	60.25
18	910.25	918.94		919.04	0.00017	1.47	356.02	0.17	0.10	52.99
19	910.25	918.93		919.04	0.00018	1.57	350.98	0.17	0.11	53.30
20	909.95	916.99		918.86	0.00367	6.20	232.62	0.75	1.86	51.73
21	909.95	916.02	916.02	918.75	0.00655	7.44	167.05	0.97	2.73	51.45
22	909.95	914.40	915.47	918.56	0.01481	9.13	101.72	1.39	4.17	42.18
23	910.00	912.23	913.67	918.17	0.06235	10.98	42.89	2.46	5.93	27.59
24	909.92	915.00	913.63	915.57	0.00184	3.56	141.02	0.51	0.57	39.21
25	910.50	913.94	913.94	915.42	0.00137	5.63	99.38	0.97	1.48	35.17



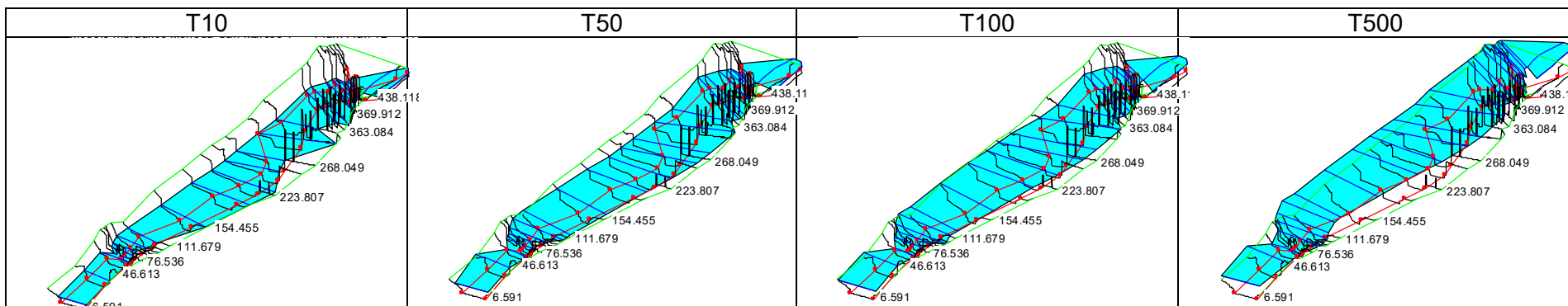
Apéndice III.3

Diagramas 3D para las series de estudio

Serie completa



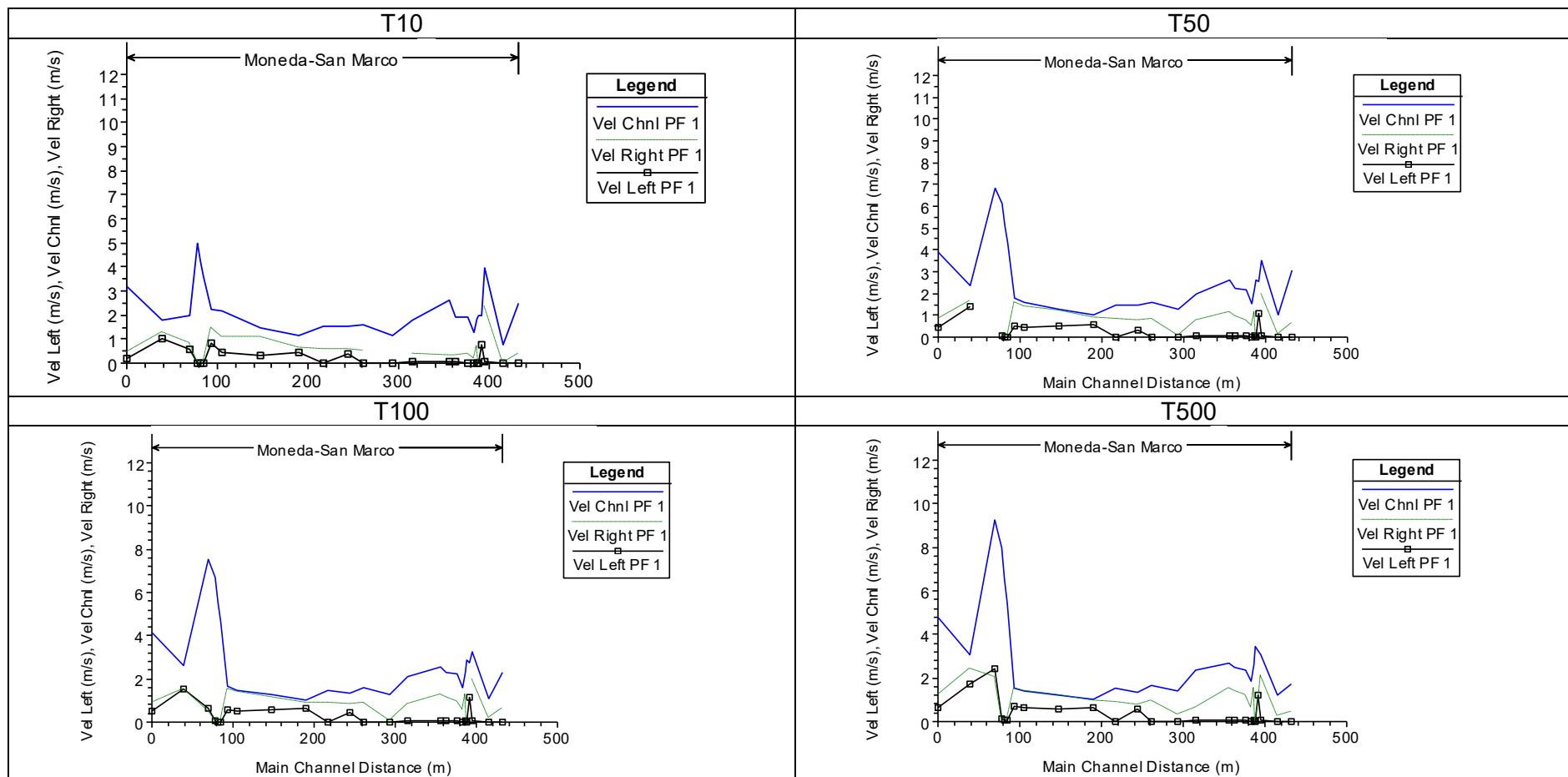
Serie sin embalse





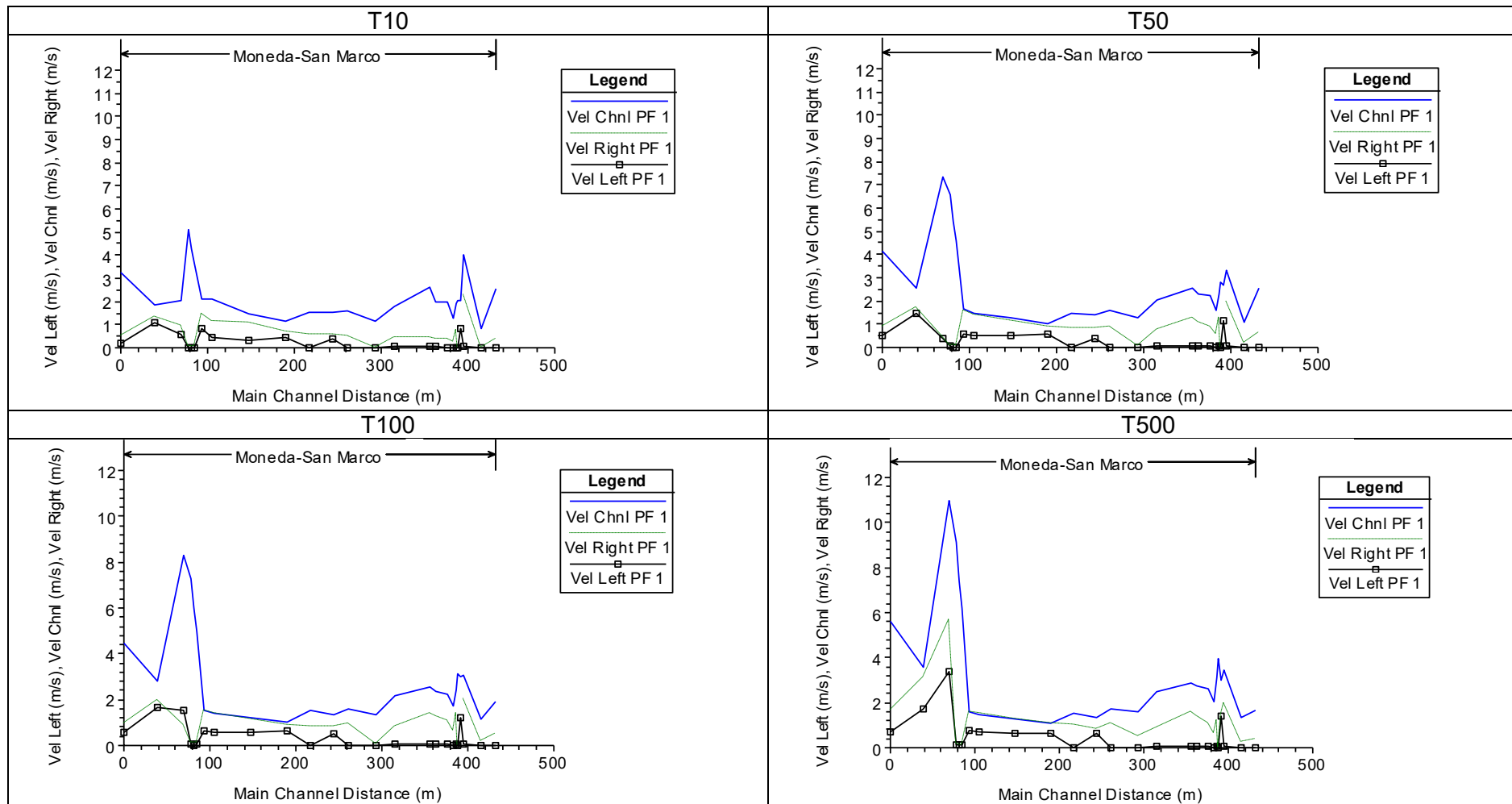
Apéndice III.4

Diagramas de velocidad del flujo para márgenes y canal. Serie completa





Serie sin embalse





Apéndice III.5

Tabla de velocidades para margen izquierda, derecha y canal del río

	Velocidades (m/s) Serie Completa											
	T10			T50			T100			T500		
	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha
1	0.02	2.50	0.36	0.02	3.05	0.64	0.02	2.32	0.64	0.01	1.71	0.46
2	0.01	0.79	0.01	0.01	1.01	0.13	0.01	1.08	0.18	0.01	1.22	0.25
3	0.09	3.93	2.35	0.08	3.52	1.96	0.08	3.24	2.00	0.07	3.08	2.08
4	0.78	1.97		1.06	2.55		1.16	2.76		1.22	3.22	0.72
5	0.01	1.95	0.01	0.01	2.60	0.01	0.02	2.84	0.01	0.02	3.42	0.01
6	0.03	1.88	0.68	0.04	2.21	1.17	0.04	2.32	1.31	0.04	2.62	1.54
7	0.01	1.26	0.21	0.02	1.51	0.52	0.02	1.60	0.59	0.02	1.84	0.64
8	0.03	1.94	0.36	0.04	2.18	0.78	0.04	2.21	0.95	0.04	2.35	1.18
9	0.04	1.92	0.33	0.04	2.24	0.95	0.04	2.30	1.13	0.05	2.51	1.39
10	0.06	2.60	0.34	0.05	2.61	1.13	0.05	2.56	1.29	0.05	2.65	1.50
11	0.04	1.76	0.36	0.03	1.99	0.73	0.04	2.08	0.81	0.04	2.36	0.67
12	0.00	1.12		0.02	1.24	0.04	0.02	1.29	0.05	0.03	1.44	0.29
13	0.01	1.60	0.50	0.02	1.59	0.83	0.03	1.58	0.91	0.03	1.68	0.97
14	0.37	1.56	0.55	0.31	1.44	0.79	0.44	1.37	0.81	0.60	1.33	0.78
15	0.02	1.55	0.55	0.03	1.45	0.81	0.02	1.44	0.87	0.03	1.50	0.90
16	0.46	1.14	0.63	0.57	1.03	0.90	0.61	1.03	0.90	0.62	1.02	0.97
17	0.34	1.49	1.07	0.49	1.27	1.21	0.55	1.27	1.16	0.59	1.21	1.20
18	0.44	2.17	1.10	0.45	1.60	1.38	0.53	1.46	1.38	0.63	1.39	1.42
19	0.86	2.20	1.46	0.50	1.79	1.62	0.58	1.65	1.55	0.68	1.52	1.53
20	0.01	3.56	0.04	0.01	4.32	0.08	0.03	4.65	0.09	0.08	5.42	0.12
21	0.01	4.19	0.04	0.01	5.13	0.09	0.01	5.58	0.10	0.07	6.52	0.12
22	0.02	4.97	0.05	0.04	6.15	0.07	0.06	6.69	0.09	0.11	7.97	0.13
23	0.57	1.97	0.83		6.85		0.66	7.54	0.53	2.42	9.24	2.05
24	1.02	1.80	1.25	1.40	2.36	1.65	1.56	2.63	1.55	1.72	3.08	2.43
25	0.16	3.22	0.46	0.42	3.90	0.84	0.50	4.17	0.89	0.62	4.82	1.23



Velocidades (m/s) **Serie Sin Embalse**

	T10			T50			T100			T500		
	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha	Izquierda	Canal	Derecha
1	0.02	2.55	0.40	0.02	2.52	0.67	0.01	1.89	0.53	0.01	1.64	0.39
2	0.01	0.81	0.01	0.01	1.06	0.17	0.01	1.14	0.22	0.01	1.37	0.28
3	0.09	4.03	2.32	0.08	3.30	2.00	0.07	3.08	2.02	0.07	3.45	1.95
4	0.82	2.03		1.13	2.71		1.22	2.97		1.41	2.98	1.47
5	0.01	2.02	0.01	0.02	2.79	0.01	0.02	3.10	0.01	0.02	3.97	0.01
6	0.03	1.92	0.74	0.04	2.30	1.28	0.04	2.44	1.42	0.04	3.13	1.21
7	0.01	1.28	0.26	0.02	1.59	0.58	0.02	1.70	0.65	0.03	2.05	0.66
8	0.03	1.98	0.40	0.04	2.21	0.92	0.04	2.25	1.08	0.04	2.62	1.07
9	0.04	1.97	0.38	0.04	2.29	1.09	0.04	2.38	1.26	0.05	2.77	1.43
10	0.06	2.63	0.43	0.05	2.58	1.26	0.05	2.57	1.40	0.05	2.87	1.60
11	0.04	1.79	0.42	0.04	2.06	0.79	0.04	2.19	0.81	0.04	2.49	0.90
12	0.00	1.13	0.02	0.02	1.28	0.05	0.03	1.35	0.09	0.03	1.57	0.54
13	0.01	1.62	0.54	0.02	1.59	0.89	0.03	1.60	0.97	0.03	1.73	1.09
14	0.36	1.56	0.59	0.41	1.39	0.81	0.53	1.32	0.81	0.66	1.32	0.84
15	0.03	1.54	0.59	0.02	1.45	0.86	0.03	1.51	0.85	0.03	1.55	1.00
16	0.47	1.13	0.68	0.60	1.03	0.90	0.62	1.03	0.90	0.64	1.06	1.08
17	0.35	1.46	1.10	0.54	1.28	1.17	0.57	1.24	1.15	0.62	1.25	1.30
18	0.45	2.10	1.16	0.52	1.49	1.39	0.59	1.40	1.39	0.70	1.47	1.50
19	0.81	2.14	1.49	0.57	1.69	1.58	0.64	1.56	1.51	0.75	1.57	1.61
20	0.01	3.64	0.05	0.02	4.61	0.09	0.05	4.97	0.11	0.12	6.20	0.15
21	0.01	4.29	0.05	0.01	5.42	0.10	0.03	5.99	0.10	0.12	7.44	0.14
22	0.02	5.10	0.05	0.06	6.55	0.09	0.09	7.29	0.12	0.11	9.13	0.17
23	0.60	2.02	0.93	0.36	7.36	0.43	1.53	8.30	0.90	3.41	10.98	5.66
24	1.06	1.85	1.32	1.50	2.53	1.73	1.64	2.80	1.96	1.70	3.56	3.13
25	0.18	3.28	0.48	0.49	4.13	0.88	0.57	4.48	0.96	0.71	5.63	1.67



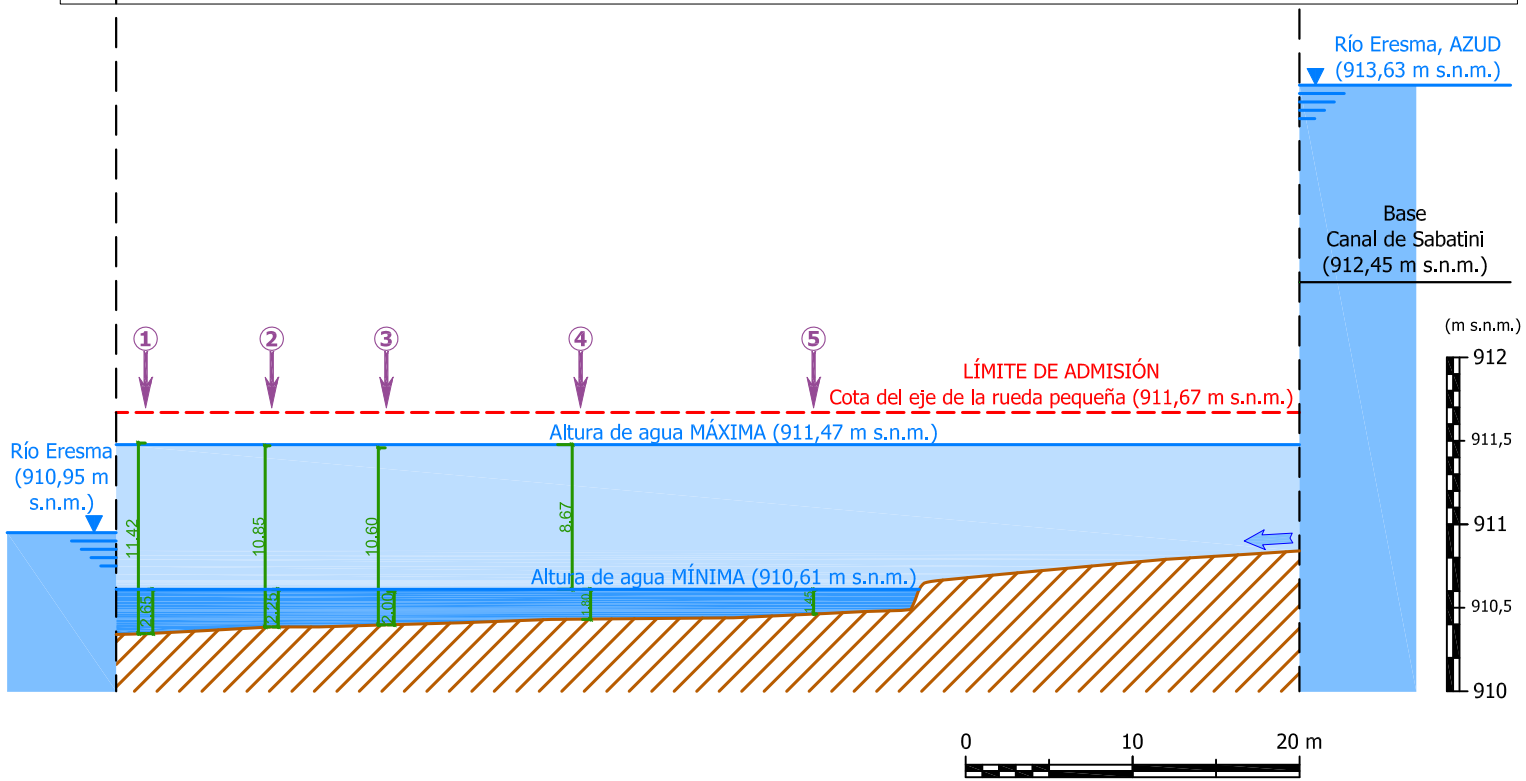
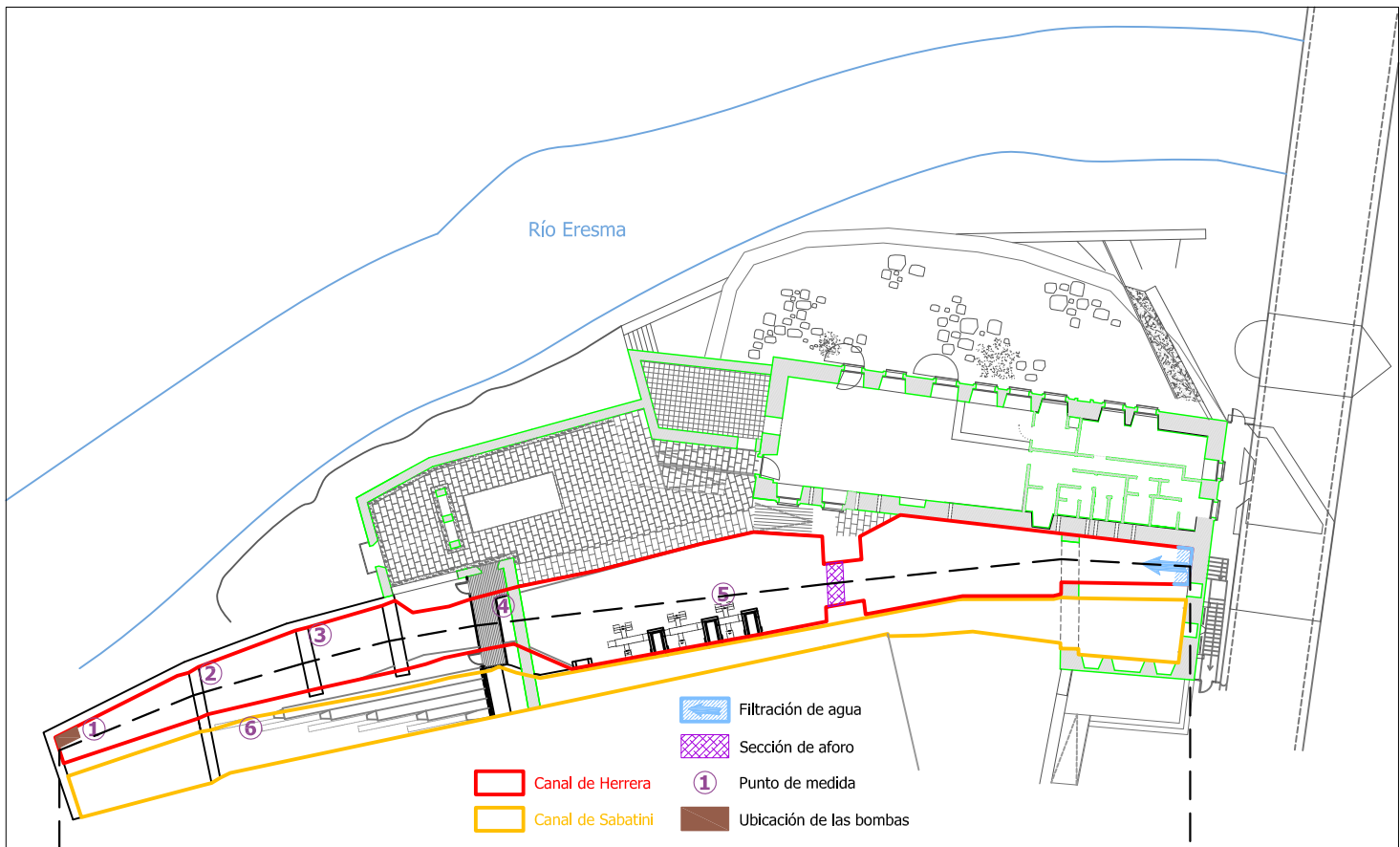
Altura de la lámina de agua

nº	Nombre	Altura (m s.n.m.)								
		(m)	T10S7	T10S9	T50S7	T50S9	T100S7	T100S9	T500S7	T500S9
1	Inicio azud	438	914.14	914.17	914.46	914.89	915.09	916.00	917.16	919.37
2	Bajada azud	421	913.57	913.67	914.62	915.07	915.24	916.08	917.21	919.40
3	Antes Puente Moneda	401	912.88	912.96	914.17	914.69	914.88	915.77	916.92	919.08
4	Comienzo Puente Moneda	398	913.18	913.28	914.25	914.70	914.88	915.65	916.72	919.07
5	Centro Puente Moneda	395	913.18	913.27	914.23	914.67	914.84	915.60	916.63	918.61
6	Fin Puente Moneda	393	913.20	913.29	914.31	914.77	914.96	915.75	916.83	918.87
7	Salida Puente Moneda	389	913.26	913.35	914.39	914.85	915.03	915.84	916.92	919.03
8	Terraza 1	383	913.13	913.22	914.25	914.73	914.92	915.73	916.82	918.91
9	Terraza 2	369	913.11	913.20	914.23	914.70	914.89	915.70	916.79	918.88
10	Terraza 3	363	912.93	913.02	914.13	914.63	914.83	915.66	916.76	918.86
11	Fin Terraza	322	912.96	913.05	914.16	914.65	914.84	915.66	916.75	918.88
12	Fin Casa Moneda	300	913.00	913.10	914.22	914.72	914.91	915.74	916.85	918.98
13	Salida de Canales	268	912.91	913.02	914.18	914.69	914.89	915.73	916.84	918.99
14	Jardín	250	912.91	913.01	914.19	914.70	914.90	915.75	916.87	919.02
15	Pradera 1	223	912.88	912.99	914.17	914.68	914.88	915.71	916.84	918.98
16	Pradera 2	197	912.90	913.01	914.19	914.70	914.89	915.74	916.86	919.00
17	Pradera 3	154	912.83	912.94	914.15	914.66	914.86	915.71	916.83	918.97
18	Pradera 4	111	912.62	912.76	914.08	914.61	914.81	915.67	916.8	918.94
19	Prepuente San Marcos	99	912.60	912.74	914.05	914.58	914.79	915.65	916.78	918.93
20	Inicio Puente San Marcos	92	912.10	912.20	913.16	913.53	913.72	914.41	915.30	916.99
21	Centro Puente San Marcos	88	911.80	911.88	912.70	913.06	913.15	913.74	914.53	916.02
22	Fin Puente Marcos	84	911.34	911.40	912.00	912.24	912.33	912.73	913.3	914.40
23	Salida Puente Marcos	76	912.08	912.14	911.23	911.35	911.39	911.58	911.84	912.23
24	Marcos-Azud final	46	912.05	912.11	912.73	912.99	913.07	913.50	914.02	915.00
25	Azud final	6.591	911.57	911.62	912.10	912.31	912.40	912.73	913.19	913.94



APÉNDICE IV

PLANTA Y PERFIL DEL SISTEMA DE CANALES DE LA REAL CASA DE LA MONEDA





APÉNDICE V

REPORTAJE FOTOGRÁFICO DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS



Sistema de canales (canal de Herrera y canal de Sabatini) aguas arriba



Sistema de canales (canal de Herrera y canal de Sabatini) aguas abajo



Tramo inicial del canal de Sabatini. Compuertas de entrada



Tramo final del canal de Sabatini. Conexión con el canal de Herrera



Aforo con micromolinetete en el canal de Herrera



Aforo con micromolinetete en el canal de Herrera



Inicio del ensayo de llenado en el canal de Herrera



Final del ensayo de llenado en el canal de Herrera



Inicio del ensayo de llenado en el canal de Herrera. Punto 1



Final del ensayo de llenado en el canal de Herrera. Punto 1



Inicio del ensayo de llenado en el canal de Herrera. Punto 2



Final del ensayo de llenado en el canal de Herrera. Punto 2



Ubicación de las bombas achique. Compuertas de salida



Tubería de evacuación de agua procedente del bombeo



APÉNDICE VI

CONSECUENCIAS TÉCNICAS, AMBIENTALES Y ECONÓMICAS DEL DRAGADO O 'LIMPIEZA' DEL CAUCE



Consecuencias técnicas, ambientales y económicas del dragado o 'limpieza' del cauce

En los últimos años, a través de los medios de comunicación locales, ha trascendido que las medidas previstas en el proyecto original de restauración de los edificios de la RCMS, consistían básicamente en el dragado del lecho del río y la construcción de un dique artificial en la margen izquierda. Estas medidas se han denominado en la prensa "saneamiento del río", y con ellas se ha polemizado acerca de si deberían haberse realizado con anterioridad al inicio de las obras en los edificios (ver El Adelantado de Segovia, El Norte de Castilla, Gente en Segovia y Zoquejo.com entre los días 24 de enero y 5 de febrero de 2009).

El dragado del lecho del río, o sea la extracción de material sólido (arenas, gravas, bloques y escombros) bajo la lámina de agua, estaba previsto realizarlo entre el puente de la Casa de la Moneda y el pontón de San Marcos (frente Parque norte del Alcázar), que actuarían como puntos fijos de cota. No obstante, en algunos medios de comunicación se comentó y propuso prolongar dicho dragado hasta la confluencia del Eresma con el Clamores (García, 2009), donde se acumulan los materiales del antiguo cono de desembocadura y restos de escombros de obras y actuaciones; e incluso extenderlo hasta el Arco de la Fuencisla (ver El Adelantado de Segovia de 24 de enero; y Proyectos Básico y de Ejecución, 1998 y 2004 respectivamente).

Se trataría de un dragado lineal, conducente a configurar un perfil longitudinal rectilíneo de pendiente homogénea entre los puntos inicial y final, lo que conllevaría profundización en el cauce de un espesor variable, entre los 50 y 60 cm. También se han producido declaraciones en prensa recomendando que dicho dragado se produjera hasta profundidades de 2,5 a 3 m, para retirar el relleno de 1,5 m que se ha producido desde el siglo XVI hasta nuestros días, más los escombros de las obras del azud generados en las obras de la CHD en 1994 y 1995 (Europapress.es 24-01-2009).

Con este dragado se pretendería bajar la cota del lecho del río, aumentar la sección húmeda del cauce y regularizar la pendiente, con lo que se conseguiría incrementar su capacidad de evacuación y la velocidad de la corriente, disminuyendo así la susceptibilidad de desbordamiento a las márgenes e inundar las mismas.

No obstante, este dragado, como cualquier otro, plantea diversos problemas e inconvenientes, tanto de índole técnica, ambiental y económica:

Problemas técnicos

- ✓ El dragado proyectado aumenta la capacidad de evacuación del cauce, pero tan sólo en una pequeña proporción, produciendo sólo un ligero aumento del periodo de retorno de desbordamiento; nunca supondrá, por sí sólo, la solución definitiva a la inundabilidad de los edificios. De hecho en el informe de García (2009) se reconoce que aún con el dragado proyectado, los edificios se hubieran inundado durante las pasadas crecidas; y los caudales registrados se han visto superados al menos siete veces en el último siglo, con lo que la capacidad del dragado se vería superada cada 10-15 años.
- ✓ Un dragado de pendiente homogénea altera la dinámica de pozas y vado natural del río asociada a estrechamientos y ensanchamientos del cauce respectivamente, por lo que según los principios básicos de la ingeniería fluvial (Lane), el río tratará de reestablecer el perfil natural y reajustar sus variables



morfométricas. De esta forma, el dragado precisará un mantenimiento cada poco tiempo (3-4 años) para mantener su efectividad.

- ✓ La alteración que el dragado introduce en la dinámica de erosión y sedimentación del río, hace que se produzca un efecto de erosión remontante aguas arriba del lugar donde empieza el dragado. Esta erosión remontante del lecho puede llegar a descalzar estructuras, como el propio azud de la RCMS, ubicado inmediatamente aguas arriba; a las pilas de los puentes de la Moneda y San Marcos, sin olvidar la propia cimentación de los muros perimetrales de la Casa de la Moneda. Este zapado puede afectar a la cimentación y estabilidad, pudiéndose producir colapsos y filtraciones por sufusión.
- ✓ El encajamiento del canal que produce el dragado genera que los taludes de las márgenes (escarpes de bancos de orilla) estén más pronunciados, generándose fenómenos gravitacionales (deslizamiento por zapado, flujos de barro...) y procesos de sufusión (*piping*), que degradan las márgenes y ensanchan artificialmente el canal de manera anárquica y descontrolada.
- ✓ La recuperación del perfil natural a partir del lecho dragado se hace mediante erosión en algunas zonas y depósito en otras (ensanchamiento). Esta sedimentación se realizará con los únicos materiales que el río Eresma es capaz de transportar con el régimen de caudales ordinarios, limos y arcillas, con lo que el lecho quedará cubierto alternativamente por zonas con un manto de bloques y gravas armados (sin finos como matriz), y otros tramos convertidos en cenagales.

Problemas ambientales

El dragado proyectado tiene efectos ambientales en el lecho y en las márgenes, y tanto durante el proceso de dragado como posteriormente:

- ✓ **Efectos ambientales durante el dragado** (inicial y los sucesivos de mantenimiento): la introducción de maquinaria pesada (retroexcavadoras, dragalinas y camiones), altera la morfología de las márgenes, desmontando los escarpes de los bancos de orilla para hacer accesos; además decapita el horizonte orgánico de los suelos, desestructura los horizontes, compacta e impermeabiliza los mismos, y destruye la vegetación ribereña; los vertidos de combustibles y lubricantes de la maquinaria contaminan los suelos y las aguas subterráneas. Además, durante el dragado se produce la remoción de los materiales finos, que son arrastrados por la corriente en suspensión, aumentando la turbidez aguas abajo y trasladando el efecto de sellado del lecho por fangos a varios kilómetros de río. Por último, los materiales extraídos deberían ser adecuadamente gestionados o reaprovechados, no suponiendo un nuevo residuo incontrolado; máxime cuando pueden estar contaminados por antiguos vertidos incontrolados al río.
- ✓ **Efectos ambientales después del dragado** (inicial y los sucesivos de mantenimiento): el lecho del cauce queda topográficamente más bajo, desconectando la lámina de agua de la vegetación riparia y su aparato radicular, lo que puede llevar a la degradación e incluso la muerte de algunos ejemplares y especies, o a una sustitución por otras menos freatofíticas. Este cambio puede modificar el sistema de relaciones entre el río y el acuífero aluvial con el que está conectado, generándose modificaciones bruscas de los niveles freáticos en las riberas. Por otro lado, el cauce dragado deja de tener



una disposición sedimentológica y distribución granulométrica natural, puesto que se alteran los mantos de depósito, se extraen preferentemente los materiales más gruesos y se dejan las fracciones más finas; esto supone que el lecho no tiene suficiente diversidad de subambientes ni elementos gruesos para facilitar la supervivencia de macroinvertebrados benthónicos, ni el frezado de la fauna piscícola; la capa de finos (limos y arcillas) sella el lecho e impide el establecimiento de flora acuática. Durante las aguas bajas, que funcionan con caudal ecológico buena parte del año, el hilo de corriente recorrerá este lecho fangoso, donde proliferarán especies nitrófilas, charcos con eutrofización, e insectos (mosquitos). La mayor profundidad del canal durante las aguas medias y altas, y el aumento de la verticalidad de las orillas, supondrá dificultades de acceso y alimentación para anfibios y anátidas.

Problemas económicos

Además de los elevados costes del dragado inicial (500.000 euros, que iban a ser sufragados por el antiguo Ministerio de la Vivienda) en un sector tan amplio (más de 500 m), el mantenimiento del dragado supondría una hipoteca continua y una elevada dependencia de repetir estas medidas.

Además del propio dragado y su mantenimiento, implicarían gastos importantes las obras complementarias para intentar corregir y detener los efectos técnicos y ambientales indicados: instalación de escolleras, gaviones, estacillados de orillas, micropilotados de estructuras, etc., que elevarían el coste general del proyecto.

