

Modelización hidráulica de una restauración fluvial y ambiental de un tramo del río Ter en la zona de la Pilastra, Salt (Girona), para la compatibilización con el uso lúdico-deportivo

Agustí Pere Figueras i Romero, ABM Ingenieros y Consultores, afigueras@abmgrou.net

Iván Bustamante i Galera, Ayuntamiento de Salt, ibustamante@salt.cat

Joan Macarro i Ortega, ABM Ingenieros y Consultores, jmacarro@abmgrou.net

François Escorihuela, ABM Ingenieros y Consultores

1 Introducción

El Club Piragüismo Salt-Ter es una entidad deportiva sin ánimo de lucro que se constituyó hace 15 años, cuyo objeto social es la promoción y la práctica del piragüismo en general, y de las modalidades del piragüismo de aguas bravas en particular, en las comarcas gerundenses. Este organismo gestiona, desde hace más de diez años, el desarrollo del piragüismo en la zona de la Pilastra y que ha permitido el fomento de su práctica en las comarcas de Girona. Durante estos años se han efectuado varias pruebas de promoción para niños y niñas que fomentan el deporte y el respeto a la naturaleza.

El Ayuntamiento de Salt, conjuntamente con el Club Piragüismo Salt-Ter, ha promovido el acondicionamiento del campo de eslalon de La Pilastra, con el objetivo de poder disponer de una instalación deportiva adecuada a la práctica del piragüismo y que sea apta para todo tipo de usuarios, desde los principiantes hasta los más expertos. Esta instalación permitirá promocionar un deporte y también favorecer el respeto al medio ambiente desde la vertiente más social del deporte.

El ámbito de actuación del proyecto se sitúa en el cauce del río Ter, al límite este del término municipal de Salt (Gironès). El tramo de actuación abarca una longitud de unos 305 metros a lo largo del brazo derecho del río Ter en la zona de La Pilastra. En este tramo, el río discurre en paralelo con la vía verde del Carrilet de Olot a Girona, muy utilizada por la población como zona de recreo y para su uso lúdico-deportivo.

La zona de actuación tiene unos valores ecológicos importantes ya que se trata de un espacio incluido en la Red Natura 2000 como LIC, y tiene hábitats de interés comunitario no prioritarios como los ríos de tierra baja y de montaña con vegetación sumergida o parcialmente flotante (*Ranunculion fluitantis* y *Callitriche-Batrachion*), encinares y carrascales.

Con el fin de minimizar el posible impacto de las actuaciones de restauración fluvial para la adaptación del tramo del río Ter a la práctica del piragüismo, se consideró desde el inicio de su promoción la realización de una modelización hidráulica de detalle con el fin de evitar modificaciones posteriores a la ejecución de los trabajos si no se cumplieran las condiciones de flujo locales requeridas para la práctica del piragüismo. Por consiguiente, el presente artículo presenta el proceso realizado durante todas las fases de desarrollo de los trabajos de diseño y control de ejecución de las actuaciones desarrollados por la empresa ABM Ingenieros y Consultores (ABM) junto con el equipo técnico del Ayuntamiento de Salt con tal finalidad.

2 Descripción de las actuaciones de restauración fluvial y ambiental

En los trabajos previos de desarrollo del proyecto se estudiaron dos alternativas para el acondicionamiento de la pista de slalom para piragüismo de La Pilastra. En primer lugar, debido a la poca pendiente del tramo, se estudió la posibilidad de corregir la pendiente longitudinal del cauce del río Ter con el fin de incrementar el desnivel de la pista de slalom y por tanto las posibilidades para la práctica deportiva. En segundo lugar, se estudió mantener el cauce actual concentrando el flujo con diferentes elementos (deflectores y obstáculos) que permitieran convertir este tramo de río en un tramo de aguas bravas. Con el objetivo principal de minimizar los impactos sobre el medio ambiente y evitar la creación de problemas de estabilidad del cauce por la modificación del perfil longitudinal del mismo, finalmente se aprobó la segunda propuesta y que fue ratificada por la correspondiente Declaración de Impacto Ambiental.

La solución elegida planteaba la construcción de estructuras que desviarán y modificarán el régimen hidráulico del río para favorecer las condiciones necesarias para la práctica deportiva del kayak, en sus disciplinas de estilo libre y eslalon.

Las dos disciplinas tienen unos requerimientos hidráulicos distintos: mientras que el estilo libre necesita un resalte donde poder ejecutar las distintas maniobras, el eslalon necesita zona de aguas rápidas pero también zonas a contracorriente. Así pues, se diseñó una combinación de estructuras que permitiera la práctica de ambas modalidades, mediante la construcción de 16 deflectores, que desvían el flujo y crean contracorrientes, y dos estructuras transversales para producir resaltes aptos para la práctica de la modalidad de estilo libre.

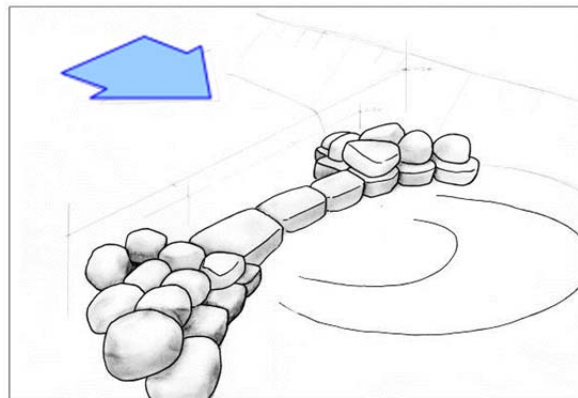


Figura 1 Esquema de la representación de una estructura tipo para generar un resalte de estilo libre.

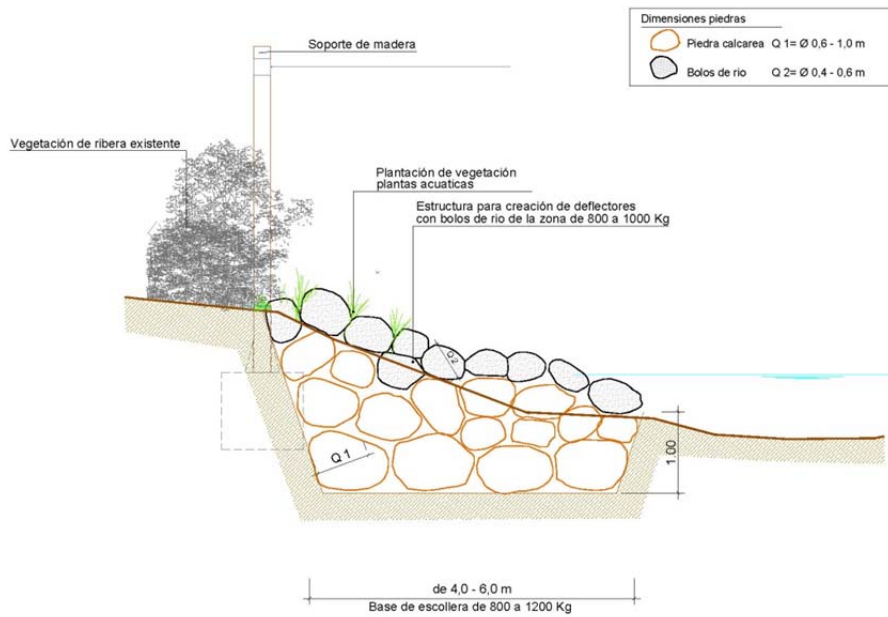


Figura 2 Sección transversal de un deflector construido con piedras de escollera y cantos rodados de grandes dimensiones y del propio río.

Desde el punto de vista de mejora ambiental, la principal actuación consiste en la sustitución de la vegetación alóctona de las inmediaciones de la pista de eslalon. En la zona de actuación existían robinias (*Robinia pseudoacacia*), plátanos de sombra (*Platanus x hispanica*), negundos (*Acer negundo*), chopos de Canadá (*Populus x canadensis*), aligustres arbóreos (*Ligustrum lucidum*) y un rodal de caña (*Arundo donax*). En la margen derecha, fácilmente accesible y con mayor afectación, tanto los árboles como las cañas fueron arrancados de raíz. En la margen izquierda se cortaron selectivamente los pies indeseados. Tanto los tocones de la margen izquierda como los rebrotes a partir de trozos de raíces en la margen derecha fueron tratados con aplicación localizada de herbicida.

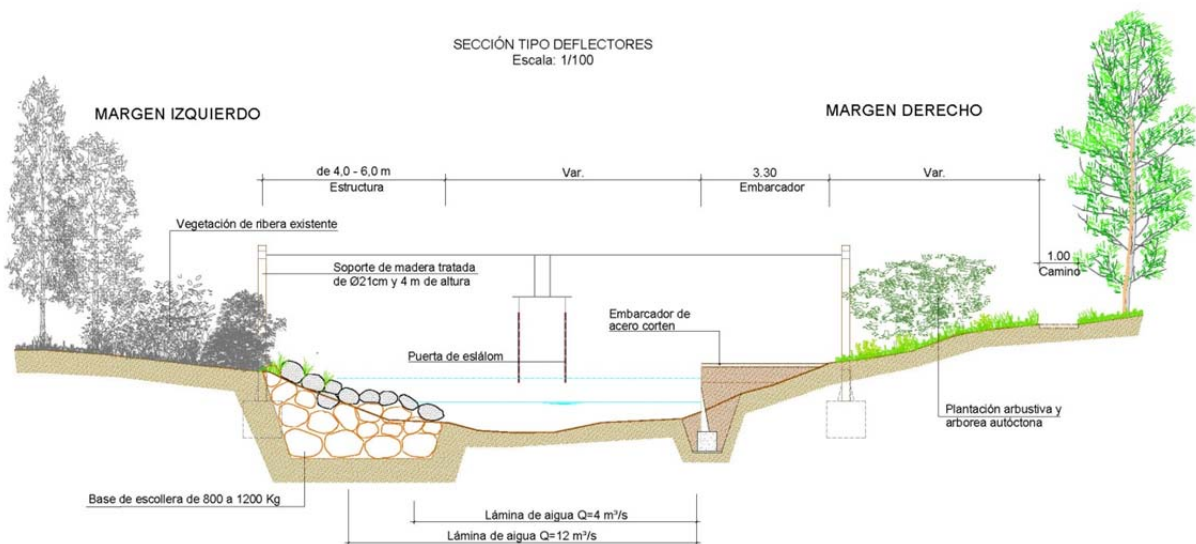


Figura 3 Sección transversal del cauce con la sección proyectada.

En el margen de la vía verde se dejaron algunos pies preexistentes de plátano de sombra ya que, aunque alóctono, no se trata de una especie con carácter invasor, para garantizar la permanencia de alguna sombra en ese

tramo. Esos ejemplares serán eliminados en actuaciones de mantenimiento a ejecutar en años venideros cuando los árboles autóctonos plantados hayan crecido suficientemente.

Se ha llevado a cabo una hidrosiembra con especies herbáceas autóctonas para acelerar el recubrimiento del suelo y así evitar posibles erosiones y dificultar el establecimiento de especies foráneas en el terreno removido. La plantación del nuevo arbolado se efectuará en el próximo período de parada vegetativa, con el fin de facilitar su supervivencia. Las especies a plantar son fresnos (*Fraxinus angustifolia*), álamos (*Populus alba*), sauce ceniciento (*Salix cinerea subsp. oleifolia*), olmos (*Ulmus minor*) y alisos (*Alnus glutinosa*).

Además, se pretende reducir el riesgo de erosión en las orillas con la instalación de rollos vegetados estructurados en fibra con predominio de lirio amarillo (*Iris pseudacorus*).

Los materiales utilizados para la infraestructura deportiva han sido seleccionados en aras a su integración paisajística. Así pues, los soportes madera para la puertas de eslalon son de madera, las estructuras metálicas de las plataformas de embarcación de acero Corten y los deflectores de grandes cantos rodados, actuando a la par de estructuras refugio para la fauna acuática.

El sendero de acceso de los jueces de competición se ha condicionado con una cierta sinuosidad para mejorar su integración visual y para repartir la afectación sobre distintas franjas de vegetación ribereña, evitando la pérdida de comunidades ribereñas.



Figura 4 Vista de los deflectores ya construidos, el camino perimetral y los soportes de madera para la puertas de eslalon.

3 Modelización hidráulica

El caudal del río Ter en el tramo de actuación está fuertemente regulado por el conjunto de embalses del sistema Sau-Susqueda-Pasteral que se encuentra aguas arriba. De acuerdo con los datos de caudal aforados durante los últimos años por la Agencia Catalana del Agua, se puede observar que, entre 2001 y 2009, el caudal medio habitual no supera los 10 m³/s, siendo los valores más normales entre 2,5 y 8 m³/s.

Por este motivo, se ha diseñado la pista de eslalon teniendo en cuenta unos valores de caudal situados entre 4 y 8 m³/s. No obstante, considerando que durante la celebración de pruebas deportivas puede liberarse puntualmente un caudal superior, o bien anulando el caudal derivado por la acequia Monar o bien liberando más caudal del sistema de embalses situado aguas arriba, se ha verificado también el comportamiento de la instalación para un caudal de 12 m³/s.

Dentro del proceso de concepción, diseño, ejecución y explotación de las actuaciones realizadas en la zona de la Pilastra, se han realizado diferentes modelizaciones con el fin de poder responder a las necesidades de conocimiento de su comportamiento hidrodinámico en cada momento.

En la fase de concepción y promoción inicial de las actuaciones, se realizó una modelización preliminar mediante un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) con el fin de poder validar la viabilidad de las actuaciones a promover. Este primer modelo permitió tener un conocimiento inicial de las condiciones de flujo.

Posteriormente, en la fase de diseño de las actuaciones y redacción del Proyecto Constructivo, se realizó un modelo hidráulico bidimensional de detalle (Iber) con el fin de poder ajustar las dimensiones exactas de cada uno de los espigones y saltos a partir de los resultados de las distribuciones de las velocidades (magnitud y dirección) y calados obtenidos.

Finalmente, en la fase de finalización de ejecución de las obras y antes de su explotación, se realizó una campaña de aforos con el fin de poder contrastar los resultados de la modelización hidráulica bidimensional y así poder realizar alguna modificación puntual de las actuaciones, en caso de ser necesario.

3.1 Modelizaciones hidráulicas preliminares

Para modelizar y verificar el comportamiento hidráulico de las estructuras propuestas, con los caudales de diseños adoptados de 4, 8 y 12 m³/s, se ha estudiado como canal natural bajo determinadas condiciones iniciales y condiciones de contorno, utilizando el modelo matemático de régimen gradualmente variado HEC-RAS.

Este primer modelo ha permitido determinar la tipología, magnitud y distribución de las estructuras para formar resaltes que permitan practicar el estilo libre.

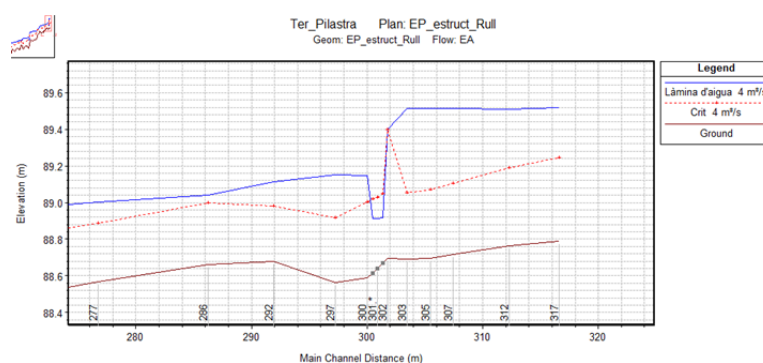


Figura 5 Cambio de régimen hidráulico y resalto producido por la estructura para la práctica de estilo libre del extremo de aguas arriba.

Además, el modelo unidimensional ha permitido verificar que de acuerdo con las recomendaciones técnicas de la Agencia Catalana del Agua, los incrementos máximos de cota de la lámina de agua, respecto al estado actual,

por el efecto de los deflectores y de las estructuras no superan los 20 cm para el caudal máximo de diseño de 12 m³/s.

3.2 Modelización hidráulica bidimensional de diseño

La necesidad de conocer de forma detallada en la fase de redacción del proyecto constructivos la distribución espacial de las características hidráulicas del flujo (calado, magnitud y dirección de velocidad) que resultarían de la ejecución de las actuaciones diseñadas, se llevó a cabo la modelización hidráulica bidimensional detallada del conjunto del tramo del brazo del río ter en la zona de la Pilastra y de las estructuras proyectadas.

Esta modelización ha sido realizada mediante la herramienta Iber (versión 1.04), modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña), el Grupo Flumen (de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC y de la Universitat de Barcelona UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universidad Politécnica de Cataluña UPC), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. De los diferentes módulos de cálculo que comprende el modelo Iber, se hizo uso únicamente del módulo hidrodinámico, cuyas principales características más destacadas comprenden: la resolución integrada de las ecuaciones de Saint Venant 2D mediante esquemas explícitos en volúmenes finitos con mallas no estructuradas y la capacidad de resolver flujo subcrítico y supercrítico.

Las principales características geométricas e hidráulicas del modelo bidimensional realizado se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 1 Resumen de los principales datos de la modelización hidráulica bidimensional realizada en la fase de redacción del proyecto constructivo

	Valores característicos
Longitud de curso modelizado	305 m
Superficie modelizada	12.589,1 m ²
Número de elementos	59.056 triángulos
Rugosidad	0,035
Caudales modelizados	4 m ³ /s
	8 m ³ /s
	12 m ³ /s

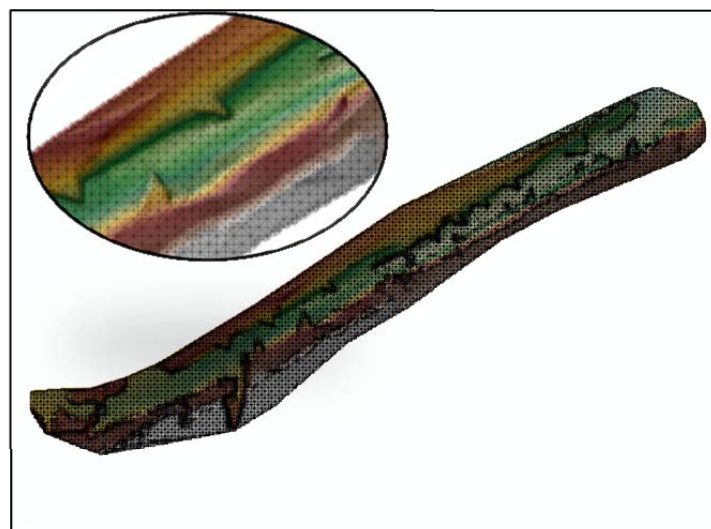


Figura 6 Malla base de cálculo y detalle en las proximidades de una zona con espigones.

Una vez ejecutado el modelo base de cálculo para cada uno de los tres escenarios de caudales de cálculo (4, 8, y 12 m³/s) se llevó a cabo un análisis detallado de los resultados. Así pues, se comprobó que los resultados obtenidos se ajustasen a los requerimientos para la práctica de piragüismo. Así pues se comprobó que en los saltos se produjesen las condiciones de velocidad y diferencia de niveles adecuadas y que aguas abajo de los espigones se creasen los flujos de retorno que permitan su remonte.

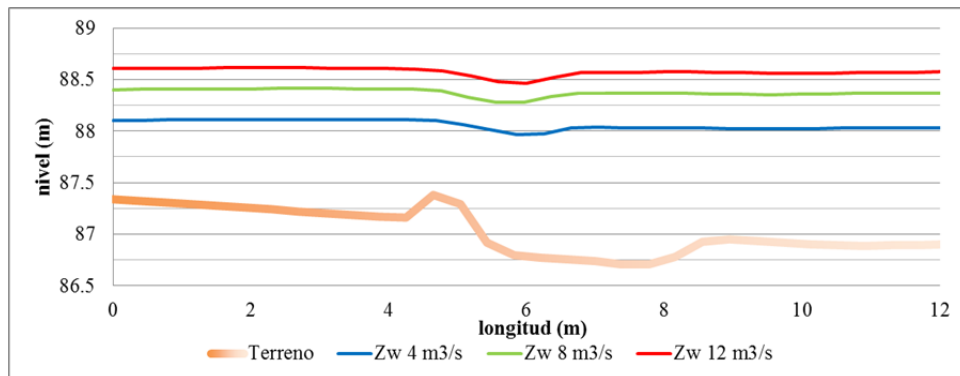


Figura 7 Resalto hidráulico resultante para los tres escenarios de cálculo en el salto aguas abajo diseñado.

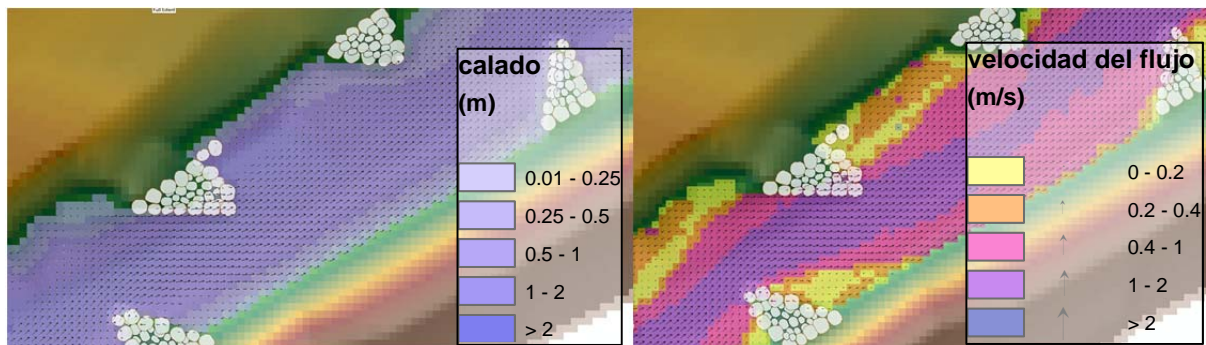


Figura 8 Distribución espacial de calados (imagen izquierda) y campo de velocidades (imagen derecha) para un caudal de diseño 4 m³/s.

3.3 Aforos de contraste y calibración final

3.3.1 Campaña de realización de aforos de contraste

El objetivo principal de la realización de los aforos de contraste en campo es el de disponer de una medida de los campos de velocidades y calados en las inmediaciones de alguno de los espigones transversales con los que poder contrastar los resultados de la modelización hidráulica. Para tal fin, se utilizó un aforador móvil sobre bote Qliner de la empresa OTT. Este sistema consiste en un perfilador Doppler, sostenido sobre un catamarán, que, utilizando el procedimiento clásico de verticales, mide la distribución vertical de velocidad en cada vertical y la profundidad del agua.

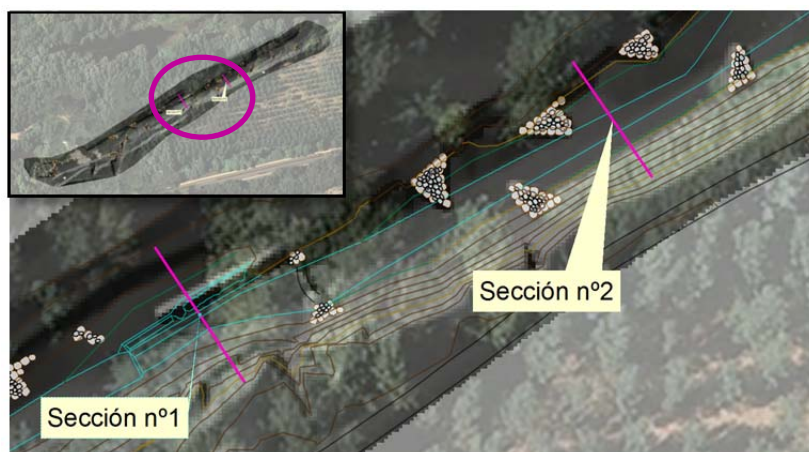


Figura 9 Localización de las secciones de aforo y detalle de su ubicación.

En la campaña de campo se realizó un aforo en dos secciones transversales. La primera de las secciones de aforo (sección n° 1) se tomó en un tramo del río con flujo cuasi-unidireccional con el objetivo de determinar el caudal circulante en el tramo de estudio y poder calibrar los valores de los coeficientes de rugosidad utilizados en el modelo realizado en la fase de redacción del proyecto constructivo. La segunda de las secciones (sección n°2) se tomó unos 4 metros aguas abajo de uno de los espigones transversales con el fin de medir la distribución y magnitud de velocidades del remolino que se forma y corroborarlas con los resultados obtenidos de la modelización hidrodinámica una vez recalibrada a partir de los valores del coeficiente de rugosidad modificado. Tal y como se puede observar en la tabla resumen de las principales características de los aforos, los resultados del caudal aforado en ambas secciones difieren en un 4% debido a que en la sección número 2 existe una componente de bidireccionalidad del flujo debido a la presencia del remolino y por consiguiente los resultados en ésta son de menor precisión.

Tabla 2 Principales características de los aforos en las dos secciones

Parámetro	Sección n° 1	Sección n° 2
Caudal aforado	10,170 m ³ /s	9,773 m ³ /s
Sección transversal de flujo	11,163 m ²	9,250 m ²
Ancho de la superficie del agua	12,0 m	10,2 m
Prof. media del cauce	0,93 m	0,91 m
Velocidad de flujo media	0,911 m/s	1,057 m/s
Velocidad superficial máxima	2,073 m/s	3,018 m/s
Velocidad superficial media	0,878 m/s	1,169 m/s
Velocidad media en vertical máxima	1,590 m/s	2,196 m/s
Número total de verticales de aforo	25	21
Número de verticales de aforo con velocidad negativa	2	6

3.3.2 Calibración final y comprobación de resultados con el modelo hidráulico

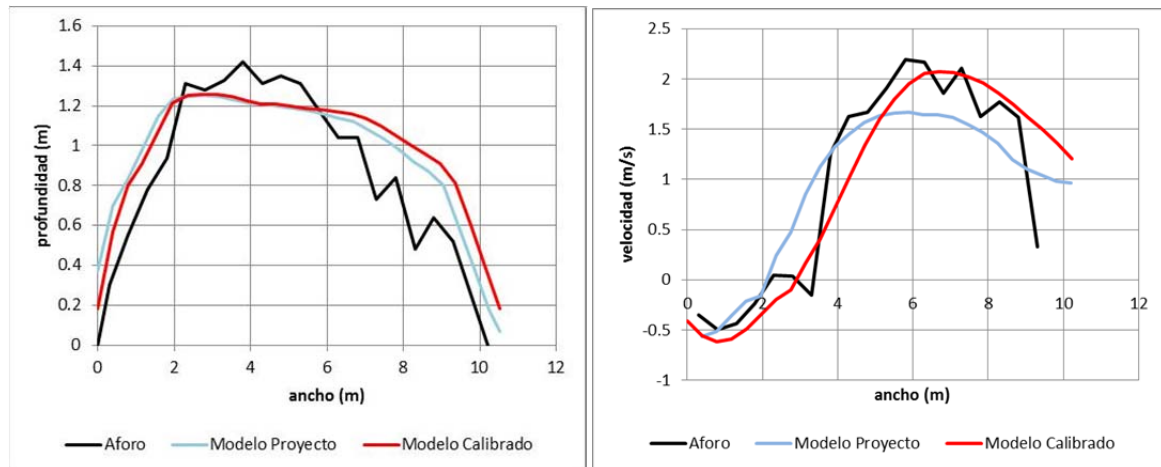
Una vez realizados los aforos de campo se procedió a la modelización de un nuevo escenario con un caudal de 10,17 m³/s y a tenor de los resultados obtenidos a una recalibración con el fin de ajustar los resultados del modelo hidráulico definitivo con los de los aforos realizados. En el proceso de calibración se detectaron ligeras diferencias en los calados y velocidades en ambas secciones.

En primer lugar contrastando los resultados obtenidos con los datos registrados y de las fotografías inspeccionadas en las visitas de campo se detectó que para un caudal de 10,17 m³/s, se detectó que en el modelo hidráulico los espigones transversales quedaban casi sumergidos mientras que en la realidad estos aún estaban 40-50 cm emergidos. Esta diferencia, radicó en que durante la ejecución de los trabajos se dispuso la cota superior de los espigones por encima de la inicialmente planteada en proyecto. Así pues, una vez subsanada esta diferencia geométrica se procedió al cálculo para diferentes coeficientes de rugosidad obteniéndose el mejor

ajuste para un coeficiente de Manning de 0,040 mientras que originalmente se consideró en la fase de proyecto un valor de 0,035.

Tal y como se puede observar en la gráfica de la figura más abajo, el ajuste de los calados obtenidos en el modelo de proyecto eran suficientemente buenos mientras que el mejor ajuste del campo de velocidades se obtuvo una vez el modelo fue ajustado geoméricamente y recalibrado.

Figura 10 Comparativa de calados y velocidades en la sección número 2 (aguas abajo de un espigón).



4 Conclusiones

El Ayuntamiento de Salt, conjuntamente con el Club Piragüismo Salt-Ter, ha promovido el acondicionamiento del campo de eslalon de La Pilastra, con el objetivo de poder disponer de una instalación deportiva adecuada a la práctica del piragüismo y que sea apta para todo tipo de usuarios, desde los principiantes hasta los más expertos. Esta instalación permitirá promocionar un deporte y también favorecer el respeto al medio ambiente desde la vertiente más social del deporte.

Con el fin de minimizar el posible impacto de las actuaciones de restauración fluvial para la adaptación del tramo del río Ter a la práctica del piragüismo, se consideró des del inicio de su promoción la realización de una modelización hidráulica de detalle con el fin de evitar modificaciones posteriores a la ejecución de los trabajos si no se cumplieran las condiciones de flujo locales requeridas para la práctica del piragüismo.

En este tipo de actuaciones, la modelización unidimensional permite, en la fase de concepción inicial, tener una primera estimación de su viabilidad.

En la fase de diseño y redacción del proyecto constructivo, se hace necesario abordar el estudio hidráulico de las actuaciones mediante un modelo hidrodinámico bidimensional de detalle que permita ajustar las dimensiones exactas de cada uno de los elementos (espigones y saltos). Como han corroborado los resultados de los aforos y de la posterior calibración del modelo, los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico del proyecto se ajustan suficientemente bien a los aforados y únicamente fueron necesarios realizar algunos ajustes paramétricos y geométricos de menor entidad.