

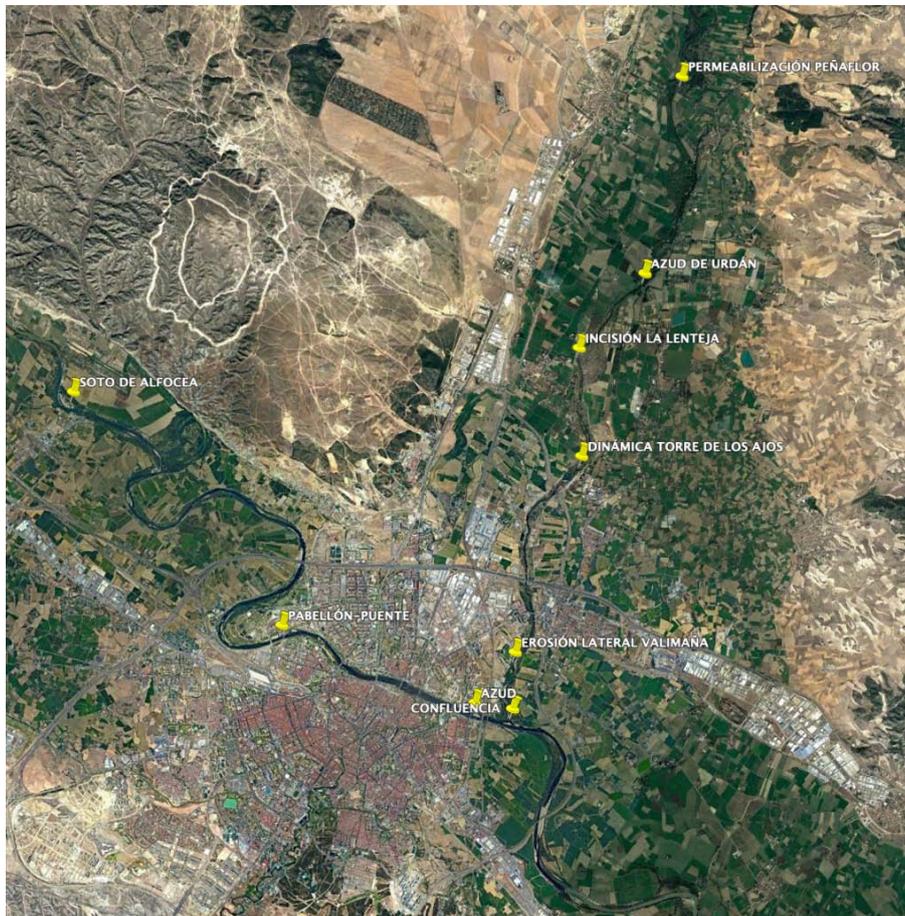
# SEDIMENTOS, DINÁMICA FLUVIAL E IMPACTOS EN EL CURSO BAJO DEL RÍO GÁLLEGO Y EN EL EBRO URBANO DE ZARAGOZA

Dossier de la salida de campo (16/11/2023)

## I Jornadas de Morfodinámica Fluvial y Observatorio de Sedimentos en Ríos



|   |    |
|---|----|
| 1. EL RÍO GÁLLEGO Y SU CURSO BAJO   | 2  |
| 2. ACTUACIÓN DE PERMEABILIZACIÓN EN EL RÍO GÁLLEGO EN PEÑAFLOR (parada 1) | 3  |
| 3. EL AZUD DE URDÁN   | 4  |
| 4. EL TRAMO MARCADO POR LA INCISIÓN: "LA LENTEJA" (posible parada)        | 6  |
| 5. DINÁMICA FLUVIAL EN EL TRAMO DE LA TORRE DE LOS AJOS (parada 2)        | 8  |
| 6. EROSIÓN LATERAL EN EL MEANDRO DE VALIMAÑA (parada 3)                   | 10 |
| 7. LA CONFLUENCIA GÁLLEGO-EBRO (parada 4)                                 | 12 |
| 8. EL CURSO MEDIO DEL RÍO EBRO Y EL TRAMO URBANO DE ZARAGOZA              | 14 |
| 9. EL AZUD DEL EBRO Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTO (parada 5)               | 15 |
| 10. EL PABELLÓN-PUENTE (parada 6)   | 15 |
| 11. ACTUACIONES EN EL SOTO DE ALFOCEA (posible parada)                    | 16 |
| 12. EBRO RESILIENCIA  | 18 |
| Más información   | 20 |
| Anexo: imágenes aéreas adicionales  | 21 |



Autores: Carles Ferrer (UPC), David Gargantilla (CHE) y Alfredo Ollero (UZ)

Revisión científica: Askoa Ibisate (UPV-EHU)

Colaboraciones y agradecimientos: Laura Albero (UZ), Daniel Ballarín (UZ), Pedro Boné (Tytasa), Pedro Duarte (UZ), Juan Miguel García Lagranja (UZ), David Granado (Tragsatec), Amani Lazreg (CIHEAM), Luoshi Li (UZ), Luis Manso de Zúñiga (Ayto.Z), Juan Pedro Martín Vide (UPC), Daniel Mora (Mastergeo), Valeria N. Pirchi (UZ), Lorenzo Polanco (CHE), Miguel Sánchez Fabre (UZ) y Javier San Román (CHE)

# 1. EL RÍO GÁLLEGO Y SU CURSO BAJO

El río Gállego es uno de los afluentes pirenaicos del Ebro. Su cuenca, estrecha y alargada, alcanza una superficie de unos 4.000 km<sup>2</sup> y su curso fluvial una longitud de 200 km. En su cabecera presenta algunas cumbres por encima de los 3.000 msnm. En sus cursos alto y medio cuenta con diferentes embalses (Lanuzza, Búbal, La Peña, Ardisa con su derivación a Sotonera, y el futuro de Almudévar) que alteran notablemente su funcionamiento hidrológico. El curso bajo del Gállego destaca por mantener una pendiente elevada del 0,35% (Fig. 1.1) a pesar de circular por el centro de la Depresión del Ebro. Su caudal está muy alterado y reducido por grandes consumos de regadío (Monegros) además de derivaciones de 4 grandes acequias en su curso bajo. El resultado es que en su desembocadura aporta al Ebro solo un tercio (unos 10 m<sup>3</sup>/s de media) del caudal que correspondería de forma natural, circulando la mayor parte del año un caudal ecológico de solo 2 m<sup>3</sup>/s. La mayor crecida registrada en el siglo XXI fue la de octubre de 2012 (Fig. 1.2), superando los 800 m<sup>3</sup>/s de caudal punta en el aforo de Zuera.

El déficit de sedimento movilizable es muy notable, tanto a causa de la retención en los embalses como de la creciente colonización vegetal del cauce en el último medio siglo por efecto también de la regulación y la consiguiente reducción del número de crecidas geomórficas. Esto ha generado procesos de incisión notables y generalizados, más acentuados en un tramo concreto (Urdán-Montañana) afectado por importantes extracciones de gravas en los años 60 y 70 del siglo XX.

El cauce activo del bajo Gállego se ha estrechado considerablemente en pocas décadas, pasando de trenzado o *braided* a mediados del siglo XX a divagante o *wandering* en el cambio de siglo y a sinuoso simple en la actualidad. Sin embargo, es un cauce activo, que muestra cambios de trazado en las crecidas que todavía presenta (muchas veces debidas a desembalses), con procesos de meandrización y corta relativamente rápidos en algunos enclaves, debidos a la notable potencia del río gracias a su relativamente elevada pendiente. En suma, es un río con energía, que, ante la escasez de materiales para transportar, invierte en incidir en su lecho y en modificar sus orillas. De hecho, el sedimento que ahora moviliza procede solamente de esas orillas, pero a veces con volúmenes notables, que deposita más abajo en importantes lenguas con abundante madera. Podríamos concluir diciendo que el bajo Gállego es un río que quiere ser trenzado y tiene energía para ello, pero tiene que conformarse con ser simple y estrecho, aunque muy activo.

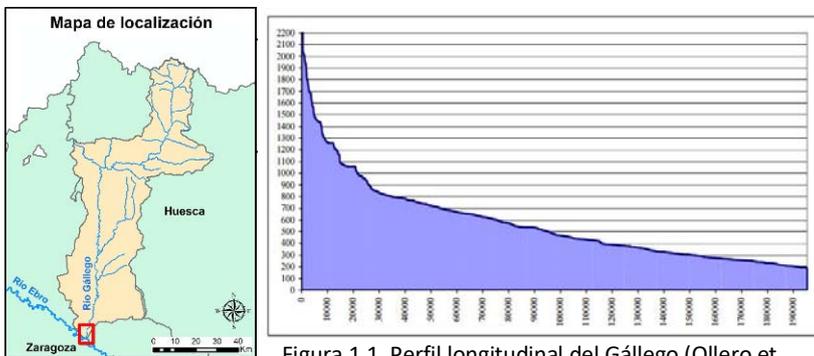


Figura 1.1. Perfil longitudinal del Gállego (Ollero et al., 2004)

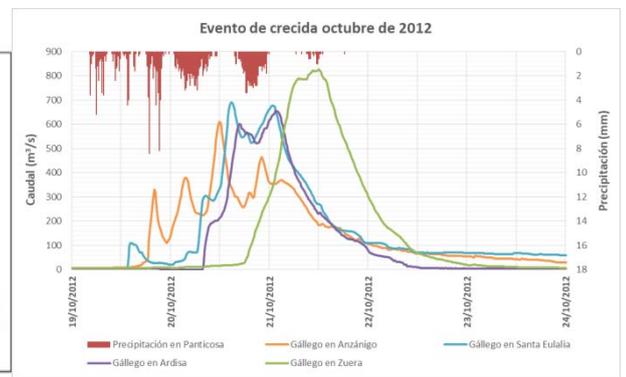
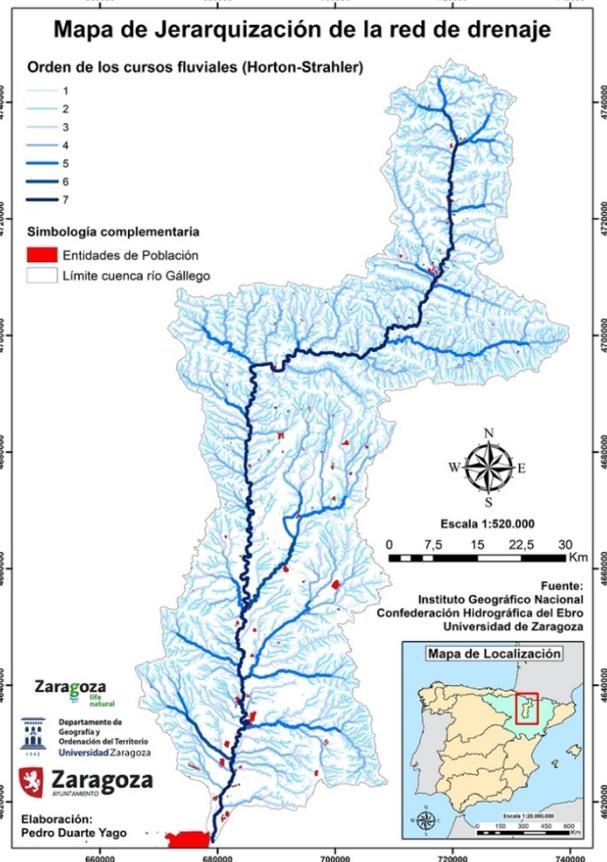
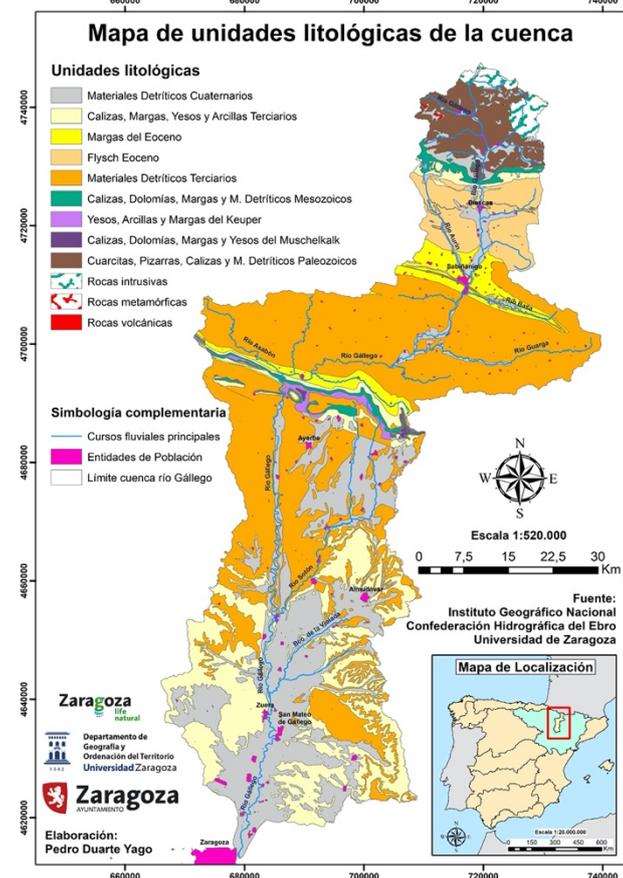


Figura 1.2. Crecida del Gállego: octubre de 2012 (Duarte, 2017)



Figuras 1.3 y 1.4. Mapas de unidades litológicas y de jerarquización de la red de drenaje de la cuenca del Gállego (Duarte, 2017)

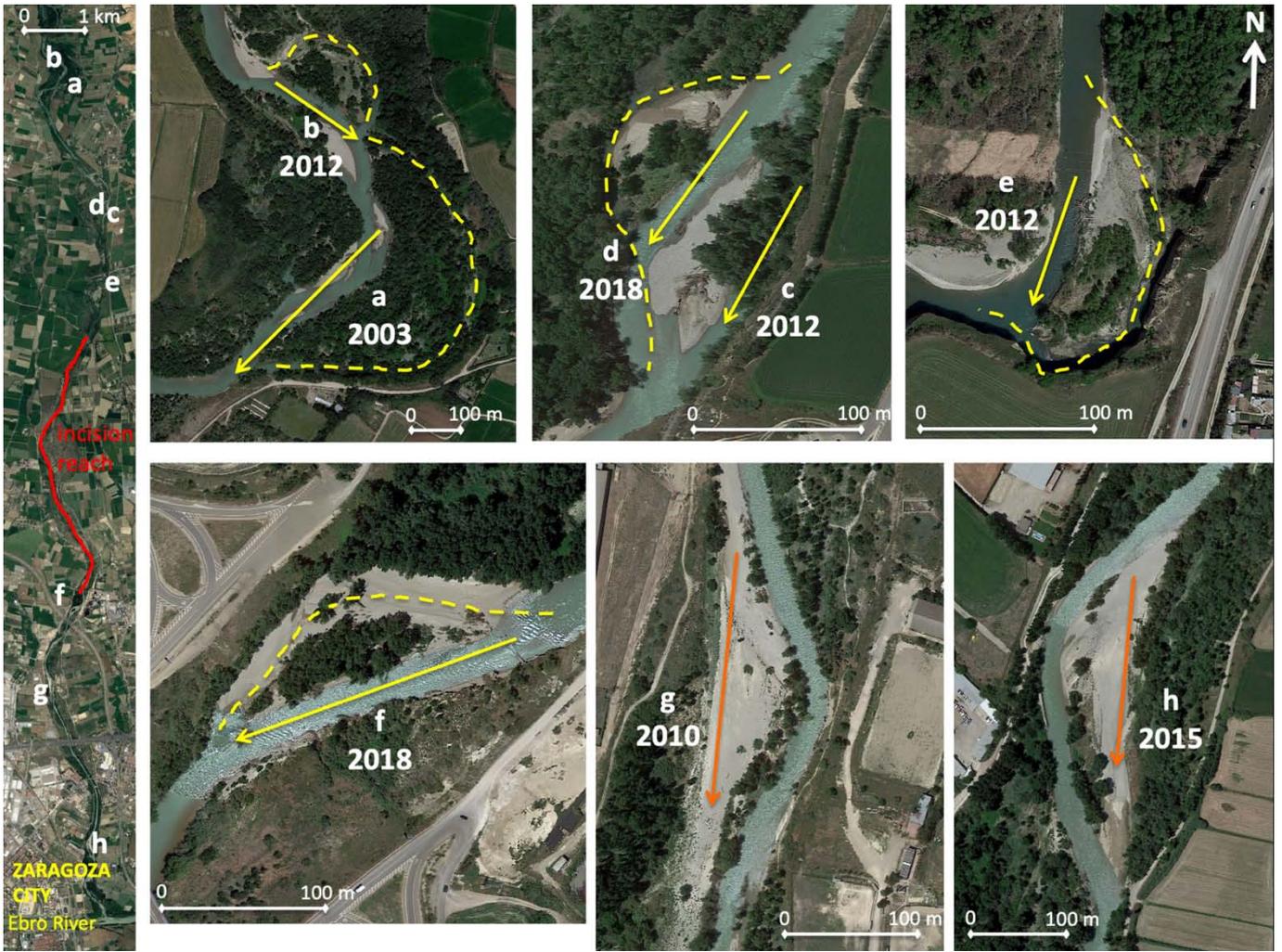


Figura 1.5. Diferentes cortas de meandro registradas en el curso bajo del Gállego en el siglo XXI (elaboración propia)

## 2. ACTUACIÓN DE PERMEABILIZACIÓN EN EL RÍO GÁLLEGO EN PEÑAFLORES (parada 1)

El tramo del río Gállego que discurre entre Torre del Hospitalicio y Peña del Cuervo presenta cambios bruscos de pendiente y velocidad rápida del flujo incluso con caudales bajos (Ollero y Martín Vide, 2005). El dinamismo del río en este tramo es elevado, con importantes modificaciones e incluso cortas en los meandros que se pueden observar incluso en periodos de tiempo cortos.

En los archivos de la CHE existen varias referencias a intentos de contención de esta movilidad fluvial mediante la construcción de diques y espigones. En el meandro de "El Madrazo", durante las obras de construcción del dique de defensa de la margen izquierda del río, entre los años 1984-1988, se cerró artificialmente la entrada al brazo del río situado más próximo a la nueva defensa. Esta circunstancia favoreció la tendencia natural del meandro a crecer hacia la ribera derecha.

En el año 2021, la CHE ha llevado a cabo una intervención destinada a la recuperación de la funcionalidad hidráulica de los brazos perdidos en el meandro para caudales bajos. Estos trabajos se han llevado a cabo aplicando una combinación de actuaciones que han consistido en: tratamientos selvícolas de poda y desbroce de la vegetación de los brazos; movimientos de tierras para la reapertura del brazo principal; aplicación de la técnica del curage en los dos brazos; retirada de basuras; y apeo de pies arbóreos de forma puntual que pudieran obstruir los brazos a corto plazo.



Figura 2.1. Evolución del tramo del río Gállego entre 1927 y 2018 (vuelos CHE 1927, Gob. Aragón 1956, IGN 1997, 2012 y 2018). Las ortofotos están orientadas al norte. La dirección del flujo del Gállego es de norte a sur.



Figura 2.2. Construcción de defensa en la orilla izquierda del río (vuelo IGN 1973-1986).

Figura 2.3. Construcción de defensa en la orilla izquierda del río (vuelo IGN del 20 de agosto de 1984).

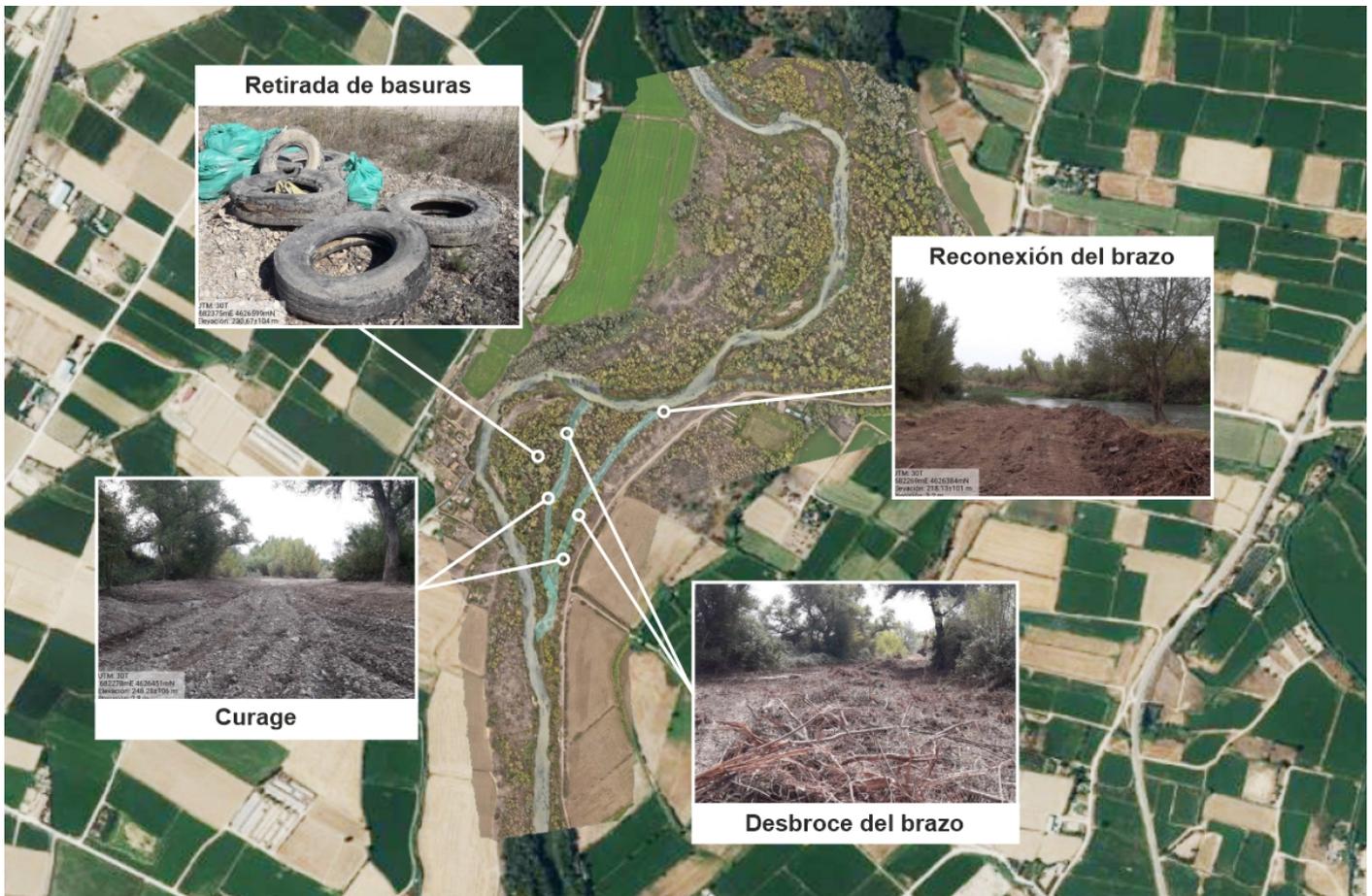


Figura 2.4. Intervención en el meandro de “El Madrazo” (elaboración propia).

### 3. EL AZUD DE URDÁN

Azud histórico que abastece a la acequia de Urdán o Urdana, de 40 km de longitud, que riega la margen izquierda del Gállego y luego la del Ebro hasta Villafranca, con un caudal de concesión de 6,5 m<sup>3</sup>/s (Fig. 3.1). El azud parece remontarse hasta el siglo XII y fue destruido y reconstruido en numerosas ocasiones. Se resuelve en una rampa a cuyo pie se ha ido registrando un descalce que ya alcanza los 3-4 metros.

La importancia geomorfológica del azud reside en su papel de tope de la erosión remontante que se produce en todo el tramo de incisión Urdán-Montañana, de ahí que constituya el límite superior de dicho tramo. Como puede observarse, el riesgo de descalzamiento y colapso del azud por efecto de dicha erosión es alto. Se ha intervenido en numerosas ocasiones a lo largo de las últimas décadas mediante el vertido de bloques de hormigón para tratar de frenar el proceso y consolidar la estructura.

En las fotos (figuras 3.2 a 3.7) se observa con claridad la evolución del azud y el avance de la incisión al pie de la presa.

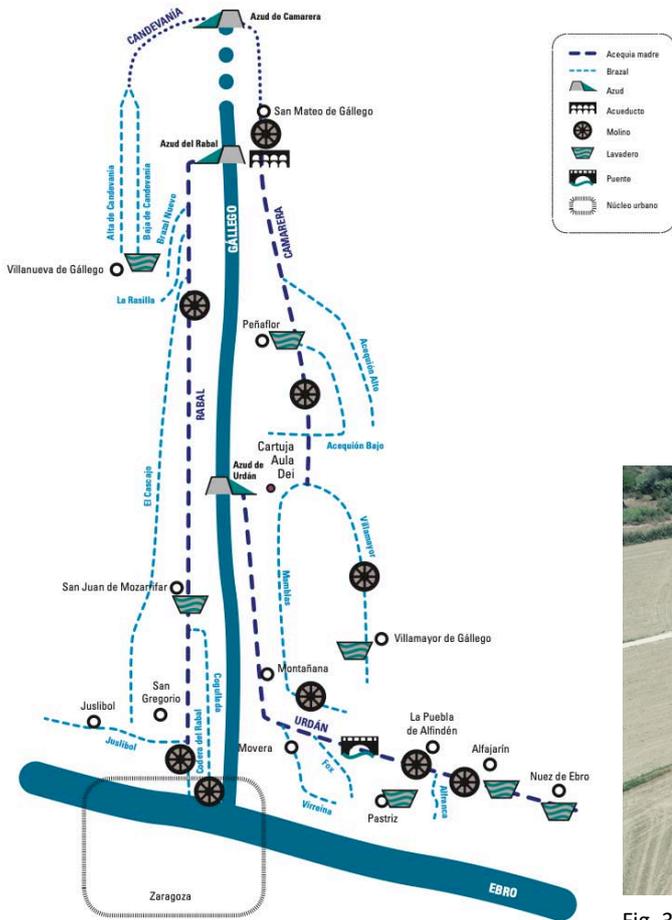


Fig.3.1. Esquema de azudes y acequias del bajo Gállego (Rivas, 2016)



Fig. 3.4. Azud de Urdán en 2021 (A. Ollero)



Fig. 3.6. Azud de Urdán en septiembre de 2023 (A. Ollero)



Fig. 3.7. Azud de Urdán en 2023 (A. Ollero)



Fig. 3.2. Azud de Urdán a mediados del siglo XX (imagen facilitada por L. Manso de Zúñiga)



Fig. 3.3. Azud de Urdán en 2019 (vuelo dron Ayuntamiento, L. Manso de Zúñiga)



Fig. 3.5. Azud de Urdán en 2004 (facilitada por Luis Manso de Zúñiga)

## 4. EL TRAMO MARCADO POR LA INCISIÓN: “LA LENTEJA” (posible parada)

En el tramo desde el azud de Urdán hasta el puente de la autopista A-2 en Santa Isabel se ha registrado un notable proceso de incisión que se inició en los años 60 del siglo XX como consecuencia de las importantes extracciones de gravas practicadas directamente en el cauce en aquellas fechas. En la Fig. 4.1 (Martín Vide et al., 2010) se reconstruyeron, a partir de un trabajo de archivo que localizó diferentes estudios e informes con datos topográficos, los perfiles longitudinales en varias fechas (en 1971-74 cuadrados, en 1992 línea continua, en 2004 círculos y asteriscos). Se incluyen también los histogramas de volúmenes de extracción aguas abajo del azud de Urdán, marcado con claridad por el salto en el perfil en el km 11 desde la desembocadura en el Ebro.

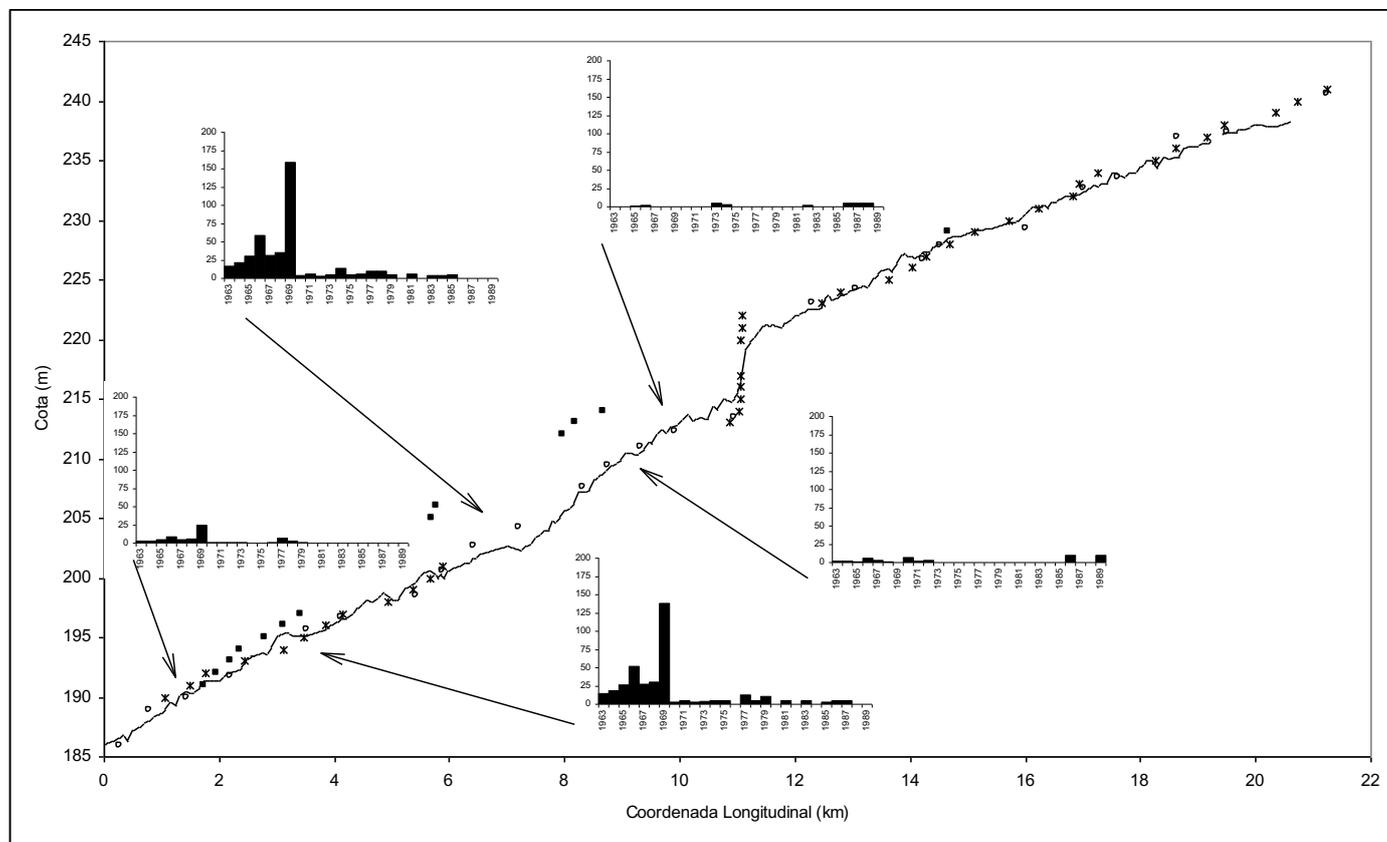


Figura 4.1. Dimensiones de la incisión en el perfil longitudinal del bajo Gállego y extracciones de gravas (Martín Vide et al., 2010)

Los valores máximos de incisión alcanzan los 7 metros y se registran en el enclave conocido como “La Lenteja”, que ha quedado colgado a esa altura respecto del cauce actual (Fig. 4.2), cuando era cauce activo en 1957. Puede observarse la elevada movilidad de ese cauce activo en la primera mitad del siglo XX (Fig. 4.3).

En diferentes estudios realizados para el del Ayuntamiento de Zaragoza se han muestreado los sedimentos del tramo y del gran depósito sedimentario de la Lenteja. En la tabla 4.1 se recogen las granulometrías, morfometrías y acorazamientos medidos en el trabajo de Duarte (2017), que nos dan una idea de los valores que se constatan en este tramo bajo del Gállego.

La incisión y la erosión remontante asociada progresaron durante décadas, como recuerdo y respuesta dilatada a las antiguas extracciones, y también favorecidas por la regulación de caudales y el propio efecto de la presa de Urdán. Pero parece que los procesos comienzan a frenar en los últimos años. Mientras tanto, ha habido un debate continuo todavía sin resolución: ¿qué se puede hacer para revertir esta incisión? En el estudio coordinado por Ollero y Martín Vide (2005) se propuso devolver sedimento al río desde la Lenteja, al menos los 2 metros superiores del depósito, y reabrir en este alguno de los antiguos cauces (Fig. 4.4). El debate sigue y no se ha llegado a una propuesta final o proyecto.

| Barras fluviales muestreadas | Granulometría mm | Acorazamiento | Desgaste (arenisca:granito) | Aplanamiento (arenisca:granito) | Esfericidad (arenisca:granito) | Centilo cm |
|------------------------------|------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------|
| 1. Aguas arriba              | 54,58            | 2,32          | 0,70 / 0,66                 | 2,99 / 1,88                     | 0,60 / 0,72                    | 36         |
| 2. Lenteja alta              | 46,87            | 1,95          | 0,56 / 0,73                 | 2,53 / 1,80                     | 0,61 / 0,74                    | 40         |
| 3. Lenteja media-alta        | 38,99            | 2,35          | 0,56 / 0,63                 | 2,60 / 2,12                     | 0,61 / 0,66                    | 35         |
| 4. Lenteja fungiforme        | 47,49            | 1,70          | 0,67 / 0,75                 | 2,61 / 1,79                     | 0,64 / 0,72                    | 29         |
| 5. Lenteja media-baja        | 45,22            | 1,71          | 0,63 / 0,69                 | 2,40 / 2,22                     | 0,64 / 0,67                    | 33         |
| 6. Margen izquierda          | 54,39            | 2,10          | 0,61 / 0,57                 | 2,29 / 2,10                     | 0,64 / 0,67                    | 38         |
| 7. Aguas abajo               | 39,22            | 1,59          | 0,53 / 0,58                 | 3,00 / 2,13                     | 0,56 / 0,68                    | 31         |

| Barras fluviales muestreadas | Granulometría mm | Acorazamiento | Desgaste (arenisca:granito) | Aplanamiento (arenisca:granito) | Esfericidad (arenisca:granito) | Centilo cm |
|------------------------------|------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------|
| 1. Aguas arriba              | 53,69            | 2,78          | 0,54 / 0,64                 | 2,95 / 2,14                     | 0,58 / 0,67                    | 72         |
| 2. Lenteja alta              | 46,06            | 1,98          | 0,57 / 0,66                 | 2,41 / 1,98                     | 0,64 / 0,69                    | 51         |
| 3. Lenteja media-alta        | 37,52            | 2,27          | 0,64 / 0,66                 | 2,31 / 2,03                     | 0,65 / 0,68                    | 27         |
| 4. Lenteja fungiforme        | 46,13            | 2,51          | 0,62 / 0,65                 | 2,60 / 2,12                     | 0,63 / 0,68                    | 41         |
| 5. Lenteja media-baja        | 50,35            | 2,44          | 0,72 / 0,69                 | 3,13 / 2,00                     | 0,60 / 0,69                    | 37         |
| 6. Margen izquierda          | 48,00            | 2,47          | 0,58 / 0,70                 | 2,96 / 2,13                     | 0,57 / 0,69                    | 41         |
| 7. Aguas abajo               | 31,03            | 1,66          | 0,64 / 0,67                 | 2,65 / 1,90                     | 0,61 / 0,71                    | 23         |

Tabla 4.1. Medidas de sedimento en 7 puntos antes (arriba) y después (abajo) de la crecida de noviembre de 2016 (Duarte, 2017)



Figura 4.2. Tramo de máxima incisión (7 metros) visto desde aguas arriba (la Lenteja en la izquierda)

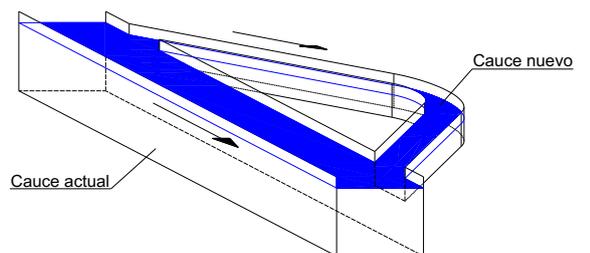
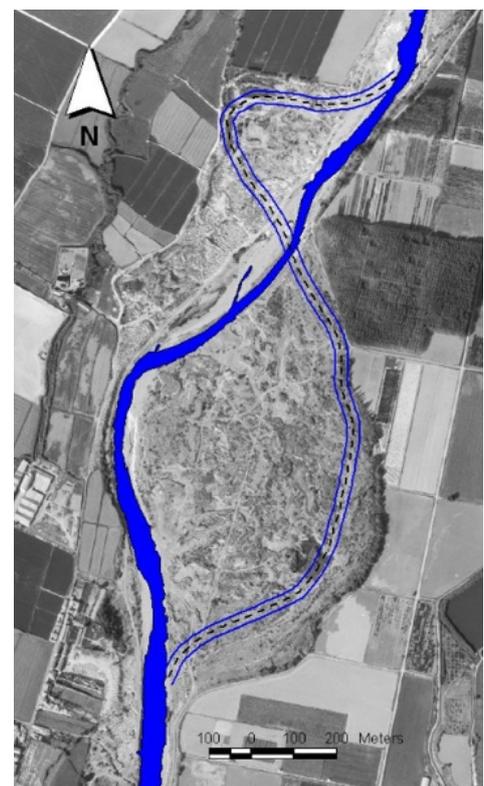
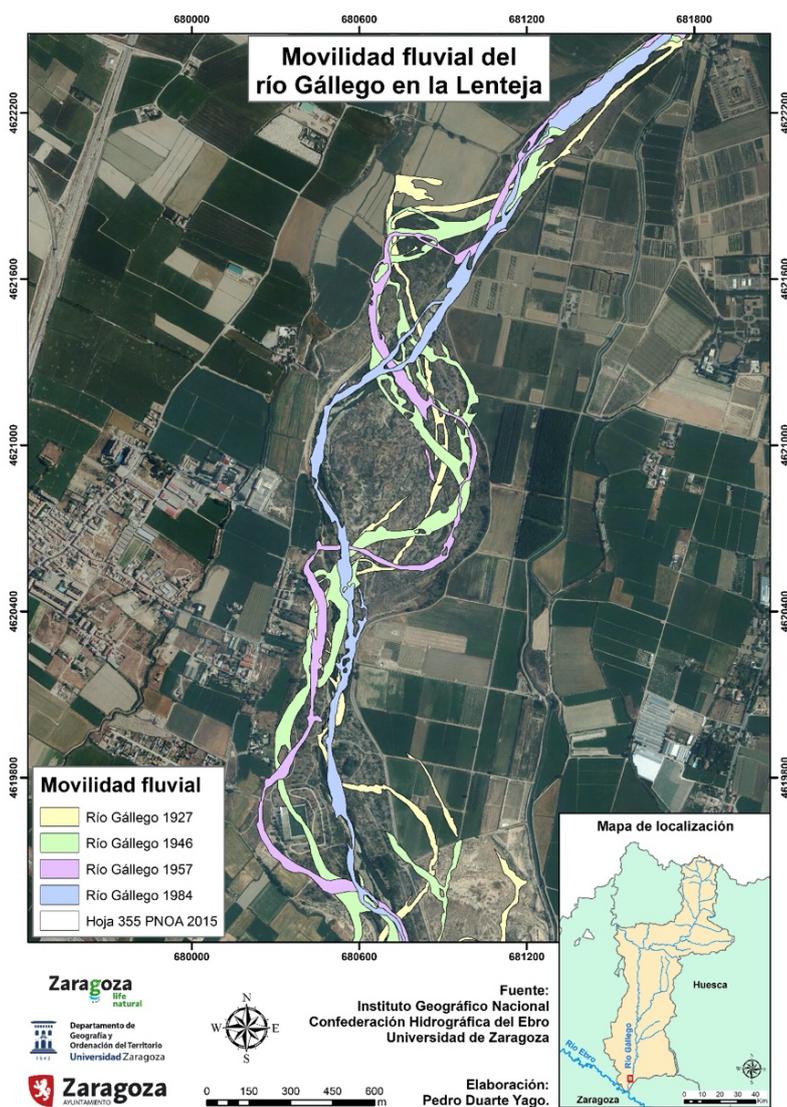


Figura 4.4. Propuesta de restauración (Ollero y Martín Vide, coords., 2005)

Figura 4.3. Movilidad del cauce activo desde 1927 en el tramo (Duarte, 2017)

## 5. DINÁMICA FLUVIAL EN EL TRAMO DE LA TORRE DE LOS AJOS (parada 2)

Este tramo presenta varios elementos de interés por su dinámica reciente, así como una situación de riesgo inducido por un puente mal dimensionado, el de acceso ferroviario a la papelerera La Montañanesa.

Aguas arriba del citado puente se desarrolla un depósito sedimentario en margen izquierda en el que la crecida de octubre de 2012 dejó varias lenguas de material superpuestas y abundante madera. Posteriormente el río labró un escarpe semicircular de *bankfull* muy claro en la imagen (Fig. 5.1) y en el terreno. La margen opuesta es más escarpada y certifica que nos encontramos todavía en el tramo de incisión, en este caso con valores de 2 a 3 metros en los últimos 50 años. La escena se completa con dos barras móviles en proceso de colonización. Es un buen punto para analizar procesos de sedimentación y comprobar la distribución y clasificación por tamaños. Se identifica también muy bien el límite entre el área donde se produce decantación de material fino por inundación y la zona de arrastre con corriente activa movilizándolo de fondo. La zona inundable está ocupada por repoblaciones realizadas por el Ayuntamiento desde los años 80.



El puente de la papelerera, construido en 2003 y también observable en la figura 5.1, tiene el problema de su horizontalidad y baja altura sobre el cauce, constituyendo un punto expuesto a las crecidas y que puede ejercer un efecto presa sobreinundando el área aguas arriba. En la figura 5.3 se observa cómo la crecida de octubre de 2012, la más importante de los últimos 20 años, alcanzó su tablero. En la figura 5.2 se muestra el efecto de sobreelevación ejercido por el puente para un caudal con un periodo de retorno de 500 años, calculado en el estudio coordinado por Ollero y Martín Vide (2005).

Aguas abajo del puente se desarrolla un tramo recto y más estrecho en el que el Gállego pasa junto a la industria papelerera, que emite aquí su vertido contaminante. En este tramo se ha registrado la última corta natural de meandro en el bajo Gállego, que tuvo lugar en la crecida de abril de 2018 (figs. 5.4 a 5.11). El río eligió un recorrido recto de mayor pendiente, conservando el antiguo meandro como cauce secundario hasta el final de las aguas altas de aquella primavera. Desde entonces el nuevo cauce recto se consolidó y el antiguo sinuoso se fue colonizando de vegetación, aunque en las pequeñas crecidas posteriores sigue siendo activo. La corta provocó que el gasoducto que abastece a la papelerera quedase colgando, siendo posteriormente enterrado a mayor profundidad, ante la evidencia de que el cauce del Gállego no iba a regresar a su trazado anterior.

Figura 5.1. Área dinámica aguas arriba del puente de la papelerera en julio de 2022 (Google Earth)

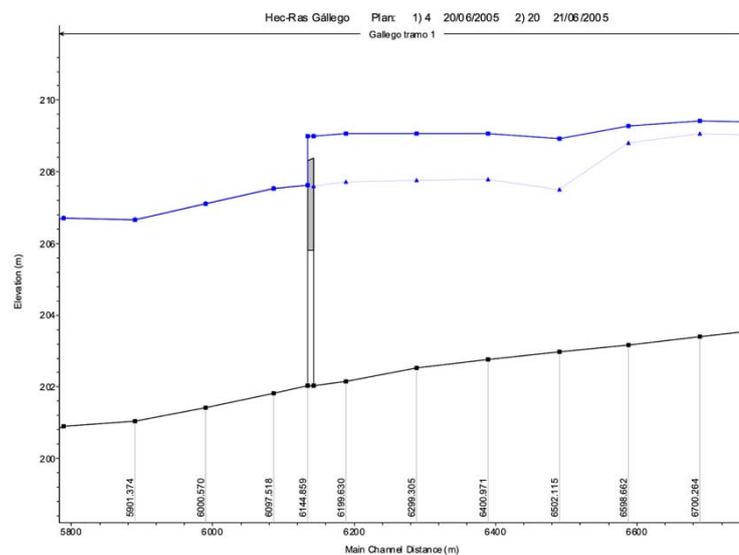


Figura 5.2. Efecto de sobreelevación provocado por el puente, modelado con HEC-Ras (Ollero y Martín Vide, coords., 2005)



Figura 5.3. Crecida de octubre de 2012 chocando con el tablero del puente.



Figura 5.4. Situación previa a la corta (ortoimagen 2017)



Figura 5.5. Situación posterior a la corta (junio 2018)



Figura 5.6. Durante la crecida (22 abril 2018)



Figura 5.7. Tras la crecida (18 mayo 2018) con el gasoducto colgando



Figura 5.8. En noviembre de 2018



Figura 5.9. En noviembre de 2019 obras para enterrar el gasoducto



Figura 5.10. Imagen (dron Ayuntamiento) en septiembre de 2020



Figura 5.11. Situación en julio de 2022

## 6. EROSIÓN LATERAL EN EL MEANDRO DE VALIMAÑA (parada 3)

En este lugar estudiamos la colmatación de un cauce de alivio artificial de 400 m de longitud, 10 m de anchura y 1,5 m de profundidad. El cauce de alivio se diseñó para reducir el riesgo de erosión de la orilla derecha del río Gállego. El área de estudio se localiza en el tramo bajo del río, que tiene una morfología meandriforme aunque en algunas zonas se asemeja más a un río divagante (Fig. 6.1). Se trata de un río que sigue siendo dinámico a pesar de la presencia de tres presas en cabecera y sobre todo de la intensa actividad extractiva durante las décadas de 1960 a 1990. Dicha actividad provocó una grave incisión y un cambio morfológico drástico, con la pérdida de la morfología trenzada que tenía antes de las extracciones.

En junio de 2014 una avenida destruyó un andador (camino) que discurre por la margen derecha del río. Fue reparado durante el verano de 2015 y con el objetivo de evitar daños futuros, simultáneamente a las obras de reparación se abrió un cauce auxiliar o de alivio en la margen izquierda del cauce principal (Fig. 6.1 y 6.2). Dicho cauce atravesaba la barra aluvial situada frente al punto en que la crecida de 2014 erosionó la margen y destruyó el andador. Estas actuaciones fueron acompañadas por una protección longitudinal con gaviones de unos 200 m (Fig.6.2). En noviembre de 2016 una crecida de caudal máximo  $\sim 350 \text{ m}^3/\text{s}$ , similar al caudal dominante, destruyó la protección lateral de gaviones, dañó el andador y acumuló  $\sim 5800 \text{ m}^3$  de material en el cauce de alivio, cegándolo por completo (Fig. 6.3).

La colmatación y el cegado del cauce de alivio no es un hecho aislado. Al contrario, durante los últimos años han sido numerosos los cortes de meandros ocurridos de forma natural en el tramo bajo del río Gállego. Pensamos que esta dinámica está relacionada con los impactos de origen antrópico que ha sufrido el río: fijación de márgenes, estrechamiento del cauce, extracciones de material aluvial o las presas. Dichos impactos contribuyen a limitar el aporte de sedimento grueso al tramo bajo haciendo inviable que el río pueda mantener múltiples cauces de forma simultánea.

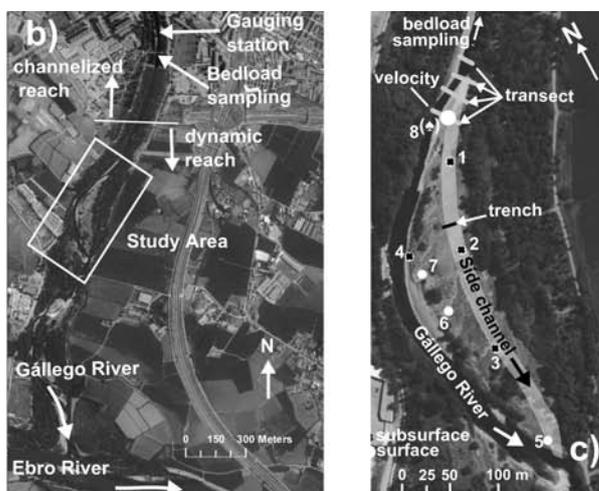


Figura 6.1. Localización del área de estudio (izquierda), del cauce auxiliar (*side channel*) y de los puntos donde se llevó a cabo la campaña de campo para estudiar las causas de su colmatación (derecha) (Ferrer-Boix et al., 2021)



Figura 6.2. Vista desde aguas arriba del cauce auxiliar (izquierda) y del cauce principal del río Gállego (derecha) poco después de que finalizaran las obras. A la derecha de la imagen se aprecian los gaviones para proteger dicha margen de la erosión. Fotografía gentileza de José Bellosta.

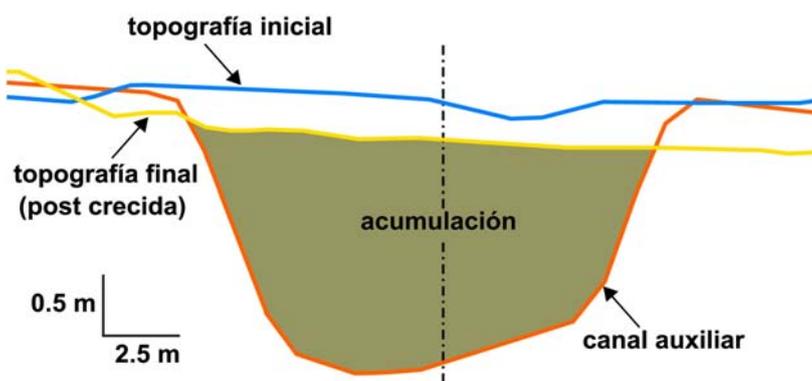


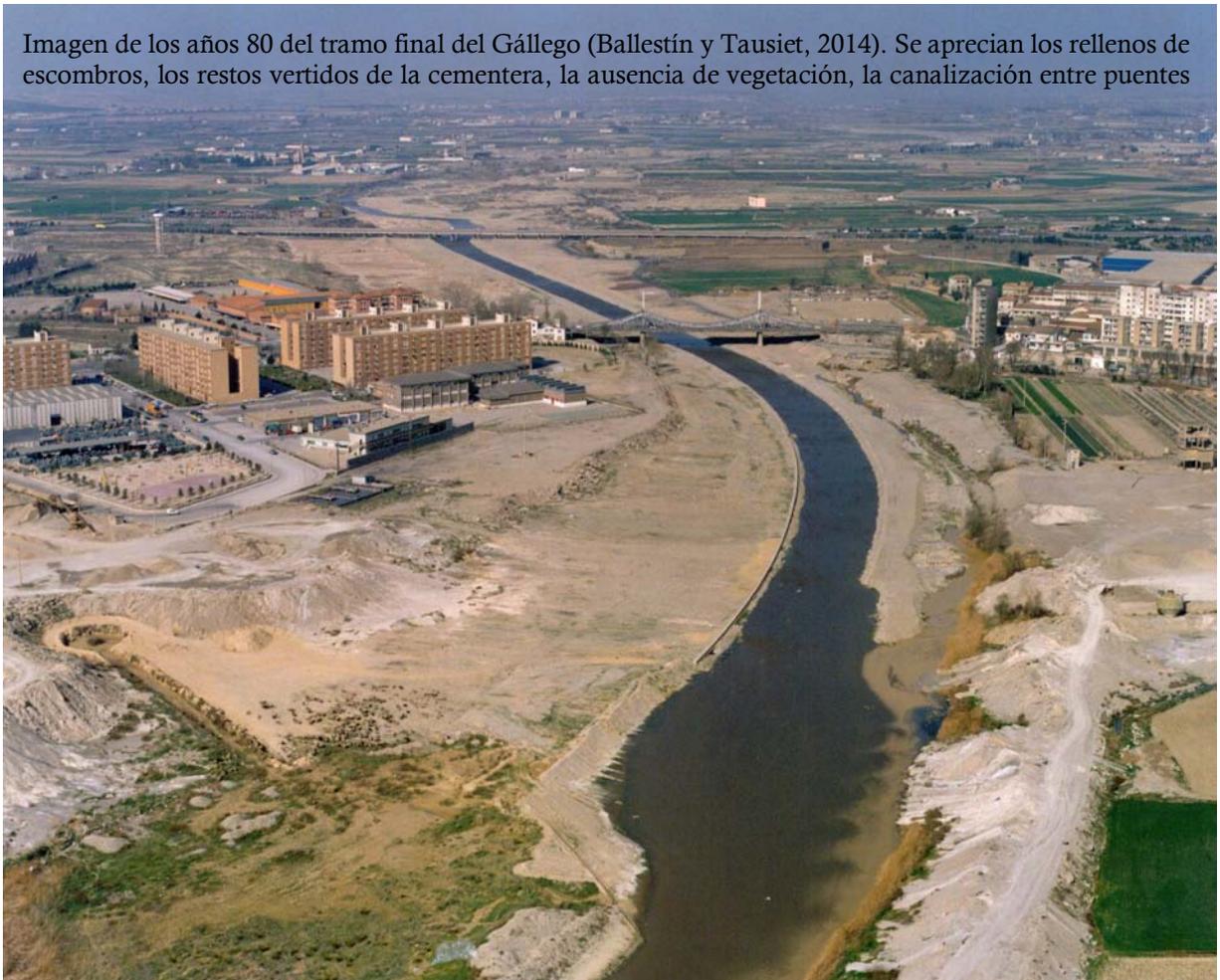
Figura 6.3. Acumulación de material en una sección del cauce auxiliar (izquierda) y destrucción de la protección de gaviones y del andador (derecha) en la crecida de 2016.

Este trabajo fue parte de un estudio de la UPC para Ayuntamiento de Zaragoza (José Bellosta, Montserrat Hernández y Luis Manso de Zúñiga). Agradecemos la colaboración de Alfredo Ollero (Universidad de Zaragoza) y de Daniel Mora y Daniel Ballarín (Mastergeo).

Imagen posterior a la crecida de abril de 2018



Imagen de los años 80 del tramo final del Gállego (Ballestín y Tausiet, 2014). Se aprecian los rellenos de escombros, los restos vertidos de la cementera, la ausencia de vegetación, la canalización entre puentes



## 7. LA CONFLUENCIA GÁLLEGO-EBRO (parada 4)

En condiciones naturales la aportación del Gállego al Ebro viene a implicar un incremento del 10% tanto en caudal como en superficie de cuenca. El aporte sedimentario del Gállego fue siempre muy notable hasta que se construyeron los embalses en su cuenca. De ahí que la desembocadura haya sido siempre un punto dinámico con cambios de trazado, en el que predominaba una morfología de tipo cono aluvial en el Gállego que era desmantelada por cada crecida del Ebro. En las siguientes imágenes (Fig. 7.1) se observan los cambios en este enclave, además del estrechamiento progresivo del cauce del Gállego.



Figura 7.1. Evolución de la confluencia Gállego-Ebro. Elaboración propia.

Un aspecto de interés en los últimos años es la isla formada en el Ebro a raíz de un depósito sedimentario de la crecida de febrero de 2003. Puede observarse ese depósito sin colonización vegetal en la imagen de 2004 y cómo va consolidándose en los años siguientes hasta 2020, fecha en la que el soto-isla alcanzó la mayor madurez. En el verano de 2021 se eliminó totalmente la vegetación de la isla y además se practicó un pasillo de curage que divide en dos la barra final del Gállego, pasillo que se observa muy bien en la imagen de febrero de 2022 y en las posteriores. En cuanto a la isla en el Ebro, en el verano de 2022 se observa sin vegetación, pero la colonización se ha reiniciado en el verano de 2023. En el trabajo de Cuartero et al. (2022) se estudiaron y evaluaron las actuaciones en este enclave, tanto la eliminación vegetal de la isla como el curage en el Gállego (Fig. 7.2).

Otro aspecto destacable de este sector es la importante colonia de avión zapador (*Riparia riparia*) que se instaló entre 2019 y 2021 en el escarpe de la orilla cóncava final del Gállego (margen izquierda).



Figura 7.2. Imágenes de trabajo de campo en el curage del Gállego (izquierda) y en la isla del Ebro (derecha) (Cuartero et al., 2022)



Por último, en esta confluencia se registra un típico efecto de cierre hidráulico, por el cual el Ebro en crecida penetra en el curso final del Gállego y no deja salir a éste, produciendo el embalsamiento del Gállego, como puede observarse en la figura 7.3.

En la crecida ordinaria *bankfull* del Ebro en diciembre de 2019 se pudo comprobar hasta qué sector del Gállego alcanzan los efectos de las crecidas del Ebro (Fig. 7.4).

Figura 7.3. Crecida bankfull del Ebro en 1992 cerrando la salida del Gállego (gentileza de J. San Román).

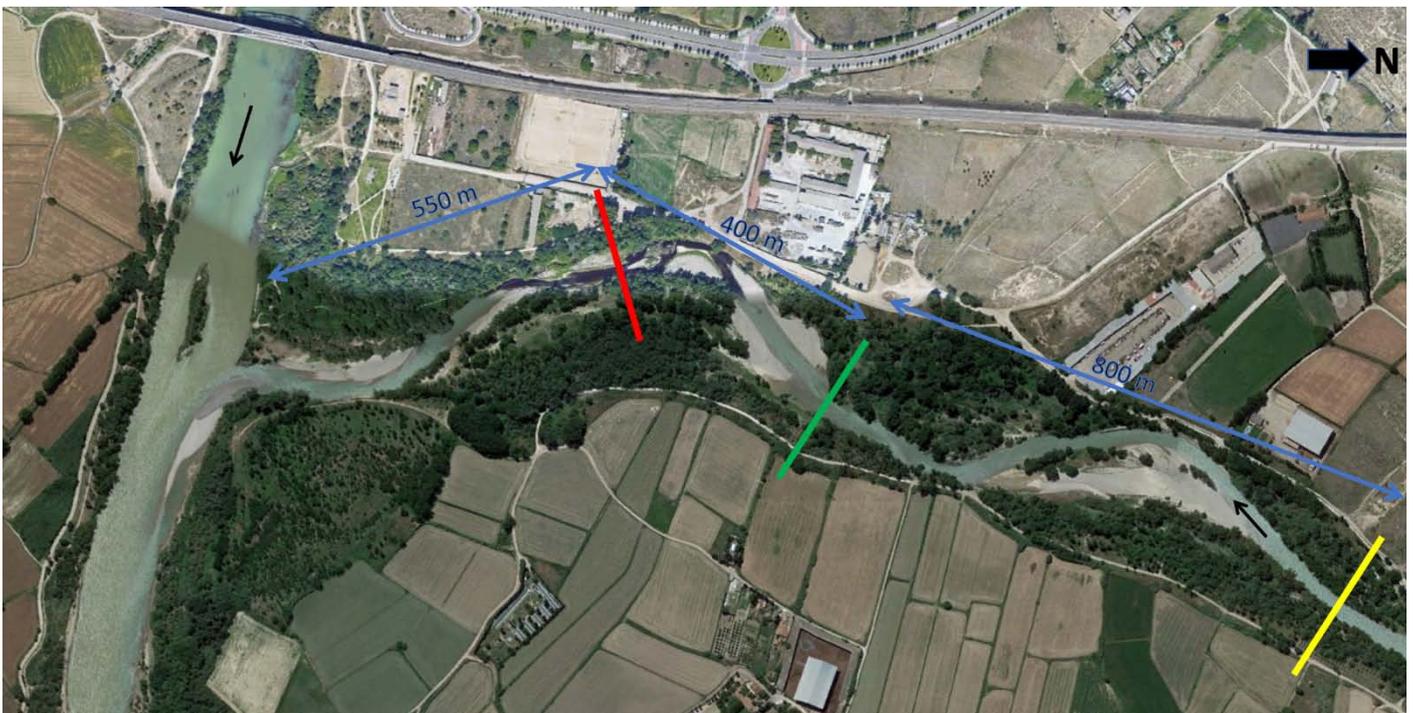


Figura 7.4. Sobre ortofoto que no corresponde con la crecida, se representa hasta dónde entró el Ebro en el Gállego en la crecida *bankfull* ( $1.550 \text{ m}^3/\text{s}$ ) del 16 de diciembre de 2019. Hasta la línea roja se detectó flujo del Ebro. Entre la línea roja y la verde el agua estaba detenida, embalsada. Entre la línea verde y la amarilla el Gállego discurría con una corriente muy lenta. Aguas arriba de la línea amarilla había un flujo normal del Gállego.

## 8. EL CURSO MEDIO DEL RÍO EBRO Y EL TRAMO URBANO DE ZARAGOZA

Zaragoza se localiza en el curso medio del Ebro y en su tramo de meandros libres, que se extiende desde Logroño hasta La Zaida a lo largo de 340 km. Su extensa llanura de inundación alcanza un máximo de 6 km de anchura aguas abajo de Zaragoza. Las crecidas son muy frecuentes y han generado continuos cambios en el cauce a lo largo de la historia, protagonizando una dinámica fluvial única y de gran valor a escala peninsular. La superficie de cuenca del río Ebro hasta Zaragoza es de 40.434 km<sup>2</sup> y el caudal medio de 230 m<sup>3</sup>/s. El Ebro en Zaragoza reduce localmente la anchura de su llanura de inundación a 2,9 km, e incrementa la pendiente del cauce, que alcanza un valor del 0,092% en el casco urbano histórico, frente al 0,045% del tramo fluvial aguas arriba. Este hecho implica una evacuación más rápida y eficaz de las crecidas en el ámbito urbano. El núcleo antiguo de Zaragoza se asentó sobre una de las terrazas pleistocenas de la margen derecha del río Ebro, formada por gravas fuertemente cementadas y de gran espesor, mientras toda la margen izquierda es inundable. Las crecidas más relevantes en el siglo XXI han sido las acontecidas en febrero de 2003, marzo de 2015, marzo de 2018 y diciembre de 2021.

El curso medio del Ebro es meandriforme con un índice de sinuosidad de 1,5 y su dinámica está muy mermada por las defensas de margen. Pero en la primera mitad del siglo XX respondió a un modelo *wandering* o divagante, con extensas barras sedimentarias e islas. Desde diferentes muestreos de sedimento realizados se puede concluir que es un río de gravas con tamaño medio de unos 40 mm, ligeramente inferior a las del Gállego. Las gravas del Ebro destacan también por un índice aplanamiento elevado.



Figura 8.1. Curso divagante, casi trenzado, del río Ebro en la confluencia con el Aragón



Figura 8.2. Tramo meandriforme de elevada sinuosidad en Alagón (2020)



Figura 8.3. Roturas de mota y depósitos de gravas tras la crecida de diciembre de 2021



Figura 8.5. Crecida de 2015

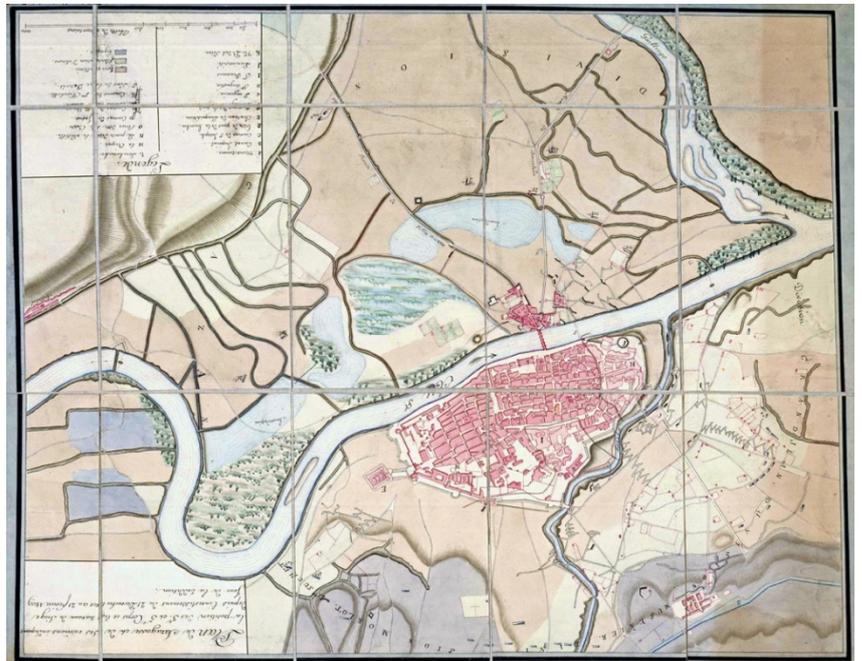


Figura 8.4. Cartografía militar de la ocupación francesa de 1809. Se ha orientado

izquierdo del puente.

## 9. EL AZUD DEL EBRO Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTO (*parada 5*)

En el año 2007 se construyó un azud de compuertas a la salida del tramo urbano del río Ebro en Zaragoza (Fig. 9.1), aguas arriba de la confluencia con el Gállego. Esta estructura es especialmente sensible porque al alzar las compuertas se puede acumular grava y arena en el remanso que crea. A pesar de eso, este aspecto no se tuvo en cuenta en su proyecto, que sólo prestó atención a los niveles de agua en el tramo urbano. Para ajustar el caudal máximo a partir del cual las compuertas del azud deberían abatirse para reducir el riesgo de aterramiento, en mayo de 2018 se hizo una prueba en el azud para tratar de estimar el caudal de inicio de movimiento para el transporte de fondo. Dicha prueba fue acompañada de un estudio teórico que concluyó, con incertidumbres, que el transporte de fondo en el tramo urbano del Ebro empieza cuando el caudal supera 400 m<sup>3</sup>/s.

Estas estimaciones se complementaron en enero de 2019 con una campaña de medida del transporte sólido de fondo. El dispositivo de medidas utilizado fue un Helley-Smith de 76,2 mm de apertura (Fig. 9.2). Las medidas se tomaron en el Puente Giménez Abad (situado inmediatamente aguas abajo del azud, a ~ 250 m) durante una crecida de dos semanas en la que el caudal máximo alcanzó 1200 m<sup>3</sup>/s (Fig. 9.3). Se tomaron medidas durante 13 días de la crecida en cinco puntos del puente, cubriendo toda la anchura del río. En cada punto se tomaron tres medidas consecutivas cuyos resultados fueron posteriormente promediados. En total se hicieron 195 mediciones. Las muestras de material de 90 de ellas fueron tamizadas en el laboratorio para obtener la granulometría. La campaña de medidas se acompañó con el registro del campo de velocidades mediante ADCP (Rivercat M9-3) un día en que el caudal fue ~1500 m<sup>3</sup>/s. A partir de los datos medidos y aplicando coeficientes de eficiencia (inciertos) para tener en cuenta las limitaciones del Helley-Smith usado para recoger las partículas más gruesas, se estimó que el volumen de material sólido como transporte de fondo durante la crecida fue de unos 2000 m<sup>3</sup>.



Figura 9.1. Vista hacia aguas arriba del azud sobre el río Ebro con las compuertas abatidas.



Figura 9.2. Izado del aparato de medidas Helley-Smith durante el muestreo del transporte de fondo de mayo de 2018.

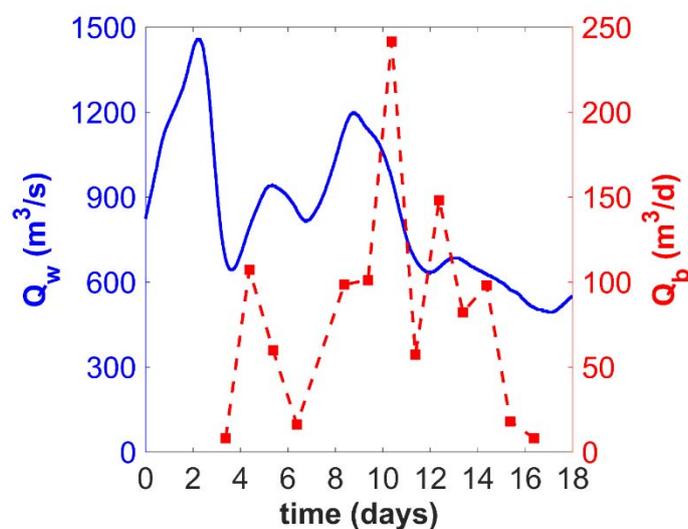


Figura 9.3. Hidrograma registrado en la estación de aforos de Zaragoza durante la campaña de medidas de enero de 2019 (línea azul) y datos medidos del transporte de fondo (m<sup>3</sup>/día) durante los 13 de campaña (cuadrados rojos).

Esta campaña de campo, realizada dentro de un estudio de la UPC para la C.H.E., fue posible gracias a la participación de Albert Rovira (Agència Catalana de l'Aigua) y Pedro Duarte (Universidad de Zaragoza). Agradecemos la colaboración de Alfredo Ollero (Universidad de Zaragoza) y del Ayuntamiento de Zaragoza.

## 10. EL PABELLÓN-PUENTE (*parada 6*)

En el año 2008 se construyó sobre el río Ebro un gran puente que debía de servir como pabellón para la Exposición Universal de 2008 que organizó la ciudad de Zaragoza. El puente se apoya sobre un pilar central dentro del cauce, cubierto por una coraza metálica que lo envuelve, lo que hace que el pilar represente una gran obstrucción para el flujo. La Empresa Constructora y la Propiedad, preocupadas por la seguridad del puente, pidieron a la UPC que estudiara la erosión local alrededor del pilar y propusiera el diseño de una protección de escollera para, en su

caso, hacer frente a una erosión que supusiera un riesgo inaceptable para la estructura. Dicha campaña experimental se llevó a cabo en la Universidade de Beira Interior (Portugal). Los experimentos en modelo reducido (escala 62.5) estimaron que la erosión local podría alcanzar 17,5 m (Fig. 10.1), mucho mayor que la máxima erosión admisible por criterios de estabilidad de la estructura, estimada en 6 m. Ante esta situación, se llevó a cabo el diseño de una protección de escollera (dimensiones del manto y peso de los escollos) de modo que la erosión se produjera suficientemente alejada del pilar como para que no supusiera una amenaza (Fig. 10.1).

En 2015, después de una crecida de ~2500 m<sup>3</sup>/s de caudal punta, se observó una acumulación de material a lo largo de la margen izquierda que prácticamente cegó el brazo del río a la izquierda del pilar del Pabellón Puente. Por el contrario, en el brazo derecho se apreció un gran foso de erosión alargado, que se asocia a la contracción creada por el pilar y cuyas dimensiones en planta excedían las estimadas en modelo físico (Fig. 10.2). Se cree que la combinación de 1) el obstáculo del pilar del Pabellón Puente, cuya magnitud podría suponer de hecho una bifurcación para el río y 2) el flujo en curva del meandro aguas arriba (Fig. 10.3) podrían haber favorecido la concentración del flujo por el brazo derecho del río en el entorno del pilar. Esta concentración podría haber causado la acumulación de material en el brazo izquierdo y a la vez la erosión del brazo derecho.

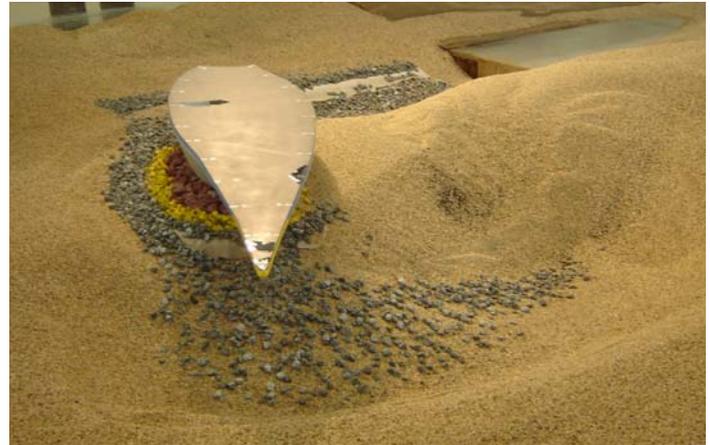
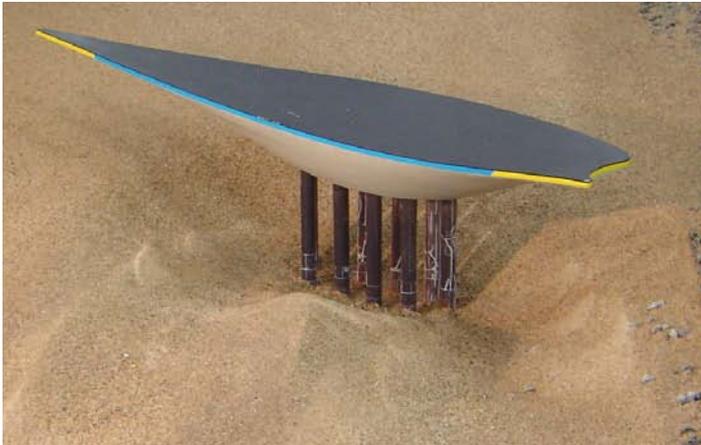


Fig. 10.1. Resultados de la campaña experimental para el estudio de la erosión local alrededor del pilar del Pabellón Puente. Izquierda: vista desde aguas abajo de las dimensiones finales del foso de erosión local. Derecha: vista desde la margen derecha de la protección de escollera diseñada y de los fosos de erosión adyacentes tras el experimento.

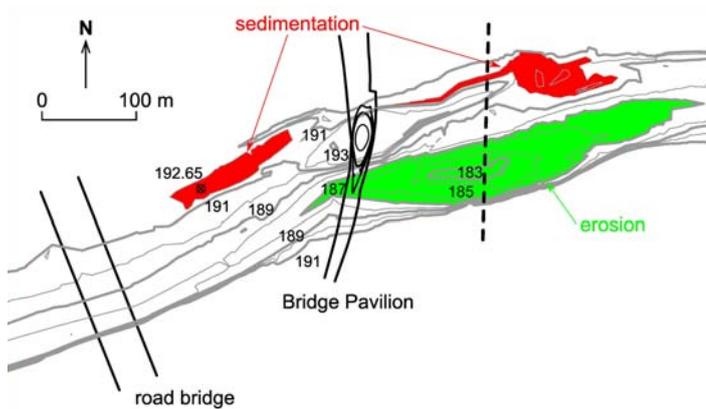


Fig. 10.2. Detalle de los cambios morfológicos (de erosión en verde y de acumulación en rojo) en el entorno del Pabellón Puente tras la crecida de 2015. El flujo es de izquierda a derecha. (Martín Vide et al., 2022)

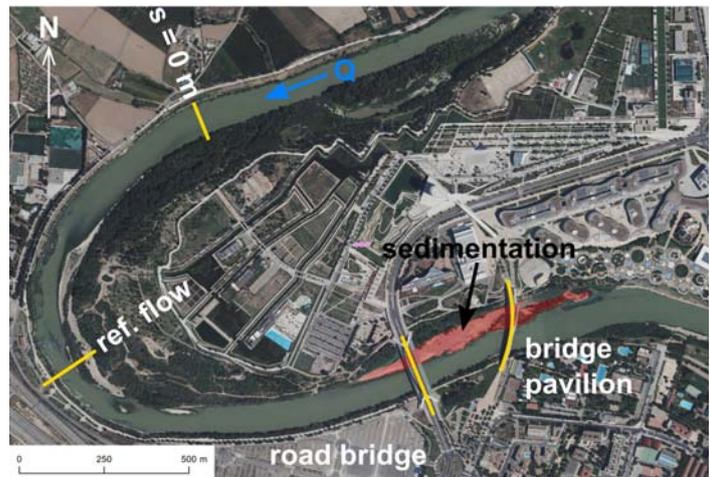


Fig. 10.3. Meandro de gran curvatura aguas arriba del Pabellón Puente. Zona de sedimentación en la margen izquierda del río Ebro (2015) (Martín Vide et al., 2022)

Agradecimientos: Cristina Fael (Universidade da Beira Interior). Los efectos de la crecida de 2015 se estudiaron gracias a un estudio de la UPC para la C.H.E.

## 11. ACTUACIONES EN EL SOTO DE ALFOCEA (posible parada)

El conocido como Soto de Alfoceda es una barra de meandro adosada a la ribera izquierda del Ebro y situada aguas arriba del puente que une las localidades de Alfoceda y Monzalbarba, en Zaragoza. Desde las obras de canalización del río, el meandro se mantiene sensiblemente estable. Las defensas situadas en ambas orillas han reducido la anchura del cauce a 230 metros a la altura del puente. El fuerte estrechamiento de la canalización impide el desarrollo del meandro y parece estar induciendo una fuerte incisión en el cauce de estiaje del río, pegado a la ribera derecha, que se sitúa cinco metros por debajo de la cota de terreno del meandro.

El meandro conserva la topografía de cuatro antiguos brazos del río, situados a diferentes alturas y que han quedado cada vez más desconectados del cauce activo.

En 2018 se realizaron trabajos para la recuperación de la funcionalidad de estos brazos con el objetivo de mejorar la capacidad hidráulica favoreciendo el desagüe del puente, recuperar la complejidad geomorfológica del cauce, aumentar los días de irrigación del soto y favorecer la movilidad del sedimento.

Esta intervención se ha incluido en los trabajos de seguimiento geomorfológico y ambiental realizados sobre este tipo de intervenciones.

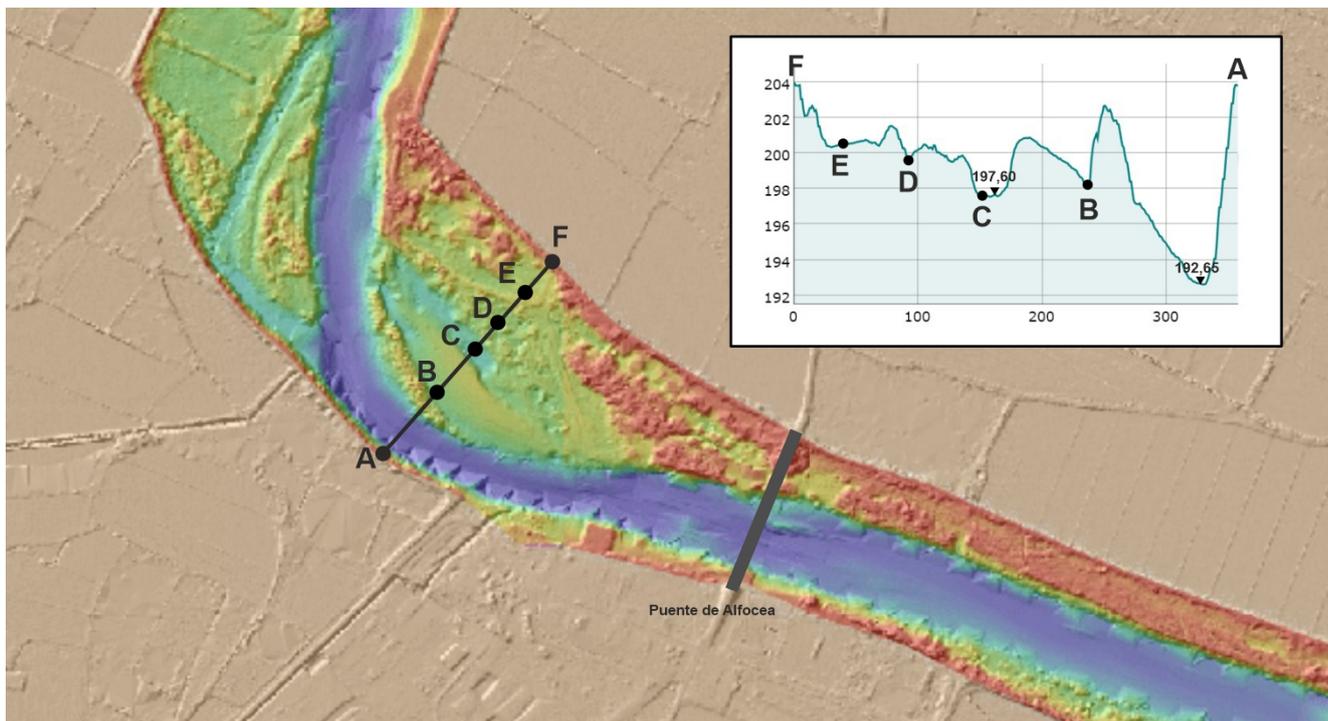


Figura 11.1. Modelo digital del terreno del meandro del Soto de Alfoccea y perfil transversal (elaboración propia sobre el MDT de la Estrategia Ebro Resilience).



Figura 11.2. Brazos recuperados en el meandro del Soto de Alfoccea (Cuartero *et al*, 2022).



Figura 11.3. Intervención en el meandro del Soto de Alfoccea durante una crecida del Ebro, vista hacia aguas abajo (Estrategia Ebro Resilience).

## 12. EBRO RESILIENCE

Tras las importantes avenidas del año 2015 en la cuenca del Ebro, el entonces Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, la Confederación Hidrográfica del Ebro y las CCAA de La Rioja, Aragón y Navarra acordaron poner en marcha una estrategia destinada a aumentar la resiliencia del sistema, aplicando el, en aquella fecha recién aprobado, Plan de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) de la demarcación hidrográfica del Ebro. Esta Estrategia fue denominada Ebro Resilience ([www.ebroresilience.com](http://www.ebroresilience.com)).

La misión de esta Estrategia es promover actuaciones que reduzcan el impacto de las inundaciones en los tramos de mayor riesgo, implementando medidas que a su vez contribuyan a mejorar el estado de las masas de agua y los hábitats fluviales. Asimismo, pretende mejorar la capacidad de respuesta de la población ante estos episodios. Para ello, se contemplan medidas de prevención, protección, preparación y recuperación. Asimismo, incorpora, como un componente fundamental, la colaboración entre las distintas Administraciones y la participación de la sociedad en todos sus ámbitos.

La visión de futuro es crear un río Ebro donde las actividades económicas y los núcleos de población COEXISTAN con un río en BUEN ESTADO de conservación, sin que las inevitables inundaciones causen daños importantes.

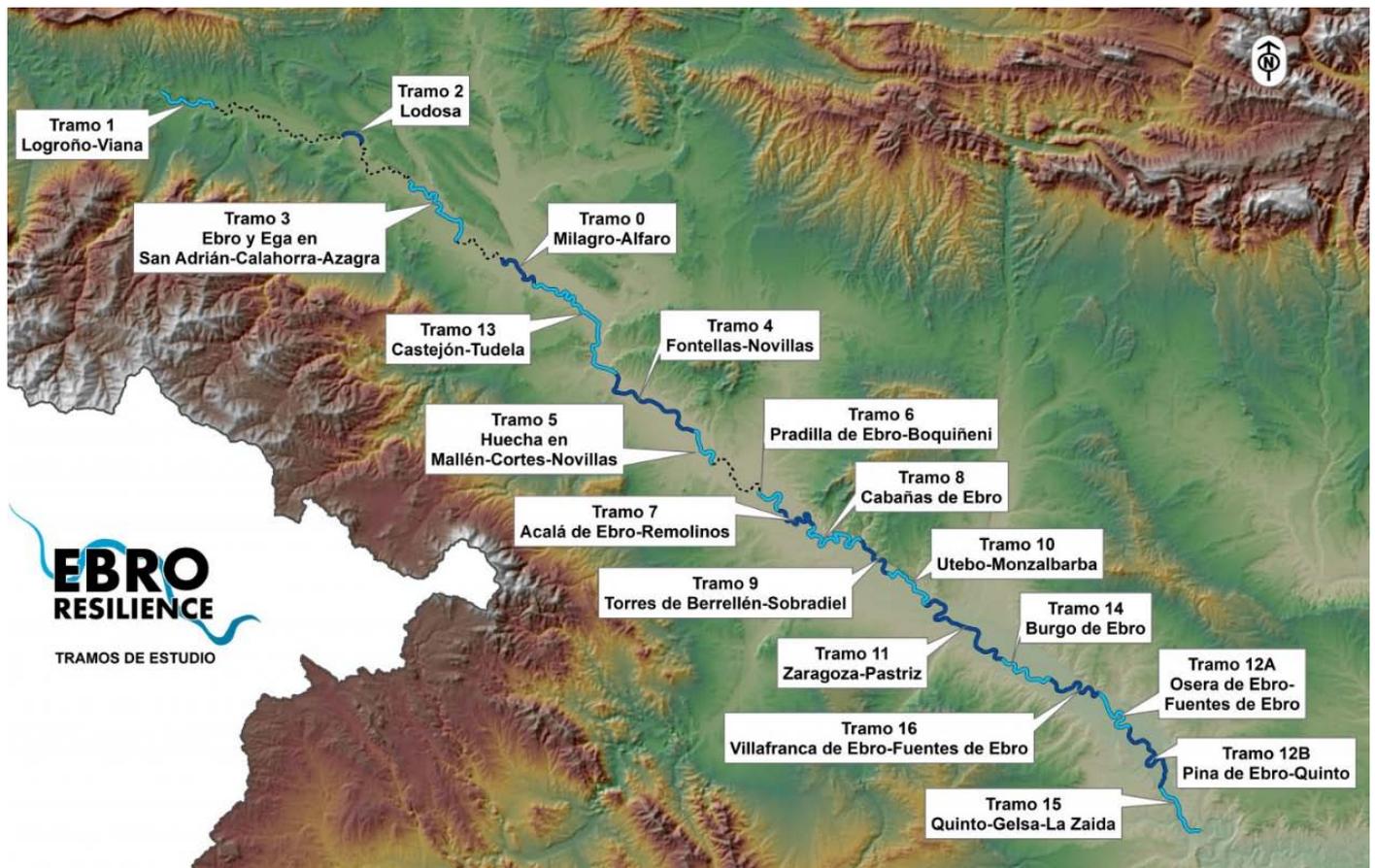


Figura 12.1. Tramos en estudio como desarrollo de la Estrategia (Estrategia Ebro Resilience).



Figura 12.2. Grupos de participación (Estrategia Ebro Resilience).

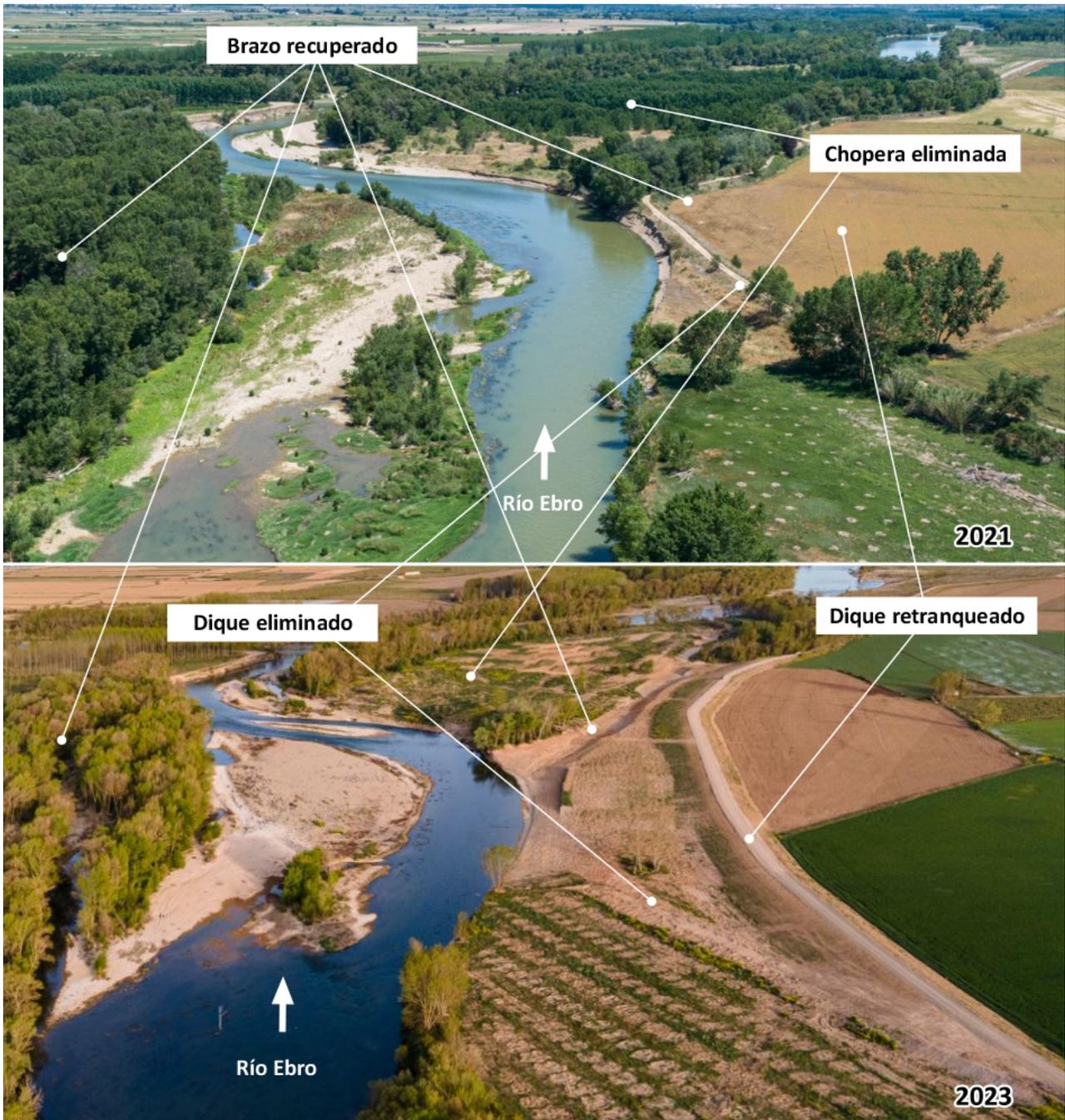


Figura 12.3. Actuaciones realizadas en el río Ebro a su paso por el paraje de “El Ortigoso” en Milagro, Navarra (Estrategia Ebro Resilience).

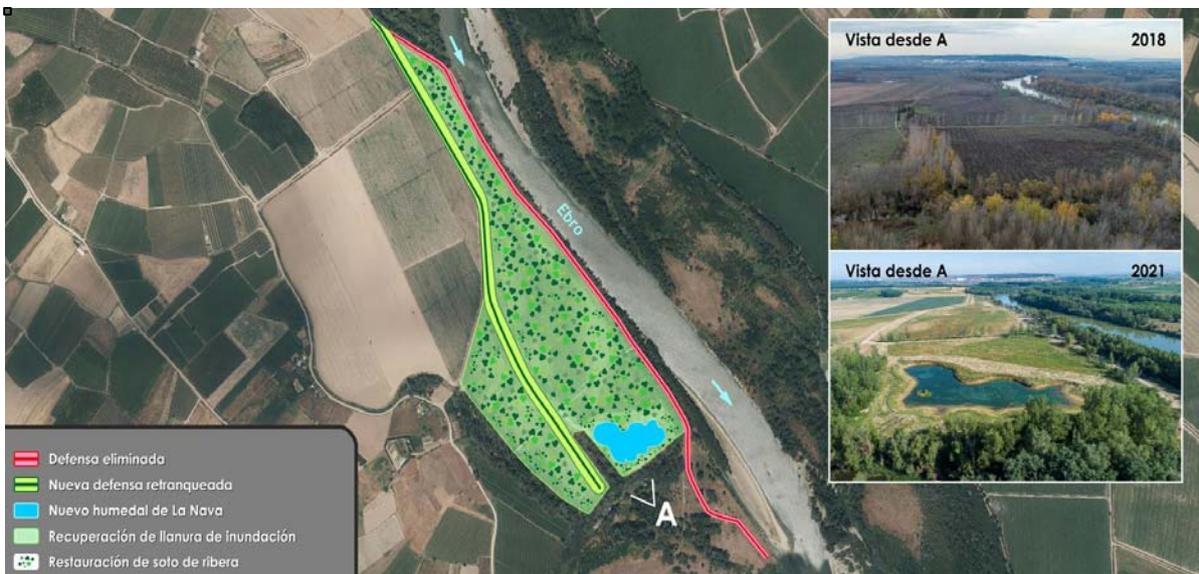


Figura 12.4. Actuaciones realizadas en el río Ebro a su paso por el paraje de “La Nava” en Alfaro, La Rioja (Estrategia Ebro Resilience).

## MÁS INFORMACIÓN

- Benito, G., Sancho, C., Peña, J.L., Machado, M.J., Rhodes, E.J. (2010) Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS6 in NE Spain: climatic and paleohydrological implications. *Quaternary Science Reviews*, 29: 2694-2704.
- Cuartero, N., Moral, R., Ollero, A., Pirchi V.N. (2022) *Evaluación hidromorfológica tras la aplicación de la técnica curage en el curso medio del Ebro*. Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Duarte, P. (2017) *Inventario ambiental y propuestas de actuación para el Bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza*. Informe técnico para el Ayuntamiento de Zaragoza.
- Estrategia Ebro Resilience (2020) *Estrategia general de actuaciones* (<https://ebroresilience.com/wp-content/uploads/2020/02/estrategia-ebro-resilience-2020.pdf>).
- Ferrer-Boix, C. (2011) *Incisión de ríos por extracción aluvial y retirada de presas. Estudio matemático y experimental*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ferrer-Boix, C., Boix, J., Martín Vide, J.P., Ollero, A. (2021) Alluviation of a side-channel by bed material load. Field measurements and modelling. *Geomorphology*, 389, doi 10.1016/j.geomorph.2021.107801
- Horacio, J., Ollero, A., Noguera, I., Fernández Pasquier, V. (2019) Flooding, channel dynamics and transverse infrastructure: a challenge for Middle Ebro River management. *Journal of Maps*, 15(2): doi 10.1080/17445647.2019.1592719.
- Lazreg, A. (2024) *Dinámica fluvial, impacto antrópico y objetivos de restauración en el curso bajo del río Gállego*. Tesis Master (en preparación), CIHEAM-Instituto Agronómico Mediterráneo, Zaragoza.
- Marqués, L.A. (2018) *Alteraciones hidrogeomorfológicas en el Bajo Gállego a partir del registro instrumental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Martín Vide, J.P., Ferrer-Boix, C., Ollero, A. (2010) Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117: 261-271.
- Martín Vide, J.P., Fael, C.M.S., Núñez, F., Ferrer-Boix, C., Santos, C.A.V., Prats, A., Chavarrias, V. (2022) A large bridge pier in an alluvial channel: local scour versus morphological effects and the role of physical models. *Journal of Hydraulical Engineering*, 148(8), doi 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001993
- Mora, D. (2007) *Análisis de la evolución de los usos del suelo y la dinámica fluvial del curso bajo del río Gállego*. Memoria fin de master en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad de Zaragoza.
- Moreno, S. (2005) *Restauración ecológica en ríos de la cuenca del Ebro. Propuestas de actuaciones de restauración en los Ojos de Monreal del Campo-Río Jiloca (Teruel) y tramos del curso bajo del río Gállego (Zaragoza)*. Tesis Master CIHEAM-Instituto Agronómico Mediterráneo, Zaragoza.
- Ollero, A. (1992) *Los meandros libres del río Ebro (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Ollero A. (2010) Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, 117: 247-260.
- Ollero, A., Sánchez Fabre, M., Marín, J.M., Fernández, D., Ballarín, D., Mora, D., Montorio, R., Beguería, S., Zúñiga, M. (2004) Caracterización hidromorfológica del río Gállego. In Peña, J.L., Longares, L.A., Sánchez Fabre, M. (Eds.) *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, 117-129, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Ollero, A. y Martín Vide, J.P. (Coords., 2005) *Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial*. Ayuntamiento de Zaragoza.
- Ollero, A., Ibsate, A., Granado, D., Real de Asua, R. (2015) Channel responses to global change and local impacts: perspectives and tools for floodplain management (Ebro River and tributaries, NE Spain). In Hudson, P.F., Middelkoop, H. (ed.) *Geomorphic approaches to integrated floodplain management of lowland fluvial systems in North America and Europe*, 27-52, Springer, New York.
- Ollero, A., Ibsate, A., Acín, V., Ballarín, D., Granado, D., Horacio, J., Mora, D., Nadal, E., Sánchez Fabre, M., Sebastián, M., Segura, F., Valls, A. (2017) Dynamique fluviale, changement global et pression anthropique dans le bassin, le cours et le delta de l'Èbre. *Sud-Ouest Européen*, 44: 41-54.
- Ollero, A. y Briz, J.L. (2018) Ciudad y territorio fluvial en Zaragoza: principales retos y estrategias de futuro. *Seminario Internacional El agua y los ecosistemas fluviales en la ciudad*, FNCA y Cámara de Comercio de Zaragoza.
- Ollero, A., García, J.H., Ibsate, A., Sánchez Fabre, M. (2021) Updated knowledge on floods and risk management in the Middle Ebro River: the "Anthropocene" context and river resilience. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47: 73-94, doi 10.18172/cig.4730
- Ollero, A., Albero, L., Boné, P., Díaz Morlán, J., Pirchi, V.N., Marchioro, E. (2024) Three rivers and different approaches of urban riverscapes in Zaragoza city: hydromorphology, memory, perception and planning. In Farguell, J., Santasusagna, A. (Eds) *Urban and metropolitan rivers: geomorphology, planning and perception*, Springer (in press).
- Pellicer, F. (2015) La recuperación de las riberas del Ebro en Zaragoza. Un efecto perdurable del evento efímero Expo 2008. In: De la Riva J, Ibarra P, Montorio, R, Rodrigues M (eds) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza & AGE, 353-362.
- Peña-Monné, J.L., Longares, L.A., Rubio, V., Sampietro, M.M., Sánchez Fabre, M. (2020) Dynamic changes in the lower Gállego river (Ebro basin, NE Spain) and their relationship with anthropic activities and the quaternary substrate. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2): 371-393.
- Pirchi, V.N. (2023) *Dinámica fluvial y estado hidrogeomorfológico del curso bajo del río Gállego (T.M. de Zuera): diagnóstico para su restauración*. Trabajo fin de master en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad de Zaragoza.
- Rivas, F.A. (2016) *Patrimonio hidráulico en la huerta de Zaragoza*. Ayuntamiento de Zaragoza.
- SEO Bird Life (2022) *Estudio y seguimiento de las poblaciones de aves en los curages del río Ebro - resultados temporada 2022 -*. Confederación Hidrográfica del Ebro.
- UPC (2008) *Estudio Hidráulico en Modelo Físico de la Protección del Pabellón-Puente de la Expo 2008*. Informe Técnico para EPTISA.
- UPC (2017) *Estudio del equilibrio sedimentario del río Ebro en el tramo urbano de Zaragoza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- UPC (2018a) *Estudio del caudal de inicio de movimiento de fondo en el azud del Ebro en Zaragoza*. Informe Técnico para el Ayuntamiento de Zaragoza.
- UPC (2018b) *Estudio hidrodinámico y sedimentológico de puntos clave del río Ebro en el tramo urbano de Zaragoza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

## ANEXO: IMÁGENES AÉREAS ADICIONALES (Google Earth)

(todas las imágenes se encuentran orientadas, con el norte hacia arriba)

### MEANDRO DE EL MADRAZO (PEÑAFLOR)



octubre 2020

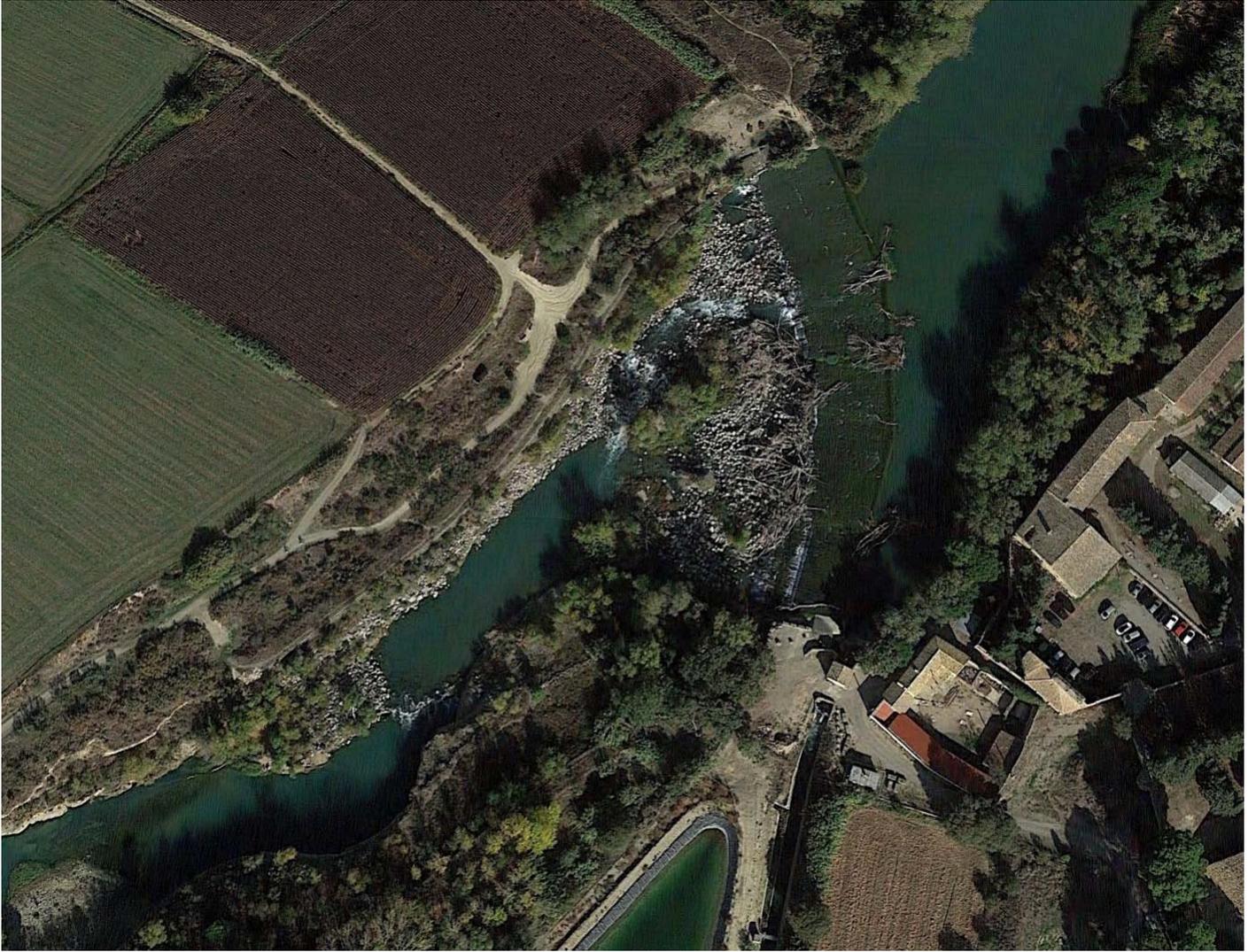


febrero 2022



julio 2023

## AZUD DE URDÁN



octubre 2020

## LA "LENTEJA"



octubre 2020

## AZUD DEL EBRO



julio 2022

## PABELLÓN PUENTE



julio 2022

SOTO DE ALFOCEA



julio 2022