



Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial

Application of Structure from Motion (SfM) algorithms for the historical analysis of changes in fluvial geomorphology

Llena, M.^(1,2); Vericat, D.^(1,2,3); Martínez-Casasnovas, J.A.^(2,4)

(1) Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial

(2) Dpto. Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Universidad de Lleida, Av. Alcalde Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, Catalunya, España.

(3) Centro Tecnológico Forestal de Cataluña, 25280 Solsona, Catalunya, España.

(4) Grupo de Investigación en AgróTICA y Agricultura de Precisión, Centro Agrotecnio, Universidad de Lleida

Resumen

En el presente artículo se presenta el flujo de trabajo para la obtención de información espacial utilizada para el análisis de cambios geomorfológicos fluviales en el tramo alto del río Cinca (Pirineo Aragonés) durante el periodo comprendido entre el año 1927 y el año 2015. Los productos finales tras la aplicación de la metodología SfM-MVS son ortomosaicos, con un error medio cuadrático (RMSE) entre 0,5 y 1 m, y nubes de puntos con un RMSE entre 1 y 2 m. Los resultados indican que el tramo de estudio del Alto Cinca ha sufrido una fuerte reducción de la anchura activa del cauce (52%) con un elevado proceso de incisión (e.g. >5 m en algunos puntos). Además, se observa una clara simplificación en el patrón del cauce (reducción del índice de multiplicidad de canales y paso de patrón multicanal a unicanal). Estos procesos están directamente influenciados por los impactos antrópicos asociados a las extracciones de áridos y a la construcción de escolleras (escala de tramo), y por los efectos sobre la producción y transferencia de sedimentos (escala de cuenca) debido a los cambios en los usos del suelo a partir de la década de 1950 del siglo XX.

La metodología que se presenta en este trabajo es de gran utilidad para el diagnóstico del estado morfo-sedimentario de sistemas fluviales. En el caso particular del Alto Cinca, los resultados son de gran interés para la mejora de la comprensión de las relaciones causa-efecto en la dinámica morfo-sedimentaria observada para el período 1927-2015. Esta mejora puede ayudar a modificar los planes de gestión de cuenca mediante una visión más integral de los procesos contemporáneos.

Palabras clave: fotogrametría digital; SfM-MVS; análisis geomorfológico histórico; dinámica fluvial.

* Correo electrónico autor principal: mllena@macs.udl.cat



Abstract

This work presents the workflow used to obtain spatial information to analyze geomorphological changes in the upper reach of the Cinca River (Southern Pyrenees) during the 1927-2015 period. The final products after application of the SfM-MVS methodology are orthomosaics with a root mean square error (RMSE) of 0.5-1 m, and point clouds with an RMSE of 1-2 m. The results of the study indicate that the study reach has suffered a clear reduction of the active channel width (i.e. 52%) with a high incision processes associated (e.g. >5m in some points), and a simplification in the channel pattern (i.e. reduction of the braiding index and changes from a multi-channel pattern to a single-channel one). These processes are directly influenced by the anthropogenic impacts associated with in-channel gravel mining and the associated impacts related to channel embankment (reach scale, localized impacts), and also influenced by the impacts on the production and transfer of sediment (catchment scale) due to land use changes since the 50s of the 20th century.

The methodology presented in this paper is very useful for the diagnosis of the morphosedimentary state of river systems. In the particular case of the Alto Cinca River, the results are of great interest for the improvement of the understanding of the cause-effect relationships in the morphosedimentary dynamics observed for the period 1927-2015. This improvement can help modify basin management plans through a more comprehensive view of contemporary processes.

Key words: digital photogrammetry; SfM-MVS; historical geomorphological analysis; fluvial dynamics.

1. Introducción

El estudio evolutivo de la morfología fluvial ha sido tradicionalmente analizado mediante el análisis de los cambios en el cauce y en la llanura de inundación entre dos o más periodos temporales a partir de la interpretación de fotografías aéreas o mediante la repetición de observaciones topográficas. De manera general, son dos los tipos de análisis para este estudio: (a) el análisis planimétrico; y (b) el análisis altimétrico o topográfico (e.g. Vericat *et al.*, 2017; Vericat y Batalla, 2016).

El análisis planimétrico por medio de la interpretación de mapas históricos y fotografías aéreas (e.g. Batalla *et al.*, 2006; Calle *et al.*, 2017; Comiti *et al.*, 2011; Ibisate *et al.*, 2013; Sanchis-Ibor *et al.*, 2017; Surian *et al.*, 2009) permite la delimitación y caracterización de la geometría de unidades morfológicas. De esta forma, mediante la comparación de cartografía de sucesivos años, se puede observar la evolución morfológica en planta (e.g. cambios en la extensión de las unidades, variación de la anchura activa, frecuencia de canales), así como determinar las áreas en las que los procesos dominantes durante el período de estu-

dio han sido de erosión o sedimentación (e.g. la desaparición de una barra indica que el proceso dominante entre el período analizado es erosivo). Existen varias incertezas y errores asociados a este tipo de análisis, como son por ejemplo los errores de georreferenciación (e.g. Vericat *et al.*, 2009). La magnitud de estos errores está influenciada por el proceso de georreferenciación y la posterior creación del mosaico que se lleva a cabo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). De la misma forma, la resolución de los datos también condiciona la calidad de los resultados, especialmente en los casos de las fotografías y mapas históricos en los que suele ser baja. El punto fuerte de esta metodología es que permite el estudio de la evolución morfológica para un amplio periodo temporal debido a la elevada disponibilidad de fotogramas y mapas históricos. Por el contrario, una de las limitaciones de esta metodología recae en la frecuencia en la que se dispone de sucesivos fotogramas o mapas, lo que significa que los cambios observados son el resultado del total de los procesos ocurridos entre períodos y, al incrementar la escala temporal, se integra la dinámica asociada a múltiples episodios competentes.

Dentro del análisis altimétrico o topográfico, la obtención de secciones topográficas permite caracterizar la geometría del cauce y evaluar los cambios topográficos entre periodos mediante la comparación de los perfiles de cada sección. Este método se limita a escalas de tramo (centenares de metros), y mediante la interpolación (i.e. propagación de los resultados entre secciones) se pueden obtener cambios volumétricos para el conjunto del tramo analizado. La baja densidad de observaciones hace que la fiabilidad y representatividad de las zonas interpoladas fuera de las propias secciones sea relativamente baja (Lane *et al.*, 1994). Se trata de un método común hasta principios de siglo XXI debido a la limitación de las técnicas de adquisición de datos topográficos. Actualmente sigue siendo utilizado por algunos autores, sobre todo en trabajos donde el objetivo es el análisis histórico (e.g. Arnaud *et al.*, 2015; Comiti *et al.*, 2011; Moretto *et al.*, 2014; Surian *et al.*, 2009). Los avances en los campos de la geomática y la teledetección desde finales de los años 90 y principios del siglo XXI (ver la Figura 1 en Brasington *et al.*, 2012 y en Passalacqua *et al.*, 2015) ha permitido la obtención de información topográfica de elevada resolución. Esta información es fundamental para la creación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) de tramos fluviales (e.g. Brasington *et al.*, 2012; Williams, 2012; Williams *et al.*, 2013). Así pues, los MDT permiten una representación continua de la superficie, simplificada por medio de celdas regulares, y de distinta tipología a la disponible a partir de secciones topográficas. Del mismo modo, la comparación entre MDT o DoD (DoD del inglés DEMs of Difference) permite observar la evolución topográfica, pudiendo localizar y cuantificar los procesos de erosión y sedimentación que hayan tenido lugar en un tramo determinado (Brasington *et al.*, 2000; Lane *et al.*, 1996; Vericat *et al.*, 2017; Wheaton *et al.*, 2010).

En la actualidad, los avances en el post-proceso de imágenes aéreas (e.g. nuevos algoritmos, mejoras computacionales) han permitido desarrollar una novedosa, rápida y económica metodología basada en técni-

cas de fotogrametría clásica. Los algoritmos Structure from Motion y Multi View Stereo (SfM-MVS) permiten la identificación espacial de puntos comunes en diferentes fotografías, habitualmente más de tres. A partir de estos puntos se orientan y localizan las cámaras y, posteriormente, se obtiene una nube de puntos (i.e. información topográfica) en tres dimensiones, así como ortomosaicos rectificadas geométrica y geográficamente (i.e. información planimétrica; ver más detalles del método en Carrivick *et al.*, 2016; Micheletti *et al.*, 2015a; Smith *et al.*, 2016; Ullman, 1979). Los algoritmos SfM-MVS no requieren información interna de las cámaras (e.g. lentes) ni datos de orientación ni ubicación 3D de las mismas para la reconstrucción de la escena (Westoby *et al.*, 2012). Aun así, el establecimiento de una red de puntos de control topográficos permite el registro de la información a un Sistema de Coordenadas Geográfico (georreferenciación) para la comparación de la información o la integración con datos ya disponibles y registrados. Además, esta técnica es, junto con las técnicas de láser terrestre, la que mayor versatilidad ofrece para garantizar altas densidades de información de elevada resolución a escalas espaciales amplias (e.g. Smith y Vericat, 2015).

Desde el punto de vista del análisis histórico, este enfoque metodológico ofrece un amplio abanico de posibilidades para el estudio geomorfológico. Por un lado, a partir de fotografías aéreas con cierto solape es posible extraer atributos topográficos relativos de las zonas a las cuales representan, los cuales tendrán una resolución directamente dependiente de la resolución y solape de las fotografías, y de los puntos de control desde los cuales se registre la información para obtener valores relativos a un Sistema de Coordenadas determinado. Por otro lado, los ortomosaicos permiten el estudio planimétrico de unidades de interés y su evolución. En este contexto, este artículo presenta un flujo de trabajo para la obtención de información topográfica y ortomosaicos a partir de SfM-MVS aplicada a fotografías aéreas históricas para el análisis morfológico de cauces fluviales. La

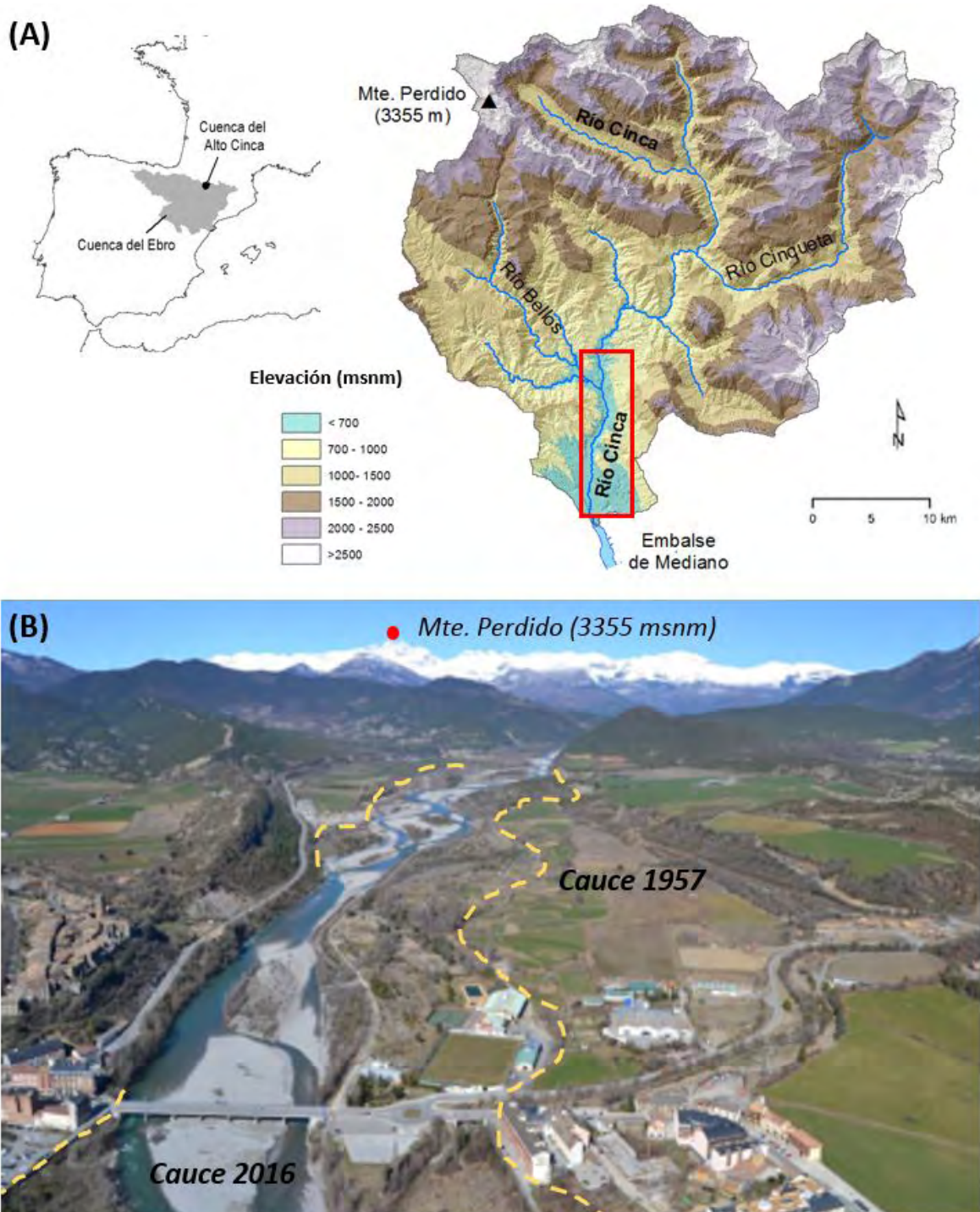


Figura 1. (A) Localización del área de estudio dentro del contexto de la Península Ibérica y Cuenca del Alto Cinca. (B) Imagen del tramo bajo de la zona de estudio con los límites aproximados del cauce activo en 1957 y 2016 respectivamente.

Figure 1. (A) Study area location and Iberian Peninsula and Upper Cinca catchment context. (B) Image of the lower section of the study area with the approximate limits of the active channel in 1957 and 2016 respectively.

metodología se aplica en un tramo de 13 km del Alto Cinca (aguas arriba del municipio de Aínsa, Huesca; Pirineo Central) durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1927 y 2015. Mediante la aplicación de esta metodología es posible realizar un diagnóstico del estado morfológico de la zona de estudio para cada una de las series temporales, así como los procesos y cambios geomorfológicos sucedidos entre dichas series. Es importante remarcar que, en el caso particular de la cuenca del Alto Cinca, parte de este enfoque metodológico ha sido presentado por Llena *et al.* (en revisión). Este trabajo se centra en análisis de cambios topográficos a causa de la construcción de una carretera en una ladera y la extracción de piedra de una cantera a cielo abierto, teniendo en cuenta el análisis y la propagación de errores de los correspondientes modelos, lo cual busca un objetivo distinto con respecto al presente artículo.

2. Área de estudio

La cuenca del Alto Cinca ocupa una superficie de 848 km² y está localizada en la cabecera del río Cinca, dentro de la cuenca del Ebro. El tramo de estudio se sitúa en la parte baja de la cuenca y abarca 13 km de río entre el municipio de Escalona y el embalse de Mediano, en las inmediaciones del municipio de Aínsa (Huesca). En este tramo se reduce claramente la pendiente respecto al tramo de aguas arriba, comportándose como una zona receptora de todo el sedimento procedente de las cabeceras. Se trata de un tramo muy dinámico, con múltiples canales, barras sedimentarias de distinta tipología y con distintos niveles de vegetación. El promedio de la anchura del canal activo está entorno a los 200 m, mientras que la profundidad media con caudales medios es de 0,3 m. La granulometría superficial va desde arenas a grandes bloques (i.e. 0,5 a 2000 mm), con una mediana del tamaño de los sedimentos superficiales de alrededor de los 64 mm (ver más detalles de la zona de estudio en Béjar *et al.*, 2017 y Béjar *et al.*, 2018). El tramo de estudio ha sufrido importantes impactos antrópicos que han afectado

directa o indirectamente la geomorfología del lecho fluvial, especialmente a partir de la segunda mitad de siglo XX. Impactos que van desde los cambios en los usos del suelo y el abandono rural, los cuales han tenido un efecto importante sobre la transferencia de agua y sedimentos (e.g. Beguería *et al.*, 2006; García-Ruiz *et al.*, 1996), hasta impactos directos en el cauce como son las extracciones de áridos y la construcción de escolleras, especialmente a partir de los años 1980 del siglo XX. Así, se trata de un tramo en el que la morfología fluvial del cauce ha cambiado substancialmente, especialmente a partir de los años 1950-1960 del siglo XX (Figura 1B), lo que permite un contexto muy propicio para la aplicación y evaluación de la metodología que se presenta en este trabajo.

3. Metodología

El flujo metodológico que se ha llevado a cabo en el presente artículo se presenta en forma de diagrama esquemático en la Figura 2. La metodología consta de 5 bloques. Los apartados descritos a continuación corresponden a la explicación detallada de cada uno de los bloques del diagrama. Con el objetivo de optimizar el espacio y la representatividad de las figuras, el tramo que aparece cartografiado en las figuras corresponde a la parte baja del tramo de estudio (i.e. 3 km), el cual es representativo de los procesos y cambios geomorfológicos que ha tenido el conjunto del tramo de estudio (i.e. 13 km).

3.1. Fotografías aéreas históricas

La selección de los fotogramas y los periodos temporales de análisis viene determinada por su disponibilidad, el grado de solape, la calidad y la resolución de los mismos. De este modo, en el caso particular del Alto Cinca y para el periodo de estudio comprendido entre el año 1927 y 2015, se analizaron las siguientes series temporales: 1927, 1957, 1977, 1984, 1997, 2006, 2012 y 2015. De estas, se pudieron obtener fotografías aéreas con

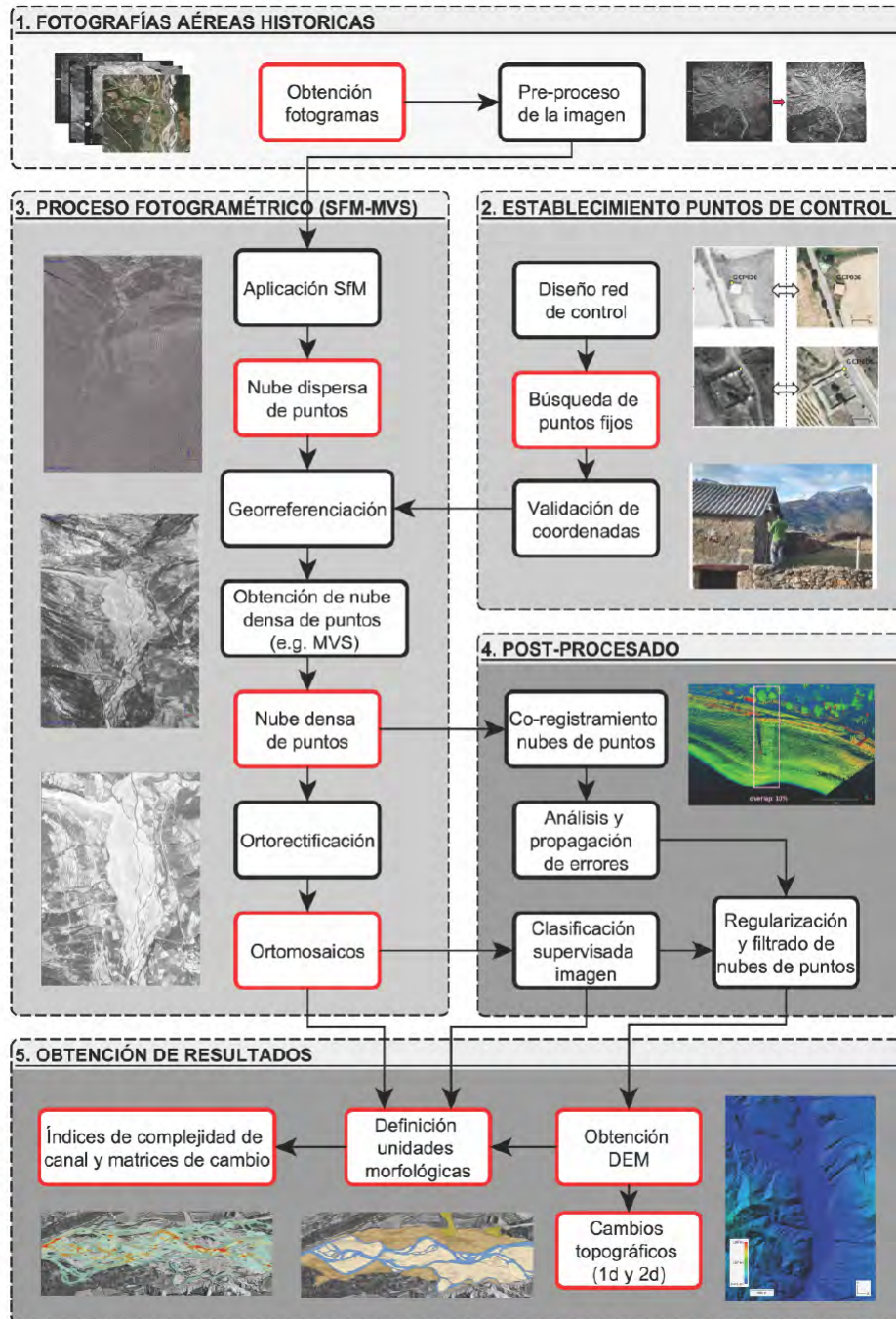


Figura 2. Flujo de trabajo para la obtención de ortomosaicos e información topográfica a partir de fotografías aéreas: 1. Obtención de fotografías aéreas históricas; 2. Establecimiento puntos de control; 3. Proceso fotogramétrico (SfM-MVS); 4. Post-procesado de los productos; y 5. Obtención de resultados. Los cuadros rojos corresponden a los inputs y outputs mientras que los negros corresponden a procesos.

Figure 2. Workflow for obtaining ortomosaics and topographic data from aerial photographs: 1. Obtaining historical aerial photographs; 2. Establishment of control points; 3. Photogrammetric process (SfM-MVS); 4. Products post-processing; and 5. Results obtaining. The red squares correspond to the inputs and outputs, while the black squares correspond to processes.

solape de las series de los años 1957, 1977, 1984 y 2015, mientras que para el resto de las series solo se pudo obtener ortomosaicos ya ortorectificados (años 1997, 2006 y 2012) y fotoplanos sin referencia espacial ni solape (año 1927), los cuales fueron georreferenciados mediante un SIG (ArcGIS 10.3). Así, para estas últimas series no se extrajo información topográfica, obteniendo solo información morfológica en planta. En cuanto a las fuentes de información, todas las series fotográficas históricas fueron adquiridas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) a excepción de a) los fotoplanos de 1927 que pertenecen a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE); b) la serie de 1957 que se obtuvo del Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF); y c) la serie de 1997 que se obtuvo del Centro de Información Territorial de Aragón (CINTA). Debido a que el formato original de los fotogramas históricos es el analógico, para poder procesarlos mediante algoritmos SfM-MVS, las imágenes se escanearon mediante un escáner fotogramétrico de alta resolución (1200 dpi) y se transformaron en un formato de imagen digital (i.e. TIF). El escaneo y envío de los fotogramas se realizó por parte de los organismos con titularidad de los fotogramas (Tabla 1).

La única serie temporal que no se obtuvo por medio de estas fuentes fue la del año 2015, la cual se tomó como serie contemporánea de referencia. Esta fue facilitada por el Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial de la Universidad de Lleida (RIUS). Estas fotografías forman parte del proyecto de investigación MorphSed dentro del cual se enmarca el presente artículo (ver referencia en los agradecimientos). Los fotogramas se tomaron con un vuelo bajo (máx. 200 m de altura) realizado con un autogiro biplaza tripulado. El resultado fue un ortomosaico de alta resolución (0,1 m), así como información topográfica de elevada densidad con errores medios cuadráticos (i.e. RMSE de sus siglas en inglés Root Mean Square Error) por debajo de los 0,05 m (ver más detalles en Vericat *et al.*, 2016).

Una vez obtenidas las fotografías, el siguiente paso consistió en el pre-proceso de las mismas para facilitar y mejorar el proceso fotogramétrico. En primer lugar, se realizó una corrección de la imagen mediante el ajuste del contraste y exposición con el software Adobe Photoshop Lightroom© 6.6.1. En segundo lugar, mediante la herramienta de enmascaramiento del propio software SfM (i.e. Agisoft Photoscan Profesional 1.2.2 en el presente estudio), se eliminaron los marcos de los fo-

Tabla 1. Características técnicas de las fotografías aéreas utilizadas en el Alto Cinca.
Table 1. Technical characteristics of aerial photographs used in the Upper Cinca River.

Año	Fecha	Tipo	Fuente	Escala	Nº Fotogramas
1927	-	Pancromático	CHE	1/10.000	-
1957	Agosto	Pancromático	CCFEA	1/33.000	18
1977	Julio - Septiembre	Pancromático	CNIG	1/18.000	21
1984	Octubre	Pancromático	CNIG	1/30.000	7
1997	Septiembre	RGB	CINTA	1/5.000	-
2006	Agosto - Octubre	RGB	CNIG	1/5.000	-
2012	Julio	RGB	CNIG	1/5.000	-
2015	Marzo	RGB	RIUS	-	800

CHE: Vuelo histórico de 1927. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

CCFEA: Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire

CNIG: Centro Nacional de Información Geográfica

CINTA: Centro de Información Territorial de Aragón

RIUS: Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial de la Universidad de Lleida

togramas en los cuales sale reflejada cierta información técnica (e.g. marcas fiduciaras, altura de vuelo, focal cámara), así como otros elementos que pudieran provocar distorsiones en el proceso fotogramétrico (e.g. partes aeroplano, zonas borrosas).

3.2. Puntos de control de terreno (GCP)

El primer paso para realizar la georreferenciación consiste en la creación y establecimiento de una red homogénea de puntos de control (i.e. GCPs; de sus siglas en inglés Ground Control Points) alrededor del tramo de estudio. Existen varios autores que ofrecen diferentes pautas para establecer el número y la distribución de los GCPs para la obtención de mosaicos a partir de fotografías aéreas de distinta resolución con el objetivo de evaluar los cambios geomorfológicos en cauces fluviales (e.g. Hughes *et al.*, 2006; Leys y Werrity, 1999; Muñoz-Narciso *et al.*, 2014; Vericat *et al.*, 2009). Leys y Werrity (1999) o Muñoz-Narciso *et al.* (2014) señalan que la manera de minimizar los errores de georreferenciación recae en la localización de los GCPs con un patrón perimetral sobre una amplia distribución. Este criterio es apropiado en fotografías aéreas que tienen relativamente poco error, ya sea debido a zonas de poco relieve o fotografías con una alta resolución. En cambio, Hughes *et al.* (2006) indica que se consigue un menor error de georreferenciación mediante la concentración de GCPs cerca de las áreas de interés. En el caso del presente trabajo, se tuvo en cuenta una combinación de ambos criterios, intentando tener una densidad de GCPs constante en todo el tramo. Se debe remarcar que se tiene una fuerte dependencia del hecho que existieran GCPs identificables en el máximo número de series posibles para que estos sean válidos para todas (i.e. puntos en los que la topografía no se haya modificado).

En el caso particular del Alto Cinca, la elección de los puntos de control se basó en la localización de puntos identificables desde las fotografías en zonas que potencialmente no hayan variado de posición (i.e. x, y, z) a lo lar-

go del tiempo (e.g. cruces de caminos, lindes de campos, construcciones bajas). Es importante evitar la selección de puntos de control en elementos volumétricos o con una geometría irregular puesto que esto podría producir errores importantes en la cota de la nube de puntos final. Para la identificación de estos puntos de control se eligió como referencia el ortomosaico del año 2012 del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) así como la consulta de las fotografías aéreas de las series fotográficas de los años 1927, 1957, 1977 y 1984. Se digitalizaron un total de 95 GCPs en el tramo de estudio, con una densidad aproximada de 2 GCP km⁻¹. Para evaluar la sensibilidad de los errores a la densidad de la red de control, se redujo alrededor del 50% el número de puntos iniciales (45 puntos). Esta reducción supuso un incremento del error del modelo resultante de 0,6 m a 2 m. Todo ello indica, tal y como ya se ha discutido en diversos estudios ya expuestos (e.g. Hughes *et al.*, 2006; Leys y Werrity, 1999; Muñoz-Narciso *et al.*, 2014; Vericat *et al.*, 2009), la necesidad de tener en cuenta la distribución de los puntos de control y su densidad para reducir las fuentes de incertidumbre en el post-proceso y así reducir los errores a valores que se adapten al objeto de estudio.

Tal y como se ha introducido, las coordenadas planimétricas (x, y) de los GCPs se extrajeron del ortomosaico del año 2012 del PNOA, la cual utiliza el sistema de coordenadas UTM ETRS 1989 Huso 31. Por otro lado, la información de la cota o elevación (z) se extrajo del levantamiento LIDAR del CNIG del año 2010, el cual tiene una densidad de 0,5 puntos m⁻² y precisión de <0,2 m (RMSE de la coordenada z). Para validar esta información se realizaron mediciones en campo mediante un GPS diferencial Leica VIVA® GS15 con corrección RTK que permite obtener información topográfica (x, y, z) con errores inferiores a los 0,05 m (errores 3d, integración de las tres coordenadas). Se tomaron las cotas de 35 del total de puntos fijos localizados (i.e. 32% de los GCP). Los errores (i.e. RMSE) en cota se situaron en 0,6 m RMSE. Este ejercicio permite concluir que se dispone de una red de control con

errores aceptables teniendo en cuenta: que los errores asociados al proceso de georreferenciación de fotografías aéreas históricas suelen estar entre los 2 y los 5 metros (e.g. Arnaud *et al.*, 2015; Clerici *et al.*, 2015; Comiti *et al.*, 2011; Surian *et al.*, 2009); y la precisión del LIDAR utilizado para extraer la elevación o cota de los GCPs. Pese a ello, se debe señalar que existe mucha incertidumbre asociada al hecho de suponer que estas alturas son iguales en todas las series temporales, puesto que, pese a tratarse de puntos considerados fijos o estables, en los que es difícil que se produzcan variaciones topográficas, los resultados indican que existe una considerable incertidumbre asociada (i.e. 0,6 m). De este modo, para la elaboración de modelos con la máxima rigurosidad, lo óptimo sería disponer de coordenadas (x, y, z) tomadas en campo para cada una de los periodos de análisis, información difícil de obtener cuando se realizan estudios evolutivos en los que existen series temporales muy amplias.

3.3. Proceso fotogramétrico

3.3.1. Aplicación de Structure from Motion (SfM)

Las imágenes fueron post-procesadas fotogramétricamente mediante el software Agisoft Photoscan Profesional 1.2.2. El primer paso consiste en la importación y alineamiento de las fotografías. En este proceso, el software busca elementos comunes visibles en varias fotografías desde diferentes puntos de vista e identifica su correspondencia. Posteriormente, mediante una serie de algoritmos se estima la geometría en 3D de la escena, tanto las coordenadas de los puntos comunes encontrados, como la posición de las cámaras (i.e. calibración extrínseca) y los parámetros internos de la cámara (i.e. calibración intrínseca; Ullman, 1979). Así pues, se genera una primera nube de puntos de baja densidad dentro de un sistema de coordenadas local. Cabe destacar que en la actualidad existen ya algunos trabajos que describen de manera detalla la metodología SfM con aplicaciones

sobre el estudio geomorfológico. En este artículo tan solo proporcionamos información general de este proceso (ver más detalles e.g. Carrivick *et al.*, 2016; Micheletti *et al.*, 2015a; Smith *et al.*, 2016).

Cuando se trabaja con fotogramas históricos, existen dos factores determinantes que condicionan la calidad final de los productos: a) el solape entre fotogramas y b) la calidad de los mismos (Micheletti *et al.*, 2015b; Bakker y Lane 2016). Para identificar un elemento común es necesario un mínimo de dos fotogramas, pero se recomienda un mínimo de 3 para validar geoméricamente dicho punto, puesto que la fiabilidad de éste aumenta cuando sea identificado desde un mayor número de fotografías (i.e. mayor solape entre fotogramas). En el caso de los fotogramas históricos del presente artículo (i.e. 1957, 1977 y 1984), esto supone un importante limitante puesto que casi el 80% de los puntos de la nube de baja densidad solo es visto desde 2 fotogramas, existiendo muchos vacíos (sin datos) en el área de estudio debido a la inexistencia de solape. En cuanto a la calidad de la imagen del fotograma, ésta determina la textura del mismo, que es la que facilita la identificación de elementos comunes. En fotogramas históricos, la calidad de la imagen se ve afectada en muchas ocasiones en el proceso de escaneado, el cual no siempre se hace con la resolución o cuidados necesarios, lo que propicia la pérdida de calidad de las imágenes (e.g. zonas borrosas, presencia de artefactos) y un consecuente incremento de errores en el proceso de alineación. Estos dos factores limitantes pueden generar errores importantes y en algunos casos, en zonas en la que la calidad de la imagen es baja se observa en la nube de puntos una especie de superficie abultada de hasta ± 2 m.

Este hecho condiciona el tipo de análisis que se haga de las nubes de puntos históricas, limitando el estudio de cambios topográficos a casos donde los errores de cota en las nubes de puntos superan la magnitud del cambio observado. Por otro lado, en los casos que se aplica SfM-MVS sobre fotogramas históricos, existe otra posible fuente de error importan-

te. Se trata de vuelos que se planificaron con criterios basados en la fotogrametría clásica, por lo que la geometría de la toma vertical y los ejes paralelos pueden dar lugar a importantes errores sistemáticos no lineales tipo “domo” (e.g. Wackrow y Chandler, 2008; Eltner y Schneider, 2015).

3.3.2. Georreferenciación

La corrección geométrica o georreferenciación de la imagen es una transformación que implica cambiar de posición y escala de los píxeles de una imagen original, para dotarla de coordenadas reales (Chuvieco, 1995). La georreferenciación de la nube de puntos requiere las tres coordenadas espaciales (x , y , z) de distintos puntos de control (GCPs). En el caso de Agisoft Photoscan Profesional 1.2.2, la georreferenciación se realiza mediante un modelo lineal obtenido a partir de 7 parámetros de transformación: 3 parámetros de translación; 3 de rotación y 1 de escala. Por otro lado, el software permite calibrar las cámaras de manera automática para minimizar los errores asociados a las distorsiones ocasionadas mayoritariamente por la lente. Se trata de un proceso automatizado que mejora substancialmente la calidad de los resultados. Adicionalmente, es posible realizar una optimización de la georreferenciación que se basa, de manera general, en la minimización de la suma de errores de georreferenciación a partir de la modificación reiterativa de la posición estimada para todas las cámaras. Estos pasos permiten una reducción substancial de los errores de georreferenciación. En el caso de este trabajo, mediante este proceso, los errores (i.e. RMSE) se redujeron un orden de magnitud, de un promedio de 30-50 m a 3-5 m.

Una vez realizada la optimización se analizan los errores asociados a cada uno de los GCPs en relación a su posición espacial dentro del modelo georreferenciado. Antes de aceptar la georreferenciación se deben eliminar aquellos GCPs con errores muy elevados (i.e. valores atípicos). Además, en el presente estudio, también se eliminaron los GCPs que presen-

taban errores que se consideraron superiores al umbral de aceptación en función a la resolución de la información. El umbral de aceptación en el presente estudio fue de 1 m (i.e. 1,7 veces el RMSE de la validación de campo de los GCPs, ver sección 3.2). Una vez eliminados estos GCPs, se comprobó la validez de dicha modificación mediante la actualización del proceso de georreferenciación. Este proceso permite disminuir la magnitud de los errores de georreferenciación. En el caso particular del alto Cinca los errores (RMSE) de georreferenciación para los modelos de las series de 1957, 1977 y 1984 fueron de 0,72, 0,62 y 0,66 m respectivamente, un 80% inferiores a los errores iniciales, eliminando menos de un 5% del total de los GCPs (i.e. valores atípicos).

3.3.3. Obtención de nubes densas de puntos

Una vez obtenida la nube de puntos de baja densidad georreferenciada dentro de un sistema de coordenadas conocido, el siguiente paso consiste en la aplicación de distintos algoritmos (e.g. *Multi View Stereo*; MVS) para incrementar la densidad de la nube de puntos al menos dos órdenes de magnitud. Existen varios tipos de algoritmos MVS (Seitz *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2016). Agisoft Photoscan Profesional 1.2.2 usa una combinación de métodos basados en el cálculo del mapa de profundidad por pares (i.e. *Smooth* y *Height-field*) y un método basado en un enfoque de múltiples vistas (i.e. *Fast method*; Semyonov, 2011). Si se está interesado en los algoritmos específicos de cálculo sería necesaria una revisión detallada de la versión y los métodos de cálculo (revisión más allá del objetivo del presente estudio).

3.3.4. Ortorectificación y obtención de ortomosaicos

El último paso en el flujo de trabajo fotogramétrico consiste en el proceso de ortorectificación. Mediante este proceso se obtiene una única fotografía corregida geográfica y geoméricamente gracias a la información espacial que aporta la nube de puntos georre-

ferenciada. En este proceso se realiza una corrección del color en las zonas de límite entre fotogramas mediante homogeneización de los histogramas de las fotografías colindantes. En el caso del Alto Cinca, la resolución del tamaño de pixel seleccionada fue de 1 m para todos los ortomosaicos producidos.

3.4. Post-procesado

Los productos (i.e. nubes de puntos y ortomosaicos) obtenidos a partir de esta metodología son post-procesados con el fin de mejorar la interpretación y análisis de la información producida. El post-proceso de la información resultante se basa en cuatro procedimientos: (1) Co-registro; (2) Clasificación supervisada de las imágenes; (3) Regularización de la información; y (4) Obtención de los MDTs.

(1) Pese a que los errores en el proceso de georeferenciación de la nube de puntos son relativamente bajos, existen zonas (principalmente las más alejadas de los GCPs) que pueden sufrir errores de posicionamiento y orientación superiores, especialmente en nubes de puntos extraídas de fotogramas históricos con baja calidad de la imagen. Con el objetivo de minimizar los errores asociados a este hecho, es recomendable aplicar el co-registro de cada una de las nubes de puntos históricas con la nube de puntos de referencia (LIDAR del año 2010). Este proceso permite reajustar la nube de puntos obtenida a partir de zonas comunes entre esta y una de referencia. Estas zonas deben cumplir el requisito de que no se hayan desplazado (i.e. x , y , z) entre los períodos de estudio. En el caso de este estudio se utilizó el software CloudCompare 2.6.2 para la realización de dicho proceso. Posteriormente, se compararon las nubes de puntos obtenidas y la del LIDAR de zonas estables (i.e. afloramientos rocosos sin cobertura vegetal). Este análisis permite estimar el error de las nubes de puntos obtenidas una vez realizado el co-registro de la información. En el caso del Alto Cinca, la comparación de las nubes de punto se realizó mediante el algoritmo M3C2, incluido en el software libre CloudCompare 2.6.2, el cual permite realizar una comparación

entre nubes de puntos teniendo en cuenta irregularidades topográficas y la rugosidad de la superficie, así como introducir un valor mínimo de detección para tener en cuenta las incertidumbres en los cálculos de diferencia (Lague *et al.*, 2013). En todos los casos se obtuvieron diferencias en cota inferiores a los 2 m, siendo inferior a los 0,5 m en el caso de la nube de puntos de 1957.

(2) Se recomienda realizar la clasificación supervisada de los ortomosaicos de cada una de las series de estudio con el fin de eliminar los puntos de las diferentes nubes de puntos que estuvieran dentro de las zonas clasificadas como vegetación o agua, y de esta manera eliminar la incertidumbre de cota asociada a estos.

(3) Una vez filtradas las nubes de puntos, el siguiente paso consiste en la regularización de las nubes de puntos mediante técnicas de geoestadística. Para ello se utilizó el algoritmo ToPCAT de libre distribución desarrollado por Brasington *et al.*, (2012) e implementado en ArcGIS 10.3 a través de *Geomorphic Change Detection* (GCD, disponible en <http://gcd.joewheaton.org/>; ver más detalles metodológicos del GDC en Wheaton *et al.*, 2010). ToPCAT permite definir una malla regular de análisis que se superpone a la nube de puntos y , para cada conjunto de datos ubicados en cada una de las celdas de la malla calcula una serie de estadísticos: (a) el número total de observaciones (n); (b) el valor mínimo de elevación (z_{\min}) y su posición exacta en el espacio (i.e. x , y); (c) el valor máximo de elevación (z_{\max}) y su posición exacta (i.e. x , y); (d) la elevación media (z_{mean}) dentro de la celda; (e) la desviación estándar de los valores de elevación en cada celda; y (f) la desviación estándar de las elevaciones (ver más detalles en Brasington *et al.*, 2012).

(4) En el caso del Alto Cinca, la variable seleccionada de los resultados de ToPCAT para la elaboración de los MDTs fue el valor medio de cada celda. En cuanto a la resolución, teniendo en cuenta la resolución y errores en el proceso y el objetivo del estudio, se seleccionó un tamaño de celda de análisis de 5 m. El método seleccionado para la creación de los

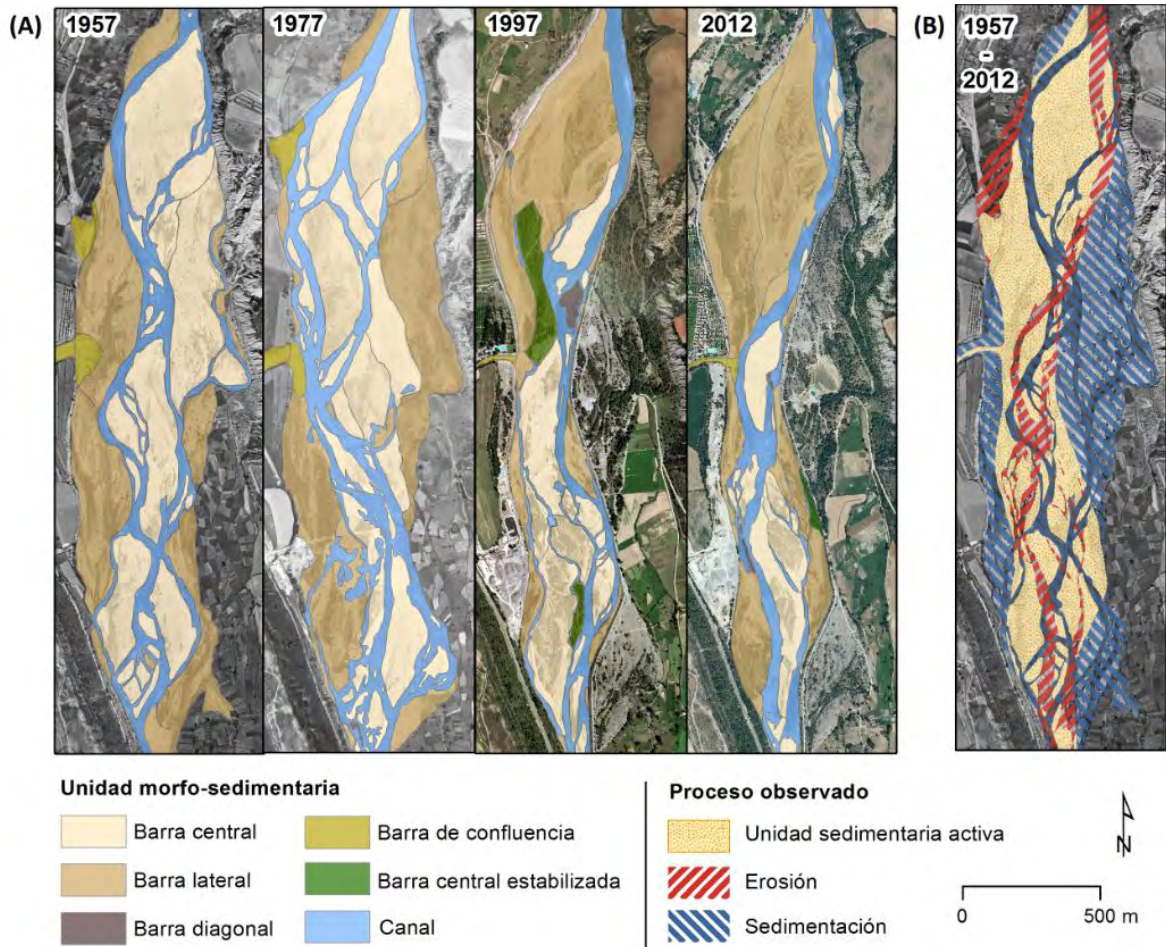


Figura 3. (A) Secuencia de la distribución y tipología de las unidades sedimentarias en el tramo representativo de la zona de estudio para las series temporales de los años 1957, 1977, 1997 y 2012. (B) Distribución espacial de los procesos morfosedimentarios sucedidos entre los años 1957 y 2012; obtenidos a partir de la combinación analítica de series temporales (matrices de cambio).

Figure 3. (A) Sequence of the distribution and typology of the sedimentary units in the representative section of the study area for the time series of the years 1957, 1977, 1997 and 2012. (B) Spatial distribution of the morphosedimentary processes that occurred between the years 1957 and 2012, obtained from the analytical combination of time series (change matrices).

MDTs de cada uno de los periodos de estudio fue la interpolación mediante el método de Vecino natural en ArcGIS 10.3.

3.5. Obtención de resultados: Análisis morfológico (planta) y topográfico (cota)

Desde el punto de vista del análisis morfológico en planta, a partir de los ortomosaicos y mapas de clases obtenidos a partir de las

clasificaciones supervisadas de éstos, se puede realizar una primera clasificación y cartografía de las unidades morfológicas del cauce del río en cada una de las series de estudio. Entendiendo como unidad morfológica las diferentes tipologías de estructuras sedimentarias presentes en el tramo de estudio (barras sedimentarias; e.g. Church y Jones 1982). En la Figura 3A se puede observar un ejemplo de las unidades identificadas y cartografiadas en este trabajo. A partir de la caracterización

morfológica realizada para cada una de las series de estudio se analiza la evolución de la geomorfológica del cauce lo largo de todo el periodo. En el caso específico del Alto Cinca, las variables que se tuvieron en cuenta para ello son: anchura activa del cauce, índices de multiplicidad de canales y matrices de cambio morfológico. El análisis de la anchura activa a lo largo de todo del tramo de estudio se puede realizar mediante la observación de la amplitud de una serie de secciones transversales comunes para todas las series, con una separación regular entre sección (longitudinalmente). En el caso de este artículo la separación fue de 300 m (Figura 4A). Los índices de multiplicidad permiten cuantificar el grado de complejidad morfológica para un momento determinado, observando su evolución a lo largo del tiempo mediante la comparación entre series (Figura 4B). Los índices seleccionados en el presente artículo fueron: el índice de número de canales de Hong y

Davies (1979); el índice de sinuosidad según Mosley (1981) y el índice de barras sedimentarias según Germanoski y Schumm (1993). Cabe destacar que muchos de estos índices, así como la anchura activa, son dependientes del caudal que circula en el momento de la toma de las fotografías y su interpretación se tiene que realizar teniendo en cuenta este hecho. Finalmente, el análisis de los cambios de las unidades morfológicas a lo largo del periodo de estudio se hizo a través de la combinación analítica de series temporales (matrices de cambio; Figura 3B). Este análisis se basa en la intersección de capas entre distintos periodos, tanto consecutivos como no consecutivos, y el cálculo de cambios que se atribuyen a cada pixel de análisis. Por ejemplo, si un determinado pixel se encuentra en el año 1957 en una zona categorizada como barra sedimentaria y en el año 2012 ha pasado a canal de aguas bajas, consideraremos que ha sufrido un proceso de erosión. Por otro lado,

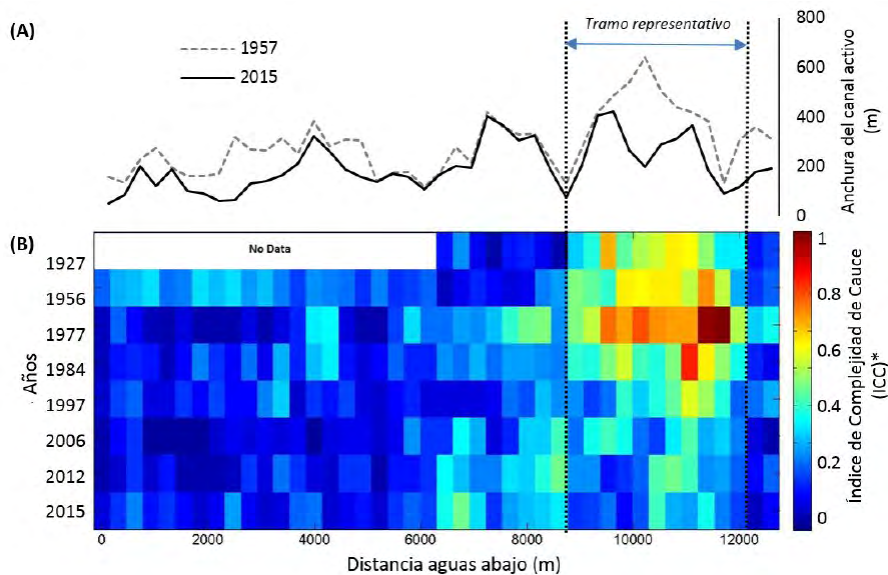


Figura 4. Resumen de los cambios morfológicos en planta en el tramo Alto del río Cinca. (A) Evolución de la anchura activa para todo el tramo de estudio entre los años 1957 y 2015. (B) Mapa de calor del índice de multiplicidad para las diferentes series temporales. *El Índice de Complejidad de Cauce (ICC) ha sido calculado a partir del promedio de los índices de canal, sinuosidad y barra previamente normalizados para cada una de las secciones.

Figure 4. Summary of the morphological changes in the upper section of the Cinca River. (A) Evolution of the active width for the entire study section between 1957 and 2015. (B) Heat map of the multiplicity index for the different time series.

* The Channel Complexity Index (ICC) has been calculated based on the average of the channel, sinuosity and bar rates previously normalized for each of the sections.

si sucede lo contrario, y este pixel pasa de canal de aguas bajas a barra sedimentaria se considerará que se ha producido un proceso de sedimentación (Figura 3B).

Mientras que el análisis morfológico en planta tiene como objetivo el estudio de cambios geomorfológicos planimétricos, el análisis altimétrico o topográfico en cota tiene como objetivo del estudio de los cambios topográficos del cauce activo. El análisis topográfico se realizó mediante la comparación de modelos de superficies (2D) o MDTs con cálculos básicos de álgebra de mapas disponible en todos los softwares de SIG (Figura 5). Es importante remarcar las limitaciones de estos cálculos asociadas a la exactitud de las nubes de puntos obtenidas (información topográfica), los posibles errores asociados a la interpolación para obtener los MDTs, y la superficie ocupada por el cauce activo mojado y la vegetación. En ambos casos no es posible obtener información topográfica del terreno e influenciará a los cálculos correspondientes.

4. Resultados: Evolución morfológica del Alto Cinca

A partir de los cambios morfológicos en planta se observó cierta tendencia a la reducción de las barras centrales, mientras que las barras laterales se mantuvieron más o menos estables (Figura 3A). El resto de tipologías de barras no siguió ningún patrón evolutivo a lo largo del tiempo, a excepción de las barras de confluencia o de tributario, las cuales siguieron un patrón claramente decreciente. Esta reducción del tamaño de este tipo de acumulaciones pudo ser debida a la disminución del aporte sedimentario de los tributarios laterales, causado probablemente por la combinación de múltiples factores como la reducción de las tasas de erosión por los cambios de los usos del suelo y el aumento de la cubierta vegetal, la desconexión sedimentaria de estos tributarios respecto al cauce principal debido al confinamiento lateral causado por la construcción de escolleras, o el déficit de sedimentos asociado a las extracciones de ári-

dos y los posibles cambios en la capacidad de transporte del río debido a la concentración del flujo asociado a la reducción de la anchura activa del cauce por las escolleras (Figura 4A).

La reducción en la anchura activa del cauce fue uno de los principales procesos observados en el tramo de estudio, llegando en algunos puntos como el tramo final en las proximidades del km 10 aguas abajo del inicio de la sección de estudio, a reducirse casi 400 m (Figura 4A). Esta reducción fue debida principalmente a la construcción de escolleras durante los años 1980. Por otro lado, la Figura 3B muestra un mapa de calor del Índice de Complejidad del Cauce (ICC). El ICC corresponde al promedio normalizado del índice de canal, índice de sinuosidad e índice de barras. Esta única variable permite analizar la variabilidad espacial y temporal de la complejidad morfológica del cauce entre el periodo comprendido entre 1927-2015. Tal y como se ha dicho, este estudio se ha hecho a partir de un mapa o digamma de calor en el cual se presentan los valores más elevados de ICC con colores cálidos y los más bajos con colores fríos. En este caso el mapa de calor muestra la evolución del ICC en el tiempo (i.e. eje y, representado por las series estudiadas) y en el espacio (i.e. eje de las x, distancia aguas abajo desde el inicio del tramo de estudio de la sección analizada). Tal y como se observa en la Figura 4B, existe una clara reducción del valor del ICC (i.e. reducción de la complejidad; valores azules en el mapa de calor). Aun así, existen ciertas zonas en las cuales la reducción de la complejidad fue de mayor magnitud y muy concentrada en un período temporal determinado. De manera específica, en el tramo bajo del tramo de estudio detallado de este artículo (10 km aguas abajo del punto inicial de estudio) se aprecia un primer periodo con una elevada complejidad (i.e. dinámica) atribuida principalmente al régimen de crecidas (i.e. valores rojos en el mapa de calor). A partir del año 1977 se observa una reducción de la complejidad muy notable. Esta disminución fue debida a la importante reducción de la anchura activa en esta área asociada a la construcción de escolleras. La reducción de

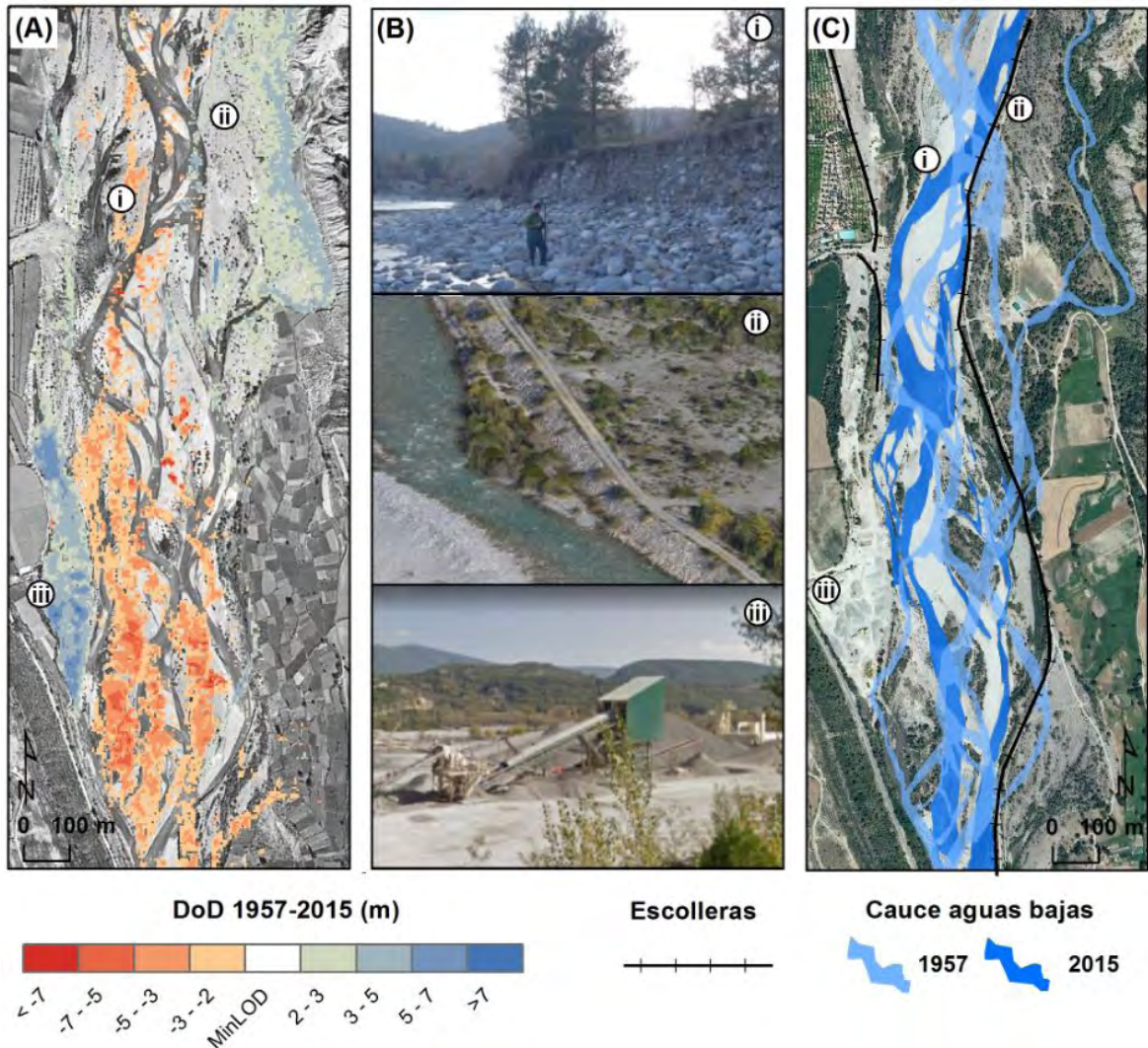


Figura 5. Cambios geomorfológicos en cota en el tramo bajo de la zona de estudio: A) Modelo de cambios topográficos (DoD) calculado a partir de las diferencias de los MDTs de los años 1957 y 2015 (se muestra la ortomosaico del año 1957 como referencia). Los valores negativos indican erosión, mientras que los positivos, sedimentación. Cabe destacar que aquellos cambios entre ± 2 m se han considerado inciertos, por debajo del nivel mínimos de detección, lo que significa que no se han representado en el mapa de cambios obtenido. B) Evidencias observadas en campo de los cambios topográficos analizados. C) Situación de los cauces de aguas bajas para los años 1957 y 2015 y localización de las escolleras construidas en los años 1980 (ortomosaico año 2015). El tramo que se presenta en la figura consiste en el tramo que se indica como tramo de detalle en el mapa de calor de la figura 3C.

Figure 5. Geomorphological changes in elevation in the low section of the study area: A) Model of topographic changes (DoD) calculated from the differences of the DTMs of the years 1957 and 2015 (the orthomosaic of the year 1957 is shown as reference). Negative values indicate erosion, while positive sedimentation. It should be noted that those changes between ± 2 m have been considered uncertain, below the minimum level of detection, which means that they have not been represented in the map of changes obtained. B) Evidences observed in the field of topographic changes analyzed. C) Situation of the low water channels for the years 1957 and 2015 and location of the ripraps built in the 1980s (orthomosaic year 2015). The section shown in the figure is the section of detail that appears on the heat map of Figure 3C.

la anchura a su vez conlleva asociado un proceso de incisión del cauce (mayor competencia del flujo), el cual se ve agravado por las extracciones de gravas realizadas en él. Este proceso queda comprobado si se analizan los cambios topográficos sucedidos entre el periodo 1957-2015. En la zona de cauce activo actual se pueden observar incisiones generalizadas que pueden llegar hasta los 5-7 m en algunos puntos (i en la Figura 5), mientras que en las zonas del cauce desconectadas por la construcción de las escolleras se observan importantes procesos de sedimentación (ii en la Figura 5). Por otro lado, el establecimiento de una planta de áridos también ha provocado cambios topográficos notables en la llanura de inundación que pueden ser cuantificados a partir de la comparación de MDTs de distintos periodos (iii en la Figura 5).

Por último, una simple cartografía del cauce activo para distintos períodos temporales (e.g. Figura 5C) permite estudiar cuales son los impactos de infraestructuras hidráulicas sobre la conectividad lateral. En el caso del tramo Alto del río Cica, se puede observar que no solo hay una reducción de la complejidad morfológica del cauce a distintos niveles, sino que también existe un impacto directo sobre la conectividad lateral debida a la construcción de escolleras, aislando parte de la llanura de inundación. Esta síntesis de resultados muestra cómo la metodología que se presenta en este trabajo es de gran utilidad para el diagnóstico del estado morfo-sedimentario de sistemas fluviales. En el caso particular del Alto Cinca, los resultados son de gran interés para la mejora de la comprensión de las relaciones causa-efecto en la dinámica morfo-sedimentaria observada para el período 1927-2015 (Llena *et al.*, en preparación). Esta mejora puede ayudar a modificar los planes de gestión de cuenca mediante una visión más integral de los procesos contemporáneos.

5. Discusión y conclusiones

El estudio de cambios geomorfológicos históricos en sistemas fluviales se ha realizado tra-

dicionalmente desde el punto de vista del análisis planimétrico (e.g. Arnaud *et al.* 2015; Comiti *et al.* 2011; Downs *et al.* 2013; Latapie *et al.* 2014). Este hecho limita de manera importante la interpretación de procesos geomorfológicos, puesto que no se tienen en cuenta las variaciones en cota debidas a los cambios topográficos. Una de las opciones ha sido la utilización de secciones topográficas (e.g. Arnaud *et al.*, 2015; Comiti *et al.*, 2011; Moretto *et al.*, 2014; Surian *et al.*, 2009), aunque en muchas ocasiones, la baja densidad dificulta la interpretación de los procesos. Frente a ello, la aplicación de fotogrametría digital basada en algoritmos Structure from Motion - Multi View Stereo se presenta como una metodología de gran aplicabilidad e interés para la obtención de información geomorfológica (e.g. Carrivick *et al.* 2016; Micheletti *et al.* 2015b; Smith *et al.* 2016; Westoby *et al.* 2012), tanto a nivel planimétrico como topográfico.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios en los que se aplica SfM para la obtención de información geomorfológica histórica, siempre en casos donde los cambios morfológicos son de una elevada magnitud: geomorfología glacial (e.g. Mertes *et al.* 2017; Midgley y Tonkin, 2017); geomorfología vulcanológica (e.g. Gomez 2014; Gomez *et al.* 2015; Ishiguro *et al.* 2016), o el estudio de grandes deslizamientos y desprendimientos (e.g. Dugonjic *et al.*, 2016; Warrick *et al.* 2017). En cambio, existen pocos trabajos que traten sobre la aplicación de SfM en el campo de la geomorfología fluvial (se considera el trabajo de Bakker y Lane, 2016 como uno de los únicos). Esto es debido principalmente a que los cambios topográficos son de una magnitud relativamente baja, lo que dificulta su detección con la metodología SfM histórica. De este modo, en sistemas fluviales, es importante seguir un flujo de trabajo riguroso, en el cual se traten de minimizar cada uno de los errores asociados al proceso fotogramétrico. Tal y como se ha visto, en el análisis SfM de fotogramas históricos los errores vienen determinados principalmente por a) las características de los propios fotogramas y b) el establecimiento y calidad de la red de control.

Los fotogramas históricos suelen tener un bajo grado de solapamiento, lo que supone una menor redundancia de imágenes en la identificación de elementos comunes, propiciando la reducción de la estimación geométrica de los mismos. Por otro lado, la calidad de la imagen de los fotogramas históricos no suele ser la óptima (e.g. mal estado de conservación de los fotogramas originales, errores en el proceso de escaneo) lo que provoca, entre otras cosas, la reducción de la resolución original, con una consecuente modificación de la textura. Según Bakker y Lane (2016) la modificación de la textura es una de las principales limitantes de la densidad de la nube de puntos, puesto que determina la identificación de elementos comunes entre fotogramas. Mertes *et al.* (2017) proponen realizar una corrección de la imagen mediante el ajuste del contraste y exposición para la mejora de la calidad y textura de la imagen, proceso que también se ha hecho en el presente estudio. Por otro lado, tal y como se ha demostrado en este trabajo, el co-registro de las nubes de puntos producidas previo a su análisis puede evitar los errores asociados al posicionamiento de los puntos lejanos a los GCPs del modelo. Este proceso fue aplicado también por Bakker y Lane (2016) obteniendo en algunos casos mejoras del error medio en cota de 0,4 m.

La red de control es uno de los elementos críticos que condicionará la precisión y exactitud de los resultados (e.g. Mertes *et al.* 2017; Midgley y Tonkin, 2017). El establecimiento de puntos de control precisos para fotografías históricas es crítico puesto que en muy pocos casos (i.e. Gomez, 2014) se dispone de medidas directas. En el resto de casos se utilizan coordenadas actuales en puntos que potencialmente no hayan variado sus coordenadas (x, y, z). En el caso de los errores planimétricos de georreferenciación (x, y), estos suelen ser menores a 1 m, muchas veces aceptables para la cartografía en planta de unidades morfológicas de interés. En cambio, la incertidumbre asociada a la estimación de la cota (z) es frecuentemente más elevada, lo que dificulta algunos estudios cuando los procesos

esperados son del orden del error obtenido.

En este trabajo se ha desarrollado y aplicado una metodología de gran interés para la extracción de información geomorfológica (i.e. planimétrica y altimétrica) a partir de fotografías aéreas históricas a múltiples escalas temporales y espaciales. La metodología se ha aplicado al tramo Alto del río Cinca (Pirineo Aragonés), un tramo de elevada complejidad morfo-sedimentaria que ha sufrido importantes cambios geomorfológicos durante la segunda mitad del siglo XX debido a perturbaciones, tanto naturales (e.g. crecidas) como antrópicas (e.g. extracción de gravas). La puesta a punto de esta metodología indica que:

- (a) es posible obtener información en planta e información topográfica a partir de la restitución fotogramétrica digital mediante algoritmos SfM de fotografías aéreas históricas;
- (b) los errores planimétricos asociados a los ortomosaicos producidos mediante esta técnica (i.e. RMSE 0,5 m) pueden ser menores que los que se producen mediante otras técnicas convencionales de georreferenciación;
- (c) los errores de cota asociados a las nubes de puntos (i.e. RMSE +/- 2m) han permitido analizar el impacto en la geomorfología fluvial de las perturbaciones antrópicas sucedidas en el tramo de estudio durante el periodo histórico analizado; y
- (d) la calidad de los productos finales, especialmente las nubes de puntos 3D, está muy condicionada por la calidad y resolución de los fotogramas, el grado de solapamiento entre estos, así como de la disponibilidad y calidad de los puntos de control o GCPs. Es muy importante tener en cuenta estos aspectos para producir un producto que sea válido para el análisis geomorfológico histórico, siempre teniendo en cuenta el objeto de estudio y su magnitud.

La metodología que se presenta en este trabajo es de gran utilidad para el diagnóstico del estado morfo-sedimentario de sistemas fluviales, en especial de sistemas modificados como el caso del Alto Cinca. Este diagnóstico puede ser determinante para entender la dinámica contemporánea asociada a zonas críticas que requieren trabajos de adecuación del cauce para la solución de problemas puntuales de erosión lateral o inundación. Del mismo modo, estos estudios sirven como base sólida a la hora de hacer estimaciones sobre la topografía del lecho en reconstrucciones de crecidas históricas, las cuales son de gran interés para analizar la recurrencia de crecidas de gran magnitud.

Agradecimientos

El estudio se ha beneficiado de la metodología de análisis de datos desarrollada en los proyectos MORPHSED (CGL2012-36394) y MORPHPEAK (CGL2016-78874-R), financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos Europeos FEDER. La página web del proyecto MORPHSED presenta más información de éste: www.morphsed.es. El trabajo se ha beneficiado de comentarios y discusiones surgidas en distintas reuniones de la EU-COST-Action Connecteur (ES1306). El primer autor tiene un contrato doctoral FPU (FPU014/01687), mientras que el segundo autor está contratado mediante el programa Ramón y Cajal (RYC-2010-06264) del Programa Nacional de Contratación e Incorporación de Recursos Humanos de Investigación. Ambos autores forman parte del Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial-RIUS es Grupo Consolidado reconocido por la Generalitat de Catalunya (2017 SGR 459). Se agradece el apoyo del Departamento de Economía y Conocimiento de la Generalitat de Catalunya. Se agradece a la Confederación Hidrográfica del Ebro la disponibilidad en su archivo cartográfico online de los fotoplanos históricos del año 1927. También agradecer toda la ayuda de los miembros del grupo de investigación RIUS, así como los comentarios del editor y de dos revisores anónimos que han mejorado la calidad este trabajo.

Bibliografía

- Arnaud, F.; Piégay, H.; Schmitt, L.; Rollet, a. J.; Ferrer, V.; Béal, D. (2015). Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>
- Bakker, M.; Lane, S.N. (2016). Archival photogrammetric analysis of river-floodplain systems using Structure from Motion (SfM) methods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 1274-1286. <https://doi.org/10.1002/esp.4085>
- Batalla, R. J.; Vericat, D.; Martínez, T. (2006). River-channel changes downstream from dams in the lower Ebro River. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 143, 1-14.
- Beguera, S.; López Moreno, J. I.; Gómez-Villar, A.; Rubio, V.; Lana-Renault, N.; García-Ruiz, J.M. (2006). Fluvial adjustments to soil erosion and plant cover changes in the Central Pyrenees. *Geografiska Annaler*, 88(A), 177-186. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2006.00293.x>
- Béjar, M.; Gibbins, C. N.; Vericat, D.; Batalla, R.J. (2017). Effects of suspended sediment transport on invertebrate drift. *River Research and Applications*, 33, 1655-1666. <https://doi.org/10.1002/rra.3146>
- Béjar, M.; Vericat, D.; Nogales, I.; Gallart, F.; Batalla, R.J. (2018). Efectos de las extracciones de áridos sobre el transporte de sedimentos en suspensión en ríos de montaña (alto río Cinca, Pirineo Central). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44. <https://doi.org/10.18172/cig.3256>
- Brasington, J.; Rumsby, B.T.; Mcvey, R.A. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 973-990. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y)
- Brasington, J.; Vericat, D.; Rychkov I. (2012). Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. *Water Resources Research*, 48, 1-18. <https://doi.org/10.1029/2012WR012223>
- Calle, M.; Alho, P.; Benito, G. (2017). Channel dynamics and geomorphic resilience in an ephemeral Mediterranean river affected by gravel mining. *Geomorphology*, 285, 333-346. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.026>

- Carrivick, J.L.; Smith, M.W.; Quincey, D.J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*, Wiley-Blackwell, 208 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- Church, M.; Jones, D. (1982). Channel bars in gravel bed rivers. In: *Gravel bed rivers* (R.D. Hey, J.C. Bayhurst, C. R. Thorne eds.), Wiley, 291-324.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ed. Rialp, Madrid, 453 pp.
- Clerici, A.; Perego, S.; Chelli, A.; Tellini, C. (2015). Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *Journal of Hydrology*, 527, 1106-1122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.063>
- Comiti, F.; Da Canal, M.; Surian, N.; Mao, L.; Picco, L.; Lenzi, M.A. (2011). Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. *Geomorphology*, 125, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.011>
- Downs, P.W.; Dusterhoff, S.R.; Sears, W.A. (2013). Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA. *Geomorphology*, 189, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.023>
- Dugonjic, S.; Perani, J.; Ru, I.; Arbanas, Ž. (2016). Analysis of a historical landslide in the Rječina River Valley, Croatia. *Geoenvironmental Disasters*, 3, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0061-x>
- Eltner, A.; Schneider, D. (2015). Analysis of different methods for 3d reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. *The Photogrammetric Record*, 30 (151), 279-299. <https://doi.org/10.1111/phor.12115>
- García-Ruiz, J.M.; Lasanta, T.; Ruiz-Flano, P.; Ortigosa, L.; White, S.; Gonzalez, C.; Martí, C. (1996). Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, 11, 267-277. <https://doi.org/10.1007/BF02059854>
- Germanoski, D.; Schumm, S.A. (1993). Changes in braided river morphology resulting from aggradation and degradation. *Journal of Geology*, 101, 451-466. <https://doi.org/10.1086/648239>
- Gomez, C. (2014). Digital photogrammetry and GIS-based analysis of the bio-geomorphological evolution of Sakurajima Volcano, diachronic analysis from 1947 to 2006. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 280, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.015>
- Gomez, C.; Hayakawa, Y.; Obanawa, H. (2015). A study of Japanese Landscapes using Structure from Motion Derived DSMs and DEMs based on Historical Aerial Photographs: New Opportunities for Vegetation Monitoring and Diachronic Geomorphology. *Geomorphology*, 242, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.021>
- Hong, L.B.; Davies, T.R.H. (1979). A study of stream braiding. *Geological Society of America*, 90, 1839-1859. <https://doi.org/10.1130/GSAB-P2-90-1839>
- Hughes, M. L.; McDowell, P. F.; Marcus, W. A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>
- Ibáñez, A.; Díaz, E.; Ollero, A.; Acín, V.; Granado, D. (2013). Channel response to multiple damming in a meandering river, middle and lower Aragon River (Spain). *Hydrobiologia*, 712, 5-23. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1490-0>
- Ishiguro, S.; Yamano, H.; Oguma, H. (2016). Geomorphology Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging structure from motion - multi-view stereo technology. *Geomorphology*, 268, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.029>
- Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lane, S.N.; Chandler, J.H.; Richards, K.S. (1994). Developments in Monitoring and Modeling Small-Scale River Bed Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 349-368. <https://doi.org/10.1002/esp.3290190406>
- Lane, S.N.; Richards, K.S.; Chandler, J.H. (1996). Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel. *Geomorphology*, 15, 1-15. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00113-J](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00113-J)
- Latapie, A.; Camenen, B.; Rodrigues, S.; Paquier, A.; Bouchard, J.P.; Moatar, F. (2014). Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. *Catena*, 121, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.017>

- Leys, K.; Werritty, A. (1999). River channel plan-form change: software for historical analysis, *Geomorphology*, 29, 107-120. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00009-4)
- Llena, M.; Cavalli, M.; Vericat, D.; Crema, S. (En revisión) Assessing changes on landscape associated to anthropic disturbances by means of the application of Structure from Motion photogrammetry using historical aerial imagery. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*.
- Llena, M.; Vericat, D.; Smith, M.W. (En preparación). Morphological changes in a Piedmont river: The Upper Cinca reach (Southern Pyrenees).
- Mertes, J.R.; Gulley, J.D.; Benn, D.I.; Thompson, S.S.; Nicholson, L.I. (2017). Using structure-from-motion to create glacier DEMs and orthoimagery from historical terrestrial and oblique aerial imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*. 10.1002/esp.4188 <https://doi.org/10.1002/esp.4188>
- Micheletti, N.; Chandler, J.H.; Lane, S.N. (2015a). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques (British Society for Geomorphology)*, 2, 1-12. http://geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf
- Micheletti, N.; Lane, S.N.; Chandler, J.H. (2015b). Application of Archival Aerial Photogrammetry to Quantify Climate Forcing of Alpine Landscapes. *The Photogrammetric Record*, 30, 143-165. <https://doi.org/10.1111/phor.12099>
- Midgley, N.G.; Tonkin, T.N. (2017). Geomorphology Reconstruction of former glacier surface topography from archive oblique aerial images. *Geomorphology*, 282, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.008>
- Moretto, J.; Rigon, E.; Mao, L.; Picco, L.; Delai, F.; Lenzi, M.A. (2014). Channel adjustments and island dynamics in the Brenta River (Italy) over the last 30 years. *River Research and Applications*, 30, 719-732. <https://doi.org/10.1002/rra.2676>
- Mosley, P.M. (1981). Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 127-137. <https://doi.org/10.1002/esp.3290060206>
- Muñoz-Narciso, E.; Béjar, M.; Tena, A.; Vericat, D.; Ramos, E.; Brasington, J.; Gibbins, C.N.; Batalla, R.J. (2014). Generación de modelos topográficos a partir de fotogrametría digital automatizada en un río de gravas altamente dinámico. In: *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*. XIII Reunión Nacional de Geomorfología (Schnabel, S.; Gómez-Gutiérrez, A. Eds.). ISBN: 978-84-617-1123-9, Universidad de Extremadura, Cáceres, 335-338.
- Passalacqua, P.; Belmont, P.; Staley, D.M.; Simley, J.D.; Arrowsmith, J.R.; Bode, C.A.; Crosby, C.; DeLong, S.B.; Glenn, N.F.; Kelly, S.A.; Lague, D.; Sangireddy, H.; Schaffrath, K.; Tarboton, D.G.; Wasklewicz, T.; Wheaton, J.M. (2015). Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: a review. *Earth-Science Reviews*, 148, 174-193. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.012>
- Sanchis-Ibor, C.; Segura-Beltrán, F.; Almonacid-Caballer, J. (2017). Channel forms recovery in an ephemeral river after gravel mining (Palancia River, Eastern Spain). *Catena*, 158, 357-370. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.012>
- Seitz, S.M.; Diebel, J.; Scharstein, D.; Szeliski, R. (2006). A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. *IEEE Computer Society Conference*, 1, 519-528. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>
- Semyonov, D. (2011). Algorithms used in Photoscan [Msg 2]. Retrieved 3 May 2011. Message posted to www.agisoft.ru/forum/index.php?topic=89.0.
- Smith, M.W.; Vericat, D. (2015). From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from Structure-from-Motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1656-1671. <https://doi.org/10.1002/esp.3747>
- Smith, M.W.; Carrivick, J. L.; Quincey, D.J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40, 247-275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Surian, N.; Ziliani, L.; Comiti, F.; Lenzi, M. A.; Mao, L. (2009). Channel adjustments and alteration of sediment fluxes in gravel-bed rivers of north-eastern Italy: potentials and limitations for channel recovery. *River Research and Applications*, 25, 551-567. <https://doi.org/10.1002/rra.1231>
- Ullman, S., (1979). *The interpretation of structure from motion*. The Royal Society, London. 203, 405-442. <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>
- Vericat, D.; Brasington, J.; Wheaton, J.; Cowie, M. (2009). Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors. *Ri-*

- ver *Research and Applications*, 25, 985-1000. <https://doi.org/10.1002/rra.1198>
- Vericat, D.; Muñoz-Narciso, E.; Béjar, M.; Ramos-Madróna, E. (2016). Case study: Multitemporal reach-scale topographic models in a wandering river - uncertainties and opportunities. In: *Structure from Motion in the Geosciences. New Analytical Methods in the Earth Environmental Science* (J. L. Carrivick, M. W. Smith, D. J. Quincey, eds.). Wiley, 194 pp.
- Vericat, D.; Wheaton, J.; Brasington, J. (2017). Revisiting the Morphological Approach: Opportunities and Challenges with Repeat High-Resolution Topography. In: *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters* (D. T. Tsutsumi, J. B. Laronne, eds.). Wiley, 121-158. <https://doi.org/10.1002/9781118971437.ch5>
- Vericat, D.; Batalla, R. J. (2016). Morfodinámica fluvial. In: *Procesos hidrosedimentarios en medios fluviales* (R.J. Batalla, A. Tena, eds.). Editorial Milenio, Lleida, 19-74.
- Wackrow, R.; Chandler, J.H. (2008). A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *The Photogrammetric Record*, 23(121), 6-18. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x>
- Warrick, J.A.; Ritchie, A.C.; Adelman, G.; Adelman, K.; Limber, W. (2017). New Techniques to Measure Cliff Change from Historical Oblique Aerial Photographs and Structure-from-Motion Photogrammetry. *Journal of Coastal Research*, 33, 39-55. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00095.1>
- Westoby, M.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, M.J. (2012). Structure from Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wheaton, J.M.; Brasington, J.; Darby S.E.; Sear, D.A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136-156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>
- Williams, R.D. (2012). DEMs of Difference. *Geomorphological Techniques (British Society for Geomorphology)*, 2, 1-17. <http://eprints.gla.ac.uk/114527/1/Williams%202012%20DEMs%20of%20Difference.pdf>
- Williams, R.D.; Brasington, J.; Vericat, D.; Hicks, D.M. (2013). Hyperscale terrain modelling of braided rivers: Fusing mobile terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 167-183. <https://doi.org/10.1002/esp.3437>

