

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN LÁSER (LIDAR) EN HIDROLOGÍA FORESTAL Y EN LA GESTIÓN DE ECOSISTEMAS FLUVIALES

Roberto Martínez Romero¹, Silvia Merino de Miguel² y Fernando Magdaleno Mas¹

¹ Área de Ingeniería Ambiental. CEDEX - Ministerio de Fomento. Alfonso XII, 3-5. 28014-MADRID (España). Correo electrónico: roberto.martinez@cedex.es

² UD Topografía. EUIT Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Ramiro de Maeztu s/n. 28040-MADRID (España)

Resumen

La utilización de sensores láser desde plataformas aéreas (LiDAR) ofrece nuevas posibilidades en el cartografiado de sistemas fluviales, tanto en áreas densamente cubiertas por vegetación, como en aquellas que presentan una escasa cubierta. La información topográfica de alta resolución que se obtiene a partir de las medidas láser puede ser utilizada en el análisis y estimación de diversas variables hidrológicas, y en el estudio de diferentes componentes del medio fluvial. Entre éstas, cabe citar la vegetación riparia, la morfología fluvial, el régimen hidrológico o el grado de alteración de los ecosistemas debido a las presiones de origen antrópico. La gestión del medio fluvial puede ser mejorada en gran medida gracias a la precisión y fiabilidad de esta información. En muchas ocasiones, el escaso relieve de los valles fluviales y la densa cubierta vegetal que existe en ellos han dificultado la aplicación de otras técnicas de teledetección. Sin embargo, los datos obtenidos mediante altimetría láser son especialmente aconsejables para estos trabajos, mediante análisis numéricos o a través de la simple interpretación de las imágenes obtenidas. Este artículo muestra las posibilidades de uso de los datos LiDAR en hidrología forestal y en la gestión de zonas húmedas, a lo largo de tramos con condiciones climáticas bien diferenciadas. En todas ellas, se comparan los resultados obtenidos mediante la aplicación de distinto software, con el fin de mostrar la mejor metodología de tratamiento de la información láser. Asimismo, se muestra la diferencia con otras técnicas de teledetección, y se muestra la fácil integración de los datos LiDAR con otras herramientas y metodologías de estudio de las variables citadas.

Palabras clave: *Río, Geomorfología, Vegetación, Restauración, Ecología*

INTRODUCCIÓN

Un sistema LiDAR está basado en la emisión de pulsos de luz láser desde una plataforma aérea o terrestre (Figura 1). La medición precisa del tiempo de retorno de las porciones del pulso al sensor permite calcular la distancia que separa a éste de la superficie terrestre y de los objetos que existen sobre ella. Su funcionamiento es

similar, por tanto, al de una estación total topográfica. Dado que la posición y orientación del sensor son conocidas para cada pulso emitido, cada señal de retorno tiene unas coordenadas tridimensionales únicas, lo cual permite la captura remota de la información topográfica.

La tecnología LiDAR se basa en el uso de sensores activos, por lo que la captura de información depende, en menor medida que en otros

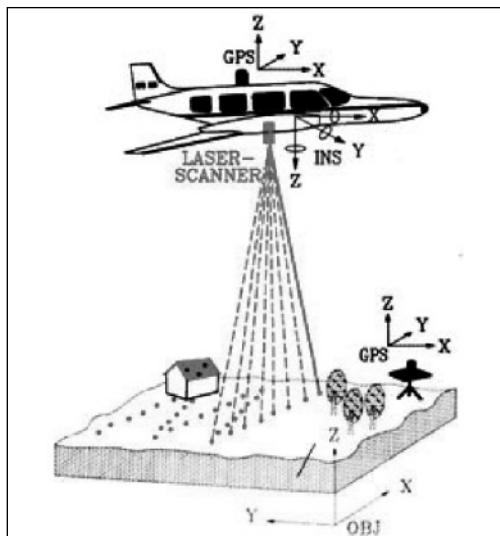


Figura 1. Esquema de vuelo de un sensor LiDAR (Fuente: NOAA)

sensores, de las condiciones meteorológicas y de iluminación solar.

El tratamiento de los datos LiDAR permite la extracción de modelos digitales del terreno (MDT), modelos digitales de elevaciones (MDE), y modelos digitales de información intermedia. Los productos LiDAR cuentan con la ventaja de ser entregados, generalmente, en formatos fácilmente ejecutables mediante sistemas SIG y CAD.

Por lo que respecta a las principales aplicaciones LiDAR en el ámbito hidrológico y forestal, existen ya diversos trabajos que analizan sus posibilidades en este campo. Es el caso de las labores de dasometría e inventario forestal, dado que LiDAR permite efectuar mediciones de gran precisión de la altura media de copas, volúmenes de madera en zonas boscosas, áreas basales o biomasa.

Otros trabajos han analizado la aplicación de LiDAR en el estudio del riesgo de avenidas, la modelización de poblaciones de aves, la aplicación de fitosanitarios, la clasificación de usos de suelo, etc. En cuanto a las aplicaciones en la gestión de sistemas fluviales, cabe destacar las siguientes (HOLLAUS et al., 2005; SAYE et al., 2005; THOMA, 2005; HALL et al., 2005; FARID et al., 2005a, 2005b; FLEECE, 2002):

- Medida de la estructura y composición de la vegetación de ribera.

- Análisis de la geomorfología del cauce (medida de la pendiente, cálculo de la complejidad morfológica, rugosidad, perímetro mojado, profundidad del *thalweg*,...).
- Estudio de infraestructuras hidráulicas.
- Análisis de las interacciones cauce-sistema fluvial.
- Modelización hidrológica y sedimentaria.
- Estudio de indicadores del estado ecológico de los ríos.
- Análisis de procesos biológicos en el medio fluvial.
- Evaluación de procesos erosivos.
- Obtención de la red de drenaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los modelos digitales de elevaciones utilizados como ejemplos corresponden a dos zonas bien diferenciadas:

- Sector central del río Ebro. El modelo se obtuvo a partir de 13 vuelos LiDAR realizados entre el 3 y 11 de octubre de 2003 con una resolución de paso de malla de 2x2 metros y una precisión de ± 50 cm en las coordenadas x e y , y de ± 15 cm en z . El sensor utilizado fue el denominado *Falcon II*, desarrollado por Toposys para adquirir datos tridimensionales de la superficie terrestre. Datos cedidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Bosque de Kielder en Northumberland, Inglaterra, a partir de un conjunto de vuelos realizados en julio de 2003. Datos cedidos por: *Forest Research Agency - Forestry Commission*, RU.

Los datos utilizados no incorporan de forma automática un modelo batimétrico, pero existen otros sensores láser que sí incluyen esta posibilidad (SHOALS, EAARL, CHARTS, o BATS).

APLICACIONES DE LIDAR EN LA GESTIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL

Aplicación de LiDAR en la estimación del perfil longitudinal de un río.

El perfil longitudinal de un cauce (*thalweg profile*) se viene utilizando para analizar su gradiente, su potencia hidráulica o el transporte

sedimentario que puede producirse en el mismo (Figura 2). El perfil longitudinal se construye mediante la medida de la elevación del lecho del cauce, en sucesivas secciones, tomando como referencia el punto más bajo de cada una de ellas. En función del nivel de precisión requerido y las características hidromorfológicas del cauce, es posible utilizar diversas metodologías de obtención de los perfiles.

La utilización de los datos LiDAR permite obtener perfiles longitudinales del cauce, de forma continua a lo largo del tramo de estudio, y con una precisión elevada. La aplicación de esta técnica en el estudio del gradiente de un río reduce los elevados costes que genera el desarrollo de campañas de campo, y homogeneiza de manera notable los resultados obtenidos, al no ser dependiente de la calidad de las mediciones realizadas en el terreno, factor éste que suele generar una elevada dispersión en las observaciones realizadas.

Aplicación de LiDAR en el análisis de la microtopografía fluvial

La microtopografía del cauce influye de manera notable en el balance hídrico de estas zonas, afectando al equilibrio hidromorfológico del cauce, y modificando las condiciones ecológicas del medio. Por ejemplo, afecta de manera muy particular a la vegetación de ribera. La microtopografía de una cuenca tiene una relación directa, además, con los flujos de materia y energía. En el caso de la llanura de inundación de un río, el microrrelieve es responsable de su conexión con el cauce, y del mantenimiento de relaciones tróficas en el conjunto del sistema fluvial.

La tecnología LiDAR permite analizar, de manera efectiva, la microtopografía de los ecosistemas fluviales, y estudiar su interacción con diferentes componentes de los mismos. Por lo que respecta al estudio del balance sedimentario, LiDAR permite realizar también estimaciones detalladas de la acumulación de sedimentos en barras e islas a lo largo del cauce, y de los procesos erosivos desarrollados en él (MAGDALENO et al., 2004). La figura 3 muestra un ejemplo de caracterización de la microtopografía de un cauce, como forma de analizar la evolución de la geomorfología fluvial en el tramo.

Aplicación de LiDAR en el análisis de la vegetación de ribera

La aplicación de los datos LiDAR en el análisis de la vegetación riparia abre nuevas líneas de trabajo en la gestión de estas comunidades. La vegetación de ribera tiene, como elemento distintivo frente a otras comunidades vegetales, su carácter edafo-higrófilo. Es, por tanto, el régimen hidrológico el elemento básico que, con su variabilidad natural intra e interanual define el hidro-período de las especies vegetales de ribera.

La posibilidad de generación de cartografía de detalle de la geomorfología fluvial mediante LiDAR, y las aplicaciones que su utilización presenta desde el punto de vista del estudio específico de las comunidades vegetales hace viable el uso de los datos LiDAR en la gestión y caracterización de los bosques de ribera.

El estudio de la composición de estas comunidades puede realizarse a partir de criterios morfológicos, que en función de la calidad de la información y de la existencia o no de ortofotografías de detalle puede extenderse hasta realizar inventarios específicos pie a pie de estas zonas (Figura 4).

En algunas ocasiones, los datos LiDAR pueden complementarse también con aplicaciones del láser terrestre, apoyo de video desde plataformas aéreas (MACKINNON, 2001), inventarios de campo, etc.

El empleo de datos LiDAR permite, asimismo, el análisis de diferentes aspectos ecológicos del medio fluvial, relacionados con la vegetación de ribera, como el porcentaje de sombreado del cauce, o la entrada de restos vegetales en el cauce (FLEECE, 2002). También abre nuevas posibilidades para el estudio de la distribución de especies exóticas en los cauces (HALL et al., 2005), o para la gestión de plantaciones forestales en las llanuras de inundación.

Aplicación de LiDAR en el análisis de cuencas

Existen otras muchas aplicaciones de LiDAR en el ámbito de la gestión de cuencas hidrográficas, casi todas ellas basadas en la elevada resolución de las imágenes generadas a partir de esta técnica de teledetección (Figura 5). Entre estas aplicaciones cabe destacar, por su relación con los procesos físicos y ecológicos propios de los sistemas fluviales, el análisis de los procesos erosivos y sedimentarios (movi-

mientos en ladera, erosión laminar, análisis torrencial, etc.), los estudios y proyectos hidrológico-forestales, la investigación de los procesos edafológicos, o el análisis general del ciclo hidrológico en cuencas y subcuencas.

Aplicación de LiDAR en tramos fluviales urbanos y obras hidráulicas.

La figura 6 ofrece un ejemplo de generación de cartografía de gran resolución a partir de datos LiDAR, sobre el río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza. En esta figura se puede observar la calidad tanto del modelo del terreno como del modelo de elevaciones generado, que permiten una buena caracterización de los principales elementos de índole humana que jalonan el cauce.

En la figura 7 se muestra otra vista parcial del río Ebro a su paso por la capital aragonesa. Este modelo de elevaciones tiene, entre sus ventajas, su fácil integración con modelos de simulación hidráulica. La combinación de ambas herramientas da lugar a la generación de mapas de riesgo de inundaciones de mucho detalle. Asimismo, puede apoyar la creación de mapas específicos de infiltración y acumulación de agua.

CONCLUSIONES. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE DATOS LiDAR EN LA GESTIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL

Las principales ventajas de la utilización de LiDAR como tecnología de muestreo y captura de información territorial son las siguientes:

- Todos los datos se registran de manera digital, lo que posibilita su procesado automático utilizando diversos paquetes informáticos disponibles en el mercado.
- El láser es un sensor activo, por lo que puede considerarse notablemente independiente de las condiciones atmosféricas y de iluminación solar; además es posible definir gran número de parámetros de adquisición.
- Se trata de un muestreo aéreo en el que la información es recogida de manera rápida y precisa y sin necesitar soporte terrestre, por lo que resulta de gran utilidad para el muestreo de zonas de difícil acceso.

- La precisión de los datos obtenidos puede compararse, y superar en muchos casos, a la de métodos topográficos y fotogramétricos, aunque con un coste mucho menor por unidad de superficie. Además, la presencia de vegetación no tiene por qué ser un inconveniente dada su capacidad de penetración.

Entre los principales inconvenientes y limitaciones de la utilización de los datos LiDAR cabe destacar los siguientes:

- Los datos digitales de elevaciones obtenidos a partir de cualquier método, incluyendo LiDAR, no son perfectos. LiDAR no puede delinear con precisión los límites de cursos de agua, líneas de costa o aristas naturales visibles en imágenes fotográficas. La precisión está siempre limitada por los errores inherentes al GPS de a bordo y al sistema IMU.
- LiDAR tiene aún dificultades para cartografiar superficies cubiertas por vegetación muy densa. Los pulsos se pueden dispersar y reflejar en el interior de la vegetación motivando variaciones y errores en las elevaciones obtenidas.
- La mayor parte de los sensores LiDAR utilizan, como se ha comentado, radiación perteneciente al infrarrojo cercano. Algunos materiales y superficies, tales como el agua o el asfalto, absorben la longitud de onda correspondiente a esta banda del espectro y provocan que las señales de retorno puedan ser escasas o inexistentes.
- Finalmente, es preciso destacar que LiDAR puede dar lugar a archivos de datos de gran tamaño.

Agradecimientos

Los datos LiDAR utilizados para la redacción de este trabajo han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (Ministerio de Medio Ambiente), y por la Forestry Commission del Reino Unido.

BIBLIOGRAFIA

- FARID, A.; GOODRICH, D. & SOROOSHIAN, S.; 2005a. *Using airborne LIDAR data to determine old vs. young cottonwood trees in the riparian corridor of the San Pedro River.*

- US Department of Agriculture. Agricultural Research Station.
- FARID, A.; GOODRICH, D. & SOROOSHIAN, S.; 2005b. *Riparian vegetation classification from LIDAR data with an emphasis on cottonwood trees*. US Department of Agriculture. Agricultural Research Station.
- FLEECE, W.C.; 2002. *Modeling the delivery of large wood to streams with light detection and ranging (LIDAR) data*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181.
- HALL, R.K.; WATKINS, R.; MOORE, S.B.; GREGORY, S.J.; HEGGEM, D.T.; JONES, K.B. & KAUFMANN, P.; 2005. *Quantifying stream structural physical habitat attributes using LIDAR and hyperspectral imagery*. US Environmental Protection Agency.
- HOLLAUS, M.; WAGNER, W. & KRAUS, K.; 2005. Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models. *Advances in Geosciences* 5: 57-63.
- MACKINNON, F.; 2001. *Wetland Application of LIDAR Data: Analysis of Vegetation Types and Heights in Wetlands*. [Disponible en:] http://agrg.cogs.ns.ca/publications/reports/lidar_wetlands.pdf
- MAGDALENO, F.; OLAYA, V. & MERINO, S.; 2004. *Interaction between environmental flow requirements and fluvial morphology analyzed through Remote Sensing, GIS and DIP*. Fifth Symposium on Ecohydraulics. Madrid.
- MAGDALENO, F. Y MARTÍNEZ, R.; 2006. Aplicación de la teledetección láser (LiDAR) en la gestión y caracterización del medio fluvial. *Ingeniería Civil* 142: 29-43.
- SAYE, S.E.; VAN DER WAL, D.; PYE, K. & BLOTT, S.J.; 2005. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LiDAR data. *Geomorphology* 72: 128-155.
- THOMA, D.P.; GUPTA, S.C.; BAUER, M.E. & KIRCHOFF, C.E.; 2005. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Rem. Sens. Environ.* 95: 493-501.

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN LÁSER (LIDAR) EN HIDROLOGÍA FORESTAL Y EN LA GESTIÓN DE ECOSISTEMAS FLUVIALES

Roberto Martínez Romero, Silvia Merino de Miguel y Fernando Magdaleno Mas

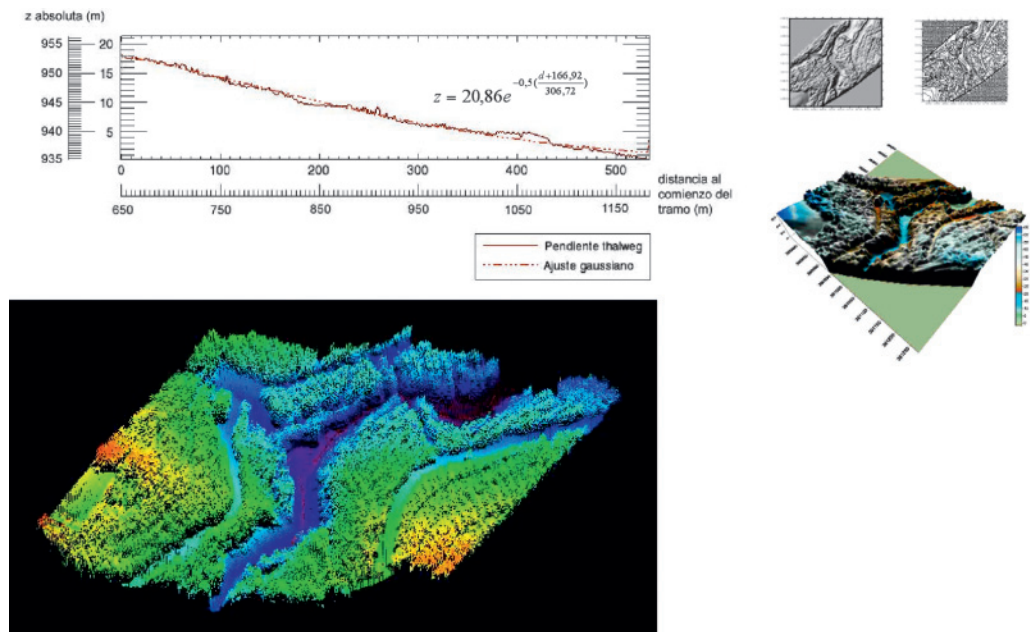


Figura 2. Perfil longitudinal del thalweg de un tramo de unos 500 m de un río británico, obtenido a partir de datos LiDAR, con ajuste a una función gaussiana. La línea roja muestra el thalweg del río

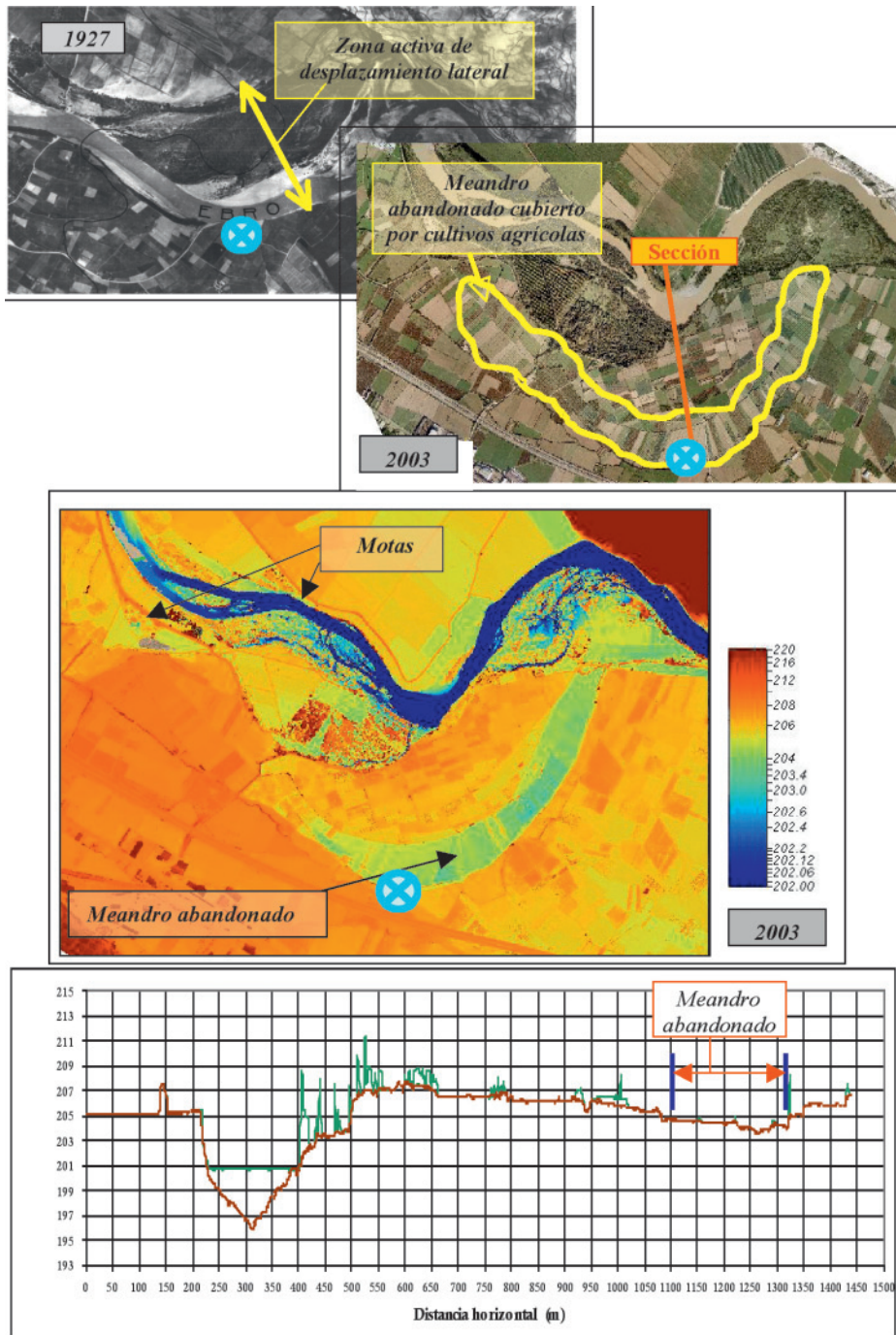


Figura 3. Estudio de la evolución de meandros abandonados (Fuente: elaboración propia)

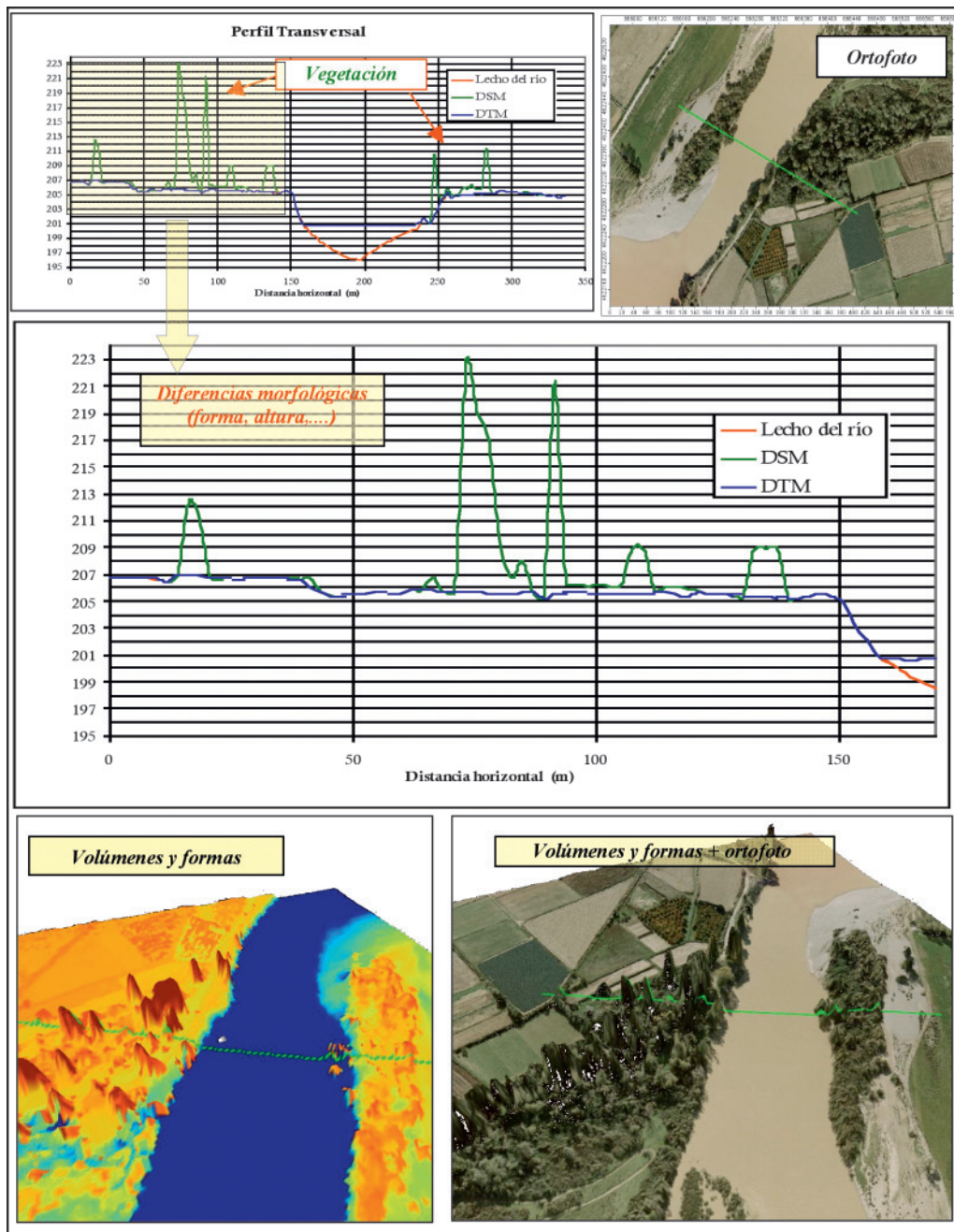


Figura 4. Aplicación de LiDAR al estudio de la estructura de la vegetación riparia de un tramo del río Ebro (Fuente: elaboración propia)

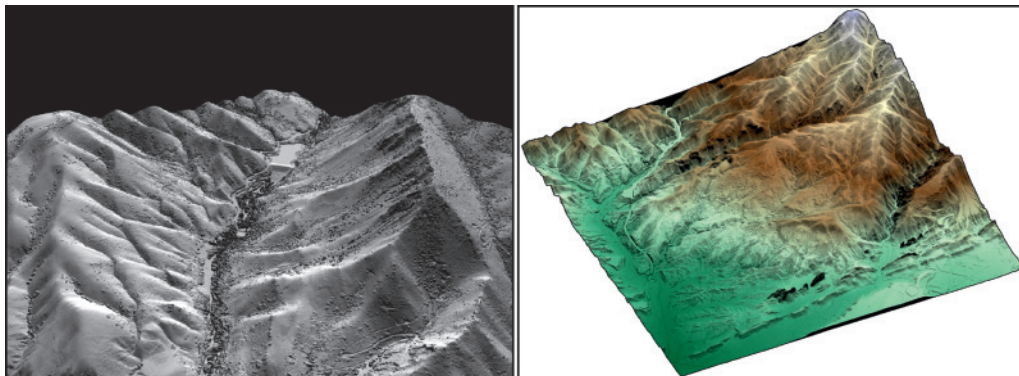


Figura 5. Modelos digitales creados para la gestión de cuencas hidrográficas a partir de datos LiDAR (Fuente: Merrick & Co.)

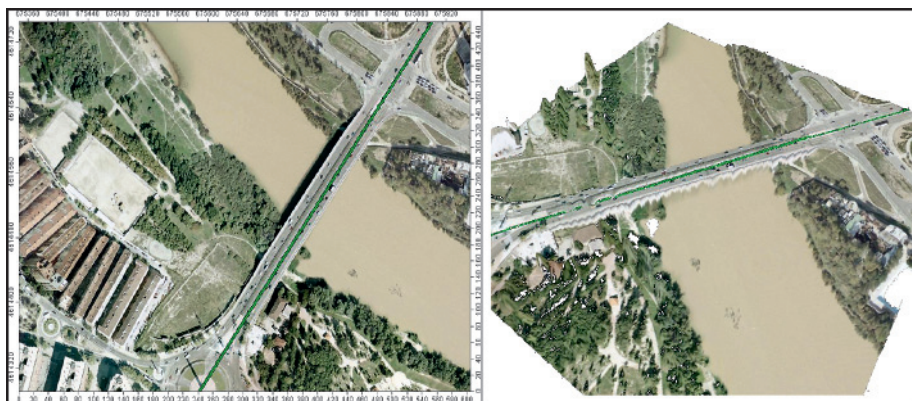


Figura 6. Análisis de infraestructuras mediante LiDAR. En este caso, se trata de uno de los puentes que cruza el río Ebro en el tramo de Zaragoza capital (Fuente: elaboración propia)

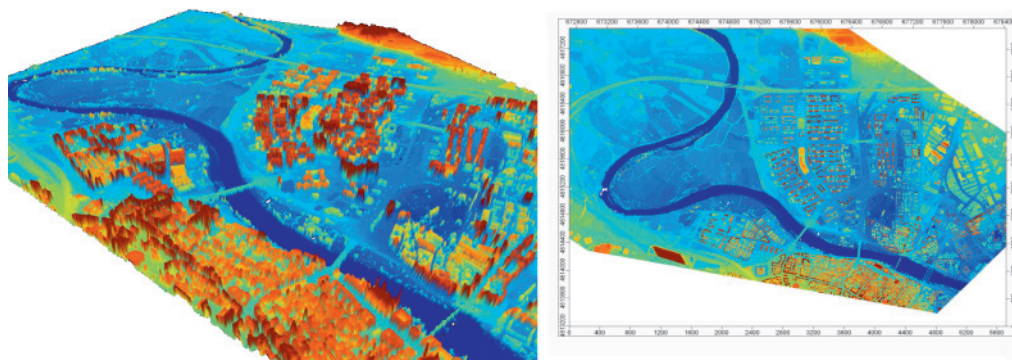


Figura 7. Generación de modelos digitales del terreno y de elevaciones del río Ebro a su paso por Zaragoza. En la parte inferior de la imagen pueden observarse la basílica del Pilar (Fuente: elaboración propia)