



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Caracterización de la vegetación riparia y de la morfología fluvial de un sector del tramo medio del río Ebro mediante datos LiDAR-PNOA e imágenes Sentinel-2

Characterization of riparian vegetation and fluvial morphology of a sector of the middle section of the Ebro river using LiDAR-PNOA data and Sentinel-2 images

Autor

Javier Viar Tobajas

Director

Antonio Luis Montealegre Gracia

Facultad de Filosofía y Letras
2018/2019

Resumen

Las formaciones vegetales de ribera destacan por su gran diversidad y por el dinamismo de sus hábitats, sin embargo, en determinados ámbitos se hayan transformadas por las actividades socioeconómicas del ser humano. El objetivo principal de este trabajo es analizar la continuidad espacial (longitudinal, transversal y vertical) del bosque de ribera mediante el índice RFV (RFV – Riparian Forest Evaluation) en un sector del tramo medio del río Ebro, considerando también las diferencias estructurales entre orillas cóncavas y convexas y las características geomorfológicas del cauce. Además se ha querido obtener una cartografía del área de estudio prestando especial atención a las especies vegetales invasoras. Se han utilizado los datos LiDAR (Light Detection And Ranging) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea para obtener modelos digitales de superficie y métricas sobre la distribución de los retornos láser, así como una imagen del satélite Sentinel-2.

Los resultados muestran que la continuidad longitudinal de la vegetación presenta un estado moderado, la continuidad transversal tiene un estado bueno y la continuidad vertical un estado moderado-deficiente, según el índice RFV. También son notables las diferencias entre orillas, destacando algunos estadísticos como el coeficiente de variación de la altura de los retornos láser como una variable interesante para analizar dichas diferencias. Finalmente, la cartografía del corredor ribereño realizada mediante la combinación de la imagen óptica y de las métricas LiDAR permite identificar zonas con especies invasoras.

Este trabajo realiza un uso pionero de los datos LiDAR de alta resolución del PNOA y abre nuevas líneas de trabajo futuro relacionadas con la caracterización automática de la geomorfología del cauce y de la vegetación riparia. Con ello se busca una metodología que reduce el trabajo de campo para gestionar estos espacios de forma sostenible.

Palabras Clave: Teledetección, índice RFV, geomorfología fluvial, bosque de ribera, Random Forest.

Abstract

The riverside plant formations stand out for their great diversity and for the dynamism of their habitats. However, in certain areas they have been transformed by the socio-economic activities of the human being. The main objective of this work is to analyse the spatial continuity (longitudinal, transversal and vertical) of the riverbank forest using the RFV index (Riparian Forest Evaluation) in a sector of the middle section of the Ebro River, also considering the structural differences between concave and convex banks and the geomorphological characteristics of the riverbed. In addition, we wanted to obtain a mapping of the study area focusing to invasive plant species. LiDAR data from the National Plan of Aerial Orthophotography have been used to obtain digital surface models and metrics on the distribution of laser returns, as well as a Sentinel-2 satellite image.

The results show that the longitudinal continuity presents a moderate state; the transversal continuity has a good state and the vertical continuity a moderate-deficient state according to the RFV index. The differences between shores are significant, highlighting some statistics such as the coefficient of variation of the height of the laser returns as an interesting variable to analyse these differences. Finally, the mapping of the riverside corridor made by combining the optical image and LiDAR metrics allows identifying areas with invasive species.

This work is pioneer in the use of the high-density LiDAR-PNOA data and opens new lines of future work related to the automatic characterization of the channel geomorphology and the riparian vegetation. The exposed methodology reduces the field work to manage these areas in a sustainable manner.

Key Words: Remote Sensing, RFV index, fluvial geomorphology, riparian forest, Random Forest.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	pág. 1
1.1.	Las áreas de ribera: vegetación riparia y geomorfología fluvial ...	pág. 1
1.2.	La aplicación de la teledetección para el estudio de las áreas de ribera	pág. 3
2.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	pág. 4
3.	ÁREA DE ESTUDIO	pág. 5
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	pág. 7
4.1.	Datos LiDAR.....	pág. 7
4.1.1.	Características generales de los datos LIDAR-PNOA	pág. 7
4.1.2.	Obtención de modelos digitales	pág. 9
4.1.3.	Cálculo de métricas LiDAR	pág. 10
4.2.	Imagen Sentinel-2	pág. 11
4.2.1.	Características generales de las imágenes Sentinel-2 y descarga.....	pág. 11
4.2.2.	Cálculo de índices de vegetación	pág. 12
4.3.	Caracterización de la morfología del cauce	pág. 13
4.4.	Caracterización de la vegetación riparia	pág. 14
4.4.1.	Valoración mediante el índice RFV	pág. 14
4.4.2.	Análisis de las diferencias estructurales entre orillas cóncavas y convexas.....	pág. 15
4.4.3.	Obtención de la cartografía de la vegetación de ribera.....	pág. 15
5.	RESULTADOS	pág. 17
5.1.	Morfología del cauce.....	pág. 17
5.2.	Caracterización de la vegetación riparia	pág. 20
5.2.1.	Estado de la vegetación de ribera mediante el índice RFV ..	pág. 20
5.2.2.	Estudio de las diferencias estructurales entre orillas cóncavas y convexas.....	pág. 24
5.2.3.	Cartografía de la vegetación de ribera	pág. 25
6.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	pág. 29
	ANEXO.....	pág. 1
	Parte I: Fotografías del área de estudio.....	pág. 1
	Parte II: Transectos de vegetación	pág. 4
	Parte III: Perfiles topográficos	pág. 25

Índice de figuras

Figura 1. Vista tridimensional de un sistema de ribera	pág. 1
Figura 2. Evolución de la literatura científica sobre vegetación de ribera..	pág. 3
Figura 3. Área de estudio	pág. 5
Figura 4. Fotografías de la zona de estudio	pág. 6
Figura 5. Esquema de la metodología aplicada	pág. 7
Figura 6. Sistema LiDAR aerotransportado en el que se indican las partes que lo componen	pág. 7
Figura 7. Estado de la segunda cobertura del proyecto LiDAR-PNOA	pág. 8
Figura 8. Densidades de puntos por m ² en la segunda cobertura del proyecto LiDAR PNOA	pág. 8
Figura 9. Esquema que muestra el procedimiento llevado a cabo para calcular la relación entre la anchura de la franja riparia y el cauce activo	pág. 13
Figura 10. Esquema que muestra el procedimiento llevado a cabo para calcular la relación entre la anchura y profundidad del "bankfull"	pág. 14
Figura 11. Perímetro del "bankfull", "thalweg" y perfiles transversales..	pág. 17
Figura 12. Perfil topobatimétrico del "bankfull" del transecto 1-2	pág. 19
Figura 13. Perfil topobatimétrico del "bankfull" del transecto 7-8	pág. 19
Figura 14. Pendiente longitudinal del "thalweg"	pág. 20
Figura 15. Porcentaje de cubrimiento del estrato arbóreo	pág. 20
Figura 16. Porcentaje de cubrimiento del estrato arbustivo	pág. 21
Figura 17. Porcentaje total de cubrimiento vegetal	pág. 21
Figura 18. Nube de puntos del transecto 1	pág. 23
Figura 19. Nube de puntos del transecto 7	pág. 24
Figura 20. Cartografía de la zona de ribera	pág. 26
Figura 21. Comparativa entre los años 1956 y 2018	pág. 30

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del vuelo LiDAR de Navarra	pág. 9
Tabla 2. Métricas LiDAR, dónde x_i es el valor de la observación (altura del retorno), N es el número total de observaciones, r_i es el retorno.....	pág. 10
Tabla 3. Bandas, longitudes de onda centrales y resolución espacial de las imágenes Sentinel-2	pág. 11
Tabla 4. Índices de vegetación empleados	pág. 12
Tabla 5. Valoración de la continuidad longitudinal y transversal	pág. 14
Tabla 6. Valoración de la continuidad vertical	pág. 14
Tabla 7. Categorías informacionales elegidas para la clasificación digital	pág. 16
Tabla 8. Relación de anchura del cauce con la anchura de las franjas riparias	pág. 18
Tabla 9. Pendientes transversales de la orilla a la llanura de inundación	pág. 18
Tabla 10. Relación anchura-profundidad del "bankfull"	pág. 19
Tabla 11. Valoración de la continuidad transversal de los transectos.....	pág. 22
Tabla 12. Valoración de la continuidad vertical de los transectos.....	pág. 22
Tabla 13. Resultados del test de normalidad de "Shapiro-Wilk".....	pág. 24
Tabla 14. Resultados obtenidos con la prueba "U de Mann-Whitney"	pág. 25
Tabla 15. Ocupación de cada categoría en la zona de estudio	pág. 26
Tabla 16. Matriz de confusión de la ratio de error OOB	pág. 27
Tabla 17. Matriz de confusión de la ratio de error "test".	pág. 27
Tabla 18. "Mean Decrease Accuracy".....	pág. 28
Tabla 19. "Mean Decrease Gini".....	pág. 28

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Las áreas de ribera: vegetación riparia y geomorfología fluvial

Las zonas de ribera son lugares de transición donde los ecosistemas terrestres y acuáticos entran en contacto e interactúan entre sí, ocupando un espacio que se extiende desde las márgenes del río hasta el borde de los sistemas de ladera (Arizpe *et al.*, 2008). Estas zonas de ribera son sistemas conectados de manera longitudinal, transversal y vertical por procesos hidrológicos, geomorfológicos y de sucesión ecológica (Gregory *et al.*, 1991).

Las formaciones vegetales de ribera destacan por su gran diversidad biológica, su elevada productividad y el gran dinamismo de sus hábitats (CEDEX, 2019), sin embargo, en determinados ámbitos se hayan fuertemente alteradas por las actividades socioeconómicas del ser humano. Cabe destacar que estas formaciones vegetales sirven de refugio para especies propias de zonas climáticas frescas y húmedas dentro de áreas más cálidas y secas (CEDEX, 2019). La degradación debida a factores antrópicos que han sufrido estas formaciones vegetales es el principal motivo que impulsa al estudio de la vegetación riparia con el fin de evaluar hasta qué punto se ven degradadas estas zonas de gran valor ecológico. De esta manera, caracterizar las comunidades riparias permite identificar tramos de ríos con elevado valor ecológico que puedan tomarse como ejemplo para la restauración de zonas degradadas (CEDEX, 2019).

Los elementos geomorfológicos constituyen la base física sobre la cual se asienta la vegetación riparia, ya que la distribución, estructura y caracteres de la vegetación vienen determinadas por las características geomorfológicas (Ollero, 1993). Se entiende como geomorfología fluvial aquella rama de la geomorfología que estudia el modelado de los lechos fluviales (Muñoz, 1995). Uno de los elementos principales estudiados por la geomorfología fluvial y tratado a lo largo de este trabajo es el nivel de “*bankfull*” o caudal geomórfico, es decir, el caudal que cabe en el cauce menor completo. La delimitación de éste es fundamental ya que permite conocer el caudal que circula durante las crecidas ordinarias. Además, se trata del caudal que mayor movilización de carga de fondo produce, ya que todavía no se ha producido el desbordamiento y la velocidad y energía del agua es potente. Su periodo de retorno medio anual es de 1,5 años para ríos como el Ebro, mientras que en ríos que cuyo lecho es impermeable supera los 2 años y hasta 6 años en el caso de las ramblas (Ollero, 2014).

Como se puede observar en la Figura 1, la vegetación de ribera y la geomorfología fluvial están directamente relacionadas formando parte del sistema de ribera, de ahí la importancia de integrar ambas en este trabajo.

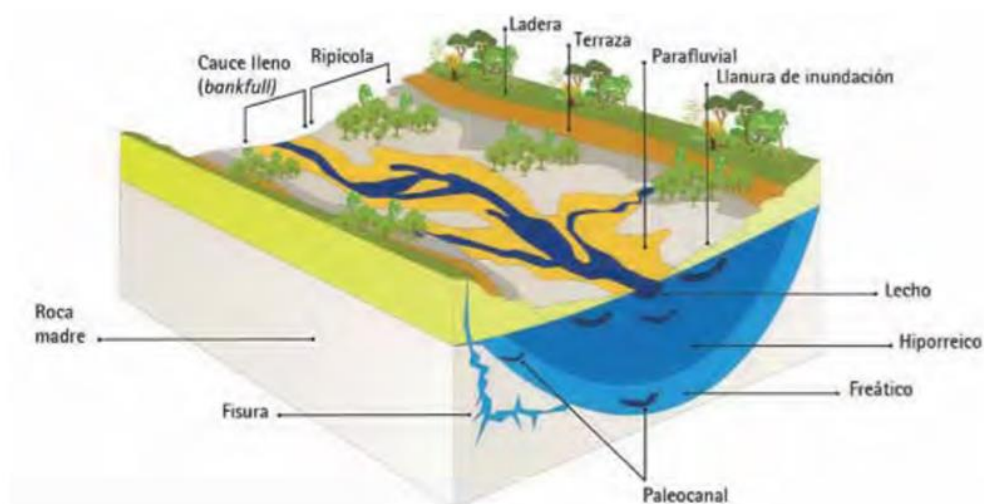


Figura 1. Vista tridimensional de un sistema de ribera. Tomado de Arizpe *et al.* (2008).

El valle medio del río Ebro, también conocido como “Ebro de meandros libres”, abarca desde Logroño (42° 28' 12" N – 2° 26' 44" W) hasta la localidad zaragozana de La Zaida (41° 19' 20" N – 0° 25' 31" W), a lo largo de 346 km de cauce (Ollero, 1996). Los meandros de este tramo adquieren una acentuada sinuosidad, convertidos en meandros libres o divagantes (Sánchez Fabre *et al.*, 2015). Este tramo medio está determinado por un régimen pluvio-nival, presentando los máximos caudales en el mes de febrero, mínimos en agosto, y disimetría en las curvas de ascenso y descenso con una prolongación de las aguas altas en primavera y las bajas en otoño (Ollero, 1992). Estos máximos en los meses invernales se deben a la influencia pluvial oceánica de las precipitaciones en el noroeste de la cuenca hidrográfica del Ebro.

El cauce del Ebro en este tramo medio presenta una pendiente muy baja (0,067 %), discurriendo por un amplio valle y con un índice de sinuosidad de 1,505 (Ollero, 1993). Geomorfológicamente destaca la presencia de numerosas barras de grava a pesar de la pérdida de carga sólida del río en las últimas décadas debido a la regulación de embalses y a la reducción de la dinámica natural del cauce. Otro elemento geomorfológico destacable son las numerosas islas que aparecen en el cauce, de gran importancia ecológica, ya que en ellas se asientan los ecosistemas con menor alteración debido a la dificultad de acceso (Ollero, 1993).

En el tramo medio del Ebro se encuentran riberas naturales que suponen un valioso corredor verde dentro del ambiente semiárido del centro de la Depresión del Ebro (Ollero, 1996). La vegetación de ribera destaca por su dinamismo, ya que cada crecida altera el equilibrio y obliga a la adaptación de las formaciones vegetales preexistentes. La tendencia natural de esta vegetación de ribera es convertirse en bosques de tipo alameda, saucedal, olmedal o tamarizal (Ollero, 1993).

En este ecosistema de ribera destacan los sotos, es decir, bosques de ribera caducifolios con especies típicas de ambientes eurosiberianos (Puente, 2006), debido al microclima más fresco y húmedo que se genera. Estos sotos presentan anchuras poco notables en la mayor parte de los casos, ya que cuando el río no estaba regulado por embalses como ocurre actualmente, las márgenes cóncavas retrocedían y las convexas avanzaban, realizándose talas en éstas para el aprovechamiento agrícola (Puente, 2006). Los estudios llevados a cabo en esta zona, como el de Ollero (1992) llevan a concluir que en el tramo medio del río Ebro, las orillas cóncavas son fértiles para el cultivo por la presencia de materiales más finos y por lo tanto son orillas protegidas y con un menor desarrollo de la vegetación. Por el contrario, es en las orillas convexas donde la mayor sedimentación permite el desarrollo de los principales sotos.

En el corredor ribereño del río Ebro, en su tramo de meandros libres, se puede destacar la presencia de numerosos sotos, debido principalmente al elevado nivel del freático (Ollero, 2000) que permite la formación de diversas comunidades vegetales, desde las más pioneras hasta las de mayor desarrollo (Ollero, 1996). Cabe destacar que la mayor parte de los sotos del tramo medio del río están protegidos y pertenecen al Hábitat de Interés Comunitario (HIC) 92A0 (Bosques galería de *Salix alba* y *Populus alba*) según el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE, en el cual aparecen formaciones de choperas, alamedas, olmedas y saucedas. Por otro lado, estas zonas de ribera se encuentran fuertemente degradadas en algunos sectores debido a las actuaciones antrópicas que se vienen realizando a lo largo de las últimas décadas. La gran regulación del río por grandes embalses, la presencia de motas que constriñen el cauce, la disminución de caudales y de crecidas ordinarias y extraordinarias, y la introducción de especies exóticas invasoras son diferentes presiones que han ido alterando las zonas ribereñas, impidiendo la dinámica geomorfológica y el correcto desarrollo de la vegetación. Por ello la importancia de estudiar estas zonas de gran valor ecológico con el objetivo de corregir estas situaciones y llegar a un equilibrio entre naturalidad de las riberas y actividades humanas.

La vegetación de ribera ha sido estudiada tradicionalmente mediante el inventario de especies, la identificación de comunidades y la descripción de los patrones espaciales y temporales de las diferentes especies en función de los factores ambientales (Dufour *et al.*, 2019). En la actualidad, la caracterización del estado de la vegetación de ribera se realiza mediante diferentes índices, ya que la Directiva 2000/60/CE establece que es necesario valorar la calidad hidromorfológica de los cauces naturales y

entre otros aspectos es necesaria la evaluación de la calidad del bosque de ribera (Magdaleno *et al.*, 2010).

En España se pueden encontrar varios índices como el QBR (“*Qualitat del Bosc de Ribera*”) (Munné *et al.*, 1998) cuyo objetivo es el de establecer un índice de calidad para valorar el estado de conservación de los bosques de ribera (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2013). Otros autores como González del Tánago *et al.* (2006) proponen el índice RQI (“*Riparian Quality Index*”) que supone un método de evaluación en campo, rápido y fácil de aplicar y que recoge de forma cuantitativa información sobre la estructura de la vegetación riparia evaluando de esta manera su estado ecológico (González del Tánago y García del Jalón, 2011). Gutierrez *et al.* (2001) desarrollaron el IVF (Índice de Vegetación Fluvial) que pretende evaluar el estado de conservación de las riberas utilizando la vegetación de ribera como bioindicadora de naturalidad (Agència Catalana de l’Aigua, 2006). Finalmente otro índice a destacar es el RFV (“*Riparian Forest Evaluation*”) propuesto por Magdaleno *et al.* (2010). Este índice está diseñado para evaluar la continuidad longitudinal, transversal y vertical de la vegetación autóctona mediante tablas de valoración con puntuaciones que se han de otorgar de acuerdo con el grado de cubrimiento del dosel. Este índice ha sido aplicado con éxito en masas de agua de diferentes cuencas hidrográficas, como las de los ríos Guadiana, Guadalquivir, Tajo, Duero, Cantábrico y Miño-Sil (Magdaleno y Martínez, 2014), sin embargo no ha sido aplicado en el contexto de la cuenca hidrográfica del Ebro.

1.2. La aplicación de la teledetección para el estudio de las áreas de ribera

Los estudios científicos sobre vegetación riparia han experimentado un crecimiento exponencial a partir de 1990, sobre todo los relacionados con el análisis de procesos y patrones espaciales. Tradicionalmente se ha hecho uso de las fotografías aéreas para el estudio diacrónico de la vegetación, pero en las últimas décadas, la disponibilidad de imágenes capturadas por satélites de alta resolución espacial y temporal, el desarrollo de sistemas de teledetección activos como el LiDAR (“*Light Detection And Ranging*”), y el auge de los drones, ha provocado un uso creciente de estos datos (Dufour *et al.*, 2019). En la Figura 2 se muestra la evolución de la literatura científica dedicada a la vegetación de ribera, evidenciándose el aumento desde la década de los 90 del siglo pasado.

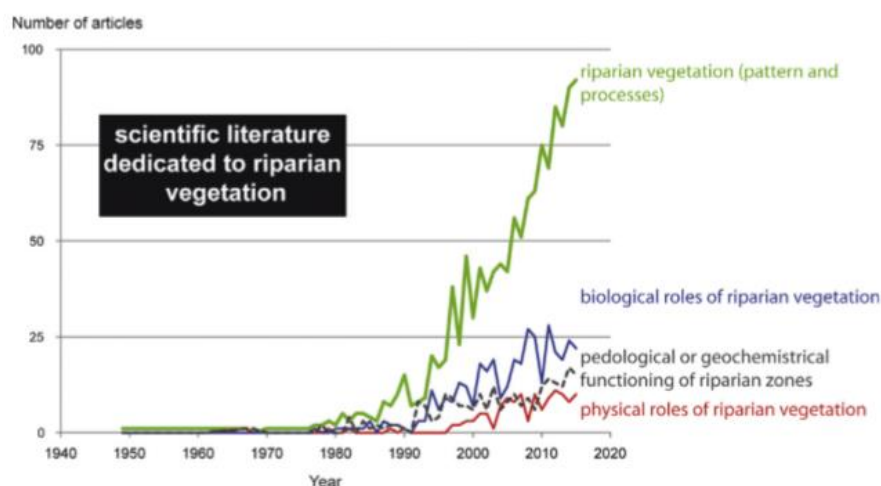


Figura 2. Evolución de la literatura científica sobre vegetación de ribera (Dufour *et al.*, 2019)

La caracterización espectral de la vegetación mediante imágenes ópticas de teledetección está determinada por una serie de factores, tales como los pigmentos foliares, la estructura celular de la hoja y su contenido de humedad. Las características geométricas de la planta, es decir, su área y forma foliar, y la geometría del dosel, son otros factores condicionantes. También hay que considerar otros aspectos derivados de la situación geográfica (pendiente, orientación, altitud, reflectividad del sustrato, condiciones atmosféricas, etc.) (Chuvienco, 2010). Algunos autores como Narumalani *et al.* (1997), Congalton *et al.* (2002) y Puig-Mengual *et al.* (2019) han estudiado zonas de ribera utilizando imágenes sate-

linales de media-alta resolución espacial con el objetivo de diferenciar cubiertas vegetales y cartografiar la zona de ribera, obteniendo resultados satisfactorios.

Cabe destacar que el programa de observación de la Tierra de la Unión Europea “*Copernicus*” ofrece información satelital destinada a aumentar los conocimientos acerca del calentamiento global, la monitorización de los recursos naturales, la sobrepoblación, etc. En este sentido, la irrupción de los satélites Sentinel 2A en 2015 y Sentinel 2B en 2017 ha ofrecido a los usuarios de teledetección óptica una interoperabilidad completa con otros programas espaciales ya existentes como SPOT y Landsat.

En el caso concreto de los sensores LiDAR aerotransportados, la información de carácter tridimensional que proporcionan (nubes de puntos con coordenadas de latitud, longitud y altura de la superficie terrestre) ya se ha utilizado con éxito en la estimación de diferentes parámetros forestales, como la altura del dosel, el volumen de madera, la biomasa, etc., de forma automática y con mayor precisión a la alcanzada con técnicas de inventario tradicional (Vosselmann y Maas, 2010; Maltamo *et al.*, 2014). Además, los datos LiDAR permiten generar cartografía de la geomorfología fluvial de gran detalle, lo cual hace del LiDAR una herramienta idónea para la gestión y la caracterización de las áreas de ribera. (Martínez *et al.*, 2009).

Existen algunas experiencias como la de Magdaleno *et al.* (2010) que utilizaron los datos LiDAR de un vuelo específico para calcular el índice RFV destinado a la valoración del estado del bosque de ribera en ríos permanentes, teniendo en cuenta que se puede obtener a partir de estos datos LiDAR información muy detallada sobre las alturas de las copas del bosque ribereño con una precisión tanto horizontal como vertical centimétrica (Arizpe *et al.*, 2008). Éste y otros índices similares como los nombrados anteriormente se basan en el trabajo de campo y en la valoración, mediante fichas de muestreo, de la calidad y del grado de alteración del bosque ripario. En este sentido, surge la necesidad de desarrollar metodologías semi-automáticas y objetivas para determinar la continuidad estructural de la zona ribereña y ayudar así en la caracterización de la calidad hidromorfológica del cauce.

Por último, cabe reseñar que durante los últimos años comienza a destacar la combinación de imágenes satelitales y datos LiDAR con el objetivo de lograr resultados de mayor precisión en la identificación de las zonas de ribera. Varios autores como Bork y Su (2007), Johansen *et al.* (2010), Jeong *et al.* (2016) han llevado a cabo metodologías que combinan ambos tipos de fuentes de información en zonas ribereñas obteniendo buenos resultados al aprovechar la información espectral proveniente de la teledetección óptica con la información estructural que proporcionan los datos LiDAR.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El **objetivo principal** del presente Trabajo de Fin de Máster es caracterizar la vegetación riparia y la geomorfología del cauce de un sector del tramo medio del Ebro mediante datos LiDAR aerotransportados de la segunda cobertura del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) e imágenes Sentinel-2, todo ello para valorar el estado en el que se encuentra la zona de ribera.

Este objetivo principal se fundamenta en la **hipótesis** de que es posible derivar una serie de descriptores básicos sobre la vegetación y la morfología del cauce mediante el uso y la integración de datos de teledetección activa y óptica de alta resolución. Esta hipótesis descansa en el hecho de que la caracterización de las áreas de ribera es compleja y requiere de un intenso trabajo de campo, por lo que surge la necesidad de proponer metodologías más automáticas y eficientes para trabajar desde gabinete y ayudar en la gestión. Dado que los recientes datos LiDAR-PNOA de la C.F. de Navarra superan en su resolución espacial (10 puntos/m²) a los disponibles para otras CC.AA (0,5-2 puntos/m²), se consideran idóneos para acometer el objetivo principal propuesto. Además, cabe destacar que se trata de un uso pionero de estos datos, por lo que también se evaluará de forma indirecta su potencialidad.

Para dar cumplimiento al objetivo principal es necesaria la consecución de una serie de **objetivos específicos**:

- 1) Obtener el nivel de “*bankfull*” mediante perfiles topobatimétricos para determinar los límites del área de ribera.

- 2) Seleccionar las variables o métricas relacionadas con los retornos LiDAR más útiles para cartografiar el estrato arbustivo y arbóreo del bosque de ribera y valorar la continuidad longitudinal, transversal y vertical de la vegetación riparia.
- 3) Analizar las diferencias estructurales de la vegetación riparia entre orillas cóncavas y convexas.
- 4) Obtener una cartografía sobre la vegetación de ribera mediante la combinación de imágenes Sentinel-2 y métricas LiDAR y evaluar mediante ella la situación actual, prestando especial atención a las especies invasoras.

La consecución de los tres primeros objetivos específicos se ha llevado a cabo durante el periodo de prácticas (275 horas) en la Dirección Territorial de Aragón del Grupo TYPESA, con sede en Zaragoza. Dicha Dirección desarrolla trabajos de consultoría en los campos de ingeniería civil, arquitectura, industria y energía, y medio ambiente. Concretamente, este trabajo final de máster se ubica dentro de los proyectos de restauración hidrológico-forestal encargados por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se enmarca en el centro de la depresión del Ebro, en el tramo medio del río Ebro. En la Figura 3 se muestra la localización del tramo estudiado, que se extiende 5,33 km de longitud aguas abajo de la localidad de Novillas (C.A. de Aragón), comenzando a una cota de 227,64 m.s.n.m. y finalizando a una cota de 225,70 m.s.n.m. Desde el punto de vista administrativo, el área de estudio se encuentra en su totalidad dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón, íntegramente en el municipio de Novillas, colindante con la C. F. de Navarra.

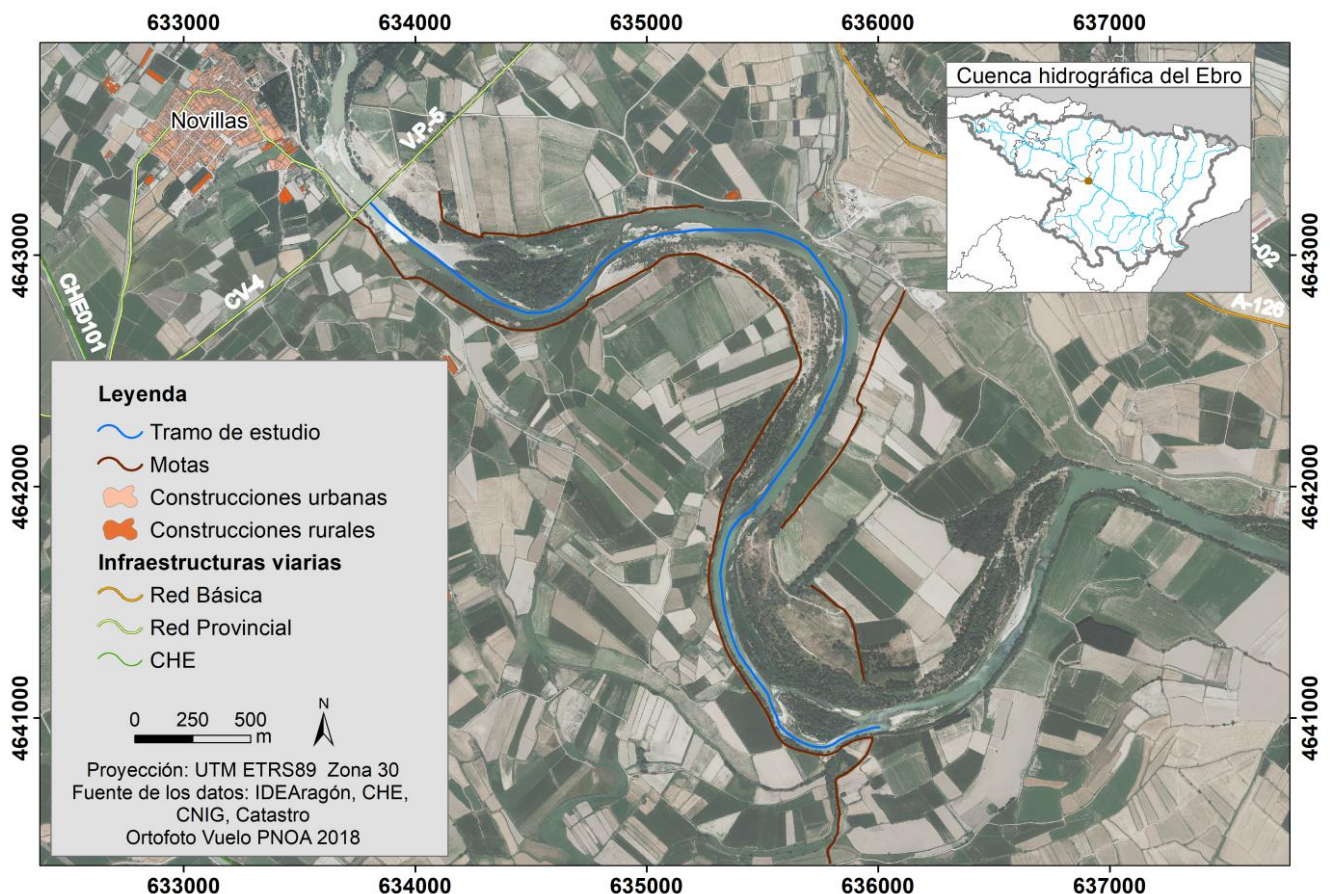


Figura 3. Área de estudio.

La elección de este tramo responde a la disponibilidad de datos LiDAR-PNOA de alta densidad de puntos correspondientes a la segunda cobertura, capturados en el año 2017, y a la existencia de un corredor verde diverso en su estructura (Fernández de Sevilla *et al.*, 2008). Además, se trata de una zona de ribera con una intensa actividad agrícola que se ve afectada de forma recurrente por las avenidas tanto ordinarias como extraordinarias del Ebro, siendo una zona protegida en ambos márgenes por motas que estrechan el espacio del río e impiden el desarrollo de la vegetación en algunas zonas. El corredor ribereño de esta zona se encuentra protegido por el LIC (Lugar de Interés Comunitario) “Sotos y Mejanas del Ebro” y es considerado HIC según el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE (código 92A0).

A continuación se muestran dos fotografías de la zona de estudio (Figura 4). En la fotografía de la izquierda (Figura 4A) se observa un camino que discurre sobre una mota por la margen derecha del río. Se puede observar como en la margen derecha apenas se ha desarrollado la vegetación al tratarse de una orilla erosiva protegida con la mota. Por el contrario la margen izquierda es una orilla sedimentaria en la que abunda la vegetación arbórea. Esta fotografía fue tomada en invierno (mes de febrero) tal y como se puede ver en la vegetación que carece de hojas. Por otra parte, la fotografía de la derecha (Figura 4B) fue tomada en el mes de agosto sobre una barra lateral protegida con escollera. Se trata también de la margen derecha del río Ebro. La barra lateral está colonizada por vegetación herbácea debido a la ausencia de crecidas recientes en el año 2019, mientras que en la orilla de la margen izquierda se desarrolla la vegetación arbórea de alto porte. En la Parte I del Anexo se incluyen más fotografías del tramo estudiado.

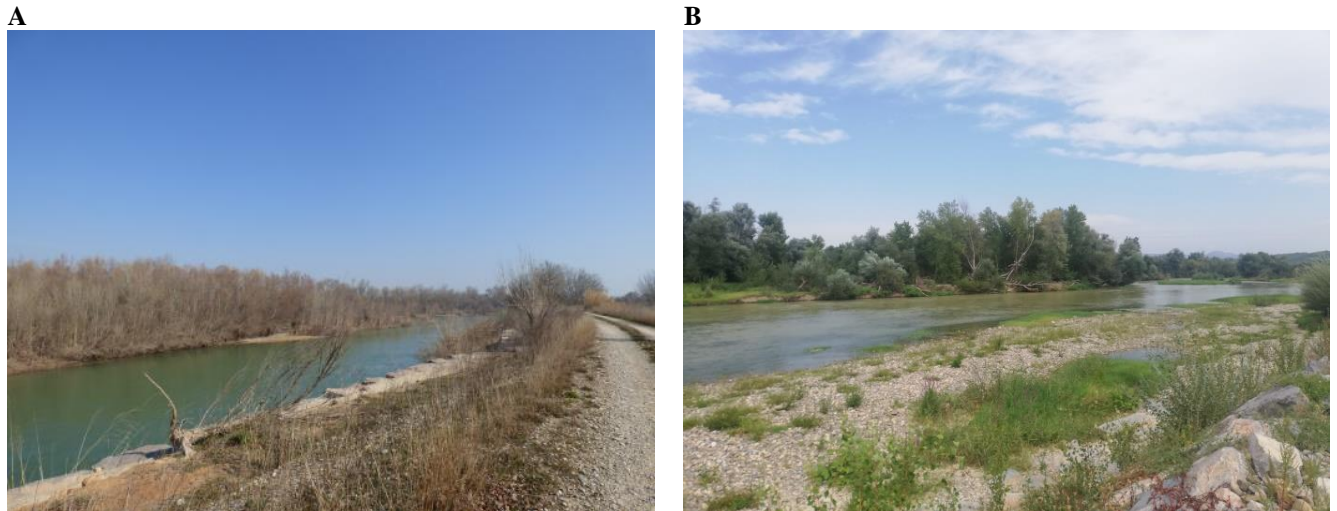


Figura 4. Fotografías de la zona de estudio tomadas por J. Viar.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describe la metodología seguida para la consecución del objetivo principal, así como de los objetivos secundarios señalados. En la Figura 5 se sintetiza gráficamente el proceso metodológico seguido mediante un diagrama de flujo.

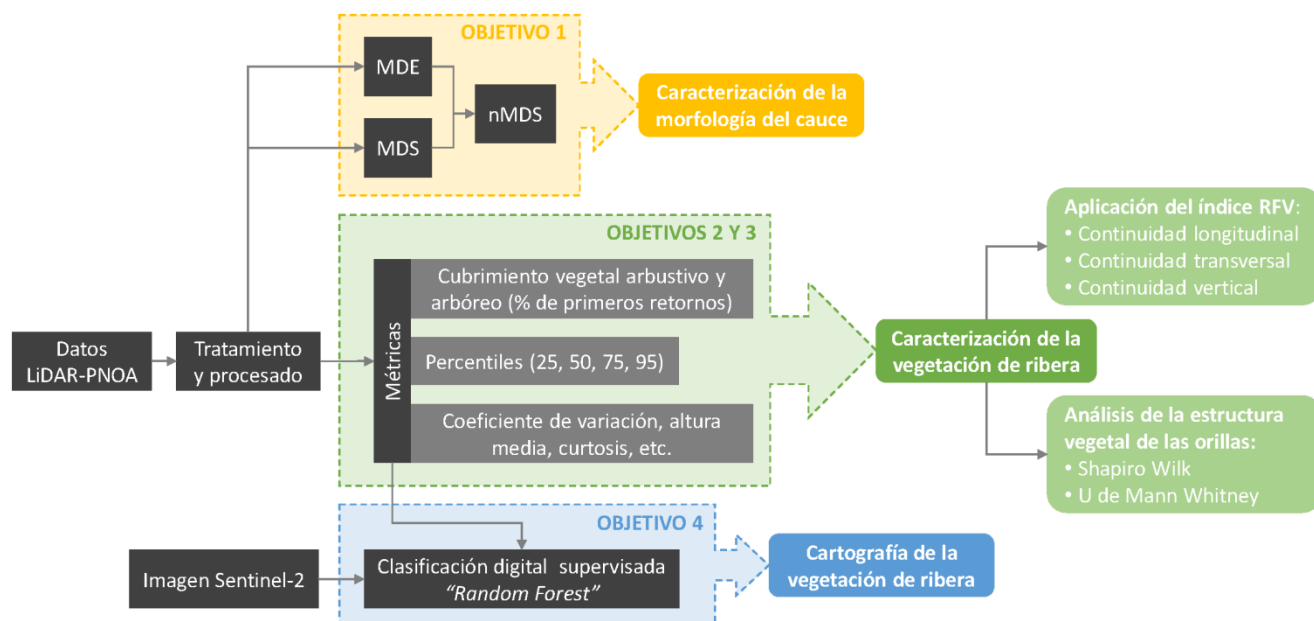


Figura 5. Esquema de la metodología aplicada.

4.1. Datos LiDAR

4.1.1. Características generales de los datos LiDAR-PNOA

El LiDAR es un tipo de sensor activo que emite pulsos láser sobre la superficie terrestre entre las regiones del espectro del ultravioleta y del infrarrojo próximo (Kobayashi, 1987). Mediante un fotodiodo se recoge la radiación devuelta por el “objeto” ubicado sobre la superficie, mientras que mediante un telémetro se obtiene la distancia que separa al sistema del “objeto”, obteniendo de esta manera una nube de puntos en 3D georreferenciada, con un nivel de precisión centimétrico. Existen diferentes tipos de sistemas LiDAR en función de la plataforma donde se coloca el sensor láser (terrestre, aerotransportado y satelital). En la Figura 6 se muestra un sensor LiDAR aerotransportado enviando pulsos láser a la superficie terrestre.

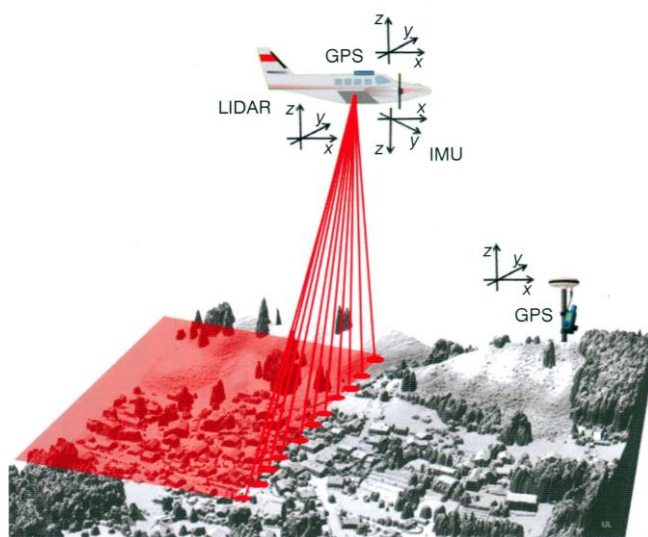


Figura 6. Sistema LiDAR aerotransportado en el que se indican las partes que lo componen. Tomado de Vosse-Iman y Maas (2010).

Los inicios de la tecnología LiDAR se remontan a los años 70 del siglo pasado, utilizados dentro de los programas de investigación realizados por la Agencia Espacial Estadounidense (Magdaleno y Martínez, 2006). En España el uso de los datos LiDAR se generalizó a partir el año 2008, en el marco del PNOA, que pretendía sobrevolar todo el territorio nacional con sensores láser para caracterizar las zonas inundables (PNOA, 2019). Actualmente este proyecto consta de dos coberturas: una primera realizada entre los años 2008-2015 y una segunda cobertura que comenzó en el año 2015 y que se prevé que finalice en el año 2020. Como se observa en la Figura 7, todavía quedan varias provincias desprovistas del segundo vuelo LiDAR, tales como el norte de las provincias de Zaragoza y Huesca, las provincias andaluzas, gran parte de Castilla y León, etc.

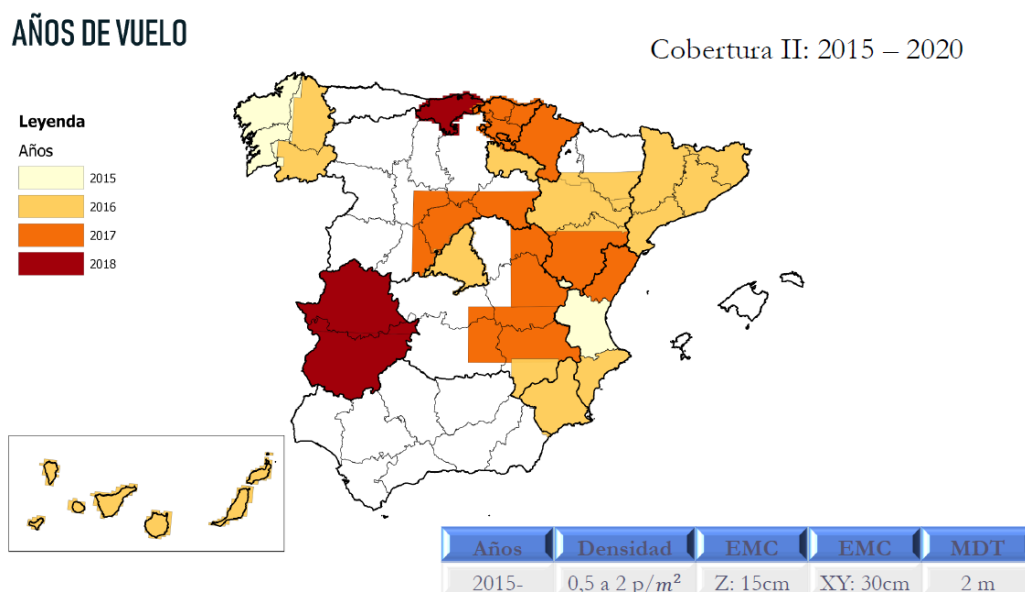


Figura 7. Estado de la segunda cobertura del proyecto LiDAR-PNOA (IGN, 2019).

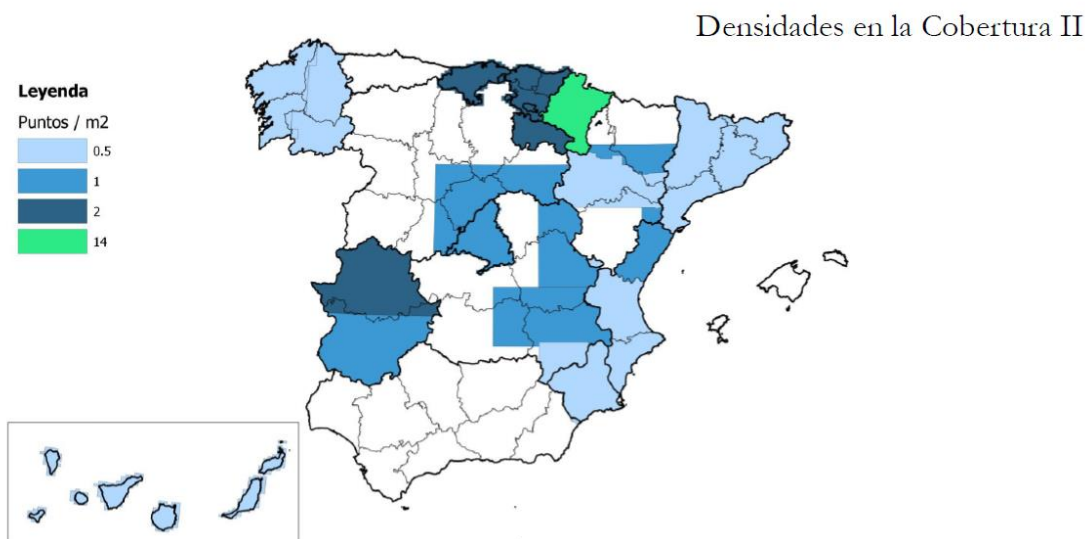


Figura 8. Densidades de puntos por m² en la segunda cobertura del proyecto LiDAR PNOA (IGN, 2019).

Los datos LiDAR utilizados en este trabajo corresponden al vuelo que realizó el PNOA sobre la C. F. de Navarra entre los meses de septiembre (17/09/2017) y octubre de 2017 (23/10/2017). En aquel momento el río Ebro presentaba un marcado estiaje, con una altura media de la lámina de agua alrededor de 1,40 – 1,70 m en la estación de aforo de Novillas (SAIH Ebro, 2019). Se ha observado que el sensor “Single Photon LiDAR” (SPL100) empleado ha registrado datos en las zonas de agua hasta un máximo de 3 m de profundidad, lo que proporciona información batimétrica del cauce principal.

Las nubes de puntos cuentan con una densidad de 10 puntos/m² (Figura 8) y un error inferior a 20 cm tanto en altimetría como en planimetría, se distribuyen en ficheros de 1×1 km de extensión, presentan alturas elipsoidales y están clasificadas automáticamente (IDENA, 2019). En la Tabla 1 se muestran las características principales de este vuelo LiDAR.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del vuelo LiDAR de Navarra. (IDENA, 2019).

Característica	Descripción
Sensor	“Single Photon LiDAR” (SPL 100)
Campo de visión transversal (FOV)	Máximo de 50° efectivos
Densidad de puntos	10 puntos /m ²
Sistema geodésico de referencia	ETRS 89
Tipo de altitudes	Elipsoidales (elipsoide GRS80)
Proyección cartográfica y huso UTM	UTM 30 N
Distribución de hojas	Archivos de 1×1 km
Modelo de Geoide	EGM2008-REDNAP
Fecha de pasada E-W	17/09/2017
Fecha de pasada transversal	23/10/2017

4.1.2. Obtención de modelos digitales

Como ya se ha comentado anteriormente, la nube de puntos original es proporcionada en alturas elipsoidales y por lo tanto es necesaria la transformación a cotas ortométricas mediante el software “TcLasConverter”, distribuido por el Gobierno de Navarra. Asimismo, se ha llevado a cabo una reclasificación de la nube de puntos para separar aquellos correspondientes al suelo desnudo del resto. Este filtrado se realizó mediante las herramientas de “LasTools” (Rapidlasso GmbH, 2019). Concretamente la herramienta utilizada es “lasground”, basada en el algoritmo de clasificación de Axelsson (2000). El filtro desarrollado por este autor crea una malla regular que se superpone a la nube de puntos, seleccionando de cada celda los puntos más bajos correspondientes al suelo a partir de los cuales crea una superficie mediante una red de triángulos irregulares (TIN). Esta superficie es la que se utiliza como referencia para clasificar el resto de puntos. Se van realizando iteraciones y en cada uno de los triángulos un punto no clasificado es añadido a la superficie TIN que se va construyendo con los puntos de suelo (Montealegre, 2017).

Los puntos de la nube clasificados como suelo fueron empleados para obtener el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que describe la topografía del terreno de la zona de estudio. Para ello se convirtieron los puntos en una superficie ráster de 50 cm de resolución espacial mediante el método de interpolación “TIN a ráster” (Vosselmann y Maas, 2010). Este modelo ha sido necesario para la normalización de las alturas de los puntos de la nube, es decir, para obtener el valor real de altura de cada punto sobre el terreno local y para la obtención de los perfiles topobatimétricos.

Además de este MDE se ha obtenido también el Modelo Digital de Superficies (MDS) que representa la elevación de la capa superficial de los objetos sobre el terreno (Fuentes *et al.*, 2012). En este caso se han utilizado los puntos correspondientes a los únicos retornos y a los primeros retornos.

Una vez obtenido el MDS se ha de obtenido el Modelo Digital de Superficies Normalizado (nMDS) para conocer las alturas de cada uno de los elementos de la superficie terrestre. Para ello se calculó la diferencia de elevación entre el MDS y el MDE.

4.1.3. Cálculo de métricas LiDAR

A partir de las nubes de puntos es posible extraer un conjunto de métricas relacionadas con la distribución y la variabilidad de las alturas de los retornos láser, así como con la densidad de puntos por unidad de superficie. En este caso, teniendo en cuenta que el índice RFV se basa en porcentajes de cubrimiento para valorar la continuidad longitudinal y transversal, se ha calculado con el software “*FUSION 3.80*” (McGaughey, 2018) el porcentaje de primeros retornos de arbolado (ecuación 1) y de matorral (ecuación 2) en píxeles de 3×3 m. La elección de este tamaño de pixel es debido a que es un tamaño adecuado para las dimensiones de las copas de los árboles y de los matorrales de mayor porte.

$$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros } > 5 \text{ m}}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros } > 0.5 \text{ m} < 5 \text{ m}}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde r_i es el valor de altura del retorno i , y N es el número total de observaciones o retornos. Se ha establecido el umbral de 5 m de altura para considerar los retornos de arbolado y el rango de 0,5 a 5 m para seleccionar los retornos del matorral. Ambos umbrales responden a un criterio experto debido al conocimiento sobre el bosque de ribera de la zona de estudio.

Para la valoración de la continuidad vertical se han calculado, con el mismo software, las coberturas en formato ráster de los percentiles 25, 50, 75 y 95 con el fin de conocer la distribución de las alturas de la vegetación (Martínez, 2015). Al igual que en el caso del porcentaje de cubrimiento, la resolución espacial de estos ráster es de 3 m. También se han extraído perfiles de la nube de puntos normalizada con el software “*Global Mapper 20*” para ayudar en la caracterización de la continuidad vertical.

Con el fin de analizar la complejidad estructural de la vegetación en las orillas cóncavas y en las convexas, así como para llevar a cabo un posterior proceso de clasificación digital, se han extraído las siguientes métricas en formato ráster: altura media, coeficiente de variación, desviación estándar, porcentaje de retornos por encima de la media, porcentaje de primeros retornos por encima de la media, porcentaje de retornos por encima de la altura de corte (0,5 m), porcentaje de primeros retornos por encima de la altura de corte, percentiles 25, 50, 75, 95, curtosis y asimetría. En este caso el tamaño de pixel es de 10×10 m, equiparándose al tamaño de pixel de las imágenes de Sentinel-2 que se utilizarán posteriormente. Todas estas métricas son extraídas con el comando “*GridMetrics*” del software “*FUSION 3.80*” (McGaughey, 2018). En la Tabla 2 se muestran todas las métricas extraídas con su correspondiente descripción.

Tabla 2. Métricas LiDAR, dónde x_i es el valor de la observación (altura del retorno), N es el número total de observaciones, r_i es el retorno. Adaptado de Lekuona *et al.* (2017) y Montealegre (2017).

Métrica	Descripción
Percentiles 25 %, 50 %, 75 %, 95 % (P25, P50, P75, P95)	<p>Los diferentes valores de percentiles fueron calculados utilizando la siguiente metodología:</p> $(N - 1)P = I + d \begin{cases} I \text{ es la parte entera de } (N - 1)P \\ d \text{ es la parte decimal de } (N - 1)P \end{cases}$ <p>Donde N es el número de observaciones y P es el percentil dividido por 100.</p> <p>Si $d = 0$ entonces $\text{Percentil} = x_{i+1}$</p> <p>Si $d > 0$ entonces $\text{Percentil} = x_{i+1} + d(x_{i+2} - x_{i+1})$</p> <p>Donde x_i es el valor de la observación teniendo en cuenta que las observaciones están ordenadas de manera ascendente.</p>

Métrica	Descripción
Porcentaje de primeros retornos por encima de un umbral de altura determinado (0,5 m) (% de cubrimiento)	$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}} > \text{umbral}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} \times 100$
Porcentaje de primeros retornos por encima de la media	$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}} > \text{media}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} \times 100$
Porcentaje de todos los retornos por encima de la media	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > \text{media}}{N} \times 100$
Porcentaje de todos los retornos por encima de la altura de corte (0,5 m)	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > \text{umbral}}{N} \times 100$
Altura media (μ)	$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$
Coeficiente de variación	$\frac{\sigma}{\mu} \times 100$
Desviación estándar (σ)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$
Curtosis	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{(N - 1)\sigma^4}$
Asimetría	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{(N - 1)\sigma^3}$

4.2. Imagen Sentinel-2

4.2.1. Características generales de las imágenes Sentinel-2 y descarga

Las imágenes satelitales de Sentinel-2 pertenecen a proyecto “*Copernicus*” de la Agencia Espacial Europea (ESA). Desde el año 2015 en el caso de Sentinel-2A y desde 2017 en el caso de Sentinel-2B, están a disposición de manera gratuita y con una elevada resolución temporal (periodo de revisita de 5 días teniendo en cuenta ambos satélites). Estos satélites tienen una anchura de barrido de 290 km² y su órbita es helio-sincrónica con una inclinación de 98,62° y situada a 786 km de la Tierra (ESA, 2019). Sentinel-2 lleva a bordo un sensor MSI (“*Multispectral Instrument*”) de alta resolución, con 13 bandas (Tabla 3) que registran en diferentes regiones del espectro electromagnético (ESA, 2019).

Tabla 3. Bandas, longitudes de onda centrales y resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 (ESA, 2019).

Banda (B)	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
B1 – Aerosoles costeros	0,443	60
B2 – Azul	0,490	10
B3 – Verde	0,560	
B4 – Rojo	0,665	
B5 – Borde rojo	0,705	20
B6 – Borde rojo	0,740	
B7 – Borde rojo	0,783	

Banda (B)	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
B8 – Infrarrojo cercano	0,842	10
B 8a – Borde rojo	0,865	20
B 9 – Vapor de agua	0,945	60
B10 – SWIR-Cirros	1,375	
B 11 – SWIR	1,610	20
B12 – SWIR	2,190	

Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado una escena correspondiente al 16 de septiembre de 2017, ya que el objetivo es trabajar con las mismas condiciones de la vegetación, estado de la lámina de agua, etc. que se registraron durante el vuelo del LiDAR-PNOA. La escena fue descargada del servidor de la ESA y corresponde al satélite Sentinel-2A, concretamente al *Level-2A* (BOA - “*Bottom of Atmosphere*”), por lo que no fue necesaria ninguna corrección de la imagen. El tamaño de las escenas es de 100×100 km y tienen una proyección UTM WGS84. Cabe destacar que se ha hecho uso de las bandas de 10 m de tamaño de píxel para obtener un resultado con la máxima resolución espacial posible.

4.2.2. Cálculo de índices de vegetación

Un índice de vegetación se basa en la combinación de las bandas espectrales de la imagen óptica para realzar la respuesta espectral de vegetación. El resultado permite obtener una nueva imagen donde los píxeles muestran el vigor y el estado de las cubiertas vegetales (Gilbert *et al.*, 1997). Estos índices se derivan del peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación (Chuvienco, 2010), especialmente en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo próximo. En la Tabla 4 se muestran los índices de vegetación utilizados en este trabajo con su descripción correspondiente.

Tabla 4. Índices de vegetación empleados.

Denominación del índice	Fórmula según las bandas de Sentinel-2	Descripción
“ <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> ” (NDVI)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Desarrollado por Rouse <i>et al.</i> (1974), es el índice de vegetación más popular en la literatura científica y que relaciona la banda del infrarrojo próximo con la del rojo.
“ <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> ” (SAVI)	$((B8 - B4) / (B8 + B4 + L)) \times (1 + L)$	Desarrollado por Huete (1988), añade a la fórmula del NDVI el parámetro “L”, una constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen (Chuvienco, 2010). En este caso el valor que se le ha otorgado a “L” es de 0,5. Este valor es idóneo para densidades de vegetación intermedias.
“ <i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i> ” (GNDVI)	$(B8 - B3) / (B8 + B3)$	Desarrollado por Gitelson <i>et al.</i> (1996). A diferencia del NDVI utiliza la banda del verde en sustitución a la del rojo. Utilizando esta banda se identifica mejor la concentración de clorofila.

4.3. Caracterización de la morfología del cauce

Con el objetivo de realizar un análisis de la geomorfología fluvial del tramo en estudio se ha determinado el nivel de “*bankfull*”, se ha calculado la anchura del cauce principal relacionándolo con la anchura de las bandas riparias, se han calculado las pendientes transversales de la orilla a la llanura de inundación, se ha calculado la relación entre anchura y profundidad del “*bankfull*” y se ha calculado la pendiente longitudinal del “*thalweg*”, todo ello de acuerdo con la metodología propuesta por Fernández de Sevilla *et al.* (2008).

A) Determinación del nivel de “*bankfull*”

En primer lugar es necesaria la caracterización del nivel de “*bankfull*”, ya que a partir de la anchura de éste se determinarán las dimensiones de los tramos de muestreo o transectos para aplicar el índice RFV (Magdaleno *et al.*, 2010). Para la delimitación del nivel de “*bankfull*” se ha utilizado la extensión “*HEC-GeoRAS*” (US Army Corps of Engineers, 2019), incorporada en “*ArcGIS 10.3*”. Se han establecido 25 perfiles separados entre sí 200 m, los cuales se han superpuesto sobre el MDE para extraer los perfiles topobatiométricos correspondientes a cada uno de ellos. A partir de la extensión “*River Bathymetry Toolkit*” (Boise Aquatic Sciences Lab, 2019) implementada en “*ArcGIS 10.3*” se ha identificado el nivel “*bankfull*” y se han digitalizado sus límites.

Una vez determinada la anchura media del “*bankfull*” se pueden definir los transectos para analizar la continuidad transversal y vertical de la vegetación riparia siguiendo los criterios marcados por Magdaleno *et al.* (2010).

B) Anchura del cauce principal y su relación con la anchura de las bandas riparias.

Se ha calculado la anchura del cauce activo y la anchura de la franja riparia para cada margen, con el objetivo de obtener el índice “R” (Figura 9) propuesto por Fernández de Sevilla *et al.* (2008). Para ello se ha utilizado el MDS a partir del cual se ha medido la anchura de la franja riparia para cada uno de los transectos, mientras que la anchura del cauce se ha medido a partir de la ortofoto del PNOA del año 2018, así como el MDE.

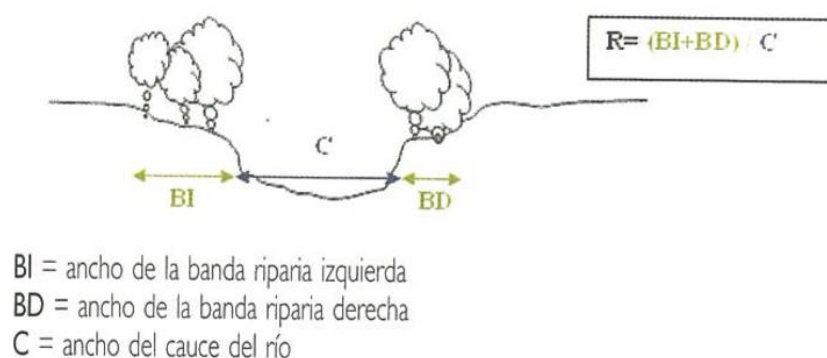


Figura 9. Esquema que muestra el procedimiento llevado a cabo para calcular la relación entre la anchura de la franja riparia y el cauce activo. Tomado de Fernández de Sevilla *et al.* (2008).

C) Pendientes transversales de la orilla a la llanura de inundación

A partir del MDE y los límites del cauce se calcularon las cotas de los límites de la franja riparia. Posteriormente, se obtienen las coordenadas de los puntos de intersección del perfil con los límites de la franja riparia y el límite del cauce, y se calcula la pendiente.

D) Medición de la profundidad del “*bankfull*”, anchura y su relación

Se ha calculado la anchura de cada perfil del “*bankfull*” y su profundidad para luego calcular su relación (Figura 10) de acuerdo con el índice propuesto por Fernández de Sevilla *et al.* (2008). Estos datos han sido obtenidos a partir de los resultados que proporciona la herramienta “*River Bathymetry Toolkit*” (Boise Aquatic Sciences Lab, 2019).

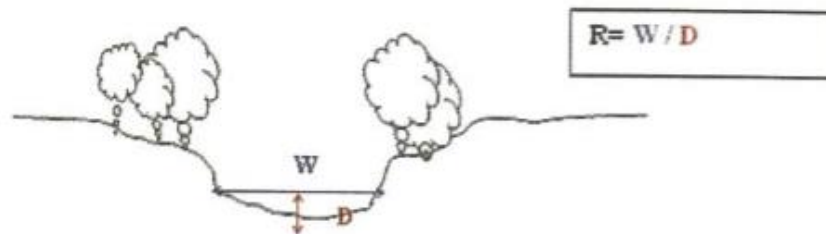


Figura 10. Esquema que muestra el procedimiento llevado a cabo para calcular la relación entre la anchura y profundidad del “bankfull”. Tomado de Fernández de Sevilla *et al.* (2008).

E) Cálculo de pendientes longitudinales a nivel de “thalweg”

Se ha establecido el nivel del “thalweg” a partir del MDE. Para ello se han utilizado las herramientas de “Hidrology” de “ArcToolbox”. Se calcula en primer lugar la dirección de flujo de cada celda del ráster, se rellenan los sumideros del MDE con el fin de corregir posibles errores en la interpolación y finalmente se calcula el flujo acumulado. Este flujo da como resultado la red hidrográfica y muestra el nivel de “thalweg” en formato ráster del tramo de río Ebro que posteriormente se convierte en formato vectorial.

4.4. Caracterización de la vegetación riparia

4.4.1. Valoración mediante el índice RFV

Una vez realizada la caracterización geomorfológica del cauce el objetivo es analizar el estado de la vegetación de ribera del tramo en estudio. Los criterios seguidos están basados en el índice RFV, propuesto por Magdaleno *et al.* (2010). Este índice está basado en la valoración de la continuidad longitudinal, transversal y vertical del bosque de ribera de los ríos permanentes a partir de unas tablas de valoración (Tablas 5 y 6) basadas en el cubrimiento del dosel vegetal. Según Magdaleno *et al.* (2010), es el régimen hidrológico el factor que condiciona en mayor medida los atributos geomorfológicos de un sistema fluvial, quedando esto patente en la relación que se establece entre el caudal dominante y la anchura del “bankfull”. Es por ello que Magdaleno *et al.* (2010) consideran la anchura media del “bankfull” a la hora de aplicar de este índice.

Tabla 5. Valoración de la continuidad longitudinal y transversal. Adaptado de Magdaleno *et al.* (2010).

Estado	Puntuación	Porcentaje de cubrimiento de la vegetación
Excelente	5	> 90 %
Bueno	4	70-90 %
Moderado	3	50-70 %
Deficiente	2	30-50 %
Malo	1	< 30 %

Tabla 6. Valoración de la continuidad vertical. Adaptado de Magdaleno *et al.* (2010).

Estado	Puntuación	Descripción
Excelente	5	Bosques muy densos con sotobosque variado
Bueno	4	Bosques densos con sotobosque poco variado
Moderado	3	Bosques claros con escaso sotobosque
Deficiente	2	Bosques muy claros y sin apenas sotobosque
Malo	1	Pies aislados

Como se puede observar en la Tabla 5, al tratarse de criterios de valoración basados en una componente estructural de la vegetación, el análisis mediante datos LiDAR permite realizar el trabajo desde gabinete, ahorrando costes económicos y disminuyendo el trabajo de campo.

A continuación se detalla la metodología llevada a cabo para la caracterización estructural del bosque de ribera a partir de este índice RFV.

A) Valoración de la continuidad longitudinal del bosque de ribera

La continuidad longitudinal indica la conexión de la vegetación leñosa a lo largo del corredor ribereño (MAPAMA, 2017). Se ha utilizado el porcentaje de cubrimiento extraído de los datos LiDAR. Dicho porcentaje de cubrimiento se ha desglosado tanto para el estrato arbóreo como para el estrato arbustivo con el objetivo de realizar un análisis más exhaustivo.

B) Valoración de la continuidad transversal del bosque de ribera

La continuidad transversal evalúa la conexión de la vegetación leñosa a lo largo del eje perpendicular al cauce fluvial (MAPAMA, 2017). La continuidad transversal se ha estudiado a lo largo de 14 transectos diferentes con una anchura de 10 m (se ha considerado una anchura suficiente para recoger la variabilidad de la vegetación dentro de cada transecto), separados entre sí aproximadamente 500 m, ya que es lo que establece como norma el índice RFV tras conocer la anchura media del “*bankfull*”. Al igual que en el caso anterior, se utiliza el porcentaje de cubrimiento de cada transecto, obteniendo como resultado final el valor medio de cubrimiento del dosel vegetal de cada uno de ellos.

C) Valoración de la continuidad vertical del bosque de ribera

La continuidad vertical permite analizar las relaciones existentes entre los diferentes estratos de la formación vegetal (MAPAMA, 2017). Se han utilizado los mismos transectos que en caso anterior. Para ello, además del porcentaje de cubrimiento, se ha analizado la distribución de las alturas de los retornos láser mediante los percentiles 25, 50, 75 y 95. Asimismo, se han extraído perfiles 3D de cada uno de los transectos a partir del software “*Global Mapper 20*”, que permiten visualizar la nube de puntos de cada uno de ellos.

4.4.2. Análisis de las diferencias estructurales entre orillas cóncavas y convexas

El objetivo de este tratamiento de los datos LiDAR es encontrar una o varias variables estadísticas (métricas) que ayuden a caracterizar las diferencias estructurales de la vegetación entre orillas cóncavas (activas o erosivas) y orillas convexas (inactivas o sedimentarias). El tratamiento estadístico se ha llevado a cabo con el software “*SPSS Statistics 20*”.

A partir de las métricas descritas en la Tabla 2, se han seleccionado de manera aleatoria 150 píxeles para cada tipo de orilla con el objetivo de que sea un análisis equitativo, ya que la muestra es mucho mayor en las orillas convexas que en las orillas cóncavas. Todos estos píxeles escogidos se encuentran dentro de los transectos transversales utilizados para la caracterización de la vegetación de ribera mediante el índice RFV.

A continuación se ha utilizado el test de normalidad de “*Shapiro Wilk*” para determinar si la muestra presenta una distribución normal. Dado que los datos no eran normales, se aplicó la prueba no paramétrica de la “*U de Mann Whitney*”, para saber si existen diferencias significativas entre las orillas cóncavas y las convexas (Rivas-Ruiz *et al.*, 2013).

4.4.3. Obtención de la cartografía de la vegetación de ribera

La clasificación digital supervisada de una imagen es el proceso a partir del cual a cada elemento de la imagen se le asigna una categoría o clase informacional, basándose en las áreas de entrenamiento (Borràs *et al.*, 2017) que se han definido previamente a partir del trabajo de campo o del conocimiento previo de la zona a clasificar. El objetivo de esta clasificación digital es realizar una cartografía en la cual se diferencien las coberturas del suelo del tramo estudiado, haciendo especial hincapié en la identificación de especies exóticas invasoras como el caso de la especie *Arundo donax*, vulgarmente cono-

cida como caña, que ha colonizado las riberas de numerosos ríos mediterráneos con efectos negativos en la biodiversidad (Bruno *et al.*, 2019).

Para la realización de esta clasificación se han combinado las bandas procedentes de la imagen Sentinel-2 con resolución espacial de 10 m, los índices de vegetación explicados en la Tabla 4 y las métricas extraídas de los datos LiDAR (Tabla 2).

El método elegido para la realización de la clasificación digital ha sido “*Random Forest*” (Breiman, 2001), que es de tipo no paramétrico (Cánovas-García *et al.*, 2016), ya que no es necesario que las variables tengan una distribución normal. Además, este método de clasificación digital utiliza árboles de decisión, donde cada clasificador contribuye con un voto para la asignación de la clase más frecuente (Del Toro, 2015). Se trata de una técnica de clasificación ideal para trabajar con una gran cantidad de datos y variables, ya que para elaborar cada árbol selecciona submuestras (Medina y Nique, 2017). En este caso la clasificación digital se ha realizado con el software “*RStudio*” utilizando el paquete “*randomForest*” (Liaw y Wiener, 2002). Además de este paquete se han utilizado los paquetes “*rgdal*” y “*raster*”. El primero de ellos permite leer los archivos vectoriales con las localizaciones de los píxeles de entrenamiento, mientras que el segundo permite cargar los archivos en formato ráster.

En primer lugar, a la hora de abordar una clasificación digital hay que analizar la zona de estudio con el objetivo de determinar cuáles van a ser las categorías informacionales que se pretenden identificar. Como se observa en la Tabla 7, se han establecido seis categorías. La categoría 2 es la más compleja ya que engloba un abanico de cuatro especies diferentes. Se ha considerado necesario agrupar estas especies en una sola categoría debido a la imposibilidad de diferenciar entre éstas con los medios utilizados en el trabajo (el tamaño de pixel de 10 m es demasiado grande como para diferenciar estas especies de gran similitud en cuanto a respuesta espectral y estructura).

Tabla 7. Categorías informacionales elegidas para la clasificación digital.

Identificador	Categoría informacional
1	Suelo desnudo (generalmente barras de grava)
2	Populus (<i>Populus alba</i> y <i>Populus nigra</i>) como especie dominante, acompañado de fresnos (<i>Fraxinus angustifolia</i>) y sauces (<i>Salix alba</i>) en menor medida.
3	Herbáceas
4	Caña (<i>Arundo donax</i>)
5	Agua
6	Tamarizales (<i>Tamarix gallica</i> y <i>Tamarix africana</i>)

Tras la elección de las categorías informacionales se han seleccionado puntos de entrenamiento en gabinete para las categorías informacionales que no presentan duda (1, 3, 4 y 5). Posteriormente se realizó trabajo de campo en el mes de febrero con el objetivo de tomar puntos con un equipo GNSS Leica Viva GS15 para georreferenciar las diferentes especies que se pretendían identificar, delimitando parcelas de entrenamiento de 15 m de radio en torno al punto tomado con el equipo GNSS. En el mes de julio se realizó otra salida de campo con el fin de seguir tomando puntos de entrenamiento, en este caso con la aplicación para Android “Mapas de España” del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Una vez seleccionados todos los puntos (un total de 466) se dividió la muestra en dos partes: puntos de entrenamiento (356 píxeles) y puntos de validación (110 píxeles) para comprobar los resultados de la clasificación y realizar la validación. Dicha validación se realizó mediante la tasa de error OOB (“*Out Of the Bag*”), la tasa de error “*test*”, el coeficiente “*Kappa de Cohen*” y las matrices de confusión. Además se calculó la importancia de cada una de las variables que forman parte del modelo de clasificación.

La tasa de error OOB permite estimar el error insesgado de la clasificación. En el proceso que utiliza “*Random Forest*” se deja aproximadamente un tercio de los casos de la muestra para la valida-

ción, es decir, no participan en el modelo. Este tercio de la muestra es conocido como OOB (Medina y Ñique, 2017). Por otra parte, la tasa de error “*test*” es la que se calcula a partir de los puntos de validación establecidos previamente.

El coeficiente “*Kappa de Cohen*” fue desarrollado por Cohen (1960) con el objetivo de medir el grado de concordancia de métodos cuyo resultado es categórico. Este índice representa la proporción de acuerdos observados respecto del máximo acuerdo posible más allá del azar (Borràs *et al.*, 2017). Los valores están comprendidos entre 0 y 1, siendo el valor de 1 la mayor concordancia.

En la matriz de confusión se registran los valores predichos por el modelo (filas) frente a los observados (columnas). Se obtienen dos matrices de confusión, una con los puntos OOB y una segunda con los puntos de validación.

Finalmente se obtiene el “*Mean Decrease Accuracy*” (MDA) y el “*Mean Decrease Gini*” (MDG) que permiten conocer la importancia de cada una de las variables utilizadas en el modelo.

5. RESULTADOS

5.1. Morfología del cauce

En la Figura 11 se muestra tanto el perímetro del “*bankfull*” como el nivel de “*thalweg*”. En conjunto, la anchura media del “*bankfull*” en el tramo de estudio es de 200 m, lo que ha permitido determinar el número y separación de los transectos para la valoración de la continuidad estructural de la vegetación de acuerdo con Magdaleno *et al.* (2010). Finalmente se ha trabajado con 14 transectos (7 en cada margen), separados entre sí aproximadamente 500 m y cuya anchura es de 10 m (véase Figura 11).

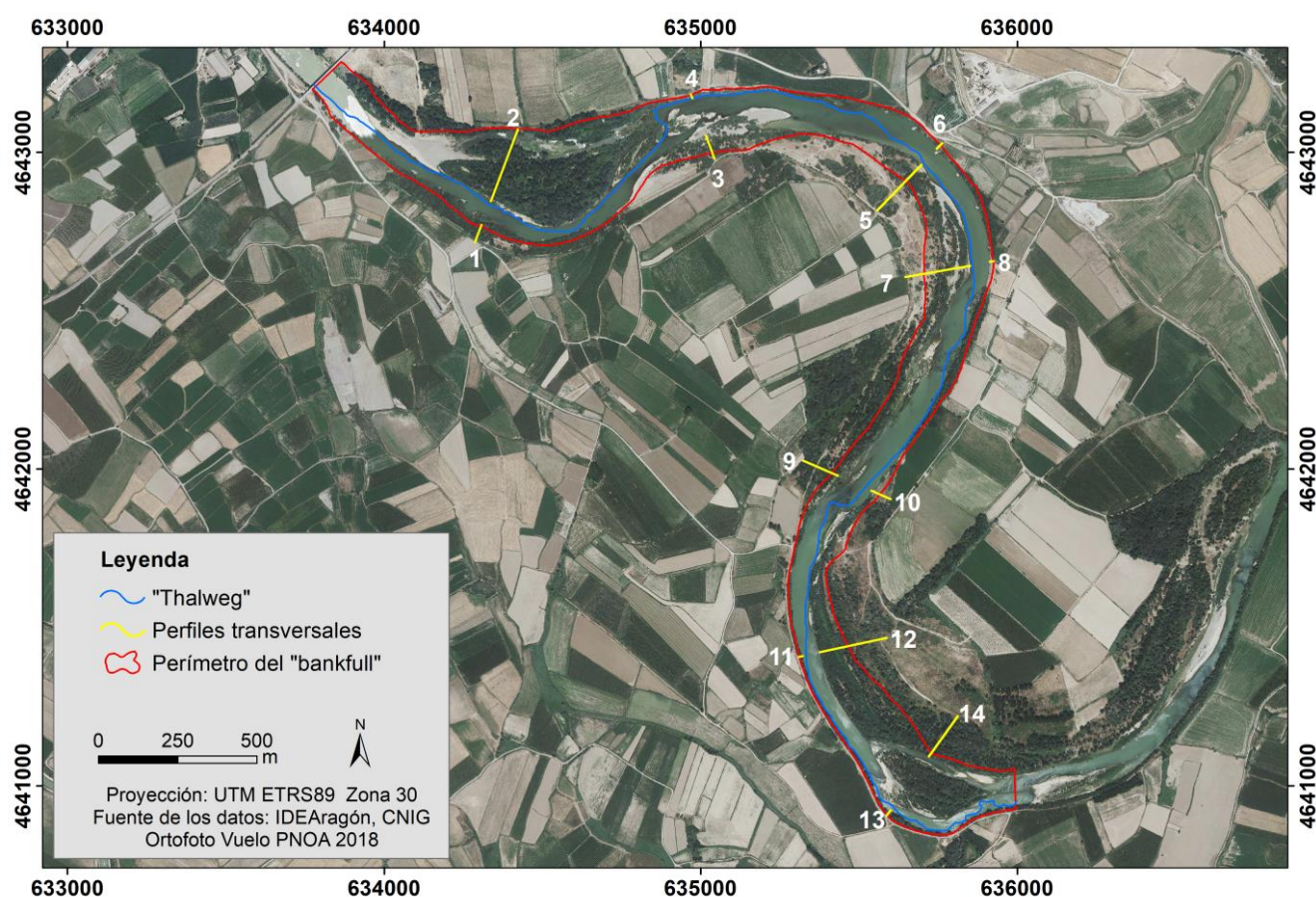


Figura 11. Perímetro del “*bankfull*”, “*thalweg*” y perfiles transversales.

En la Tabla 8 se muestra la relación entre la anchura de la banda riparia y la anchura del cauce. Se observan ratios elevados en los transectos 1-2 y 11-12, coincidiendo con zonas donde la franja de la

orilla sedimentaria o convexa se encuentra muy desarrollada, mientras que en transectos como el 3-4 o el 9-10 los valores de la ratio son bajos, siendo zonas de estrechamiento del cauce y una franja riparia poco desarrollada, debido principalmente a la presencia de motas que impiden el desarrollo transversal de la vegetación.

Tabla 8. Relación de anchura del cauce con la anchura de las franjas riparias.

Transecto	Anchura banda izquierda (BI) (m)	Anchura banda derecha (BD) (m)	BI+BD (m)	Anchura cauce (m)	Ratio
1 - 2	241	58,22	299,22	80	3,74
3 - 4	13,15	78	91,15	124	0,74
5 - 6	24,83	201	225,83	69	3,27
7 - 8	12	207,05	219,05	63	3,48
9 - 10	66	121	187	116	1,61
11 - 12	216	14	230	54	4,26
13 - 14	157	21	178	210	0,85

En la Tabla 9 se muestra la pendiente transversal de cada transecto desde la orilla a la llanura de inundación. Se puede observar la existencia de una clara relación entre elevadas pendientes y orillas cóncavas con escaso desarrollo de la vegetación, mientras que en el caso de las orillas convexas la pendiente es mucho menor, lo que permite un mayor desarrollo de la vegetación.

Tabla 9. Pendientes transversales de la orilla a la llanura de inundación.

Transecto	Cota de inicio (m)	Cota final (m)	Diferencia entre cotas (m)	Distancia horizontal (m)	Pendiente (%)
1	229,18	233,50	4,31	58,22	7,40
2	228,95	233,09	4,14	241	1,72
3	230,03	235,58	5,51	78	7,07
4	227,38	232,98	5,60	13,15	42,57
5	228,58	232,53	3,94	201	1,96
6	228,55	234,80	6,25	24,83	25,17
7	228,66	233,97	5,30	207,05	2,56
8	228,35	234,25	5,90	12	49,13
9	229,47	233,01	3,54	121	2,92
10	227,24	232,61	5,36	66	8,13
11	226,91	234,51	7,59	14	54,23
12	227,72	231,21	3,49	216	1,61
13	226,31	233,56	7,25	21	34,53
14	227,02	231,35	4,33	157	2,76

En la Tabla 10 se muestra la ratio entre la anchura y profundidad del “*bankfull*”. Se observa una ratio especialmente elevada en los transectos 1-2 y 13-14, coincidiendo con las dos zonas de mayor anchura donde en ambos casos existe un canal secundario.

Tabla 10. Relación anchura-profundidad del “bankfull”.

Transecto	Anchura (m)	Profundidad máxima (m)	Ratio
1 - 2	323,09	5,83	55,44
3 - 4	194,79	6,09	31,97
5 - 6	154,75	6,73	22,98
7 - 8	220,54	5,88	37,52
9 - 10	162,77	5,17	31,49
11 - 12	159,41	5,31	30,02
13 - 14	235,61	5,31	44,40

En las Figuras 12 y 13 aparecen los perfiles topobatimétricos del “bankfull”. En ambas figuras aparece en color azul la extensión del “bankfull”, pudiéndose observar su topografía. Se han mostrado los perfiles de los transectos 1-2 y 7-8, debiéndose su elección a las diferentes características de cada uno tanto en anchura del “bankfull” como en distribución de la vegetación. El resto de perfiles se muestran en la Parte III del Anexo.

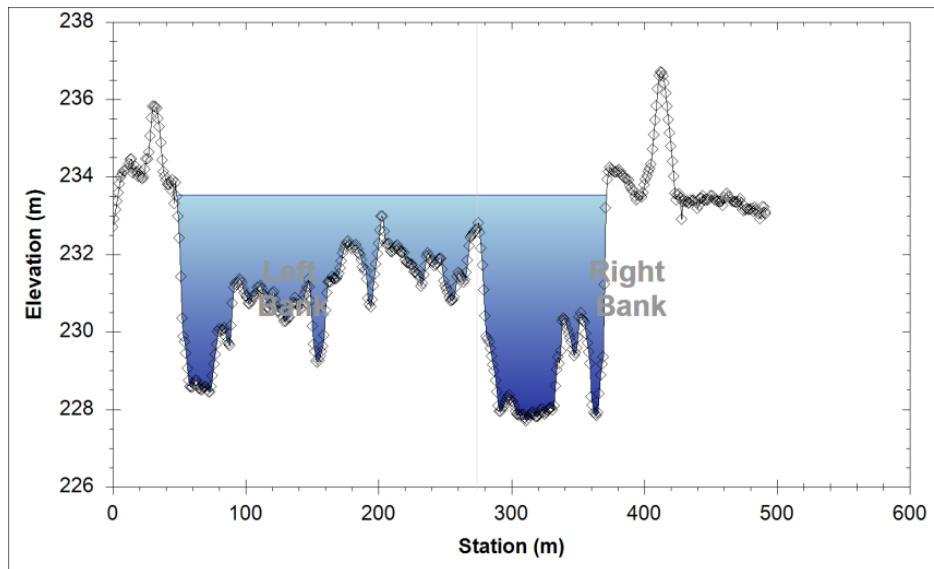


Figura 12. Perfil topobatimétrico del “bankfull” del transecto 1-2.

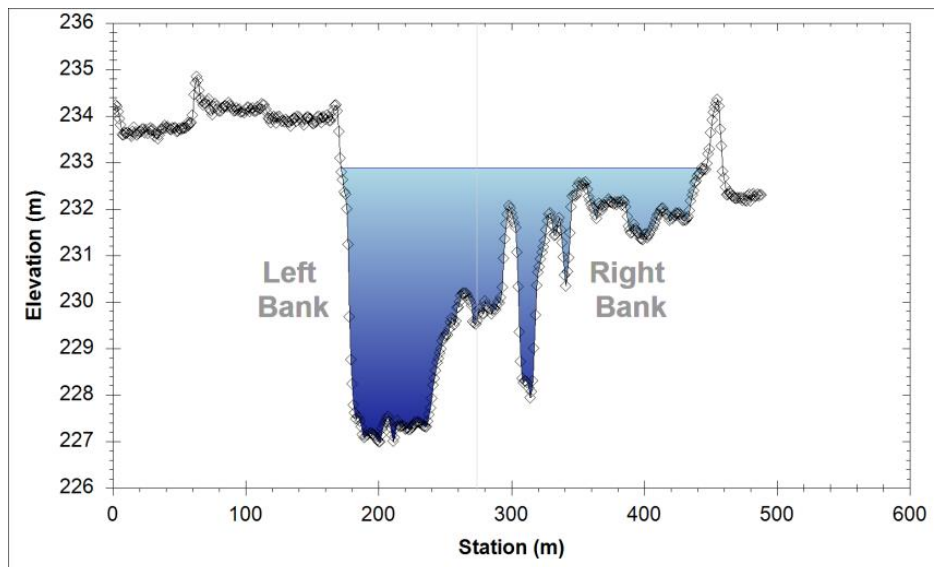


Figura 13. Perfil topobatimétrico del “bankfull” del transecto 7-8.

El último parámetro a estudiar es la pendiente longitudinal del cauce a nivel de vaguada o “thalweg”. La pendiente media es de 0,036 %, lo que supone un valor muy bajo. El resultado gráfico se muestra en la Figura 14.

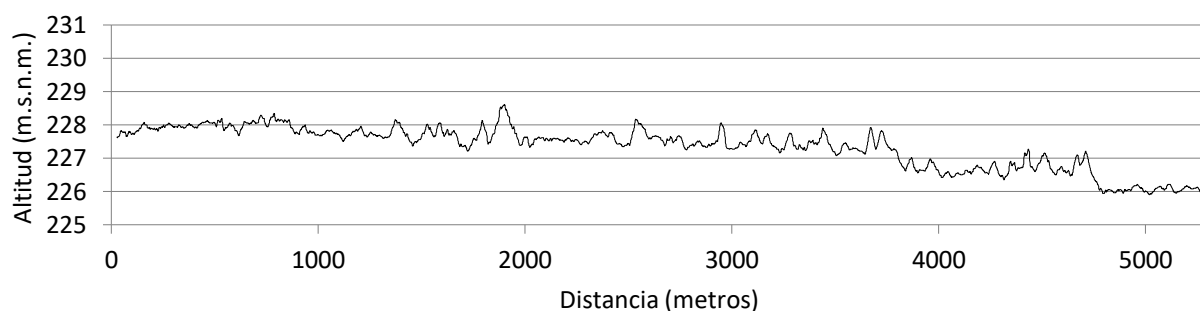


Figura 14. Pendiente longitudinal del “thalweg”. Se ha aplicado un filtro de media móvil de 30 datos.

5.2. Caracterización de la vegetación riparia

La vegetación de ribera ha sido estudiada siguiendo las pautas marcadas por el índice RFV. Por ello se ha analizado la continuidad longitudinal, transversal y vertical del bosque de ribera a partir del porcentaje de cubrimiento y la distribución de las alturas de los retornos láser.

5.2.1. Estado de la vegetación de ribera mediante el índice RFV

A) Continuidad longitudinal

Las Figuras 15 y 16 muestran el porcentaje de cubrimiento de los estratos arbustivo y arbóreo del tramo de estudio. A tenor de estos resultados obtenidos, el tramo presenta una formación de matorral denso con arbolado, ya que el 54,28 % está ocupado por arbustos leñosos y el 38,00 % está cubierto por árboles. Teniendo en cuenta ambos estratos, se obtiene un porcentaje de cubrimiento del 66,36 % (Figura 17), que según el índice RFV implica un estado moderado.

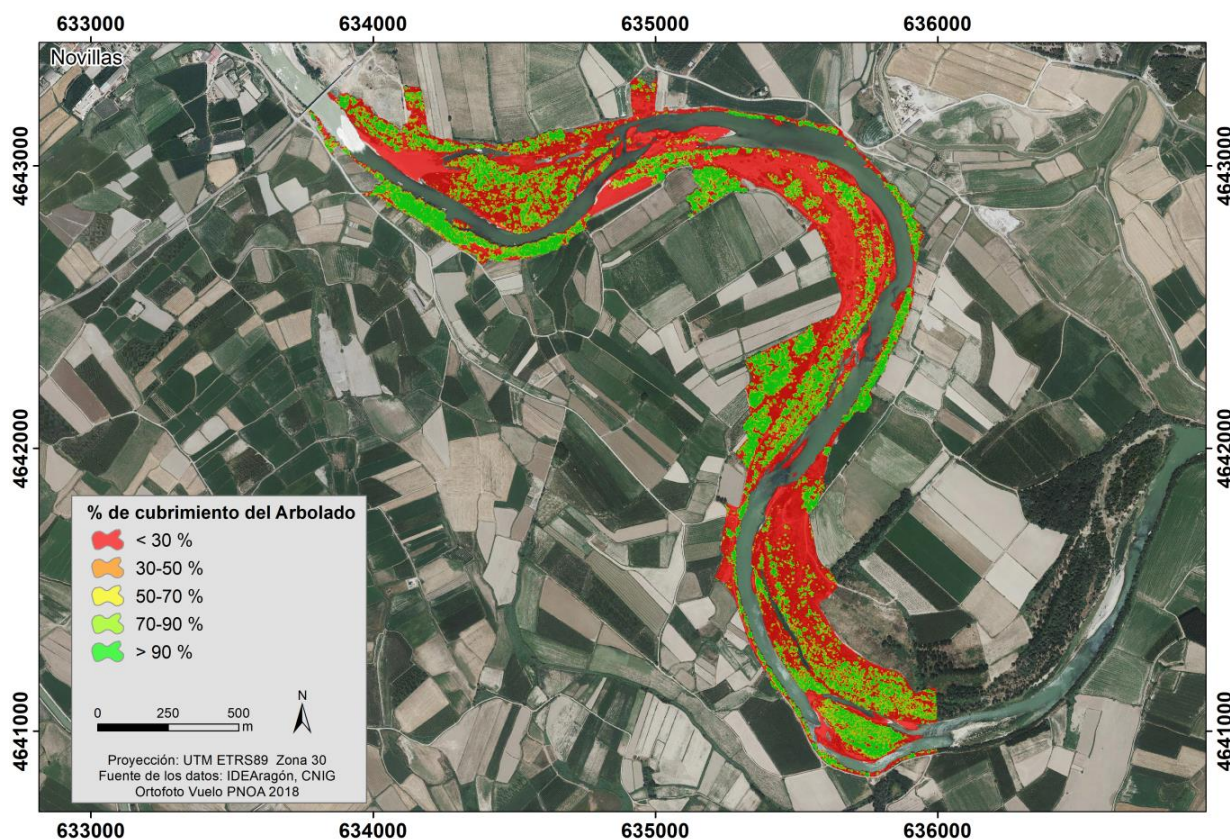


Figura 15. Porcentaje de cubrimiento del estrato arbóreo.

En cuanto al mayor porcentaje de arbolado destaca el tramo de la margen derecha aguas abajo de Novillas. Se observan otras zonas con abundancia de arbolado, especialmente a mitad del tramo estudiado en la margen derecha y en la parte final del tramo. En cuanto al estrato arbustivo, en la margen izquierda aguas abajo del puente de Novillas es donde más abunda, debido principalmente a que es una zona inundada periódicamente por las crecidas ordinarias y extraordinarias del río y por lo tanto el desarrollo del estrato arbóreo es menor.

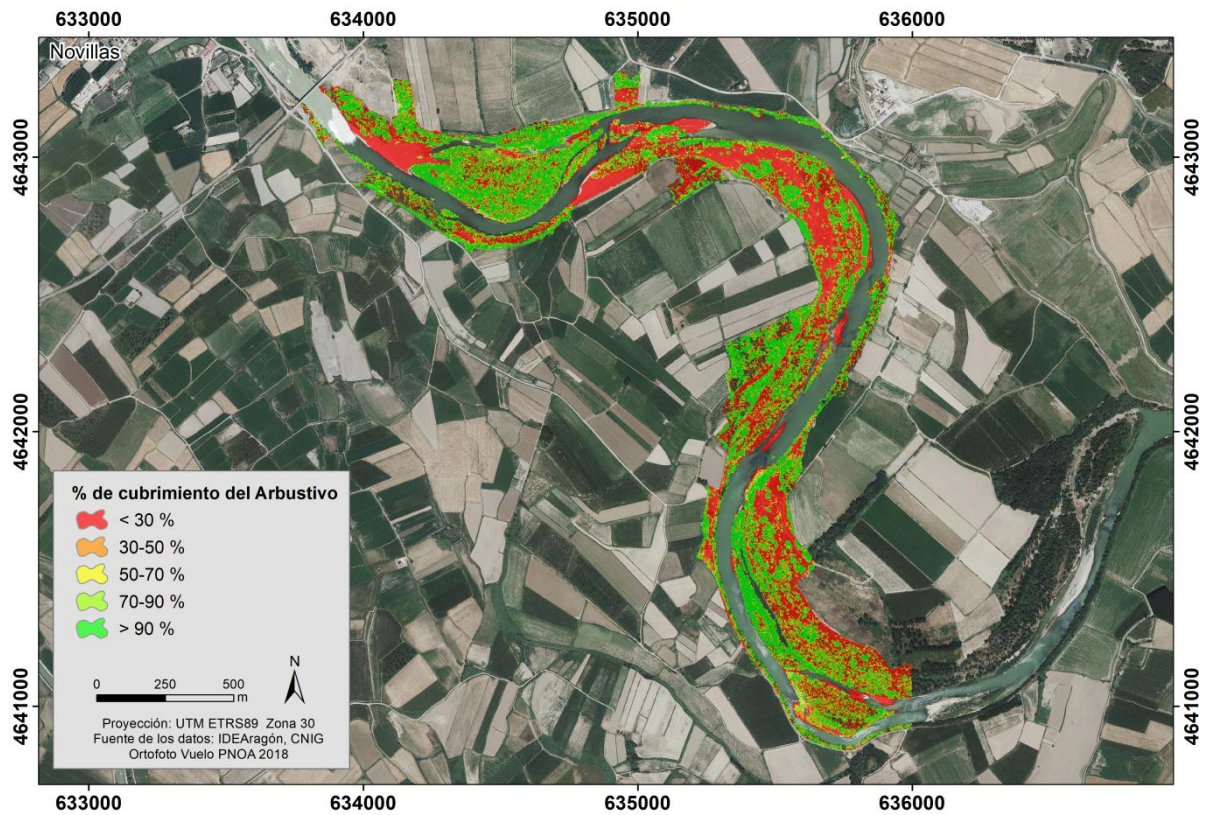


Figura 16. Porcentaje de cubrimiento del estrato arbustivo.

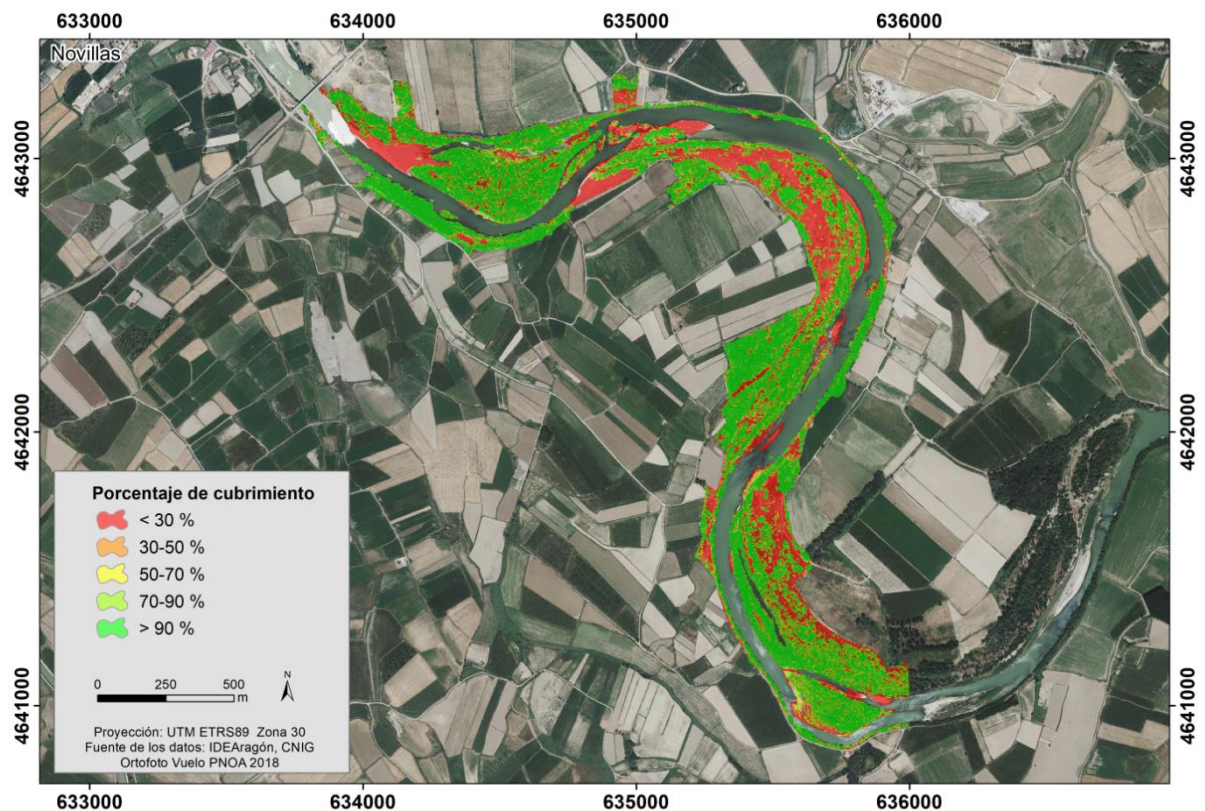


Figura 17. Porcentaje total de cubrimiento vegetal.

B) Continuidad transversal

En la Tabla 11 se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los transectos. Como se puede observar, solo los transectos 1, 2 y 11 presentan una continuidad excelente, coincidiendo con formaciones maduras del bosque ripario. En la situación opuesta destacan los transectos 7 y 8 con una calidad deficiente y mala, respectivamente. En general, puede afirmarse que la mayoría de los transectos analizados cuentan con una calidad transversal moderada y buena. El promedio de puntuaciones para el tramo estudiado es de 4 puntos, y por lo tanto el estado es bueno.

Tabla 11. Valoración de la continuidad transversal de los transectos.

Transecto	Cubrimiento vegetal (%)	Puntuación (RFV)	Estado
1	96,51	5	Excelente
2	91,04	5	Excelente
3	70,51	4	Bueno
4	73,65	4	Bueno
5	57,32	3	Moderado
6	64,20	3	Moderado
7	30,71	2	Deficiente
8	27,47	1	Malo
9	88,13	4	Bueno
10	55,40	3	Moderado
11	92,17	5	Excelente
12	59,60	3	Moderado
13	86,45	4	Bueno
14	77,11	4	Bueno

C) Continuidad vertical

Para la caracterización de la continuidad vertical, además del porcentaje de cubrimiento y los percentiles, se han analizado los perfiles de la nube de puntos normalizada (Figuras 18 y 19). Como se puede observar en la Tabla 12, los resultados indican que los transectos situados en orillas más estabilizadas (4, 6 y 8) presentan una baja continuidad vertical, especialmente debido a la escasa presencia de arbolado y a una elevada pendiente topográfica. De hecho, el valor del percentil 75 en todos ellos no alcanza los 2,5 m de altura. Por otra parte, destacan los transectos 5 y 7, situados en orillas estables, que presentan valores deficientes por una posible desconexión con el freático que limita el desarrollo de la vegetación de mayor porte. El promedio de puntuaciones para el tramo estudiado sería de 2,5 y por lo tanto el estado se considera moderado-deficiente.

Tabla 12. Valoración de la continuidad vertical de los transectos.

Transecto	Cubrimiento vegetal (%)	Percentil 25 (m)	Percentil 50 (m)	Percentil 75 (m)	Percentil 95 (m)	Puntuación (RFV)	Estado
1	96,51	9,13	13,72	16,06	18,10	5	Excelente
2	91,04	5,23	8,40	10,15	11,80	4	Bueno
3	70,51	2,78	4,39	5,94	7,67	3	Moderado
4	73,65	0,91	1,67	2,32	3,33	1	Malo

Transecto	Cubrimiento vegetal (%)	Percentil 25 (m)	Percentil 50 (m)	Percentil 75 (m)	Percentil 95 (m)	Puntuación (RFV)	Estado
5	57,32	2,35	3,60	4,55	5,61	2	Deficiente
6	64,20	0,88	1,23	1,81	2,37	1	Malo
7	30,71	1,26	2,26	3,01	3,74	2	Deficiente
8	27,47	0,06	0,22	0,46	0,93	1	Malo
9	88,13	6,09	8,57	10,12	11,69	4	Bueno
10	55,40	0,47	0,77	1,17	1,72	1	Malo
11	92,17	4,13	5,30	6,32	7,87	3	Moderado
12	59,60	1,70	2,60	3,67	4,71	2	Deficiente
13	86,45	1,88	6,47	9,19	10,85	3	Moderado
14	77,11	2,32	5,66	7,95	10,22	3	Moderado

Las Figuras 18 y 19 muestran dos ejemplos del perfil trazado sobre la nube de puntos normalizada con objeto de analizar y validar visualmente la continuidad vertical del bosque situado en los transectos 1 y 7. Según el índice RFV el transecto 1 presenta una calidad excelente, con un bosque denso y con abundante sotobosque (96,51% de cubrimiento vegetal y un percentil 50 de 13,72 m). Por el contrario, contrasta con el transecto 7 que tiene una calidad deficiente, con un bosque claro y un sotobosque escaso (30,71 % de cubrimiento vegetal y un percentil 50 de 2,26 m). Las nubes de puntos del resto de los transectos se muestran en la Parte II del Anexo.

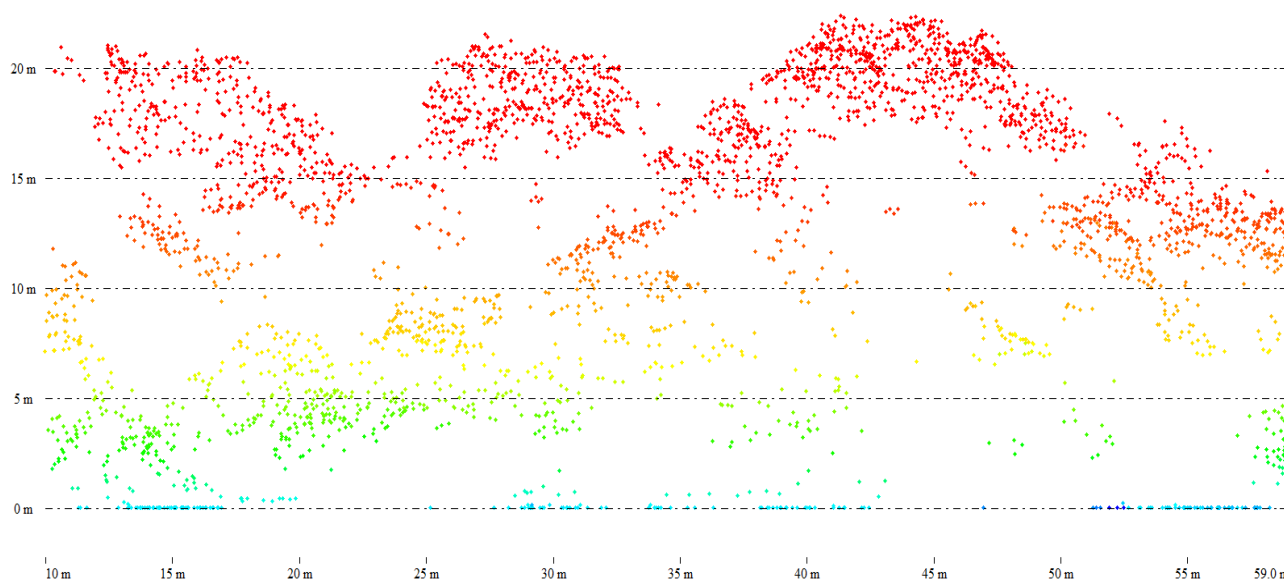


Figura 18. Nube de puntos del transecto 1.

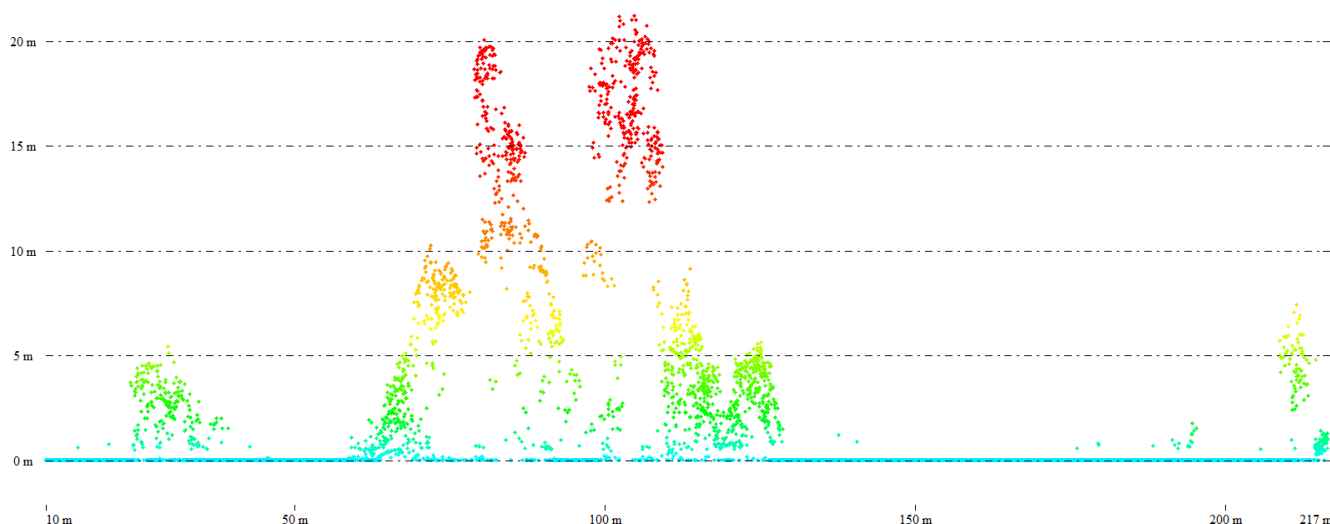


Figura 19. Nube de puntos del transecto 7.

Tras analizar la calidad estructural de la vegetación de ribera del tramo de estudio se puede concluir que no presenta problemas de continuidad graves excepto algunas zonas concretas, especialmente debido a la presencia de motas que impiden el desarrollo de la vegetación y la desconexión con el freático que también impide el desarrollo de ésta. Por lo tanto, se llega al resultado final de que la continuidad longitudinal presenta un estado moderado, la continuidad transversal tiene un estado bueno y la continuidad vertical un estado moderado-deficiente.

5.2.2. Estudio de las diferencias estructurales entre orillas cóncavas y convexas

En la Tabla 13 se muestran los resultados tras la aplicación del test de normalidad de “*Shapiro-Wilk*”. La única variable que presenta una distribución normal es el porcentaje de primeros retornos por encima de la media en las orillas convexas, ya que el p -valor supera 0,05. Al tratarse de una única variable con distribución normal se ha optado por prescindir de este estadístico para la realización del análisis. Por consiguiente, se ha empleado un total de doce métricas LiDAR.

Tabla 13. Resultados del test de normalidad de “*Shapiro-Wilk*”.

Métrica	Orilla	Significación (p)
Altura media	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Coeficiente de variación	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Porcentaje de cubrimiento	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Porcentaje de primeros retornos por encima de la media	Cóncava	0,019
	Convexa	0,072
Porcentaje de retornos por encima de la media	Cóncava	0,001
	Convexa	0,001
Porcentaje de retornos por encima de la altura de corte	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Percentil 25	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000

Métrica	Orilla	Significación (p)
Percentil 50	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Percentil 75	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Percentil95	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Desviación estándar	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Curtosis	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000
Asimetría	Cóncava	0,000
	Convexa	0,000

Como se está trabajando con datos cuya distribución no es normal se ha realizado la prueba de la “*U de Mann-Whitney*”. Como se puede observar en la Tabla 14, la mayor parte de las métricas presentan *p*-valores inferiores a 0,05 y por lo tanto se puede afirmar que existen diferencias estructurales de la vegetación significativas entre las orillas cóncavas y las convexas. Concretamente, destacan las métricas del coeficiente de variación, la desviación estándar, el porcentaje de cubrimiento, y los percentiles 95 y 75 como buenos descriptores de esas diferencias entre orillas.

Tabla 14. Resultados obtenidos con la prueba “*U de Mann-Whitney*”.

Estadístico	“ <i>U de Mann-Whitney</i> ”	Significación (p-valor)
Altura media	8530	0,000
Coeficiente de variación	9483	0,019
Porcentaje de cubrimiento	8680,5	0,001
Porcentaje de retornos por encima de la media	10618	0,400
Porcentaje de retornos por encima de la altura de corte (0,5 m)	8510,5	0,000
Percentil 25	8234	0,000
Percentil 50	8325	0,000
Percentil 75	8635	0,000
Percentil95	8635	0,000
Desviación estándar	9610,5	0,029
Curtosis	10781,5	0,533
Asimetría	10781,5	0,533

5.2.3. Cartografía de la vegetación de ribera

Finalmente se ha obtenido la cartografía de la zona ribereña tras la utilización del método de clasificación “*Random Forest*”. El multibanda que se ha utilizado ha sido compuesto por las bandas ópticas de Sentinel-2 de 10 m de resolución espacial, los índices de vegetación NDVI, GNDVI y SAVI y

las métricas LiDAR que han resultado significativas para diferenciar la estructura de la vegetación entre orillas cóncavas y convexas (Tabla 14).

El resultado obtenido es el que se muestra en la Figura 20. Se observa la dominancia de la categoría 2 (choperas, fresnedas y saucedas), ocupando prácticamente la mitad de la superficie de la zona estudiada. En estas zonas destaca principalmente la presencia de las especies *Populus alba* y *Populus nigra*, acompañadas en menor medida por *Fraxinus angustifolia*, todas ellas generalmente en el estrato arbóreo, y la especie *Salix alba* de manera muy individualizada y poco desarrollada ocupando el estrato arbustivo. Estas observaciones se han podido realizar gracias al trabajo de campo llevado a cabo durante la toma de puntos de entrenamiento.

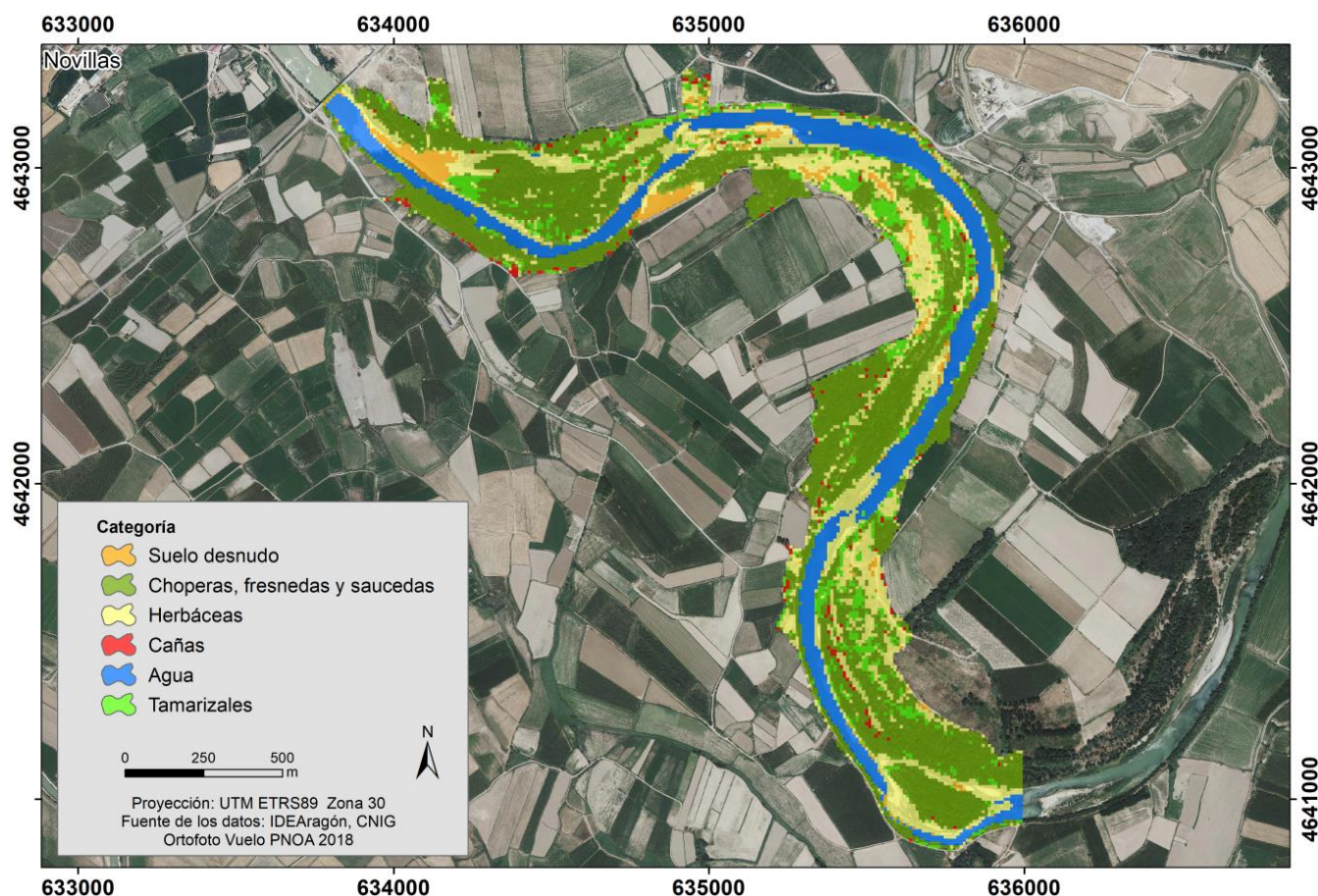


Figura 20. Cartografía de la zona de ribera.

En la Tabla 15 se muestra la ocupación de cada una de las categorías. La superficie estudiada es de 1,36 km², destacando la elevada presencia de choperas, fresnedas y saucedas como ya se ha comentado anteriormente, seguido de las herbáceas y de la lámina de agua. En cuanto a los tamarizales, el suelo desnudo (generalmente barras de grava) y las cañas, la superficie ocupada es mucho menor. Esas zonas de cañas se distribuyen de manera muy dispersa en el tramo estudiado, situándose en muchas ocasiones tras las choperas. En este sentido, es de gran importancia la localización de estas zonas de cañas con el objetivo de realizar actuaciones de restauración fluvial

Tabla 15. Ocupación de cada categoría en la zona de estudio.

Categoría	Área (km ²)	Porcentaje de la zona ribereña (%)
Suelo desnudo	0,054	3,95
Choperas, fresnedas y saucedas	0,638	47,01
Herbáceas	0,304	22,38
Cañas	0,017	1,25

Categoría	Área (km²)	Porcentaje de la zona ribereña (%)
Agua	0,233	17,19
Tamarizales	0,111	8,21

Respecto de la validación de la clasificación digital, la ratio de error OOB es del 7,02 %, arrojando lo que sería un buen resultado con una tasa de acierto de aproximadamente el 93 %. Se observa en la Tabla 16 como las categorías informacionales 3 y 5 (herbáceas y agua, respectivamente) son las que menor error presentan, mientras que las categorías 1 y 6 (suelo desnudo y tamarizales) son las que muestran mayor error, si bien es cierto que la tasa de error de estas dos últimas categorías sigue siendo muy baja.

Tabla 16. Matriz de confusión de la ratio de error OOB.

Categoría	1	2	3	4	5	6	Error
1- Suelo desnudo	21	1	3	0	0	0	0,16
2- Choperas, fresnedas y saucedas	0	70	3	0	0	6	0,11
3- Herbáceas	0	1	65	1	0	0	0,03
4- Cañas	0	1	0	25	0	2	0,11
5- Agua	0	0	0	0	104	0	0,00
6- Tamarizales	0	6	1	0	0	46	0,13

Por otra parte, la tasa de error “*test*” es de 8,18 %, algo más elevada que la OOB. En este caso destaca por encima del resto la categoría 4 (cañas) con error en el 26 % de los casos (Tabla 17). En este caso la confusión es con la categoría 2 (choperas, fresnedas y saucedas). Esta circunstancia puede deberse a que las zonas de cañas en muchas ocasiones se encuentran tras las zonas de choperas y por ello al trabajar con un tamaño de pixel de 10 m es posible que en ocasiones aparezcan pixeles que sean mezcla de ambas categorías informacionales. El valor obtenido con el coeficiente “*Kappa de Cohen*” es de 0,89. Según la clasificación de Landis y Koch (1977) este valor hace referencia a un grado de acuerdo casi perfecto.

Tabla 17 Matriz de confusión de la ratio de error “*test*”.

Categoría	1	2	3	4	5	6	Error
1- Suelo desnudo	11	1	0	0	0	0	0,08
2- Choperas, fresnedas y saucedas	0	23	0	0	0	2	0,08
3- Herbáceas	1	0	14	0	0	0	0,06
4- Cañas	0	3	1	11	0	0	0,26
5- Agua	0	0	0	0	33	0	0,00
6- Tamarizales	0	1	0	0	0	9	0,10

Finalmente en las Tablas 18 y 19 se muestra el grado de importancia de cada una de las bandas utilizadas. En ambos casos se aprecia la gran importancia del infrarrojo próximo y de los índices de vegetación, siendo de estos el NDVI el que menos importancia tiene de los tres utilizados. En cuanto a las métricas LiDAR, las de mayor importancia en ambos casos son el percentil 95 y la desviación estándar.

Tabla 18. “Mean Decrease Accuracy”.

Banda	“Mean Decrease Accuracy”
Infrarrojo próximo	0,118
GNDVI	0,113
SAVI	0,106
Percentil 95	0,095
Desviación estándar	0,088
NDVI	0,086
Verde	0,076
Percentil 75	0,070
Altura media	0,064
Azul	0,062
Percentil 50	0,051
Porcentaje de cubrimiento	0,032
Porcentaje de retornos por encima de la altura de corte	0,031
Percentil 25	0,025
Rojo	0,024
Coefficiente de variación	0,023
Porcentaje de primeros retornos por encima de la media	0,006

Tabla 19. “Mean Decrease Gini”.

Banda	“Mean Decrease Gini”
Infrarrojo próximo	30,822
SAVI	28,043
GNDVI	27,795
Desviación estándar	23,730
Percentil 95	22,734
NDVI	22,047
Verde	20,718
Percentil 75	18,658
Azul	15,706
Altura media	15,227
Percentil 50	13,128
Porcentaje de cubrimiento	9,935
Rojo	8,747
Porcentaje de retornos por encima de la altura de corte	8,479
Coefficiente de variación	8,438
Percentil 25	6,143
Porcentaje de primeros retornos por encima de la media	2,494

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La zona estudiada se enmarca dentro del tramo del Ebro de meandros libres, caracterizado por una gran homogeneidad en cuanto a su geomorfología, sus caudales y sus características paisajísticas (Ollero, 1996), de ahí que las metodologías aplicadas a lo largo de este trabajo puedan ser extrapolados a otras zonas del Ebro medio, e incluso a zonas de ribera de otros ríos peninsulares con características semejantes en cuanto a estructura de la vegetación o características geomorfológicas.

La aplicación de índices y la obtención de cartografía digital para la caracterización de las áreas de ribera son una tarea necesaria y útil para la adopción de medidas de restauración del ecosistema fluvial. En los últimos años han surgido nuevas tecnologías de teledetección como el LiDAR aerotransportado, que proporciona información sobre la topografía de la superficie terrestre (Heritage y Large, 2009). Dicha información tridimensional permite estudiar la geomorfología del cauce y la estructura de la vegetación, evitando o reduciendo en gran medida el intenso trabajo de campo que requieren dichos índices. Es el mismo caso el de las imágenes satelitales, especialmente desde el lanzamiento de los Sentinel-2 que permiten obtener de manera totalmente gratuita información espectral de la superficie terrestre con una destacable resolución espacial (10 m).

Magdaleno *et al.* (2010) y Martínez (2015) ya propusieron el uso del índice RFV a través del software “*RiC-DAR*” para automatizar el proceso de evaluación de la calidad del bosque ripario con datos LiDAR. Sin embargo, no se han encontrado experiencias sobre el uso de los datos LiDAR del PNOA, que son públicos y gratuitos, para caracterizar la geomorfología y la vegetación de forma automática en un entorno fluvial tan peculiar como es el sector medio del valle del Ebro. Por tanto, el presente trabajo constituye una aproximación inicial y pionera sobre el uso de los datos LiDAR-PNOA de alta densidad de puntos aplicados a la caracterización del corredor ribereño. De hecho, los resultados preliminares obtenidos fueron presentados mediante una comunicación oral en el III Congreso Ibérico de Restauración Fluvial celebrado en Murcia (Viar *et al.*, 2019).

Los resultados revelan que es posible caracterizar de forma eficiente las zonas de ribera, tanto su geomorfología como su vegetación. La metodología utilizada para la aplicación del índice RFV se considera extrapolable a otras zonas de ribera, siempre que el índice o el criterio empleado sea de carácter estructural (cubrimiento vegetal, densidad, altura, etc.). Hay que remarcar que la mayoría de cursos fluviales de la Península Ibérica son de características y dimensiones nada comparables con las del río Ebro y por ello surge la necesidad de adaptar estos índices para que puedan ser aplicados con los mismos criterios a todos los cursos fluviales, ya que a la hora de evaluar ríos complejos como el Ebro surgen mayores dificultades.

En cuanto a la geomorfología, los datos LiDAR permiten generar MDEs de elevada precisión (0,5 m en este caso) que unido a la capacidad de los datos LiDAR de penetrar en la lámina de agua hasta 3 m, posibilitan extraer perfiles topobatimétricos de gran precisión para obtener el nivel de “*bankfull*” y delimitar su perímetro.

En cuanto a la vegetación ribereña, la zona de estudio no presenta problemas de continuidad graves, salvo en el tramo 7-8 con una calidad mala-deficiente, pudiendo tratarse de una zona desconectada del nivel freático y por ello el escaso desarrollo de la vegetación. Cabe destacar que la continuidad transversal se ve afectada por la presencia de motas en ambas márgenes que impiden el crecimiento de la vegetación, por lo que sería oportuno estudiar la viabilidad de retranquear algunas de éstas con el fin de mejorar la calidad del bosque de ribera. Respecto de la continuidad vertical, sería conveniente diseñar criterios estructurales más precisos, por ejemplo, basados en rangos de valores de diversos percentiles y en el porcentaje de cubrimiento vegetal.

Puede plantearse un debate en torno a estos índices de valoración de la vegetación, ya que consideran el 100 % de cubrimiento vegetal como un estado excelente. Sin embargo, si se observan fotografías del vuelo americano de 1956, como la mostrada en la Figura 21A, aparecen grandes discontinuidades de la vegetación debido a la menor regulación del río, lo que propiciaba un mayor número de crecidas que impedían el asentamiento de la vegetación, al contrario que en la actualidad (Figura 21B).



Figura 21. Comparativa entre los años 1956 (izquierda) y 2018 (derecha).

Tras analizar los resultados estadísticos se puede concluir que es en las orillas cóncavas donde se produce un menor desarrollo de la vegetación, siendo uno de los factores que más influye la elevada pendiente de sus orillas. En cuanto a la diferenciación entre orillas cóncavas y convexas a partir de la estructura de la vegetación se encuentran algunos estadísticos derivados de los datos LiDAR que permiten esta diferenciación, tales como la altura media, el coeficiente de variación, el porcentaje de cubrimiento, el porcentaje de retornos por encima de la altura de corte, los percentiles 25, 50, 75 y 95 y la desviación estándar. Estos estadísticos podrían ser válidos para numerosas zonas de ribera del tramo medio del río Ebro debido a la gran homogeneidad que presenta el tramo en cuanto a estructura de la vegetación.

La cartografía de la zona ribereña obtenida mediante el clasificador “*Random Forest*” y la combinación de una imagen Sentinel-2 y datos LiDAR ofrece unos resultados satisfactorios, logrando el objetivo propuesto de cartografiar la zona ribereña e identificar zonas donde aparece la especie invasora *Arundo donax*. Si bien es cierto que no se ha podido hacer una diferenciación mayor entre especies, teniendo que realizar una agrupación de cuatro especies en la categoría informacional 2, este problema podría ser solucionado trabajando con una mayor resolución espacial que la ofrecida por Sentinel-2, pudiendo diferenciar entre especies identificando píxeles puros. De esta manera también se lograría un mayor número de píxeles de la especie *Arundo donax*, así como diferenciar entre choperas, fresnedas y saucedas.

Por otra parte, la combinación de datos LiDAR y una imagen Sentinel-2 permite cartografiar el corredor ribereño de manera mucho más precisa que si únicamente se utilizara la imagen óptica, ya que al combinar ambas, además de la información espectral se tiene información sobre la estructura de la vegetación. Durante la realización del trabajo se realizó una prueba con “*Random Forest*” utilizando tan solo las bandas ópticas y los índices de vegetación, obteniendo un error del 12 %, es decir, superior al 7-8 % que se obtiene con la combinación de óptico y LiDAR. Por lo tanto, la utilización de estos tipos de teledetección permiten caracterizar las zonas de ribera reduciendo de manera notable el trabajo de campo y los costes.

Tras la realización de este trabajo y la obtención de todos los resultados de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente se ha llegado a la conclusión final de que los datos LiDAR-PNOA proporcionados por la C.F. de Navarra con una densidad de 10 puntos/m² ofrecen unos resultados muy positivos para caracterizar la geomorfología y la vegetación riparia de un río de gran entidad como es el Ebro en su tramo medio. Sería de gran interés la continuación de estos trabajos aplicando esta misma metodología utilizando los datos LiDAR-PNOA de baja densidad de puntos (0,5-2 puntos/ m²) con el objetivo de comprobar si se obtienen resultados semejantes, lo que sería de gran utilidad ya que el resto de CC.AA. españolas tienen menor densidad de puntos que en el caso de la C.F. de Navarra.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la empresa TYPESA y especialmente a Pedro Boné Puyo la oportunidad que me dieron de realizar este trabajo proporcionándome todas las facilidades necesarias.

También me gustaría agradecerle al Grupo Geoforest del departamento de Geografía y Ordenación del Territorio su amabilidad por prestarme el equipo GNSS Leica Viva GS15 para la toma de puntos en campo.

Agradecer también a los profesores Fernando Pérez Cabello y Raquel Montorio Lloveria su disponibilidad para ayudarme en el proceso de clasificación digital para escoger el método más adecuado y proporcionarme la información necesaria.

Finalmente agradecerle a mi tutor del trabajo Antonio Luis Montealegre Gracia el darme la oportunidad de realizar este trabajo, guiándome en todo momento y mostrando su máxima disponibilidad a la hora de aclarar cualquier duda.

BIBLIOGRAFÍA

- Agència Catalana de l'Aigua (2006). Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos.
- Arizpe, D.; Almeida, M.H.; Baeza, D.; Bergmeier, E.; Bjorkland, R.H.; Bjorkland, R.; Brufao, P.; Campea, A.; Catita, D.; Chatzinikolaou, Y.; Cortes, R.; Décamps, H.; Dimopoulos, P.; Döring, M.; Duarte, M.C.; Economou, A.N.; Espirito-Santo, D.; Fabiao, A.; Faria, C.; Fernandes, R.; Fernández, J.A.; Ferreira, M.T.; Ferreirinha, J.C.; Freitas, C. y Frochot, B. (2008). Áreas de ribera sostenibles. Una guía para su gestión. Generalitat Valenciana.
- Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 33, pp. 110-117.
- Boise Aquatic Sciences Lab (26 de febrero de 2019). River Bathymetry Toolkit. Recuperado de <https://www.fs.fed.us/rm/boise/about/index.shtml>
- Bork, E.W. y Su, J.G. (2007). Integrating LiDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, pp. 11-24.
- Borràs, J.; Delegido, J.; Pezzola, A.; Pereira, M.; Morassi, G. y Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, Vol. 48, pp. 55-66.
- Breiman, J. (2001). Random Forest. *Machine Learning*, Vol. 45, pp. 5-32.
- Bruno, D.; Zapata, V.; Guareschi, S.; Dettori, E.; Picazo, F.; Millán, A.; Velasco, J. y Robledano, F. (2019). LIFE+RIPISILVANATURA: Preliminary Assessment of the effect of riparian restoration actions on aquatic and terrestrial biodiversity. En Martínez Capel, F. (Ed.), *RestauraRíos 2019*. Centro Ibérico de Restauración Fluvial (CIREF), Confederación Hidrográfica del Segura, O.A., Murcia, pp. 322-330; ISBN 978-84-09-11806-9
- Cánovas-García, F.; Alonso-Sarría, F. y Gomariz-Castillo, F. (2016). Modificación del algoritmo Random Forest para su empleo en clasificación de imágenes de teledetección. *XVII Congreso Nacional de tecnologías de Información Geográfica*. 29, 30 de junio y 1 de julio, 2016, Málaga.
- CEDEX (21 de enero de 2019). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Recuperado de <http://vegetacionderibera.cedex.es/intro.php>
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel, Barcelona. 590 pp.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas*, Vol. 20, pp. 37-46.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2013). Metodología para el establecimiento del Estado Ecológico según la Directiva Marco del Agua.

- Congalton, R.G.; Birch, K.; Jones, R. y Schriever, J. (2002). Evaluating remotely sensed techniques for mapping riparian vegetation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 37, pp. 113-126.
- Del Toro, N.; Gomariz-Castillo, F.; Cánovas-García, F. y Alonso-Sarriá, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (Región de Murcia). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, Vol. 67, pp. 327-347.
- Dufour, S.; Rodríguez-González, P.M. y Laslier, M. (2019). Tracing the scientific trajectory of riparian vegetation studies: Main topics, approaches and needs in a globally changing world. *Science of the Total Environment*, Vol. 653, pp. 1168-1185.
- Earth ESA (12 de julio de 2019). Earth European Space Agency. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
- ESA (12 de julio de 2019). European Space Agency. Recuperado de https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/SENTINEL_2
- Fernández de Sevilla, T.; Gómez, A.; Arjonilla, F.J.; Martínez, R. y Magdaleno, F. (2008). Metodología para la caracterización de formaciones de vegetación de ribera y su morfología fluvial asociada utilizando datos LiDAR e imágenes de alta resolución. *Topografía y Cartografía*, Vol. 147, pp. 24-29.
- Fuentes, J.E.; Bolaños, J.A. y Rozo, D.M. (2012). Modelo Digital de Superficie a partir de imágenes de satélite IKONOS para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, Vol. 41 (2), pp. 251-266.
- Gilabert, M.A.; González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, Vol. 8, pp. 1-10.
- Gitelson, A. A.; Kaufman, Y. J. y Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58(3), pp. 289-298.
- González del Tánago, M.; García de Jalón, D.; Lara, F. y Garilleti, R. (2006). Índice RQI para la valoración de las riberas fluviales en el contexto de la directiva marco del agua. *Ingeniería Civil*, Vol. 143, pp. 97-108.
- González del Tánago, M. y García de Jalón, D. (2011). Riparian Quality Index (RQI): A methodology for characterising and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnética*, Vol. 30 (2), pp. 235-254.
- Gregory, S.V.; Swanson, F.J.; McKee, W.A. y Cummins, W.C. (1991). An ecosystem perspective of riparian zones. *Bioscience*, Vol. 41, pp. 540-551.
- Gutiérrez, C.; Salvat, A. y Sabater, F. (2001). Index per a l'avaluació de la qualitat del medi fluvial a partir de la vegetació de ribera, Índex IVF. Documents tècnics del'Agència Catalana de l'Aigua.
- Heritage, G.L. y Large, A.R.G. (2009). *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, Vol. 25(3), pp. 295-309.
- IDENA (13 de febrero de 2019). Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra. Recuperado de <https://idena.navarra.es/Portal/Inicio>
- Jeong, S.G.; Mo, Y.; Kim, H.G.; Park, C.H. y Lee, S.K. (2016). Mapping riparian habitat using a combination of remote-sensing techniques. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 37 (5), pp. 1069-1088.
- Kobayashi, T. (1987). Techniques for laser remote sensing of the environment. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 3, pp. 1-57.
- Landis, J.R. y Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, Vol. 33, pp. 159-174.

- Lekuona, I.; Montealegre, A.L. y Lamelas, M.T. (2017). Cartografía de la biomasa aérea total en masas de *Pinus radiata* D. Don a partir de datos públicos LiDAR -PNOA e Inventario Forestal Nacional. *GeoFocus*, Vol. 20, pp. 87-107.
- Liaw, A. y Wiener, M. (2002). Classification and Regression by Random Forest. *R News*, Vol. 2, pp.18–22.
- Magdaleno, F. y Martínez, R. (2006). Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería Civil*, Vol. 142, pp. 1-15.
- Magdaleno, F.; Martínez, R. y Roch, V. (2010). Índice RFV para la valoración del estado del bosque de ribera. *Ingeniería Civil*, Vol. 157, pp. 85-96.
- Magdaleno, F. y Martínez, R. (2014). Evaluating de quality of riparian forest vegetation: the RFV (Riparian Forest Evaluation) index. *Forest Systems*, Vol. 23 (2), pp. 259-272.
- Maltamo, M.; Naesset, E. y Vauhkonen, J. (2014). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Springer, London, 464 pp.
- Martínez, R.; Merino de Miguel, S. y Magdaleno, F. (2009). Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en hidrología forestal y en la gestión de los ecosistemas fluviales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, Vol. 29, pp. 23-27.
- Martínez, R. (2015). *Estudio del estado de la vegetación de ribera en la España peninsular. Implicaciones de la alteración hidrológica y herramientas para su manejo y gestión*. Tesis Doctoral, Dpto. de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, 103 pp.
- McGaughey, R.J. (2018). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Medina, R.F. y Nique, C.I. (2017). Bosques aleatorios como extensión de los árboles de clasificación con los programas R y Phyton. *Interfases*, Vol. 10, pp. 165-189.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. MAPAMA. (2017). Protocolo de Caracterización Hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos (PHMF).
- Montealegre, A.L. (2017). *Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo*, Tesis Doctoral, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 200 pp.
- Munné, A.; Solá, C. y Prat, N. (1998) Un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de riberas. *Tecnología del Agua*, Vol. 175, pp. 20-37.
- Muñoz, J. (1995). *Geomorfología General*. Espacios y Sociedades, Madrid, 351 pp.
- Narumalani, S.; Zhou, Y. y Jensen, J.R. (1997). Application of remote sensing and geographic information systems to the delineation and analysis of riparian buffer zones. *Aquatic Botany*, Vol. 58, pp. 393-409.
- Ollero, A. (1992). *Los meandros libres del río Ebro (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, eco-geografía y riesgos*. Tesis Doctoral, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 1.138 pp. y anexo cartográfico.
- Ollero, A. (1993): Los elementos geomorfológicos del cauce en el Ebro de meandros libres y su colonización vegetal. *Geographicalia*, Vol. 30, pp. 295-308.
- Ollero, A. (1996): Ecogeografía del río Ebro. En Cal, P. De la y Pellicer F. (Coords., 2002): Ríos y caudales. *Aportaciones para la recuperación de los ríos y riberas de Zaragoza*, pp. 135-157, Institución Fernando el Católico.
- Ollero, A. (2000). Las riberas del Ebro medio: diagnosis y ordenación de un paisaje fluvial amenazado. En: Grande, N., Arrojo, P., Martínez Gil, J. (Coords.) *Una cita europea con la nueva cultura del agua: la Directiva Marco*, pp. 139-150, Fundación Nueva Cultura del Agua, Oporto.
- Ollero, A. (2014). Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores. Contrato del río Matarraña, ECODES, 143 pp., Zaragoza.

- PNOA (13 de febrero de 2019). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Recuperado de <http://pnoa.ign.es/>
- Puente, J. (2006). *Guía de la flora de la depresión del Ebro*. Consejo de Protección de la naturaleza de Aragón, Zaragoza, 262 pp.
- Puig-Mengual, C.A.; Martínez-Capel, F. y Estornell-Cremades, J. (2019). Caracterización de vegetación riparia aplicando algoritmos de clasificación supervisada. Caso de estudio del río Serpis (Valencia). En Martínez Capel, F. (Ed.), *RestauraRíos 2019*. Centro Ibérico de Restauración Fluvial (CIREF), Confederación Hidrográfica del Segura, O.A., Murcia, pp. 797-804; ISBN 978-84-09-11806-9.
- Rapidlasso GmbH (13 de febrero de 2019). LasTools. Recuperado de <https://rapidlasso.com/>
- Rivas-Ruiz, R.; Moreno-Palacios, J. y Talavera, J.O. (2013). Diferencia de medianas con la U de Mann-Whitney. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, Vol. 51 (4), pp. 414-9.
- Rouse, J.W.; Haas, R.W.; Schell, J.A.; Deering, D.H. y Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFC.
- SAIH Ebro (17 de julio de 2019). Sistema Automático de Información Hidrológica del Ebro. Recuperado de <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/graficas/tag:A285E01NRIO1>
- Sánchez Fabre, M.; Ballarín, D.; Mora, D.; Ollero, A.; Serrano, R. y Saz, M.A. (2015). Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. En de la Riva, J.; Ibarra, P.; Montorio, R. y Rodríguez, M. (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza-AGE, Zaragoza, pp. 1853-1862; ISBN 978-84-92522-95-8
- US Army Corps of Engineers (28 de febrero de 2019). HEC-GeoRAS. Recuperado de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>
- Viar, J.; Montealegre, A.L. y Boné, P. (2019). Valoración de la continuidad estructural de la vegetación riparia mediante datos LiDAR-PNOA e índice RFV. En Martínez Capel, F. (Ed.), *RestauraRíos 2019*. Centro Ibérico de Restauración Fluvial (CIREF), Confederación Hidrográfica del Segura, O.A., Murcia, pp. 405-413; ISBN 978-84-09-11806-9
- Vosselmann, G. y Maas, H.G. (2010). *Airbone and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing.

ANEXO

Parte I. Fotografías del área de estudio

A continuación se muestran las fotografías tomadas durante las visitas de campo que se realizaron en el mes de febrero de 2019 con objeto de observar in situ el tramo de estudio.







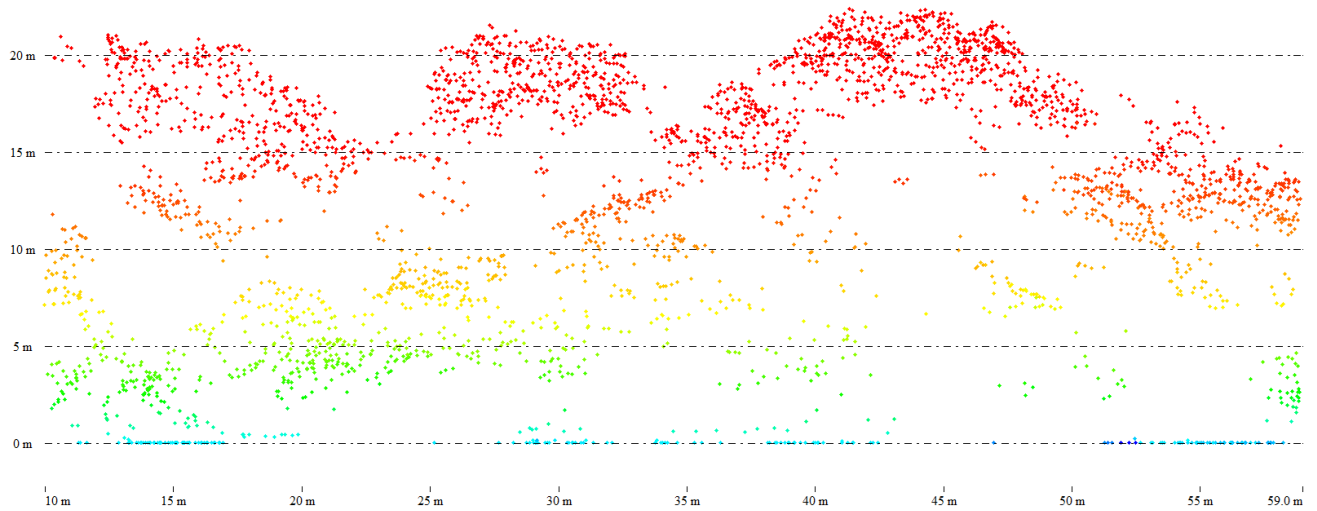
Parte II. Transectos de vegetación

En esta parte se muestran los transectos de vegetación de 10 m de anchura obtenidos de las nubes de puntos LiDAR. En los casos en los que ha sido posible, se acompañan de fotografías tomadas en campo en los meses de febrero y agosto.

Transecto 1:

From Pos: 634308.281, 4642770.861

To Pos: 634290.614, 4642725.178





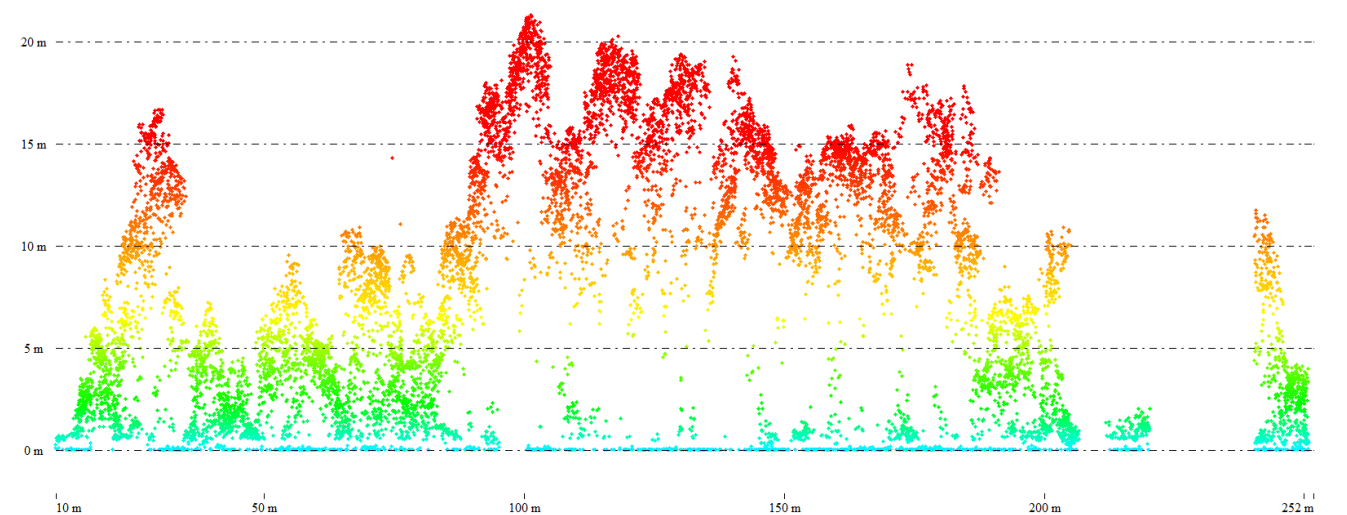




Transecto 2

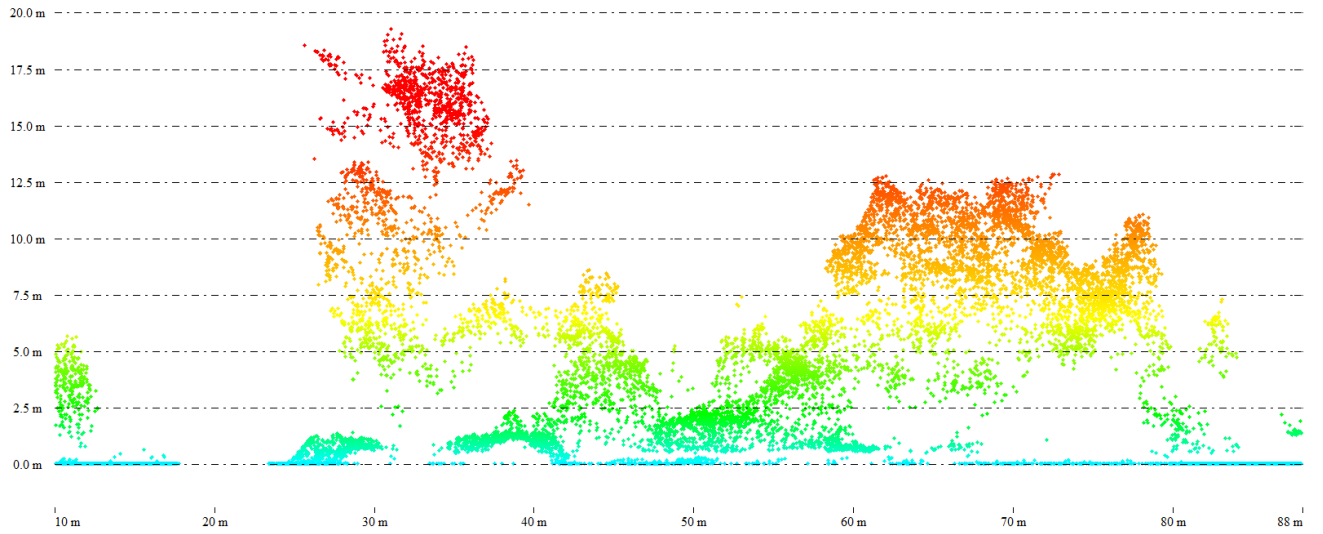
From Pos: 634336.389, 4642846.965

To Pos: 634422.830, 4643072.768



Transecto 3

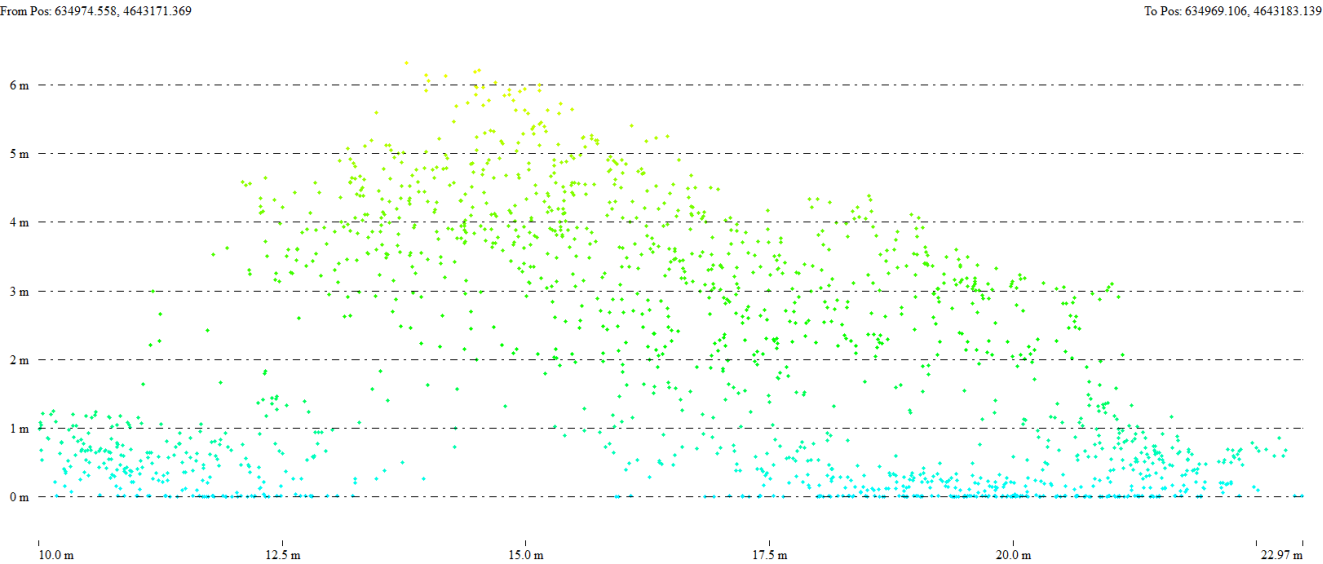
From Pos: 635016.225, 4643053.466 To Pos: 635043.300, 4642980.185



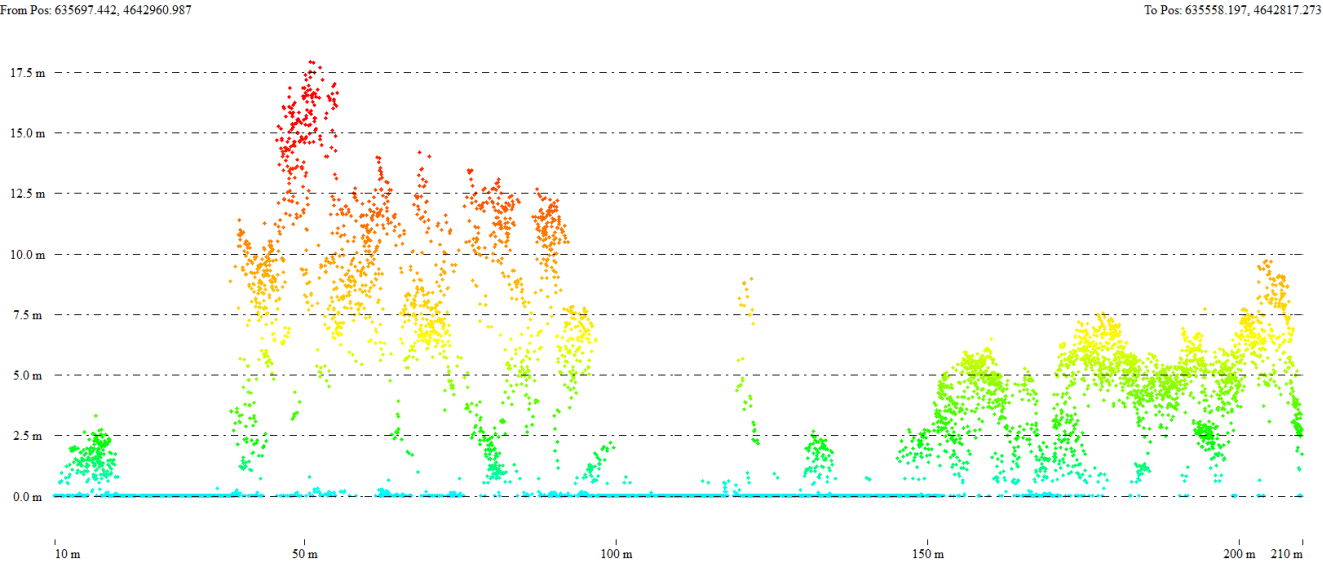




Transecto 4



Transecto 5





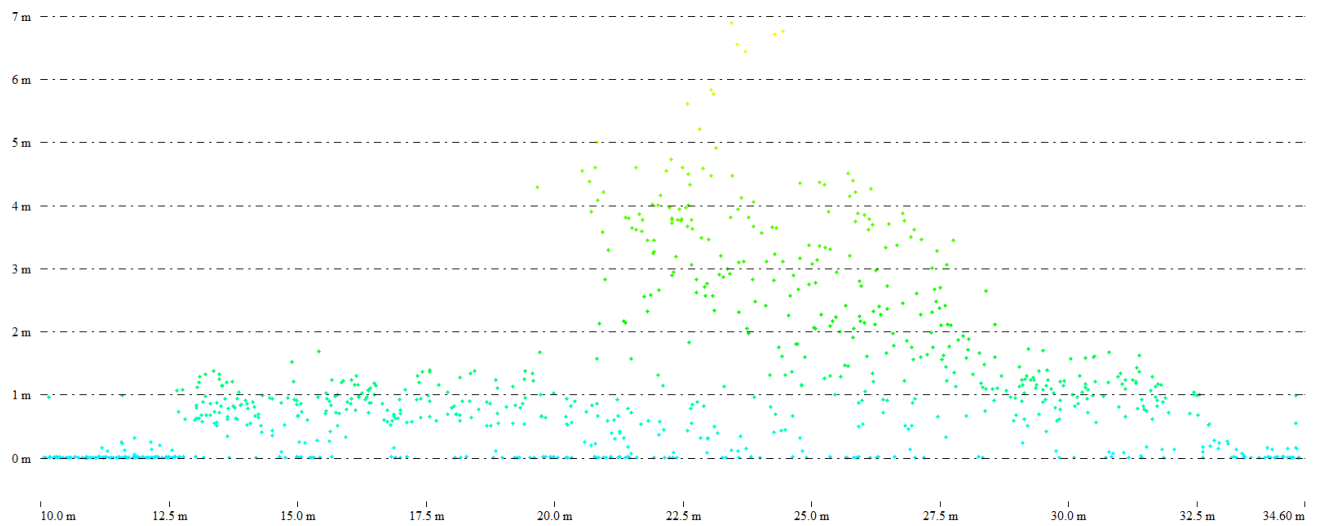




Transecto 6

From Pos: 635746.636, 4643010.797

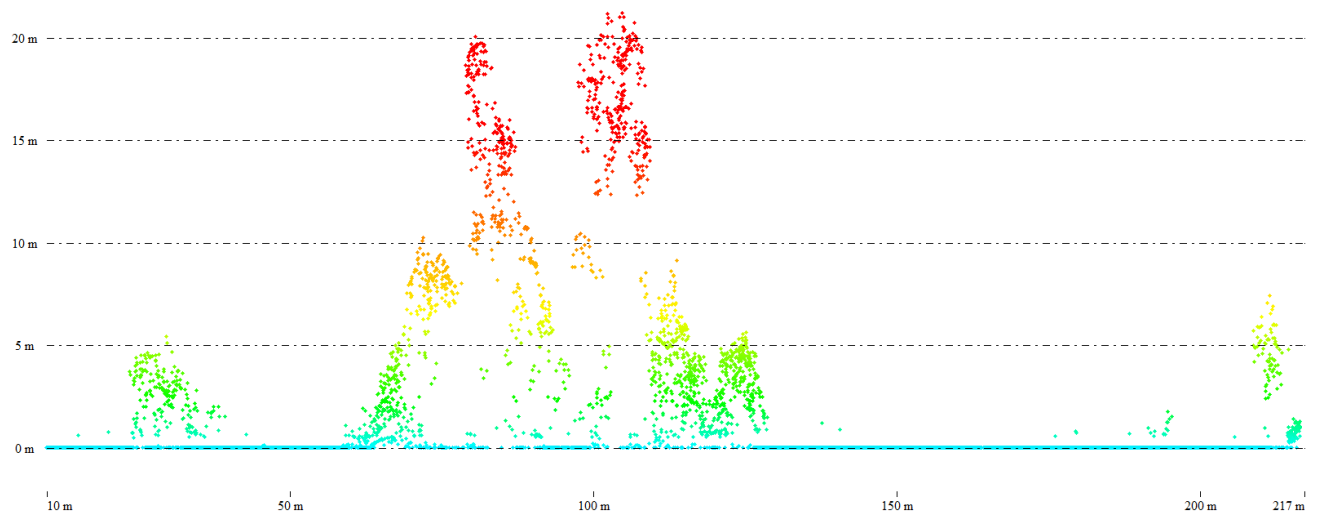
To Pos: 635763.850, 4643028.359



Transecto 7

From Pos: 635850.602, 4642641.372

To Pos: 635646.438, 4642606.560





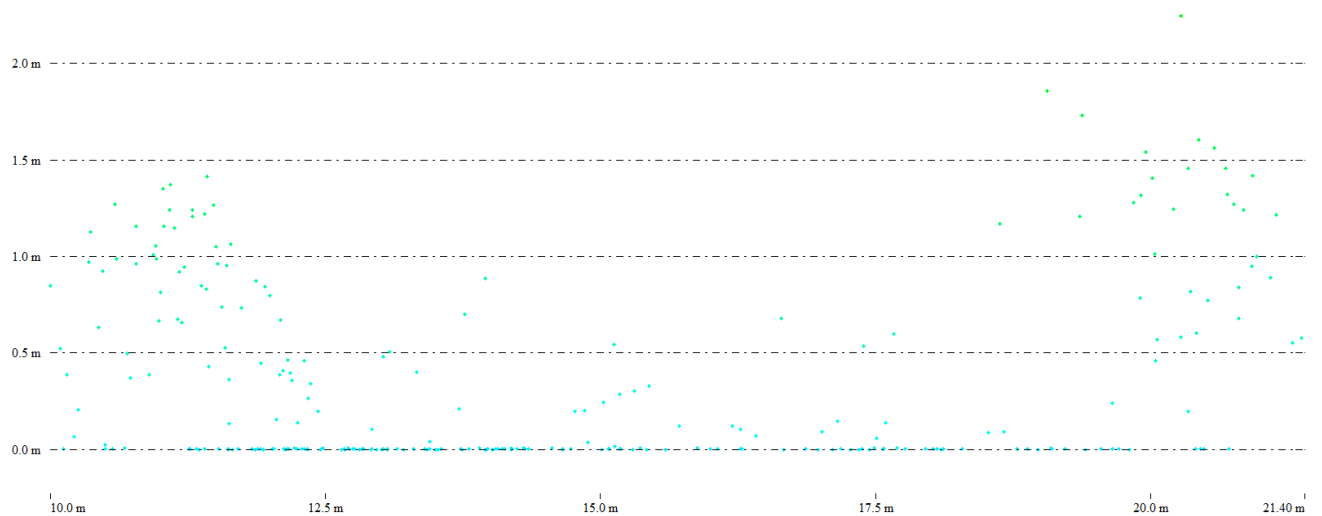




Transecto 8

From Pos: 635914.166, 4642654.426

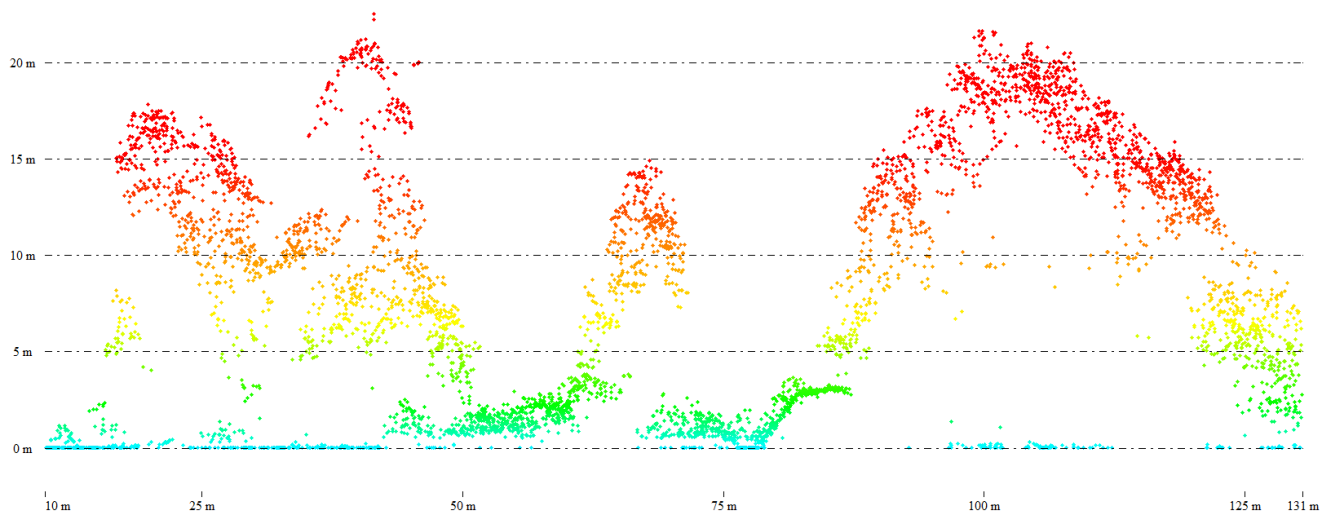
To Pos: 635925.316, 4642656.796



Transecto 9

From Pos: 635432.787, 4641977.637

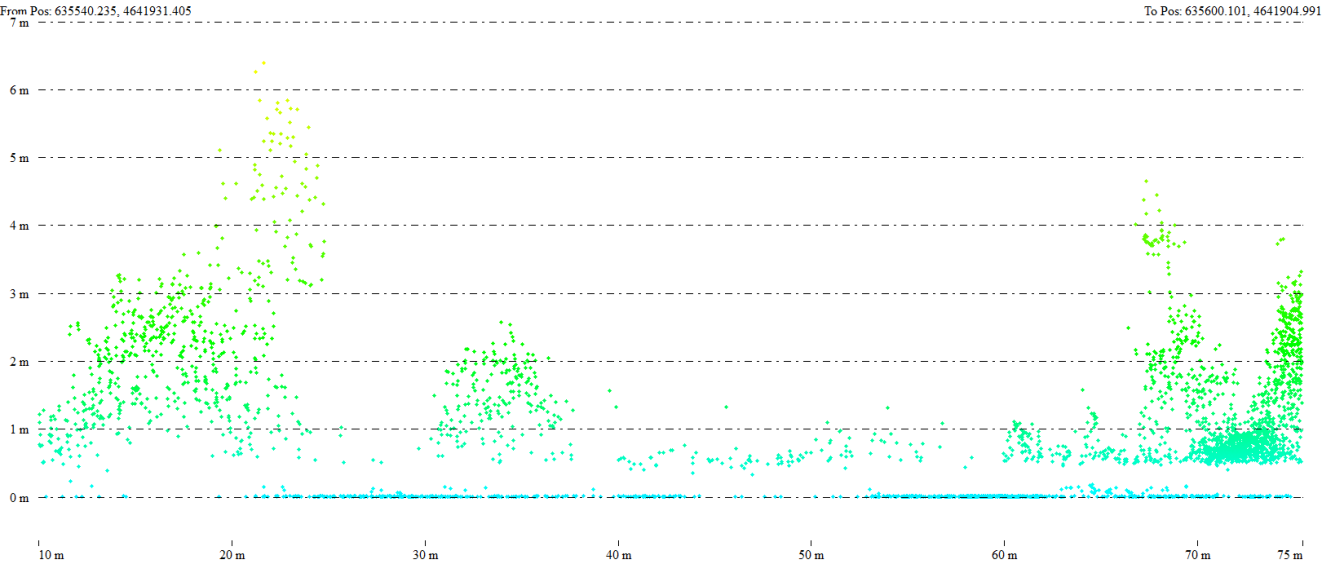
To Pos: 635323.178, 4642027.737



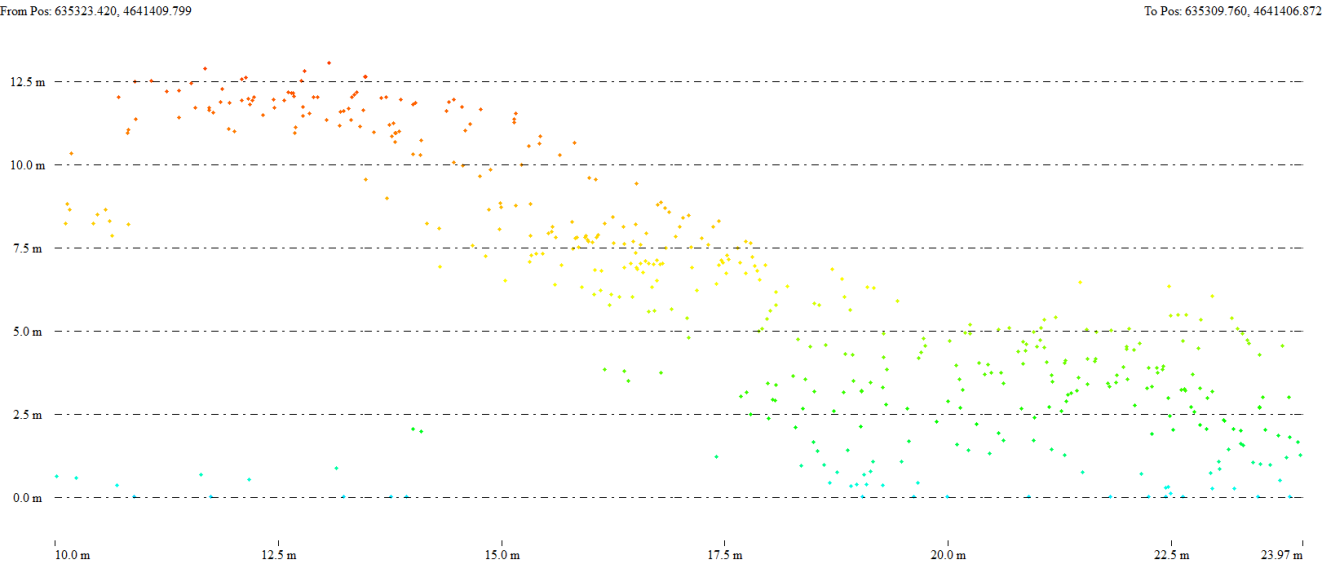




Transecto 10



Transecto 11

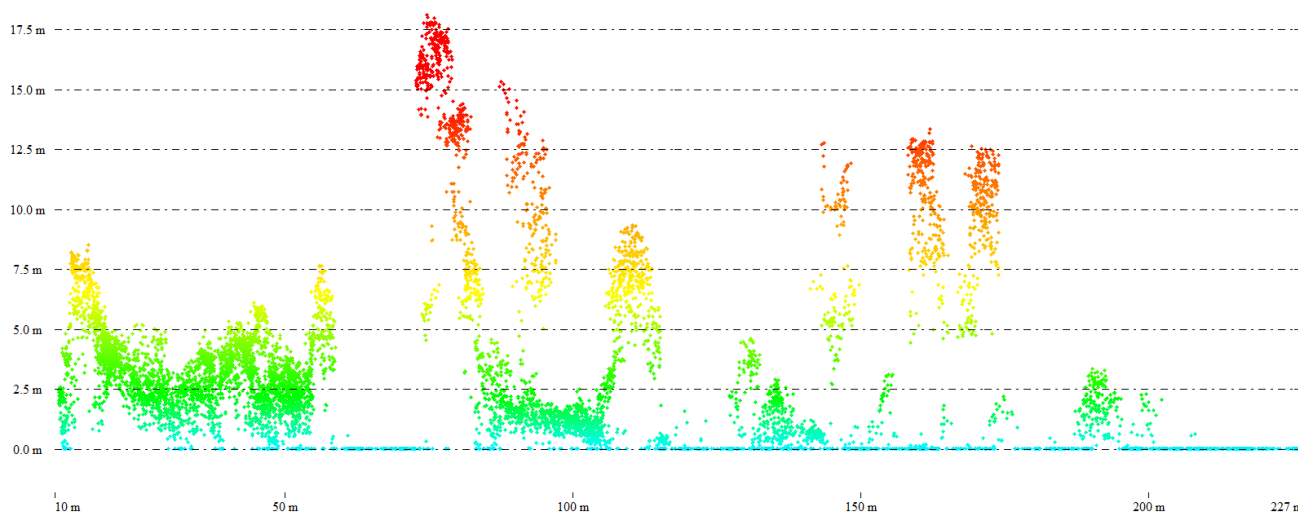




Transecto 12

From Pos: 635375.247, 4641421.687

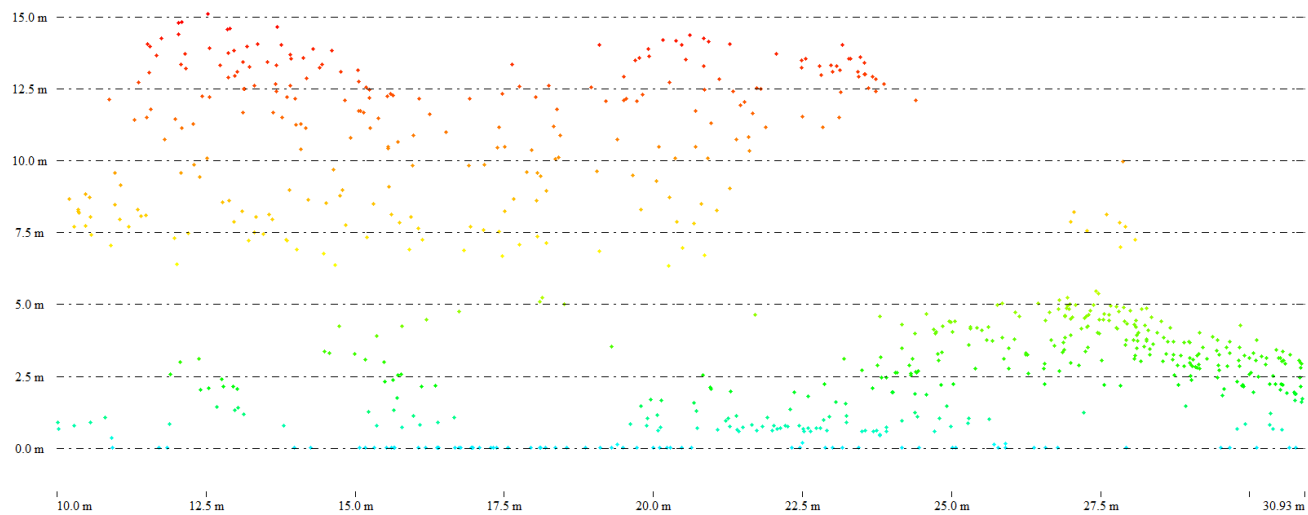
To Pos: 635587.173, 4641467.318



Transecto 13

From Pos: 635600.598, 4640923.154

To Pos: 635588.123, 4640906.358

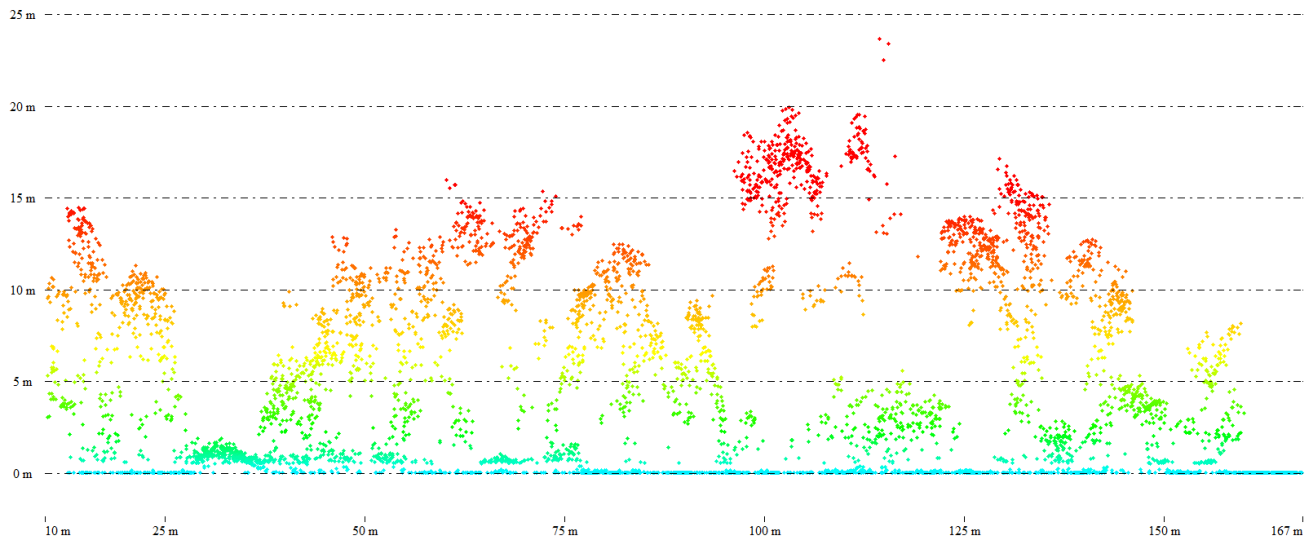




Transecto 14

From Pos: 635720.730, 4641092.615

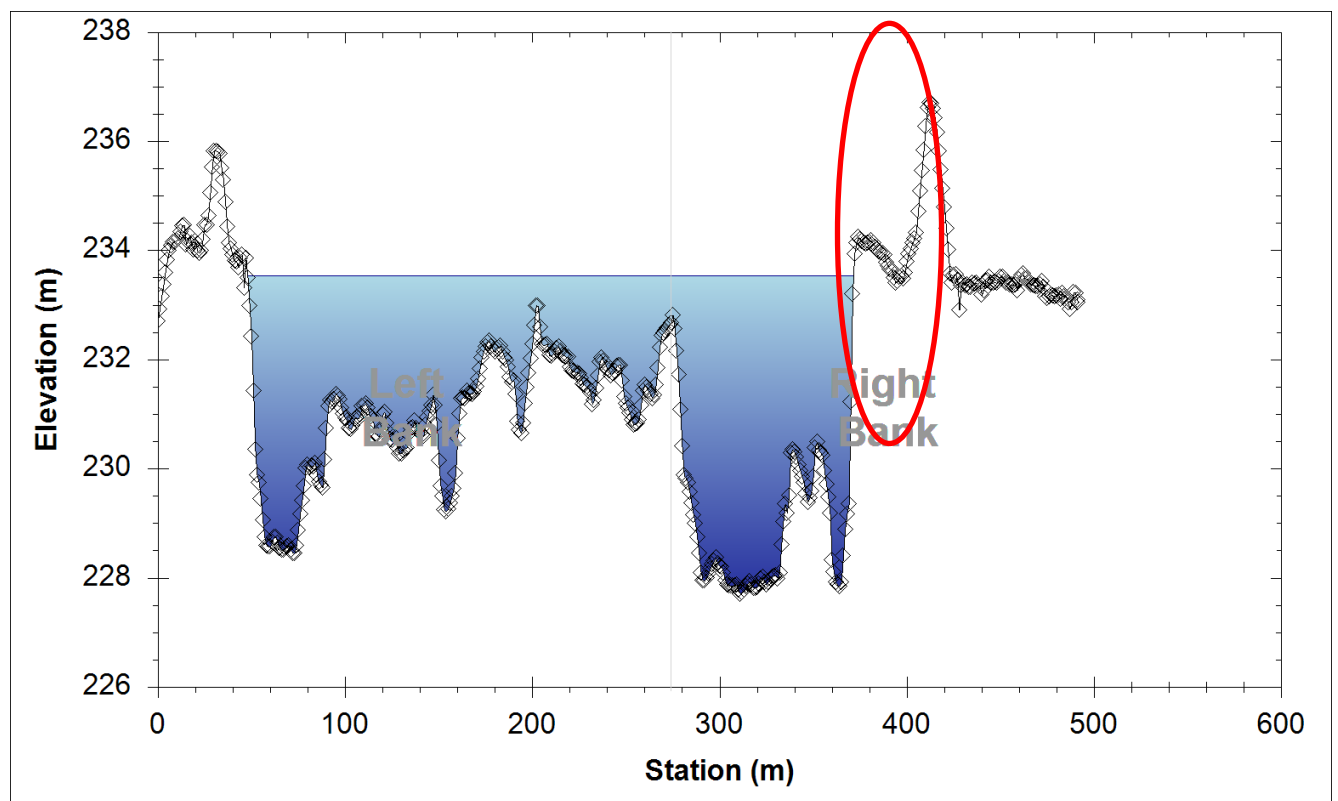
To Pos: 635812.228, 4641220.570



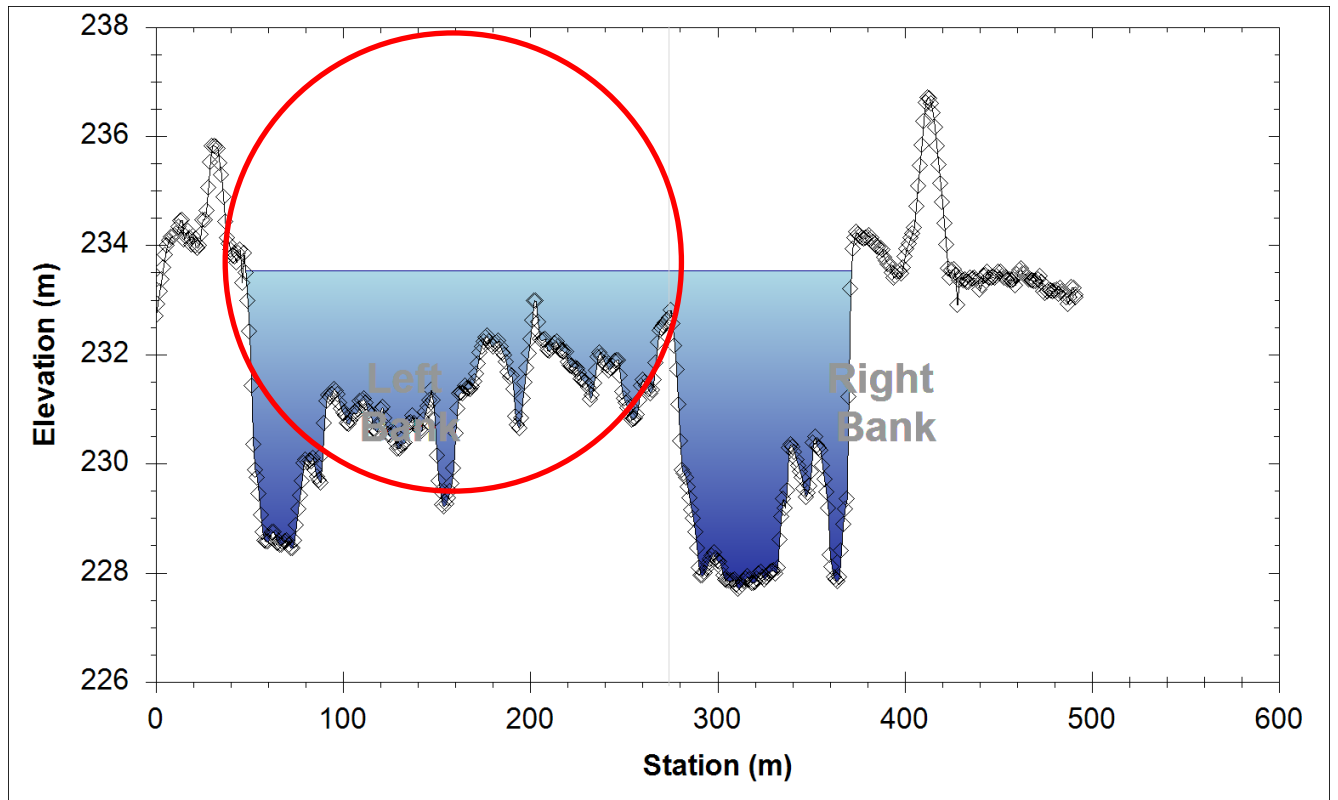
Parte III. Perfiles topográficos

Seguidamente se recopilan los perfiles topográficos trazados sobre el Modelo Digital de Elevaciones. Lo mostrado en color azul es la extensión del “bankfull”. En color rojo se muestra la zona del perfil topográfico en la cual se asienta la vegetación.

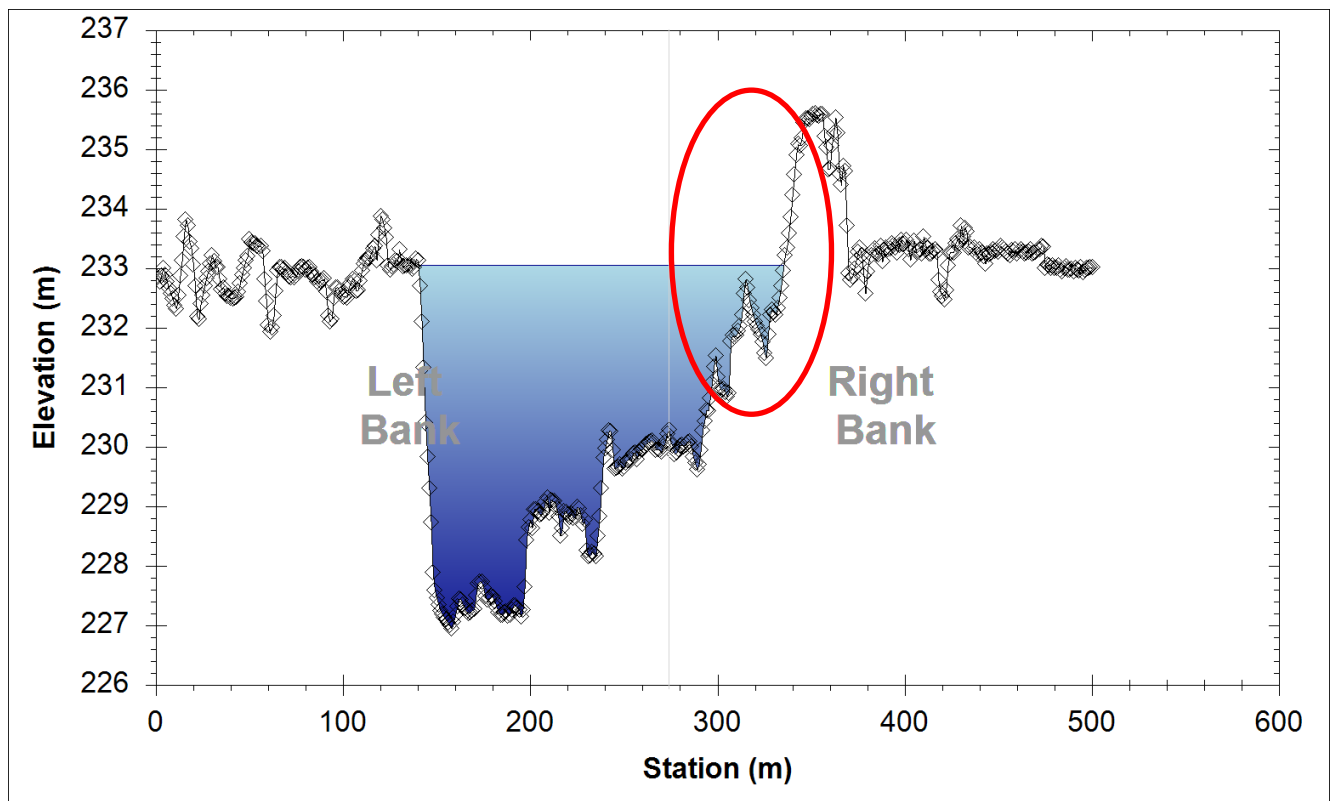
Transecto 1:



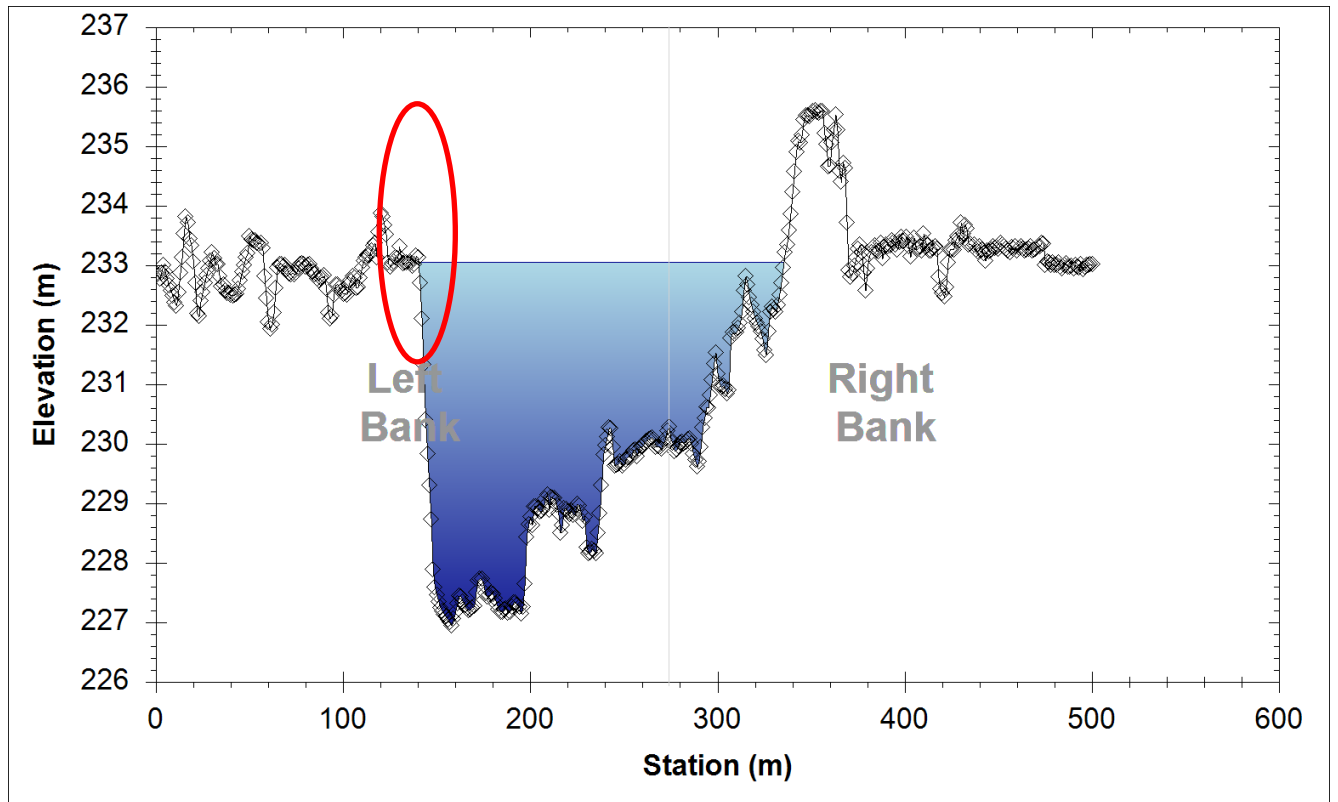
Transecto 2:



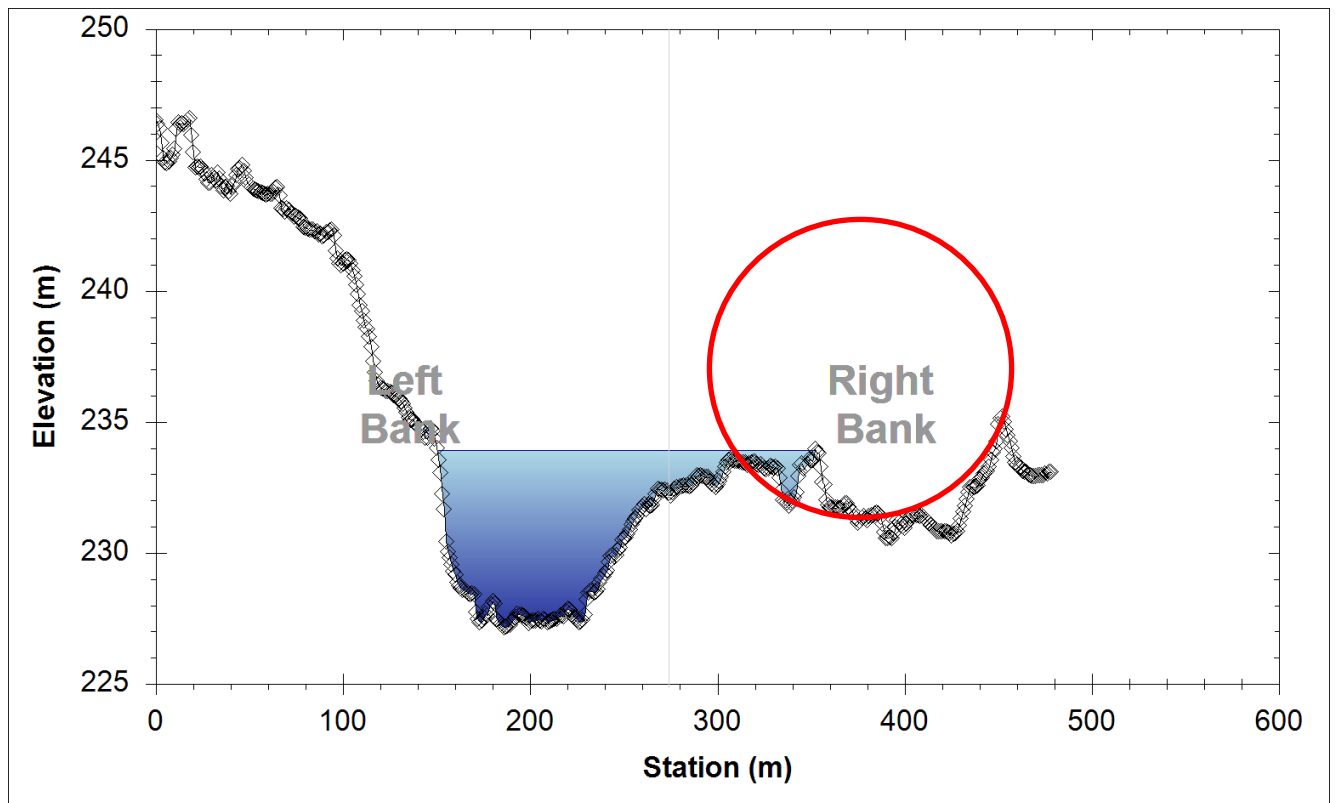
Transecto 3:



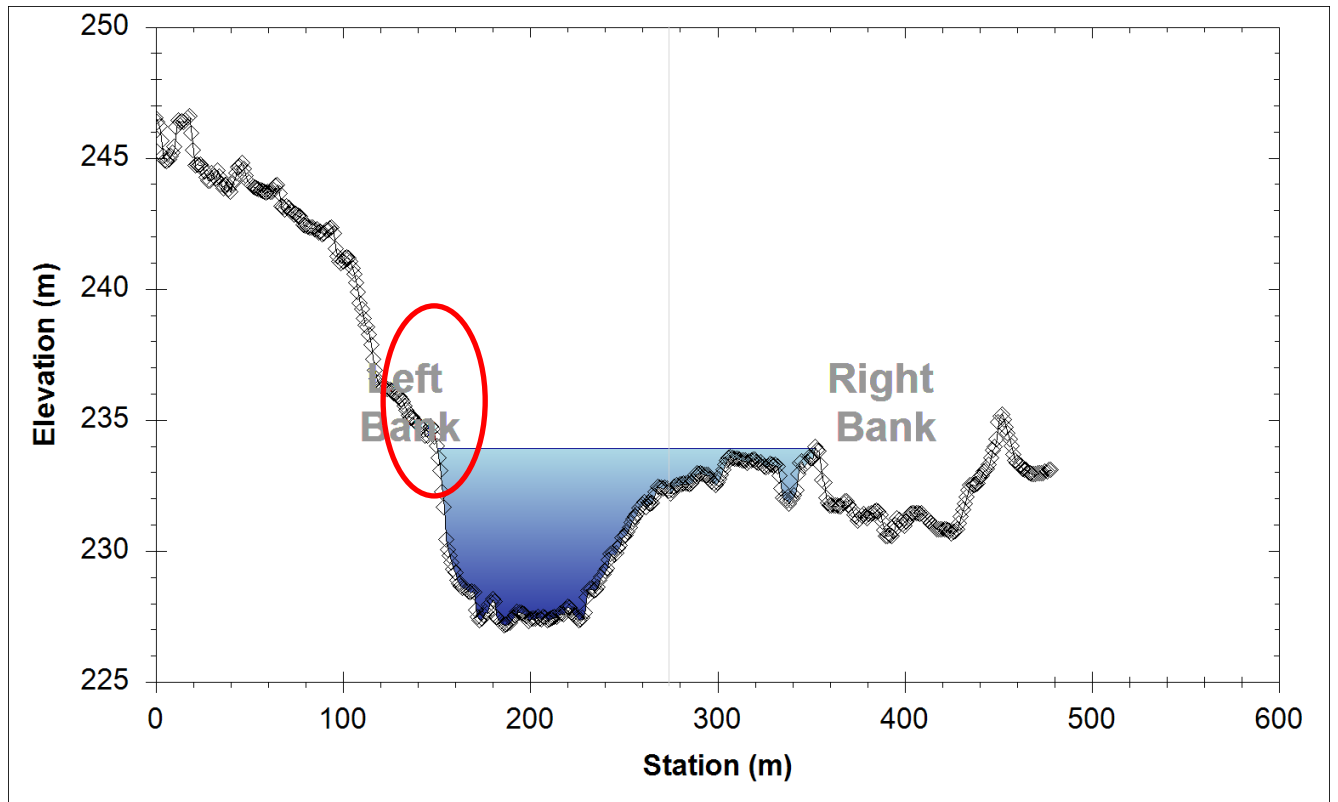
Transecto 4:



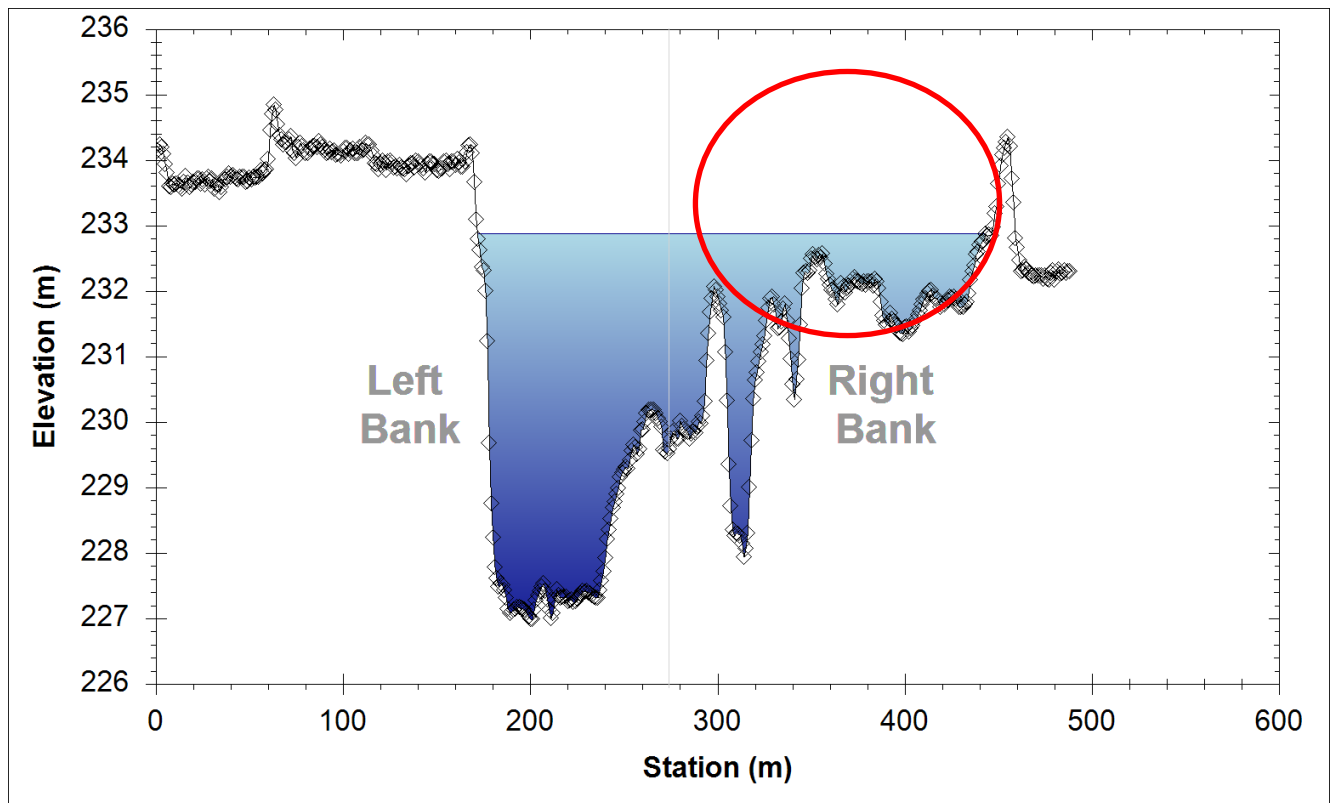
Transecto 5:



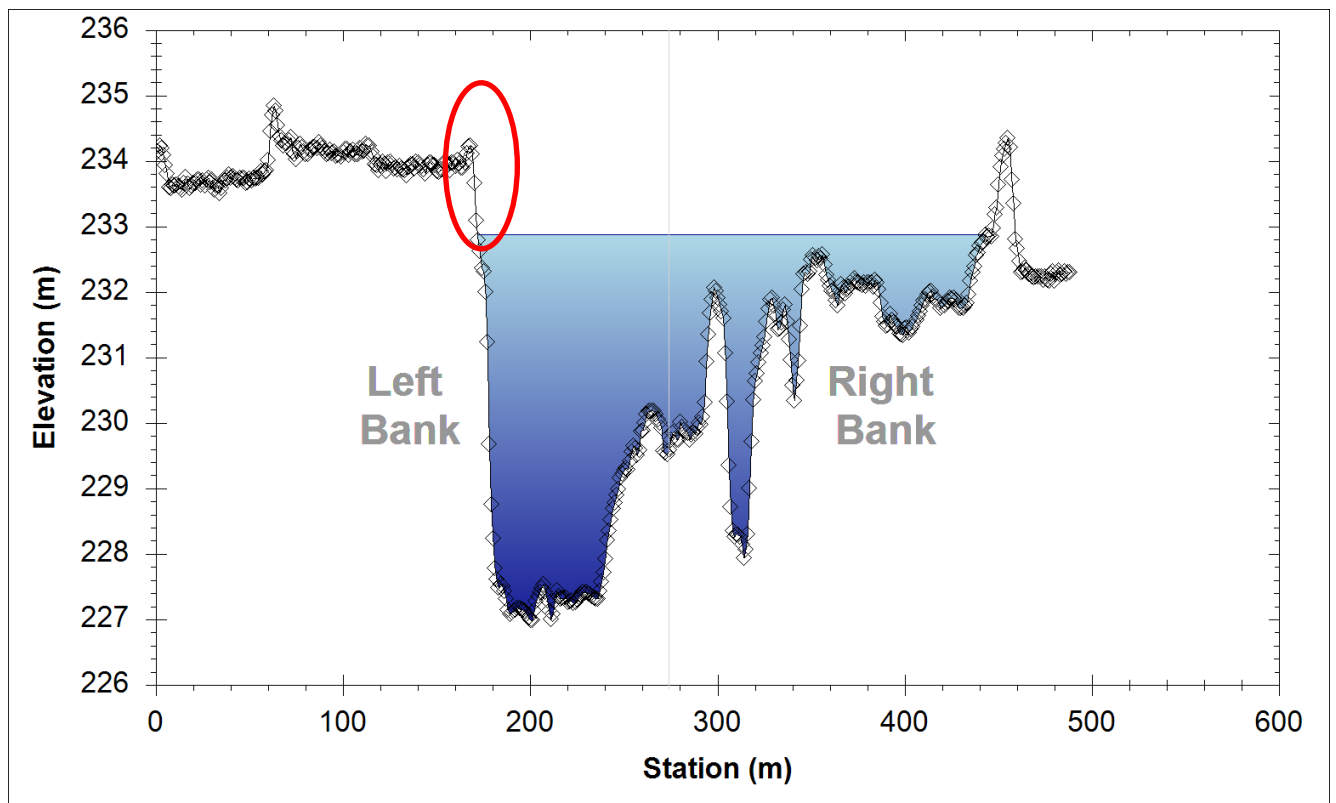
Transecto 6:



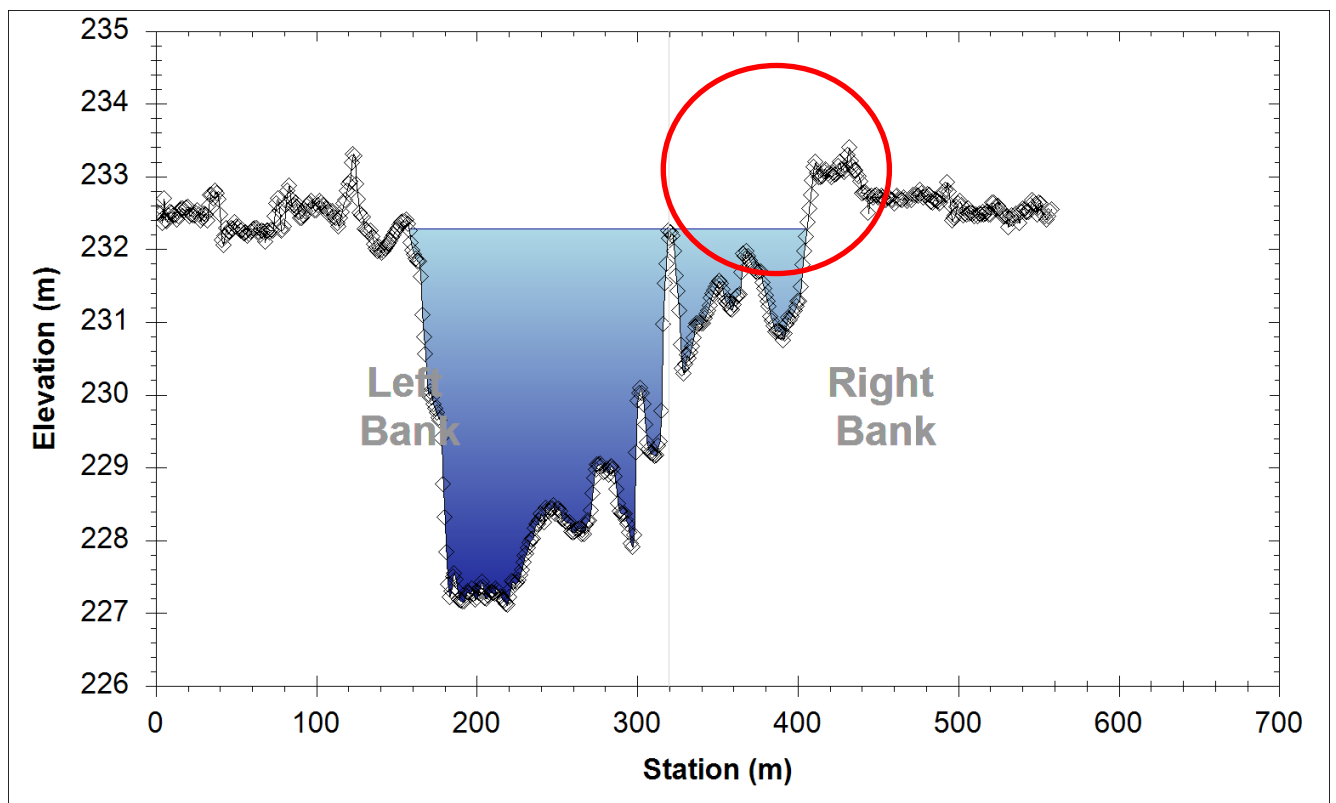
Transecto 7:



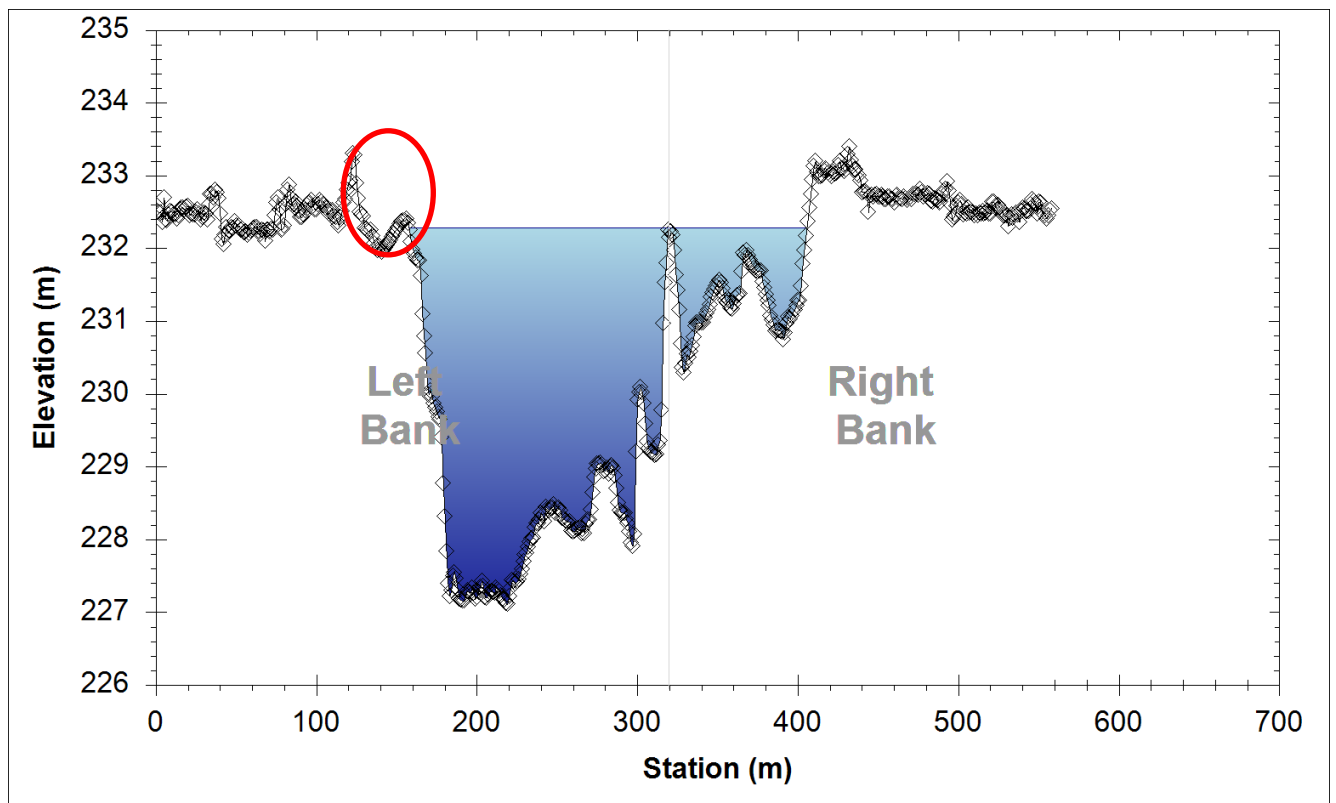
Transecto 8:



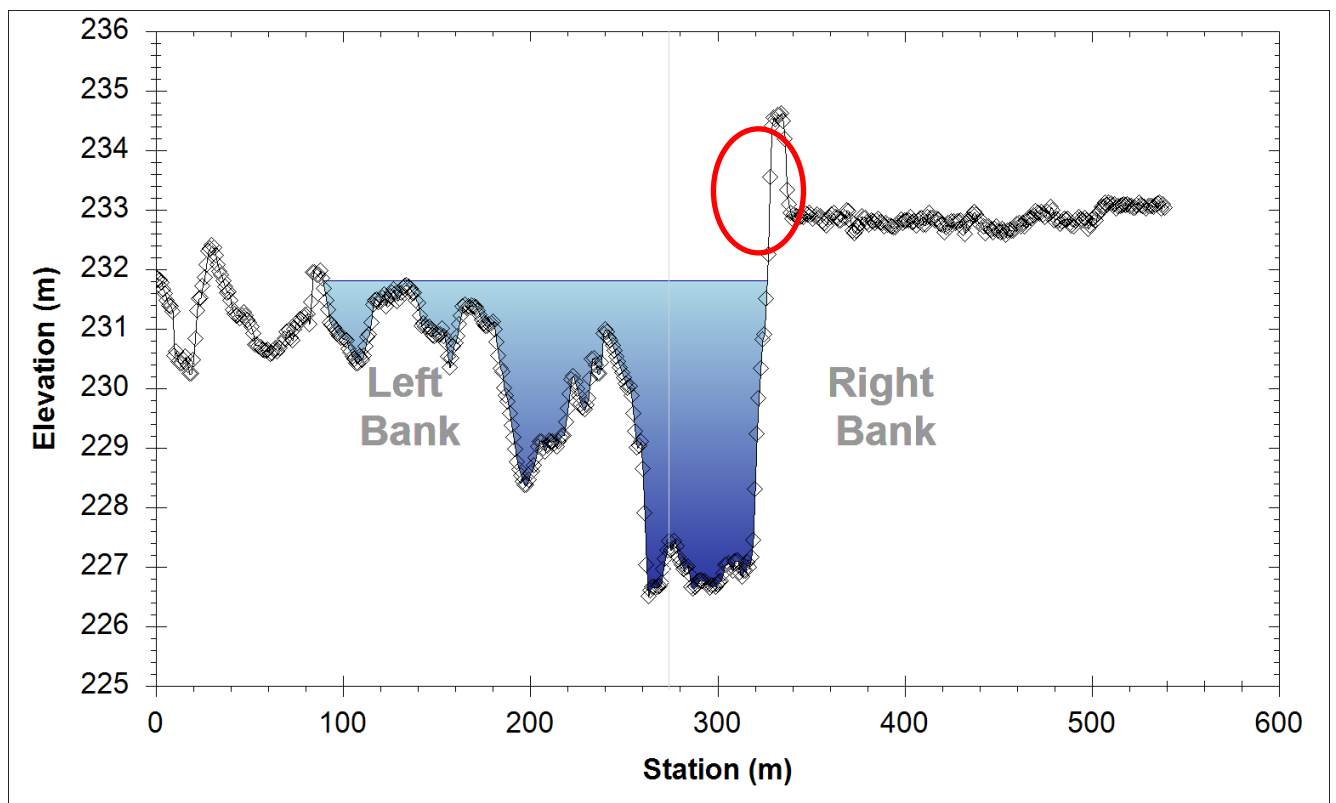
Transecto 9:



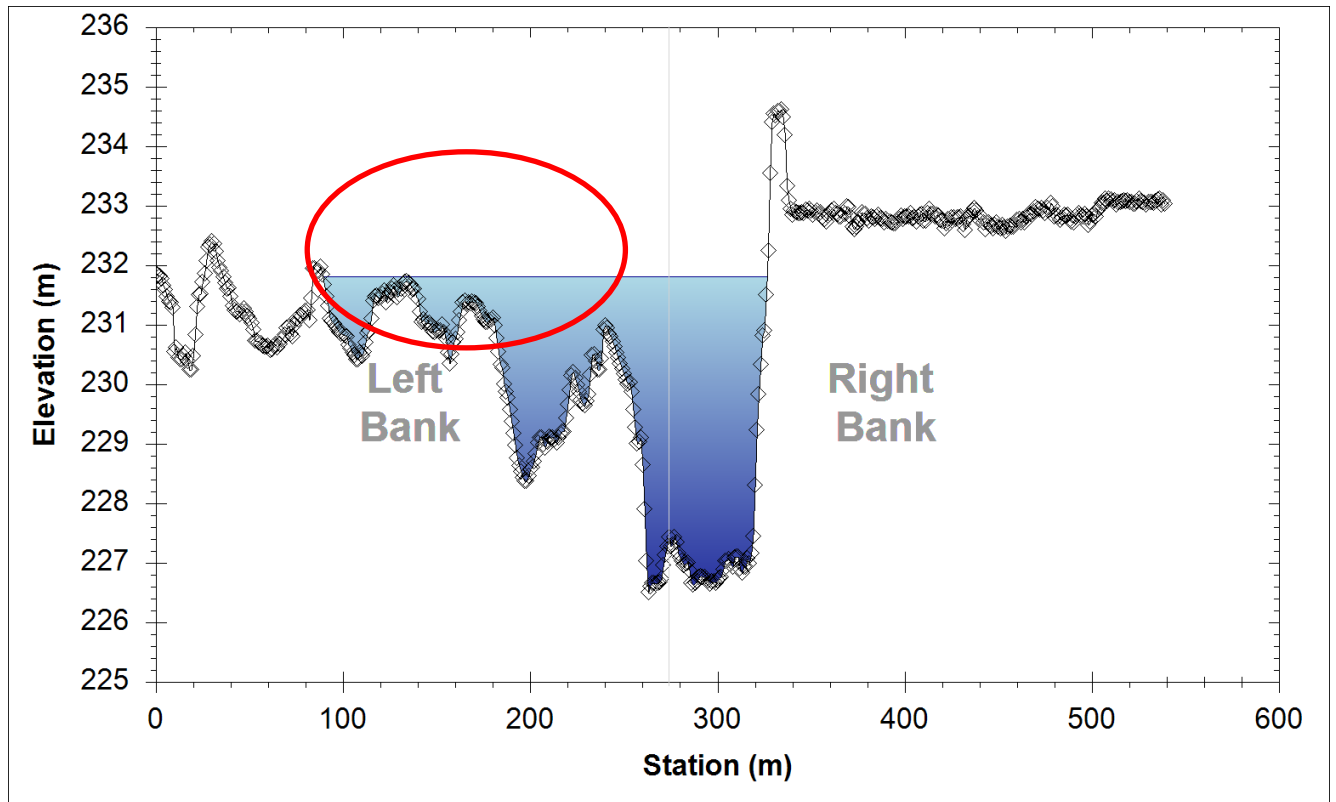
Transecto 10:



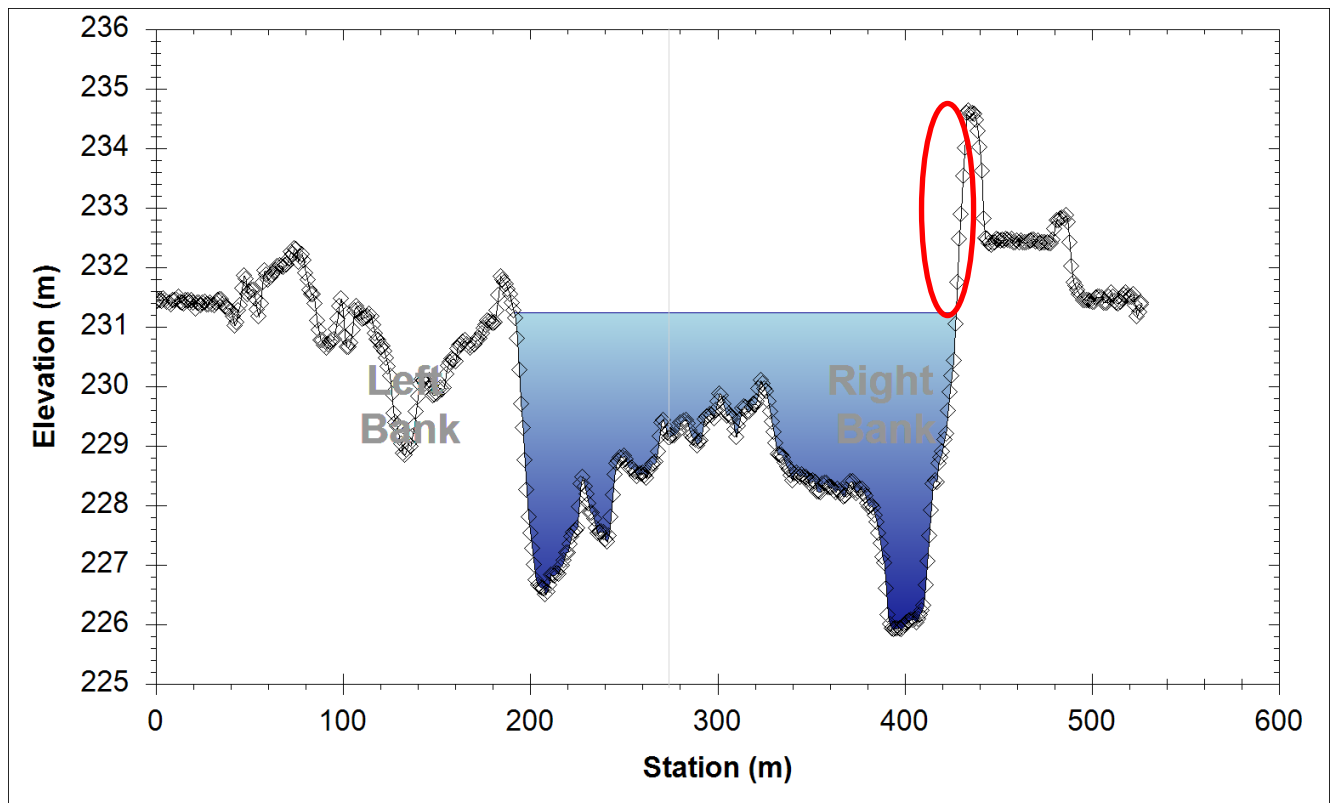
Transecto 11:



Transecto 12:



Transecto 13:



Transecto 14:

