

Herrera, V.; Quirós Rosado, E.; Pro Muñoz, C.; de Tena Rey, M. Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio

Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio

Herrera, Victorino¹ Quirós Rosado, Elia² Pro Muñoz, Carmen³ de Tena Rey, Maite⁴

¹ Instituto de Arqueología-Mérida CSIC-Junta de Extremadura.

² Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Depto. de Expresión Gráfica.

³ Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Física.

⁴ Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Expresión Gráfica.

ORCID: Herrera [0000-0002-1120-299X](https://orcid.org/0000-0002-1120-299X) Quirós Rosado [0000-0002-8429-045X](https://orcid.org/0000-0002-8429-045X) Pro Muñoz [0000-0001-8377-0972](https://orcid.org/0000-0001-8377-0972) de Tena Rey [0000-0002-8202-1782](https://orcid.org/0000-0002-8202-1782)

Correspondencia: vmayoral@iam.csic.es equiros@unex.es cpro@unex.es mtdetena@unex.es

RESUMEN

Este estudio evalúa el rendimiento relativo de los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (IGN) y los datos LiDAR de alta densidad adquiridos específicamente mediante un vuelo con VANT para la detección de estructuras enterradas en sitios arqueológicos. El ensayo analiza, por un lado, las diferencias entre ambas fuentes para la identificación de anomalías topográficas relacionadas con la presencia de restos y, por otro, la correlación entre estas características del terreno y la existencia confirmada de elementos arqueológicos gracias a la disponibilidad de resultados de diversos métodos geofísicos (radar de penetración terrestre, tomografía de resistividad eléctrica y prospección geomagnética). Se toma como caso de estudio el castro de la Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Los resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado, caracterizado por una cobertura vegetal moderada y una profundidad y un estado de conservación comparables, la densidad de datos LiDAR del IGN en su versión más actualizada es suficiente para identificar anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. La capacidad de identificación positiva, incluso en un sitio intensamente arado para el cultivo durante siglos, demuestra la sensibilidad y eficacia del protocolo que utilizamos.


Palabras clave: Arqueología no invasiva, LiDAR, métodos geofísicos.

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 20 febrero 2026


Evaluación comparativa del LiDAR PNOA y LiDAR de alta densidad para la detección de estructuras arqueológicas: el castro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) como caso de estudio

Herrera, Victorino ⁽¹⁾, Quirós Rosado, Elia ⁽²⁾, Pro Muñoz, Carmen ⁽³⁾, de Tena Rey, Maite ⁽⁴⁾


⁽¹⁾ Instituto de Arqueología-Mérida CSIC-Junta de Extremadura.

 0000-0002-1120-299X, vmayoral@iam.csic.es.


⁽²⁾ Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Depto. de Expresión Gráfica.

 0000-0002-8429-045X, equiros@unex.es.

⁽³⁾ Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Física.

 0000-0001-8377-0972, cpro@unex.es.

⁽⁴⁾ Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Depto. de Expresión Gráfica.

 0000-0002-8202-1782, mtdetena@unex.es.

Resumen: Este estudio evalúa el rendimiento relativo de los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (IGN) y los datos LiDAR de alta densidad adquiridos específicamente mediante un vuelo con VANT para la detección de estructuras enterradas en sitios arqueológicos. El ensayo analiza, por un lado, las diferencias entre ambas fuentes para la identificación de anomalías topográficas relacionadas con la presencia de restos y, por otro, la correlación entre estas características del terreno y la existencia confirmada de elementos arqueológicos gracias a la disponibilidad de resultados de diversos métodos geofísicos (radar de penetración terrestre, tomografía de resistividad eléctrica y prospección geomagnética). Se toma como caso de estudio el castro de la Edad del Hierro de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). Los resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado, caracterizado por una cobertura vegetal moderada y una profundidad y un estado de conservación comparables, la densidad de datos LiDAR del IGN en su versión más actualizada es suficiente para identificar anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. La capacidad de identificación positiva, incluso en un sitio intensamente arado para el cultivo durante siglos, demuestra la sensibilidad y eficacia del protocolo que utilizamos.

Palabras clave: Arqueología no invasiva, LiDAR, métodos geofísicos.

Comparative evaluation of PNOA LiDAR and high-density LiDAR for the detection of archaeological features: the hillfort of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) as a case study.

Abstract: *This study evaluates the relative performance of terrain data in archaeological sites for the detection of buried structures, specifically the models generated from LiDAR data of the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA) (IGN) and the high-density LiDAR data acquired specifically with an UAV flight. The essay analyzes, on the one hand, the differences between the two sources for identifying topographic anomalies related to the presence of subsurface remains, and on the other hand, the correlation between these terrain features and the confirmed existence of archaeological elements thanks to the availability of results from various geophysical methods (ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography, and geomagnetic surveying). The Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres) is taken as a case study. The results indicate that, under the specific conditions of the studied site, characterized by moderate vegetation cover and a comparable depth and state of preservation, the LiDAR data density from the most recent version of the IGN coverage is sufficient for identifying subtle topographic anomalies associated with buried structures. The capacity for positive identification, even in a site deeply ploughed for centuries, demonstrates the sensitivity and efficiency of the protocol we used.*

Keywords: *Non invasive archaeology, LiDAR, geophysics.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿Más es mejor? El problema metodológico

En los últimos años se ha producido un extraordinario desarrollo de las aplicaciones de la teledetección y la geofísica para identificar restos arqueológicos ocultos en el subsuelo. En el caso del LiDAR, se ha mostrado eficaz para localizar anomalías topográficas generadas por alteraciones artificiales del terreno, desde terrazas a caminos, pasando por cimentaciones de edificios enterrados (Vinci *et al.*, 2024). Sin embargo, persisten problemas relativos a la disponibilidad de datos y su resolución espacial, además de la necesidad de desarrollar una metodología formal. Así, productos como la 3ª cobertura del vuelo LiDAR del PNOA nos ofrecen capacidades increíbles, pero persiste una pobre explotación del potencial de herramientas para fusionar y comparar capas y así entender la estructura profunda de los datos. Más allá de una comparación intuitiva, esto nos permite formular diagnósticos cada vez más completos y fiables.

De manera concreta, en este caso se trata de formular dos preguntas principales. La primera es si con la cobertura de datos LiDAR del PNOA actualmente accesible podemos suplir la necesidad de vuelos específicos por encargo en sitios arqueológicos. La segunda es si podemos cuantificar el grado de coincidencia entre estas fuentes de teledetección, que nos informan sobre la superficie del terreno, y los datos sobre el subsuelo aportados por la geofísica.

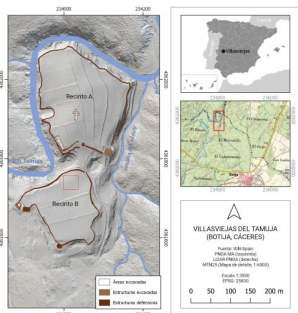


Figura 1. Localización del caso de estudio y la zona analizada.

1.2. Villasviejas como “test site” para la arqueología no invasiva.

El caso de estudio presentado es el sitio arqueológico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres, España) (fig.1). Se trata de un poblado fortificado que estuvo ocupado desde inicios del siglo IV hasta mediados del siglo I a.C. y comprende dos recintos amurallados (Norte y Sur) con un total de unas 7 hectáreas de superficie.

El tipo de estructuras presentes en el sitio, por su densidad, materiales y estado de conservación, lo han convertido en un lugar idóneo para el testeo de métodos no invasivos. Se han llevado a cabo prospecciones geofísicas mediante métodos magnéticos y tomografía eléctrica (ERT), así como georradar (GPR). Además, se han aplicado métodos de teledetección (imágenes térmicas y multispectrales, LIDAR y fotogrametría). Con el análisis combinado de todos estos resultados se ha logrado alcanzar un conocimiento sobre la estructura

interna del asentamiento y profundizar en las características geológicas del yacimiento (Mayoral *et al.* 2019; de Tena *et al.* 2020, Pro *et al.* 2020, Salgado *et al.* 2020).

Dentro de este programa general de trabajo, el presente análisis se basa en los resultados obtenidos en una publicación anterior dedicada a la comparación de los resultados de la aplicación de tres métodos de prospección geofísica en un sector del sitio arqueológico (Pro *et al.* 2020).

2. METODOLOGÍA

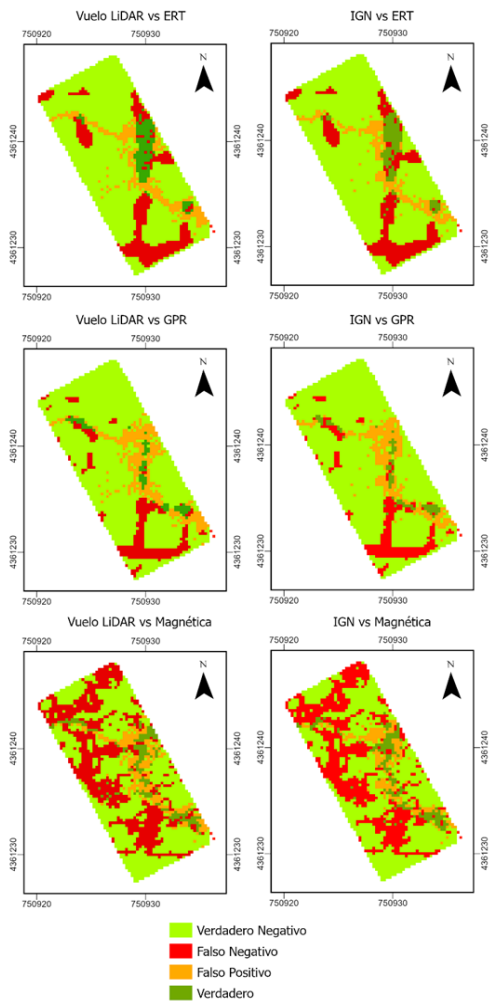


Figura 2. Comparativas entre técnicas geofísicas y los SLRM de ambas fuentes de datos LiDAR.

El flujo de trabajo que se ha seguido busca integrar una serie de fuentes de información de carácter no invasivo y compararlas con los datos LiDAR disponibles, para comprender las correlaciones entre unas y otras. Por tanto, era necesario tomar como referencia un sector del castro en el que se contaba con una multiplicidad de capas.

Los datos LiDAR del IGN fueron descargados y procesados con el software Fusion para generar un modelo digital de elevaciones (MDE) con una resolución de 25 cm de píxel. Siguiendo la metodología específica

para la detección de anomalías arqueológicas (Hesse, 2010), se generó a partir de dicho modelo un SLRM (Simple Local Relief Model) el cual permite aislar el relieve local eliminando la tendencia general del terreno. Se obtiene restando al MDE original una versión suavizada del mismo, lo que produce un raster donde destacan las irregularidades topográficas locales, como zanjas, túmulos o terrazas. Este modelo resulta especialmente útil en contextos arqueológicos porque resalta microformas antropogénicas sin la interferencia del relieve regional (por ejemplo, pendientes naturales o grandes valles).

En cuanto a las capas con los resultados de la geofísica, las imágenes binarias de ERT, GPR y magnética se remuestrearon a resolución de 0,25 m y se ajustaron para que coincidieran, a nivel de píxel, con las SLRM del IGN y del vuelo LiDAR.

La conversión a binarias de las dos imágenes SLRM se llevó a cabo poniendo como valores positivos a aquellos que se encuentran entre la media y la mediana del histograma de valores de ambas imágenes. Se definió el umbral dentro del intervalo delimitado por la media y la mediana de la distribución de intensidades, siguiendo enfoques de segmentación estadística que emplean estos parámetros para acotar el rango óptimo de umbralización, como los empleados en Triana *et al.* (2016) y Ahmad *et al.* (2014).

Una vez convertidas a binarias las imágenes SLRM, se compararon por pares con cada una de las imágenes de las técnicas geofísicas, construyendo las consiguientes matrices de confusión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2, se muestra la comparación de las imágenes SLRM, convertidas a binarias, con cada una de las imágenes de las técnicas geofísicas. Las matrices de confusión se presentan en la Tabla 1, en la que se muestran las superficies de acuerdos/desacuerdos entre las distintas técnicas.

Tabla 1. Matrices de confusión en m2 de todas las comparativas.

		ERT		ERT			
		Estructura	no Estructura	Estructura	no Estructura		
V. LiDAR	Estructura	8,94	25,25	IGN	Estructura	9,06	25,12
	no Estructura	16,50	110,62		no Estructura	14,18	112,94
		GPR		GPR			
		Estructura	no Estructura	Estructura	no Estructura		
V. LiDAR	Estructura	4,93	20,50	IGN	Estructura	5,19	18,12
	no Estructura	18,37	117,50		no Estructura	18,06	119,94
		Magnética		Magnética			
		Estructura	no Estructura	Estructura	no Estructura		
V. LiDAR	Estructura	10,56	52,87	IGN	Estructura	10,44	53,00
	no Estructura	14,87	83,0		no Estructura	12,81	85,06

Además, a partir de dichas matrices se derivaron los estadísticos de la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la exactitud global de la clasificación.

Método	Referencia	Exactitud global (%)	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	F1-score
ERT	V. LiDAR	74,1	35,1	81,4	0,30
ERT	IGN	75,6	39,0	81,8	0,32
GPR	V. LiDAR	75,9	21,2	85,1	0,20

Método	Referencia	Exactitud global (%)	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	F1-score
GPR	IGN	77,6	22,3	86,9	0,22
Magnética	V. LiDAR	58,0	41,5	61,1	0,24
Magnética	IGN	59,2	44,9	61,6	0,24

La comparación de las métricas de exactitud obtenidas a partir de las matrices de confusión permite evaluar el rendimiento relativo de los modelos generados empleando como referencia el LiDAR de alta densidad adquirido específicamente para el yacimiento y el LiDAR de la 3ª cobertura del PNOA (IGN), con una densidad aproximada de 5 puntos/m².

En términos de exactitud global, los resultados muestran diferencias reducidas entre ambas fuentes de referencia. Para los tres métodos geofísicos evaluados (ERT, GPR y magnetometría), la exactitud global obtenida utilizando el modelo derivado del LiDAR del IGN es ligeramente superior a la obtenida con el vuelo LiDAR propio, con incrementos que oscilan entre aproximadamente 1 y 2 puntos porcentuales. Estas diferencias son sistemáticas en los tres métodos analizados, lo que sugiere una concordancia elevada entre ambas fuentes de datos LiDAR en la delimitación de las áreas consideradas como “estructura” y “no estructura”.

La sensibilidad, entendida como la capacidad para detectar estructuras reales, muestra valores moderados o bajos en todos los casos, independientemente de la fuente LiDAR utilizada como referencia. Esto se explica por una prolongada labor de arado de los campos que ocupan el sitio arqueológico y que han sido cultivados desde hace siglos. Como consecuencia, las anomalías habitualmente generadas por la supervivencia de las cimentaciones de los edificios hace tiempo que han sido niveladas, y apenas ofrecen contraste con el resto del terreno. Sin embargo, en todos los métodos la sensibilidad es ligeramente mayor cuando se emplea el LiDAR del IGN. Esto indica que, desde el punto de vista de la detección de estructuras enterradas, la referencia del IGN no solo es comparable a la del LiDAR de alta densidad, sino que en este caso concreto produce resultados marginalmente más favorables en términos de coincidencia con los datos geofísicos. Podría considerarse que para esto la mayor resolución del vuelo de alta densidad introduce ruido parásito que oscurece la lectura de las variaciones de interés.

Por su parte, la especificidad presenta valores elevados en los métodos ERT y GPR, lo que refleja una buena capacidad para identificar correctamente las áreas sin estructura. En magnetometría la especificidad es menor, aunque sigue mostrando diferencias muy reducidas entre ambas referencias. La similitud de estos valores indica que la capacidad de discriminación entre zonas con y sin estructura es prácticamente equivalente cuando se emplea cualquiera de los dos modelos LiDAR. Esto abunda en la lectura ya planteada de un terreno fuertemente alterado por el cultivo.

El análisis conjunto de las métricas sugiere que el aumento de densidad de puntos del vuelo LiDAR propio (con valores que alcanzan hasta 300 puntos/m² en determinadas zonas) no se traduce en una mejora sustancial de la concordancia espacial con las anomalías

geofísicas detectadas. A pesar de la notable diferencia de resolución entre ambos conjuntos de datos, el modelo LiDAR del IGN (5 puntos/m²) ofrece resultados equivalentes e incluso ligeramente superiores en términos de exactitud global, sensibilidad y f1-score.

Este comportamiento puede explicarse por las características específicas del yacimiento analizado. La cobertura vegetal y el grado de soterramiento de las estructuras permiten que incluso un modelo digital de elevaciones derivado de una densidad de puntos moderada, sea capaz de reproducir adecuadamente las microtopografías asociadas a las estructuras arqueológicas. La sensibilidad del procedimiento empleado es especialmente relevante en un caso en el que las condiciones de entrada, con el intensivo y prolongado laboreo del terreno, son muy desfavorables. En este escenario, el incremento de densidad de puntos no supone necesariamente una mejora proporcional en la capacidad de detección indirecta de estructuras enterradas. Al contrario, el detalle es excesivo para discernir entre información útil y ruido.

En consecuencia, los resultados indican que la disponibilidad de datos LiDAR de alta densidad no garantiza por sí misma una mejora significativa en la detección de estructuras arqueológicas enterradas cuando las condiciones de visibilidad geomorfológica y de cobertura vegetal son favorables. En contextos similares al del presente estudio, la resolución ofrecida por la 3ª cobertura LiDAR del PNOA resulta suficiente para la identificación y delimitación de este tipo de evidencias. Si proyectamos esa eficacia sobre la amplia muestra de sitios arqueológicos en los que puede aplicarse esta metodología, se vislumbra un elevado potencial del LiDAR en este campo de conocimiento.

4. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre los modelos generados a partir del vuelo LiDAR de alta densidad y los datos LiDAR de la 3ª cobertura del PNOA (IGN) demuestra que ambos proporcionan resultados muy similares en la detección indirecta de estructuras arqueológicas enterradas. Las diferencias observadas en las métricas de exactitud son reducidas y, en todos los métodos geofísicos analizados, los valores obtenidos con el LiDAR del IGN son ligeramente superiores a los obtenidos con el vuelo LiDAR propio.

Estos resultados indican que, en las condiciones específicas del yacimiento estudiado la densidad de puntos del LiDAR del IGN (≈ 5 puntos/m²) resulta suficiente para la identificación de anomalías topográficas asociadas a estructuras enterradas. El incremento de resolución hasta valores muy superiores (≥ 300 puntos/m²) no se traduce en una mejora significativa de la capacidad de detección ni en un aumento sustancial de la concordancia con los datos geofísicos.

Por tanto, puede concluirse que los datos LiDAR de acceso abierto del PNOA constituyen una fuente adecuada y suficiente para la detección de estructuras arqueológicas soterradas en contextos similares al analizado, siempre que las condiciones de cobertura

vegetal y profundidad de enterramiento sean comparables. Esta conclusión refuerza el potencial de los datos LiDAR públicos como herramienta de prospección arqueológica a escala regional, permitiendo optimizar recursos y reducir la necesidad de campañas específicas de adquisición LiDAR de muy alta densidad cuando las condiciones del terreno no lo requieran.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos: “Investigación arqueológica interdisciplinar para el análisis diacrónico de los paisajes del suroeste peninsular: la Segunda Edad del Hierro como paradigma” (PID2023-151243NB-I00) y “Revalorización del Paisaje Cultural de la Dehesa extremeña y su Patrimonio Arqueológico mediante tecnologías innovadoras” (IB24032).

6. REFERENCIAS

- Ahmad, N. S., Zaki, Z. M., & Ismail, W. (2014, September). Region of adaptive threshold segmentation between mean, median and otsu threshold for dental age assessment. In *2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)* (pp. 353-356). IEEE.
- De Tena, M.T., C. Pro, C. Charro, J.A. Salgado, V. Mayoral (2020). Geological characterisation of the settlement of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Quaternary International*, 566-567, 91-97, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.024>
- Hesse, R. (2010). LiDAR-derived Local Relief Models—a new tool for archaeological prospection. *Archaeological prospection*, 17(2), 67-72.
- Mayoral V., C. Charro, C., Salgado, J.A., Pro, C., M.T. de Tena, M., Chapa, T., Vallés, J., Terrón, J.M., y Quirós, E. (2019). Radiography of an Iron Age hillfort: non-invasive archaeology in the settlement of Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres). *Trabajos de Prehistoria*, 76, nº 2 7-26, <https://doi.org/10.3989/tp.2019.12239>
- Pro, C., Caldeira, B., De Tena, M., Charro, C., Oliveira R., Borges J. F. y Mayoral, V. (2020). Exploring the Consistency of Data Collected in Archaeological Geophysics: A Case Study from the Iron Age Hillfort of Villasviejas del Tamuja (Extremadura, Spain). *Remote Sensing*, 12, 1989 <https://doi.org/10.3390/rs12121989>
- Salgado, J.A., Quirós, E.; Mayoral, V. y Charro, C. (2020). Assessing the potential of multispectral and thermal UAV imagery from archaeological sites. A case study from the Iron Age hillfort of Villasviejas del Tamuja (Cáceres, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 31.
- Triana, N., Jaramillo, A. E., Gutiérrez, R. M., & Rodríguez, C. A. (2016). Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEM-Foils. *Scientia et Technica*, 21(4), 352-359
- Vinci, G., Vanzani, F., Fontana, A., Campana, S. (2024). LiDAR Applications in Archaeology: A Systematic Review. *Archaeological Prospection*. 1-21. [10.1002/arp.1931](https://doi.org/10.1002/arp.1931).