

EL ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA DE LOS ESCÁNERES TERRESTRES APLICADOS A LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA

The waveform analysis of terrestrial laser scanning applied to archaeological research

JOSÉ ANTONIO ESQUIVEL *, JOSÉ ANTONIO BENAVIDES ** y
FRANCISCO JAVIER ESQUIVEL ***

RESUMEN El desarrollo de las técnicas de modelado mediante la utilización de mediante láser 3D ha conducido a mejoras que perfeccionan el trabajo arqueológico. Así, se han realizado distintos análisis arqueológicos y geométricos para caracterizar los parámetros métricos y geométricos de estructuras arqueológicas, completando la documentación de tales estructuras, el registro digital y la reproducción a escala. Sin embargo, la puesta en práctica de tecnologías láser no convencionales proporciona nuevas metodologías de análisis optimizadas. Este artículo se enfoca al estudio de las posibilidades que surgen de los sistemas TLS (escaneo mediante láser terrestre) en la arqueología y el patrimonio histórico para clasificar los tipos diferentes de materiales. Las características de los materiales de superficie, la escala de trabajo, la mezcla de los materiales naturales de tipo diferente (arena, piedras, vegetación, etc.) y materiales artificiales (ladrillo, tapial, cables de electricidad, etc.) pueden ser analizadas usando estas tecnologías para alcanzar resultados importantes en los estudios de patrimonio. Y este campo de investigación constituye un área importante en el futuro de los sistemas de exploración láser en la investigación arqueológica.

Palabras clave: 3D Escáner Láser, Digitalización ecos, Forma de onda, Patrimonio cultural, Escaner terrestre, Vegetación.

ABSTRACT The development of 3D modeling techniques by means of laser scanning has led to major improvements which facilitate the archaeological task. Thus, different archaeological and geometric analyses have been carried out to characterize metric and geometric parameters of archaeological structures, including the documentation of such structures, the digital register and the reproduction on every scale. However, the implementation of non-conventional laser

* Laboratorio 3D de Modelización Arqueológica, Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada, *esquivel@ugr.es*

** Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada, *jbenavid@gr.es*

*** Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Granada, *jesquivel@ugr.es*

Fecha de recepción: 18-12-2012. Fecha de aceptación: 28-06-2013.

technologies has provided new methodologies for research, particularly the detection of systems including the digitalization of the signal and successive echoes. The working methodology analyze the single pulse of light, the first pulse of light, the intermediate pulses and the last pulse of light received by the laser scanner. These systems significantly improve the analysis of the objects of study as well as being a very important aid in the classification of soils, structures, paths, roads, etc. Particularly, the distinction between areas with and without vegetation constitutes a very important element in the development of LIDAR and ALS systems.

This paper is focused on the study of the possibilities raised by TLS (Terrestrial Laser Scanning) systems in archaeology and historical heritage to classify different types of materials. The characteristics of the ground materials, the working scale, the mix of natural materials of different type and artificial materials can be analyzed using these technologies to achieve important results in the heritage studies.

Key words: 3D Laser Scanning, Digitization Echo, Waveform, Cultural Heritage, Terrestrial Scanner, Vegetation.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del láser escáner terrestre 3D sido aplicada en las investigaciones arqueológicas de edificios históricos o estructuras arqueológicas tales como muros, columnas, estatuas, asentamientos, cuevas, megalitos, etc., obteniéndose modelos virtuales 3D de gran precisión. Los datos obtenidos se han utilizado principalmente para llevar a cabo la documentación arqueológica pero, en la actualidad, su uso se ha extendido a otros campos como la restauración, las reconstrucciones virtuales, el análisis de la realidad mediante modelos digitales virtuales 3D, la simulación de distintas propuestas de restauración, etc.

La mayor parte de los trabajos arqueológicos se han enfocado a digitalizar objetos de un tamaño medio, que incluyen desde esfinges y estatuas hasta estructuras arqueológicas en asentamientos y modelos de grandes estructuras arquitectónicas. Así se ha trabajado en la documentación de las estructuras encontradas en la excavación de asentamientos arqueológicos en su totalidad (Gaisecker, 2005) y de zonas específicas de los asentamientos (Lambers *et al.*, 2007), la realización de un modelo virtual de una iglesia (Marambio y García, 2008), la digitalización del teatro romano de Acinipo (Esquivel *et al.*, 2008b), el estudio de las pirámides de Giza (Neubauer *et al.*, 2006), el trabajo de un castillo árabe (Esquivel *et al.*, 2012) con vistas a su restauración o la realización de análisis de tipo espacial (Lambers *et al.*, 2007).

Los objetos más pequeños, fundamentalmente artefactos, plantean otros problemas distintos debido a sus especiales características como son: 1) la existencia de múltiples concavidades y convexidades, 2) el estado de conservación que produce la aparición de elementos extraños que dificultan el trabajo, y 3) la necesidad de encajar de forma precisa el exterior e interior para objetos complicados (Esquivel *et al.*, 2008a).

En este trabajo se utilizan las aportaciones de los instrumentos más recientes, que incorporan nuevas capacidades para obtener mejores prestaciones en el trabajo arqueológico.

EL PRINCIPIO DE LA DIGITALIZACIÓN MEDIANTE ECOS

Uno de los nuevos principios básicos es el de la digitalización mediante ecos, que sobrepasa el simple disparo para analizar varios ecos de la misma señal y así poder discriminar entre distintas formas (fig. 1)

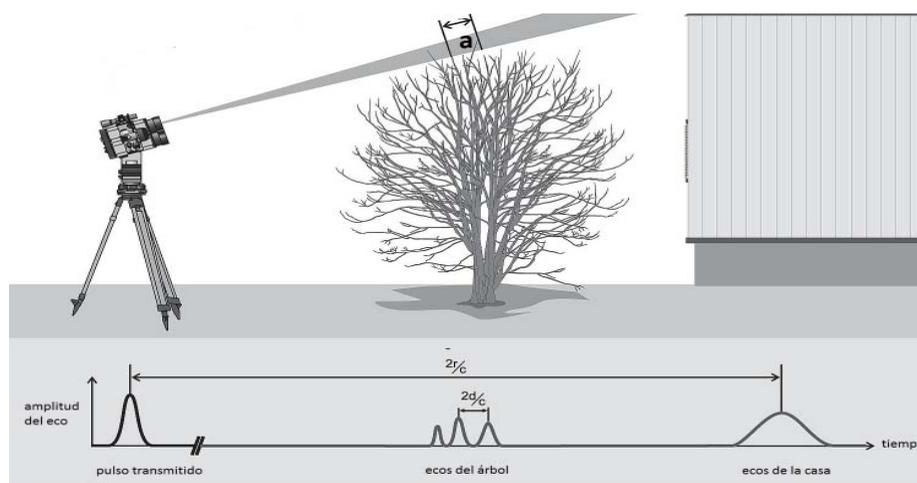


Fig. 1.—Digitalización de los ecos.

El proceso, en el estudio de una situación de cierta complejidad, comienza con el envío desde el sensor de un pulso láser del que solamente una parte alcanza el objetivo al completo, mientras que se producen varios ecos procedentes, p. ej. de las ramas del árbol y, finalmente, los ecos del techo alcanzan al receptor. Durante el proceso la señal analógica es muestreada periódicamente mediante un conversor que realiza el paso de la señal analógica a otra digital, y los datos son transmitidos y procesados previo muestreo (Pfennigbauer y Ullrich, 2008). Entre los resultados más prometedores en la investigación arqueológica destaca la detección de múltiples ecos en base al estudio de la forma de onda, mediante el análisis de medidas de alta frecuencia combinadas con la capacidad de procesar en tiempo real la forma de la onda para eliminar o mitigar el efecto de la vegetación en base a filtros de alta frecuencia y la utilización de octrees.

En este trabajo se ha utilizado un scanner Riegl VZ-400, que permite procesar digitalmente la forma de onda en tiempo real y, una vez identificado el pulso, el análisis estima de forma precisa la amplitud y el tiempo de llegada de la señal. Para ello es necesario disponer de instrumentos capaces de realizar 1.5 millones de medidas por segundo, que utilizando un laser el Riegl VZ-400 pueden regularse los pulsos con razón de repetición de 100 kHz en moda “long range” (42.000 medidas por segundo) y 300 kHz (125.000 medidas por segundo en moda “high range), lo que corresponde a entre 5 y 10 ecos por disparo (en el Riegl VZ-400 se modelizan los ecos simples, el primer eco, el último eco y otros ecos intermedios) (Doneus *et al.*, 2009; RIEGL, 2009).

Un problema importante consiste en intentar discriminar entre dos ecos consecutivos, valor que depende de la anchura del emisor del pulso láser y de la anchura de banda del receptor para determina la distancia mínima, que permita discriminar entre las dispersiones para un disparo láser sin que se superpongan las señales y el instrumento pueda discriminar (en el Riegl VZ-400 esta distancia es de 0.8 m, aunque en circunstancias especiales puede mejorarse algo dicha estimación)). Las características de este instrumento permiten llevar a cabo la digitalización de los ecos son (tabla 1):

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DEL INSTRUMENTO

aplicación terrestre
rango de medidas de 500 m con 80% de reflectividad
repetibilidad y precisión 3/5 mm
razón efectiva de las medidas de 125.000 meas./sec
campo de visión de 100 grados x 360 grados.

Aún cuando se ha utilizado en determinadas situaciones con el objetivo de monitorizar la presencia de vegetación, ya que el crecimiento de las plantas modifica la extensión de las superficies (Monserrat y Crosetto, 2008), desde un punto de vista arqueológico los filtros de vegetación tiene gran importancia para la realización de planimetrías en lugares cubiertos de vegetación, la eliminación de vegetación rasante, etc. La aplicación de los sistemas de escáner láser en la determinación de la vegetación se basa principalmente detectar y analizar los ecos simples como respuesta a los múltiplos de la señal reflejada (Alba *et al.*, 2011), en base a la digitalización de los ecos (fig. 1). Para el estudio de la longitud de onda se ha utilizado la digitalización de los ecos en base al escáner Riegl VZ-400 que tiene la capacidad de realizar el análisis digital de la onda en tiempo real.

Caso de estudio 1

El análisis ha sido aplicado a una parte de las murallas del castillo de Illora (Granada, España), que data del periodo califal (siglos IX-X) y está situado en la cima de un peñón muy escarpado con una gran importancia estratégica, formando parte de la red de castillos militares del Reino de Granada. Desde un punto de vista arquitectónico, está compuesto por tres recintos amurallados con un acceso complicado que incluye barbacanas, rastrillos, etc., junto a un total de 16 torres rectangulares y otras dos circulares en su parte más alta. El estudio se ha llevado a cabo utilizando solamente el escaneo terrestre desde la superficie del terreno, posición habitual para situar el escáner a nivel de suelo (fig. 2).

La base de las aplicaciones de filtrado de vegetación mediante ALS (aerial laser scanner) se basan en analizar las respuestas que se producen a partir de los ecos reflejados por cada pulso simple. Si un ítem tiene una respuesta simple, la señal que

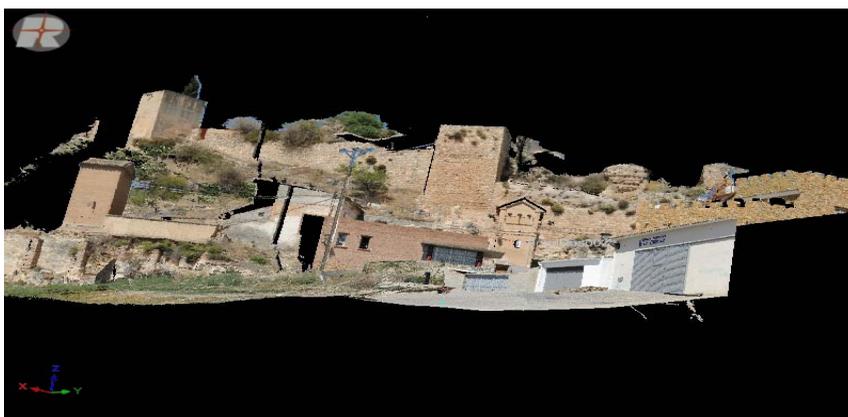


Fig. 2.—Scan de un fragmento de la muralla incluyendo vegetación, muralla, asfalto, torres eléctricas, etc.

retorna es clasificada usualmente como superficie del terreno, como edificio, etc. Sin embargo, si el pulso tiene varios ecos, la respuesta suele clasificarse como vegetación y, los rayos de gran longitud, pueden dividirse en rayos que atraviesan la vegetación y rayos parcialmente reflejados en los árboles y hojas, que parecen proporcionar un eco simple (Doneus *et al.*, 2010). Sin embargo, la forma más usual de analizar los datos en base a un escáner terrestre (terrestrial laser scanner) en alta resolución, consiste en considerar la nube de puntos clasificada según la respuesta que se obtiene en base a los ecos producidos (figs. 3 y 4):

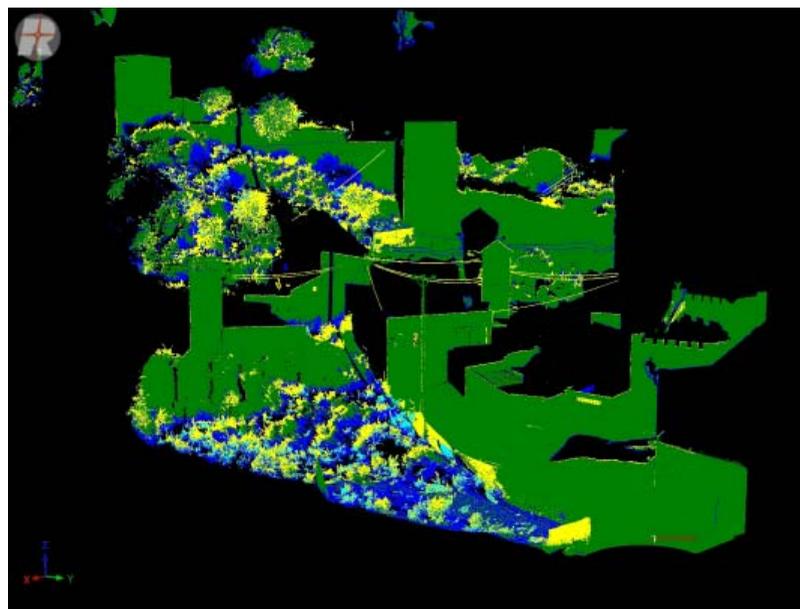


Fig. 3.—Los colores corresponden a: a) objetivos simples (verde), b) primeros ecos (amarillo), c) últimos ecos (azul), y d) otros ecos distintos a los anteriores (cian).

- si la respuesta corresponde a puntos obtenidos de una única reflexión (single), estos puntos se clasifican como construcciones opacas que no dejan pasar el rayo y corresponden a edificios sin zonas transparentes, suelo desnudo, cables, etc.
- si la respuesta corresponde al primer eco, la señal determina el perfil del escáner respecto al primer objeto que el rayo encuentra en su camino. En objetos con perfiles no claros (p.e. en aquellos que corresponden a objetos que forman aristas a cierta distancia) es más difícil determinar la arista).
- si la respuesta corresponde al último eco, se corresponde con el perfil del escáner respecto al último objeto que el rayo encuentra en su camino. Los objetos con perfiles no claros (p.e. en aquellos que corresponden a objetos que forman aristas a cierta distancia) muestran más dificultad para difícil determinar la arista).
- las respuestas distintas de los ecos anteriores indican las áreas correspondientes a zonas de vegetación, vegetación residual, zonas difusas, etc.

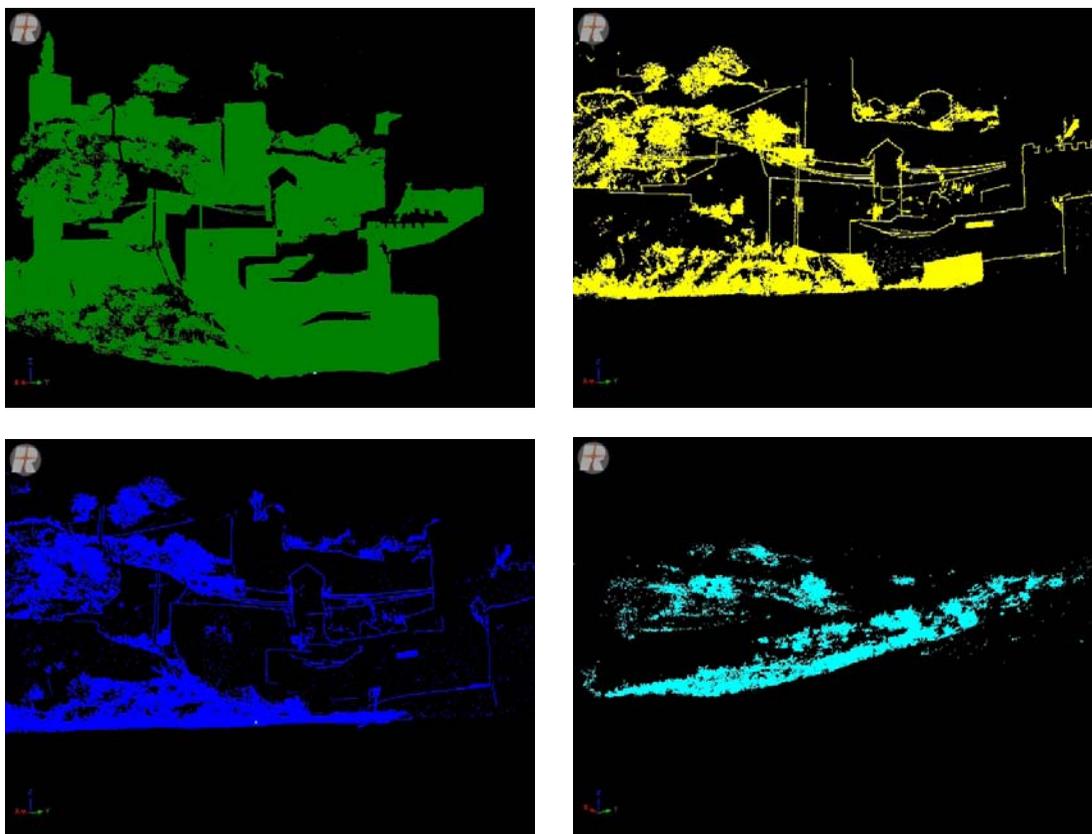


Fig.—4. a) objetivos simples (verde), b) primeros ecos (amarillo), c) últimos ecos (azul), y d) otros ecos distintos a los anteriores (cian).

La utilización de una vista con color verdadero obtenida mediante una cámara de alta resolución (al menos 12 megapíxeles) enlazada al láser y con imágenes sin distorsión referenciadas en orto permite resaltar las distintas zonas, proporcionar mayor nitidez, destacar los distintos elementos, etc., aún cuando la utilización de los primeros ecos enmascara algunos detalles de la imagen. Sin embargo, la utilización conjunta de los otros grupos de ecos permite destacar detalles y aspectos que quizá no destacarían adecuadamente en forma individual pues la inclusión del color aumenta la nitidez de algunos objetos (p.e. el color verde de la vegetación, el rojizo del ladrillo) (fig. 5).

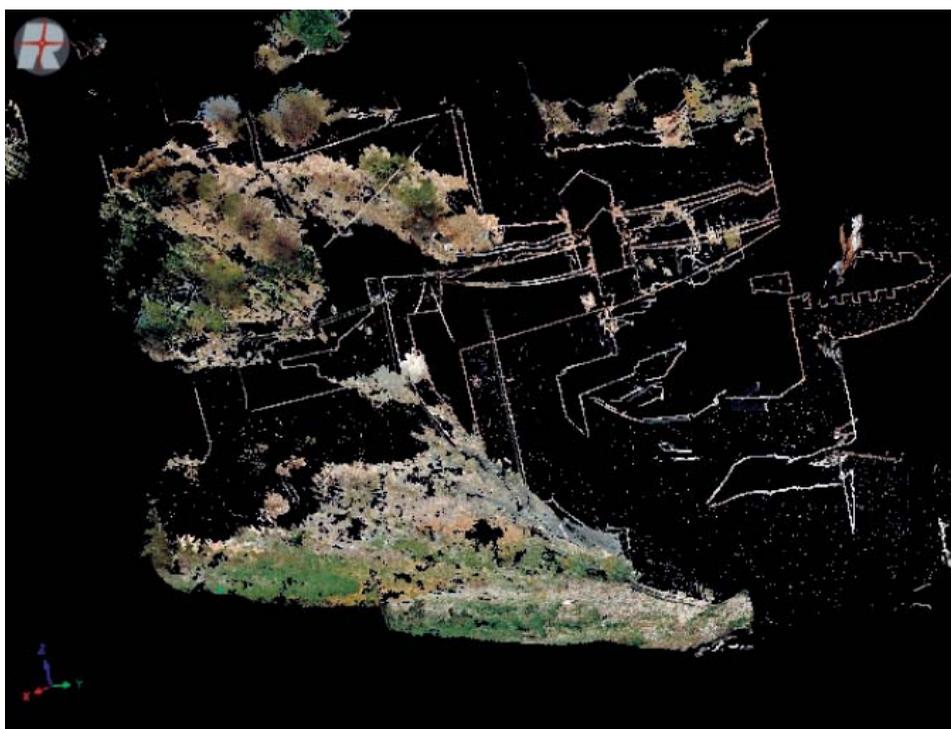


Fig. 5.—Vista de los ecos correspondientes a las primeras y a las últimas tarjetas simultáneamente.

Caso de estudio 2

En este caso se trata de una torre de alquería nazará, localizada en el término municipal de Chauchina, en la Vega de Granada, en una zona llana rodeada de álamos y situada en el anejo de Romilla.



Fig. 6.—Vista de dos laterales de la torre utilizando tres escaneos terrestres, mostrando el estado actual de conservación y el tejado moderno instalado para preservar la estructura.

El escenario es distinto al anterior puesto que se trata de formas con paredes bastante planas y con ángulos rectos (fig. 6), aisladas y rodeadas de gran parte de vegetación arbórea, lo que permite utilizar los ecos con una gran cantidad de posibilidades activando distintos ecos, activando distintos escaneos, mezclando ecos y escaneos convencionales, etc. Esta metodología aumenta bastante las posibilidades de clasificación de los escaneos conjuntos, combinando los ecos de cada uno de los scan para obtener información útil que permita discriminar entre unos objetos y otros. Sin embargo, la cantidad de ecos que se producen debido a las reflexiones en las hojas de los árboles dificultan notablemente la discriminación entre los distintos materiales. Así, a partir de solamente la opción “otros ecos”, es posible separar gran parte de la vegetación, exceptuando los ecos de las hojas separadas entre por menos de 0,8 m que es el límite de discriminación del instrumento (fig. 7).

Sin embargo, es más difícil de discriminar tanto la vegetación correspondiente a los primeros como a los últimos ecos, ya que la gran cantidad de ecos correspondientes a las hojas y las hierbas imposibilitan no solamente poder distinguir unos ecos de otros sino también discriminar entre los primeros ecos (fig. 8).

En el caso de esta estructura, al ser de paredes bastante lisas, destaca bien el perfil de las paredes, obteniéndose de forma bastante nítida las aristas de los muros, los huecos de las ventanas, el perfil de los techos, aún cuando el trabajo se ha realizado con TRL (terrestrial laser scanner), la profundidad de las ventanas, etc. (fig. 9).

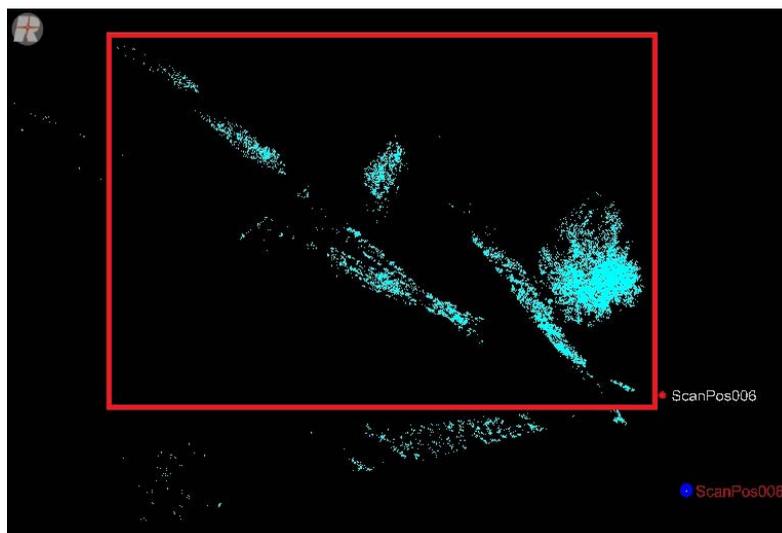


Fig. 7.—Visualización de “otros ecos”, los ScanPos006 y ScanPos008, lo que permite eliminar una gran parte de la vegetación en ambos escaneos.

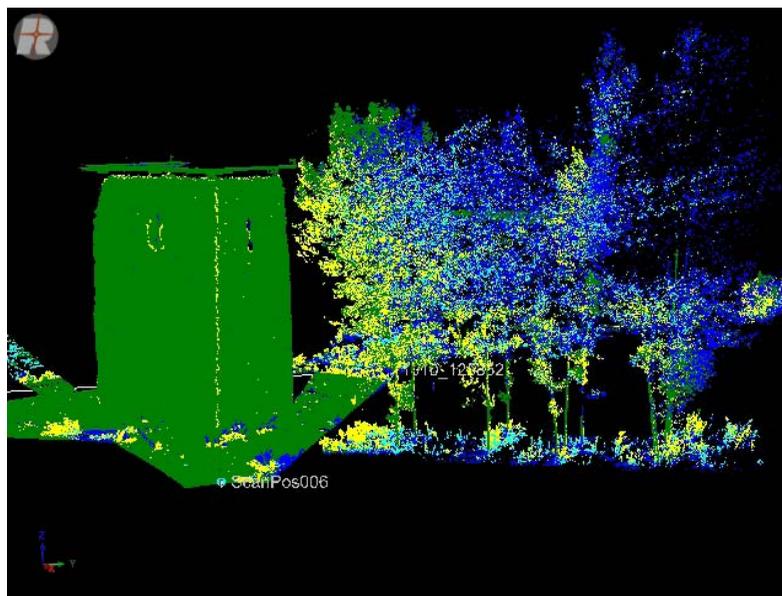


Fig. 8.—Cuando la vegetación es muy tupida es difícil distinguir los ecos con separabilidad menor de 0,8 m.

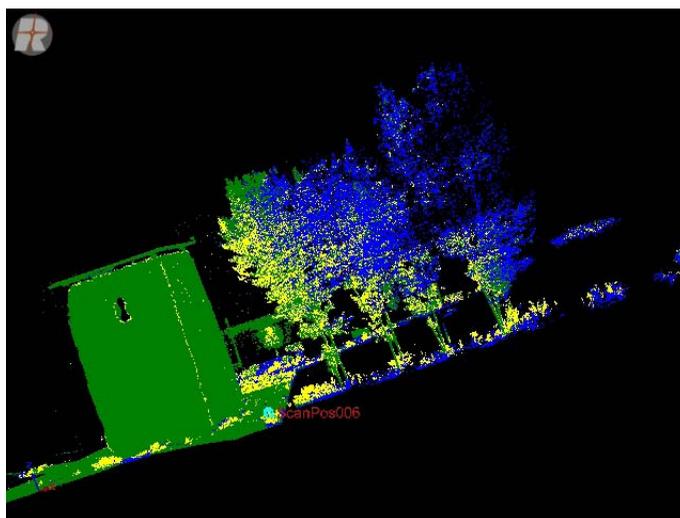


Fig. 9.—Visualización de los ecos simples, los primeros y los últimos ecos.

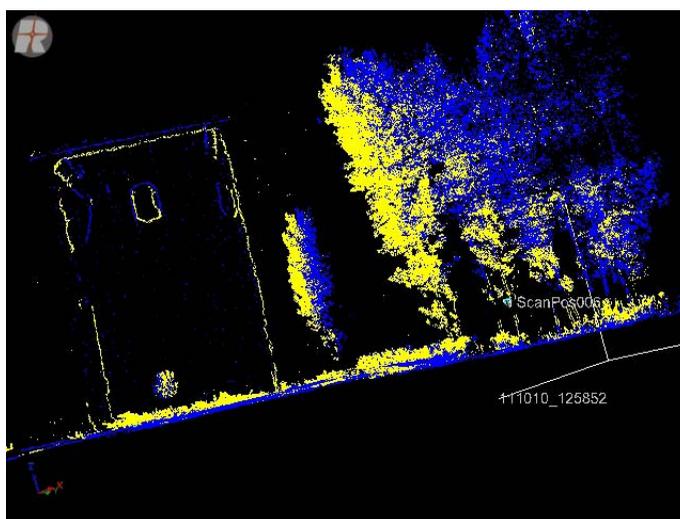


Fig. 10.—Visualización de los primeros y los últimos ecos.

Esta tecnología tiene el inconveniente de limitarse a cuatro ecos, perdiendo cierta cantidad de información. Así, una de las limitaciones proviene de los ecos correspondientes a los single targets, puesto que no es fácil distinguir algunos objetos de forma automática como, por ejemplo, una vegetación muy espesa con la estructura incrustada en ella; sin embargo, la utilización de las primeras, las últimas y las single targets permiten solucionar este problema de forma satisfactoria (figs. 10 y 11).

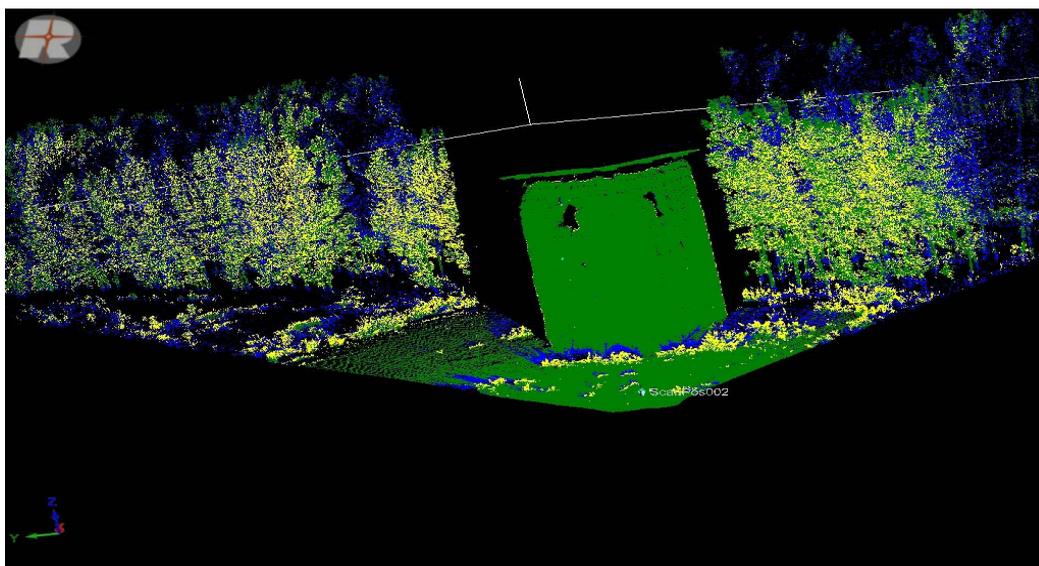


Fig. 11.—Visualización de los primeros, los últimos y los ecos únicos.

CONCLUSIONES

La utilización de los nuevos desarrollos en el campo del láser escáner aplicados a la investigación arqueológica de campo está avanzando a lo largo de nuevas líneas bastante prometedoras. Una de ellas se basa en el uso de dispositivos que digitalicen la onda y analicen la forma de la misma partir de la digitalización de los distintos ecos registrados mediante el análisis en tiempo real de la onda. Estos avances permiten penetrar parcialmente en la vegetación dentro de los límites de penetrabilidad del instrumento, que en el caso del láser escáner RIEGL VZ-400 es menor de 0,8 metros.

Esta metodología se ha aplicado a dos casos usuales en la arqueología. En primer lugar se ha utilizado una parte de la muralla de un castillo árabe construida con piedras y tapial, con escasa vegetación, situado en Íllora (Granada). En este caso la discriminación de los materiales de la panorámica en estudio permite determinar razonablemente bien los distintos materiales, y es posible clasificar los elementos de la escena en base al estudio de los distintos ecos.

En segundo lugar se ha utilizado una torre de alquería en la Vega de Granada, construida fundamentalmente de tapial y con las paredes bastante lisas. El entorno de la torre está encerrado casi completamente por vegetación compuesta de plantas herbáceas, algunos matorrales y álamos de gran altura y espeso follaje. Además, una característica importante es la posibilidad de delimitar la forma de las construcciones, separando la mayor parte de la vegetación de las estructuras. Sin embargo, la espesura del follaje puede enmascarar una parte de los detalles de las estructuras arquitectónicas.

El análisis de la forma de onda ha proporcionado la discriminación de gran parte de la vegetación a partir de los ecos, aún cuando existen algunas lagunas debido a que

la distancia mínima de discriminación entre dos ecos consecutivos está determinada por la anchura del pulso del laser y por la anchura de banda del receptor, que en el caso del RIGEL MV-400 es de 0,8 metros. La utilización de la amplitud calibrada para filtrar la vegetación puede ayudar, en el futuro, a distinguir entre vegetación y estructuras sólidas, además de para interpretar superficies escaneadas.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBA, M., BARAZZETTI, L., RONCORONI, F. y SCAIONI, M. (2011): "Filtering vegetation from terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras", *Italian Journal of Remote Sensing* 43:2, pp. 55-75. doi: 10.5721/ItJRS20114325.
- DONEUS, M., BRIESE, C. y STUDNICKA, N. (2010): "Analysis of full-waveform ALS data by simultaneously acquired TLS data: towards an advanced DTM generation in wooded areas", *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS* (Wagner, W. y Székely, B., eds.) (Vienna, 2010), IAPRS XXXVIII, Part 7B.
- DONEUS, M., PFENNIGBAUER, M., STUDNICKA, N. y ULLRICH, A. (2009): "Terrestrial waveform laser scanning for documentation of cultural heritage", *CIPA 2009, Commission VI, WG VI/4*, 8 páginas.
- ESQUIVEL, J. A., ESQUIVEL, F. J. y ALEMÁN, I. (2008a): "Análisis estadístico de los parámetros morfométricos de un vaso carenado utilizando un láser escáner 3D", *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada* 18, pp. 357-370.
- ESQUIVEL F. J., MORENO J. y ESQUIVEL, J. A. (2008b): "Modelo 3D mediante laser-scanner del Teatro Romano de Acinipo. Ronda (Málaga)", *Cuadernos de Arqueología de Ronda* 3, pp. 177-187.
- ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A. y GONZÁLEZ, C. (2012): "Utilización de un modelo digital mediante laser escáner 3D para la documentación y restauración del Castillo de Piñar (Granada, Andalucía)", *I Congreso Internacional "El Patrimonio Cultural y Natural como Motor de Desarrollo: Investigación e Innovación"* (Jaén, 2010), pp. 2171-2179.
- GAISECKER, T. (2005): "Pinchango Alto. 3D archaeology documentation using the hybrid 3D laser scan system of RIEGL", *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage* (Baltsavias E., Gruen A., Van Gool L. y Pateraki, M., eds.), Taylor and Francis, London, pp. 459-464.
- LAMBERS, K., EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., KUPFERSCHMIDT, D., GAISECKER, T., SOTOODEH, S. y HANUSCH, T. (2007): "Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru", *Journal of Archaeological Science* 34, pp. 1702-1712.
- MARAMBIO, A. y GARCÍA, P. (2006): "Escáner laser: modelo 3D y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa María del Mar en Barcelona", *Arquitectura, Ciudad y Entorno* 1:2, pp. 178-187.
- MONSERRAT, O. y CROSETTO, M. (2008): "Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63:1, pp. 142-154. doi:10.1016/j.isprsjprs.2007.07.008
- NEUBAUER W., DONEUS M., STUDNICKA N. y RIEGL J. (2006): "Combined High Resolution Laser Scanning and Photogrammetrical Documentation of the Pyramids at Giza", *Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Dequal, S., ed.) (Torino, 2006), Vol. XXXVI-5/C34/1, pp. 226-231.
- PFENNIGBAUER, M. y ULLRICH, A. (2008): "Three-dimensional laser scanners with echo digitization", *Laser Radar Technology and Applications XIII* (Turner, D. y Kamerman, W., eds.), *Proc. of SPIE Vol. 6950, 69500U*, pp. 1-8. doi: 10.1117/12.777919.
- RIEGL (2009): *Datasheet RIEGL VZ-400*: www.riegl.com, Viena.