



Topografía de vanguardia en los levantamientos de yacimientos megalíticos.

Estrategias para el conocimiento. Métodos.

D. Linares Catela¹, J.A. Linares Catela², F.R. Lozano Martínez³ y J.A. Barrera Vera⁴ V. Pallarés Silva⁵

¹ y ² Cota Cero G.P.H. S.L. ^{3,4,5} Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla. España

Resumen

Tanto las tecnologías de captura de datos de campo en topografía como las posibilidades de representación gráfica y cartográfica, permiten actualmente obtener productos que superan con creces a los tradicionales planos topográficos y a las detalladas representaciones del dibujo arqueológico que documenta un yacimiento.

Este trabajo pretende mostrar, a través de ejemplos concretos, las ventajas de conjugar el empleo de distintas técnicas de vanguardia para conseguir una documentación gráfica acorde con las demandas actuales, lógicamente in crescendo al socaire de los avances tecnológicos.

En este sentido, en el trabajo de campo se ha empleado escáner láser de alta definición para la captura masiva de datos, GPS RTK para la georreferenciación de las bases del levantamiento, estación total láser para referenciar las nubes de puntos al sistema UTM y cámara digital de alta resolución aerotransportada mediante UAV's, para la captura de texturas. En el trabajo de gabinete se ha dispuesto de software de última generación para el registro de los distintos escaneos, la aplicación de texturas a la nube de puntos, el modelado de superficies y la obtención de los distintos productos gráficos.

La calidad de los productos obtenidos posibilita un análisis arqueológico mucho más exhaustivo que una documentación tradicional, pero especialmente, es la rapidez de realización del trabajo de campo, el verdadero potencial de las nuevas tecnologías en los sitios arqueológicos.

Palabras clave: DIBUJO ARQUEOLÓGICO, LEVANTAMIENTO GRÁFICO, MODELADO 3D, NUEVAS TECNOLOGÍAS.

Abstract

Both on-site data-collection surveying technologies and the new possibilities of graphical and cartographical techniques, currently allow us to obtain products that far exceed the traditional topographic maps and detailed representations of the graphical drawings that document the archaeological sites.

This paper aims to show, through concrete examples, the advantages of combining the use of different state-of-the-art technologies to achieve a graphic documentation in line with current demands, which logically are increasing due to technological advances as well.

In this way, different instruments have been used to carry out the field work: a high-definition laser scanner for massive data capture, a RTK GPS for the georeferencing the base points of the surveying, a laser total station to reference the point clouds to the UTM system and UAV devices, with a high resolution digital camera on board, to capture textures. In the office work state-of-the-art software has been used in order to perform the registration of different scans, application of textures to the point cloud, surface modelling and obtain various graphic products.

The quality of the products obtained enables archaeologists to achieve an archaeological analysis much more comprehensive than using a traditional documentation; last but not least, it is the speed of the fieldwork performance, the true potential of new technologies in the archaeological sites.

Keywords: ARCHAEOLOGICAL DRAWING, ARCHAEOLOGICAL SURVEYING, 3D MODELLING, NEW TECHNOLOGIES.

1. Introducción

No cabe duda que, dentro de los trabajos arqueológicos, el aspecto de la documentación geométrica de los mismos es de vital importancia. Un registro exhaustivo de la información arqueológica del lugar de trabajo en general así como los distintos detalles multiplicará las posibilidades de análisis y resultados que se pueden obtener.

Este trabajo implica por un lado la toma de datos *in situ* y por otro, un arduo proceso de toda la información obtenida en el paso anterior. Las nuevas posibilidades de representación gráfica y cartográfica nos ofrecen productos que superan con creces a los tradicionales planos topográficos, pero requieren en contraprestación un trabajo intenso en su proceso.

El trabajo que se realiza en un yacimiento, puede requerir en ciertos momentos rapidez además de precisión, de ahí que los tradicionales métodos topográficos y de fotogrametría, que nos ofrecen representaciones planimétricas en 2D (plantas, secciones y alzados) pueden verse complementados con equipos, como el escáner láser de alta definición para captura masiva de datos, que permiten el registro en 3D y el consecuente modelo tridimensional. Opción cada vez más común es recurrir a estos sistemas al ofrecernos además de la geometría del yacimiento con distintas posibilidades de resolución, modelos con un aspecto muy similar al real.

Este artículo pretende mostrar las ventajas del uso conjunto de distintas técnicas para conseguir una documentación gráfica acorde a las demandas profesionales y aprovechando al máximo las posibilidades que nos ofrecen los continuos avances tecnológicos. También es intención de este artículo, mostrar

nuestra experiencia en el campo de los levantamientos arquitectónicos y arqueológicos en los que venimos empleando GPS y scanner laser 3D desde 2005 [1]. En este caso hemos usado un Láser Escaner 3D modelo Scanstation 2 de Leica.



Figura 1. Vista parcial de los dólmenes 3-4 de El Pozuelo en proceso de excavación arqueológica, donde se aprecia la irregular geometría a captar en un levantamiento de alta definición. Fuente: fotografía de los autores

Lo haremos apoyándonos en ejemplos concretos, consistentes en los trabajos de documentación realizados en diversos dólmenes, excavaciones en yacimientos romanos y de arquitectura almohade, en Andalucía.

Nos centraremos especialmente en los trabajos de obtención de información y escaneado *in situ*, aunque también haremos referencia a los trabajos de procesado de dicha información para la consecución del modelo virtual 3D.

2. Equipos para captura masiva de datos. Láser escáner.

El equipo del que nos hemos servido en este trabajo se denomina Láser Escáner Terrestre, con tecnología *time of fly* [2], que permite la captura de información rápida y precisa de una superficie o volumen de manera no intrusiva. Este método de medición se le denomina Documentación Geométrica de Alta Definición.

El láser escáner, al trabajar, realiza un barrido en abanico de la superficie objeto de estudio y obtiene miles de puntos por segundo, aportándonos una **nube de puntos 3D** referenciados a un sistema de coordenadas (x,y,z).

Puesto que el escáner dispone de una cámara fotográfica, puede asociar a cada punto medido el color del píxel correspondiente en la fotografía previamente obtenida, lo que permite que, siendo aun solo una nube de puntos sin mallar, adquiera gran realismo (figura 2).

FIGURA

Figura 2. Imagen de un fragmento de la nube de puntos tomada en el yacimiento. Fuente: elaboración propia.

Dada la capacidad de registro de volúmenes en 3D de esta herramienta, está obteniendo gran acogida en el ámbito del Patrimonio Cultural en general y como en el caso que nos ocupa, en el registro de datos en excavaciones arqueológicas. Permite la captación, tanto de volúmenes positivos como restos de muralla, túmulos y enterramientos, como de volúmenes negativos como fosas y agujeros.

La gran ventaja que nos aporta este tipo de captaciones consiste en que nos permite archivar y generar modelos de momentos concretos del trabajo arqueológico. Esto nos ofrece la posibilidad de, tanto apreciar la evolución de los distintos trabajos o fases que se van realizando, como de estudiar u obtener datos de todos y cada uno de estos modelos generados. En este sentido, podemos obtener diverso material gráfico, mediciones de las distintas fases y llegar incluso a compararlas.

3. Método y proceso de trabajo.

El trabajo realizado en esta experiencia lo dividimos en dos fases: Trabajo de campo y Procesado de la información y resultados. A continuación nos centramos en cada uno de ellos y realizamos apreciaciones concretas en cada caso.

Una vez en campo, parece oportuno realizar un escaneo con amplio campo de visión y lo más denso posible, para obtener así la documentación con el mayor detalle disponible. Nada más lejos de la realidad. Tenemos que considerar que el tiempo de captura es directamente proporcional a la resolución con que decidamos configurar el escáner (densidad de puntos a la que configuremos en el escaneo). Por otro lado, puede ocurrir que una resolución demasiado alta, vaya más allá de nuestras necesidades. Por ese motivo es muy importante valorar el grado de resolución que necesitamos en función de las necesidades de nuestro trabajo.

También es muy importante una planificación previa del trabajo, que redundará en no duplicar el escaneo de determinadas zonas y optimizar el tiempo de trabajo.

Es necesario realizar, en primer lugar, el escaneo de las zonas exteriores, especialmente en yacimientos extensos, como es el caso de los monumentos megalíticos funerarios (dólmenes). Debido a las considerables irregularidades del terreno y con el fin de registrar todas las zonas, se necesitaron multitud del escaneos.

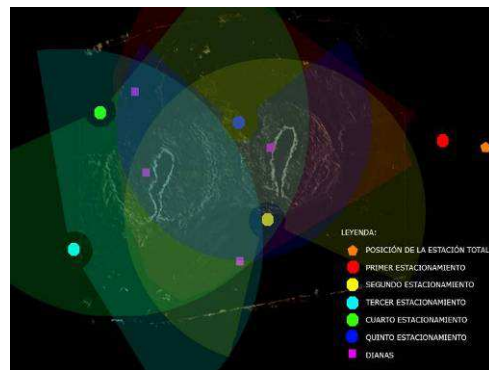


Figura 3. Planta de situación y cobertura de los distintos escaneos para registrar las superficies exteriores de un yacimiento megalítico. Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, se procede al escaneo de los interiores de las estructuras internas (corredores y cámaras) y las zonas del borde superior de las mismas, de modo que nos permita enlazar las nubes de puntos más fácilmente con las obtenidas en la primera etapa.

Las nubes de puntos que se obtienen de los escaneos permiten realizar visualizaciones, ortoimágenes, secciones y medidas aunque su procesado permite obtener formas más comprensibles del elemento registrado.

Trabajo de campo.

En el trabajo de campo, el escáner, ha de complementarse con un GPS-RTK, para georreferenciar al menos dos bases materializadas en el terreno, y una estación total para levantar las bases tomadas con GPS y los puntos en los que se sitúen las dianas para la integración de los escaneos en el sistema de referencia.

Estos dos sistemas pueden ir integrados como es el caso del material que nuestro equipo de trabajo utiliza, el SmartStation de Leica, que en esencia consiste en la combinación de un GPS sistema 1200 y una estación robotizada TPS1200. Con este sistema, directamente en campo, podemos levantar los puntos con coordenadas absolutas, facilitando considerablemente el trabajo de gabinete y evitando errores de transformación. Por otra parte, de este modo la incorporación de los datos a un GIS se puede llevar a cabo prácticamente en tiempo real [3].

El scanner se asienta sobre un trípode de madera, que presenta mayor estabilidad que los de aluminio, del mismo tipo que el de la estación total pero con mayor robustez.

También empleamos dos ordenadores portátiles, pues en un trabajo de campo tan intenso y, habitualmente distante de nuestro centro de trabajo, cualquier contratiempo informático tanto de hardware como de software puede hacernos perder la jornada. Hay que tener en cuenta que un retraso en la toma de datos puede redundar en la paralización de la excavación con lo que ello puede suponer para el resto de los profesionales. En el mismo sentido, el equipo cuenta originariamente con dos baterías, pero para este tipo de trabajos resultan claramente insuficientes, por lo que es necesario recurrir a un generador para recargar tanto las del scanner como las de los ordenadores.



Figura 4. Vista general de la excavación de los dólmenes 3-4 de El Pozuelo. Fuente: fotografía de los autores

El scanner trabaja realizando inicialmente una panorámica fotográfica de la zona a escanear, sobre la cual se selecciona el campo de visión deseado. Previamente establecemos la resolución o densidad de puntos idónea, para lo que se mide la distancia existente entre el escáner y el punto más alejado del área a escanear, donde estableceremos la resolución máxima que puede llegar a 0.1 mm.

La duración de cada escaneo puede oscilar entre 5 y 120 minutos aproximadamente, en función de la resolución, la distancia y el campo de visión. Pero hay que tener en cuenta, no solo la duración del escaneo propiamente dicho, sino la configuración del mismo, la generación de la panorámica, el posicionamiento, la búsqueda de recubrimientos y solapes y la lectura de dianas. Todas estas tareas pueden suponer un tiempo muy superior al del propio escaneo. A modo de ejemplo citaremos el caso de una excavación de un yacimiento megalítico: los dólmenes 3-4 de El Pozuelo (Zalamea la Real, Huelva), compuesto por dos grandes construcciones megalíticas y un conjunto de estructuras externas, contando con una superficie aproximada de 2200 m² en la que se han llevado a cabo dos maratónicas jornadas de trabajo. En la primera se ha registrado la geometría del exterior del yacimiento para lo que se requirieron 5 posicionamientos que, dado el amplio campo de visión y la resolución empleada, los trabajos se prolongaron desde primera hora de la mañana hasta las 22 h aproximadamente. La segunda jornada se extendió desde primera hora de la mañana hasta que desapareció la luz natural y el trabajo realizado comprendió el escaneo de las zonas en negativo, es decir, el interior de las estructuras megalíticas (corredores y cámaras) y los túmulos de los dos dólmenes. Esta misma superficie sin concavidades ni oclusiones significativas hubiera podido escanearse en sólo 50 minutos con un equipo de estas características.

En el escaneo de las zonas en negativo e interiores nos encontramos con el problema de las oclusiones que provocan unas superficies sobre otras, como consecuencia en cada escaneo las zonas ocultas son tantas que requieren gran cantidad de estacionamientos. Para maximizar el área de barrido y minimizar las oclusiones es necesario planificar concienzudamente los escaneos y posicionar el scanner en lugares poco verosímiles (figura 5). La mayoría de los scanner permiten trabajar desnivelado de modo que a posteriori puede nivelarse la nube de puntos [4]. De este modo en nuestros trabajos de campo para el registro de los interiores angostos nos hemos servido de un cuerpo de andamio para colocar el scanner invertido en unos casos (figura 6) y en otros simplemente apoyado en el suelo directamente sin necesidad de trípode (figura 7). Estas opciones consiguen minimizar al máximo la zona muerta del campo de visión del scanner (un cono de 45° bajo la vertical del centro óptico del scanner). El principal escollo a salvar en caso del empleo de soportes auxiliares para la operación en posición invertida u horizontal es, aparte del peso del equipo, la falta de rigidez del soporte, que puede provocar la interrupción del escaneado al activarse el seguro de estabilidad con los propios movimientos del scanner.

Nuestra experiencia (en contra de lo que suele recomendar el fabricante del scanner) es que los registros de las distintas nubes de puntos se realizan con mayor precisión mediante solape de nubes de puntos y ajuste por mínimos cuadrados que con dianas de control. No obstante, en los trabajos en este tipo de levantamientos como el que presentamos, en los que las superficies son muy irregulares y con infinidad de oclusiones, en los que el recubrimiento de la totalidad de las superficies hace muy difícil la captación redundante desde distintos estacionamientos, los distintos escaneos se combinan gracias al

uso de **dianas de control**, que quedan registradas en el escaneo y permiten su uso como referencia para combinar las distintas nubes de puntos. Como mínimo, son necesarias tres dianas para la realización de cada escaneo en el caso de escaneos no nivelados y dos para escaneos nivelados. No obstante cuanto mayor sea su número mejor será la precisión que se puede obtener compensando el encaje por mínimos cuadrados.



Figura 5. Estacionamiento en un promontorio para mejorar la visibilidad de la excavación. Fuente: fotografía de los autores



Figura 7. Estacionamiento del scanner sin trípode en el interior de una cámara. Fuente: fotografía de los autores

Procesado de información y resultados

En el procesado de las nubes de puntos, la primera fase consiste en realizar la unión de los distintos escaneos realizados por toda la superficie del yacimiento, para lo que se ha usado como software Cyclone.

La presencia de elementos de interferencia como instalaciones, vegetación, o cualquier elemento cuya presencia no sea oportuna, es eliminado de la nube de puntos mediante un proceso de depurado, de modo que evitamos la aparición de cualquier elemento que pueda distorsionar el resultado final. En nuestro caso los elementos a eliminar son principalmente la vegetación, las instalaciones auxiliares de obra, especialmente los andamios empleados como soporte para la colocación del scanner en posición vertical invertida y las interferencias del propio personal.

A partir de la nube de puntos globalmente registrada y limpia de ruidos y elementos que no forman parte del conjunto a representar, podemos obtener fácilmente plantas, alzados, secciones, ortoimágenes, perspectivas, etc.

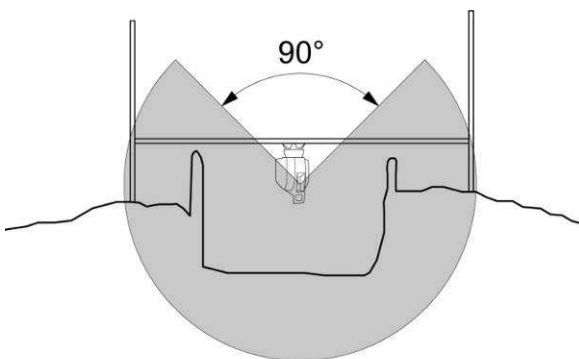


Figura 6. Esquema de la colocación del escáner en posición invertida con la ayuda de un cuerpo de andamio. Fuente: elaboración propia

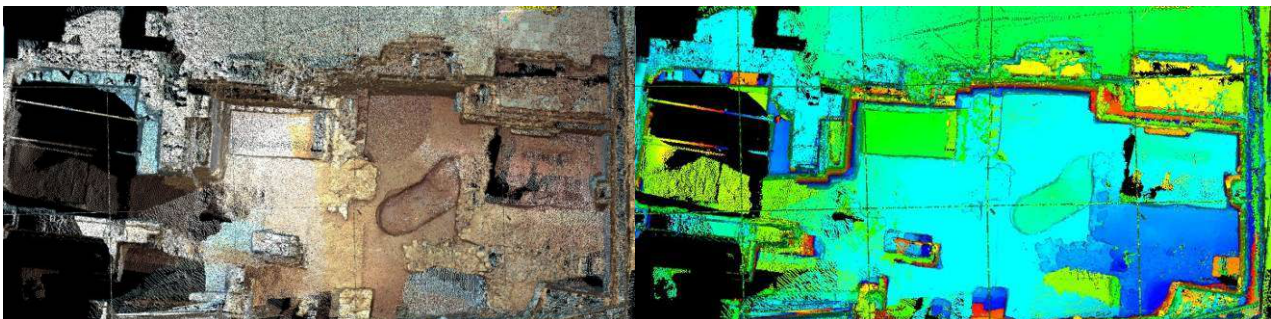


Figura 8. Ortoimagen de una excavación, obtenida a partir de la nube de puntos. Con asignación de RGB real (superior) y con segmentación por cotas (inferior). Fuente: elaboración propia

Adicionalmente para un análisis geométrico más exhaustivo y especialmente para mejorar la visualización y el trazado

automático de planimetrías podría realizarse triangulación 3D de la nube de puntos y convertir en superficies las nubes mediante



mallas. Sin embargo, para trabajos en los que los elementos a representar tienen una geometría tan orgánica el proceso de mallado se hace muy complejo. Hasta el momento no existe software adecuado para una triangulación 3D real automática o semiautomática que permita obtener de manera eficiente modelos digitales tridimensionales de superficies tan orgánicas como las que nos ocupan.

Por consiguiente, un problema a considerar de esta técnica consiste en que, a pesar de la rapidez y eficacia de la captura de puntos, su procesamiento es muy complejo y es necesario invertir mucho trabajo para obtener buenos resultados. La triangulación de Delaunay empleada en topografía resuelve perfectamente las redes TIN empleadas en modelos digitales de terrenos pero su empleo está limitado a superficies 2.5 D como es el caso de las superficies topográficas. Por otro lado, programas de modelado típicamente 3D tienen fuertes limitaciones al trabajar con estas nubes cuyas densidades de puntos son muy variables y cuentan con gran número de oclusiones, provocadas por la abundancia de concavidades. Como consecuencia, el modelado digital de este tipo de superficies, con la tecnología actual, no es eficiente y su consecución supondría un tedioso trabajo manual que no se vería compensado en absoluto por los resultados obtenidos, toda vez que los programas de manejo de nubes de puntos de última generación permiten una visualización realmente interactiva de las mismas y la obtención de medidas, ortofotogramas y secciones directamente a partir de la nube de puntos sin necesidad de modelado previo.

4. Resultados y conclusiones

A tenor de nuestra experiencia en la documentación de yacimientos arqueológicos, apoyándonos en la capacidad del escáner láser, podemos presentar como primera y destacable ventaja frente a los métodos tradicionales, la rapidez, exactitud y agilidad en la captura de datos. Por supuesto, sin dejar de mencionar los resultados obtenidos: modelos virtuales 3D que nos ofrecen no solo un aspecto mucho más real, sino la posibilidad de obtener fácilmente alzados, plantas, ortofotos y mediciones.

La rapidez mencionada, se conseguirá siempre que llevemos a cabo una planificación previa de los trabajos a realizar, de modo

que minimicemos el número de escaneos así como la duración de éstos. Trataremos de optimizar el equilibrio dentro de la relación entre el tiempo requerido y resolución necesaria para nuestro trabajo. Hay otra relación importante a considerar. Cuanto mayor sea el número de escaneos, mayor será el tiempo que deberemos dedicarle en gabinete a procesar las nubes de puntos obtenidas y enlazarlas unas a otras.

Cabe destacar un aspecto no mencionado hasta ahora, que consiste en la importancia de las condiciones de iluminación en los escaneos. En estos casos, debido a la extensión considerable de la superficie a escanear así como de sus numerosas irregularidades, necesitamos largas jornadas de trabajo para realizar el levantamiento. Ello implica que la iluminación natural de la que disponemos no solo es limitada en el tiempo, sino que según la hora del día, encontramos zonas más o menos iluminadas. Puede darse el caso de que la zona quede demasiado oscura o tan iluminada que “quememos” la fotografía, lo que no favorece que el modelo resultante del escaneo presente un aspecto uniforme en cuanto a iluminación. Además la circunstancia de no tratarse de una superficie lisa, sino bastante irregular, provoca que en la fotografía se presenten inevitablemente zonas de sombras, lo que requerirá especial dedicación para minimizarlas en el momento del procesamiento. En última instancia la textura asignada por el scanner puede sustituirse por imágenes obtenidas con cámaras convencionales pasando por un proceso de calibración [5] y posterior referenciación que dilataría enormemente el trabajo de gabinete.

Un inconveniente importante del uso del escáner láser radica en su elevado coste de adquisición. Y no solo en lo que a hardware se refiere, sino a la adquisición de software y sus licencias.

Otra ventaja a considerar con el uso de esta tecnología la hallamos en que, si hemos realizado un trabajo bien planificado, prácticamente se evitan posibles vueltas al campo de trabajo a realizar nuevos escaneos. Es común que con otras técnicas debamos volver al campo a registrar elementos que no han quedado suficientemente detallados o que no le dedicamos la suficiente atención. Si disponemos de las nubes de puntos, nos beneficiamos de una base de datos completa y precisa sobre la que podemos trabajar indefinidamente y obtener multitud de productos finales

Referencias

BARRERA VERA, José Antonio, La Muralla Almohade de Sevilla: Aplicación de tecnologías de vanguardia a los levantamientos en arqueología y restauración. *Aparejadores: Revista del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla*, N° 69. Sevilla 2005, pp. 48-55

En contraposición con los de corta distancia que suelen actuar por triangulación, miden la distancia multiplicando el tiempo que tarda el rayo láser en reflejarse en la superficie interceptada por la velocidad de la luz.

HERRÁEZ BOQUERA, José. Modeling caves with cave paintings – GIS for handling pictures and spatial data information. *Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites: Traditional and Modern Methods: Potsdam (Germany), September 18–21, 2001: Proceedings of the 18th International Symposium, CIPA 2001*. Jorg Albertz, ICOMOS, UNESCO, and ISPRS, pp. 607–610.

El nivelado puede obtenerse mediante el escaneo de dianas colocadas en puntos de coordenadas conocidas o en el proceso de registro al ajustar la nube a otras nubes solapadas. Pero un sistema experimentado por nuestro equipo de trabajo con gran éxito consiste en escanear con gran densidad una plomada lo más larga y estática posible, lo cual nos proporciona una “Z” del terreno inmejorable.

HERRÁEZ BOQUERA, José, NAVARRO ESTEVE, Pablo. Calibración de una cámara fotográfica convencional y su aplicación fotogramétrica en documentación del patrimonio. *Topografía*