

LA DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE ELEMENTOS PATRIMONIALES CON LÁSER ESCÁNER TERRESTRE. LA EXPERIENCIA DEL LAPA EN GALICIA¹

GEOMETRICAL DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE ELEMENTS WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING. THE LAPA'S EXPERIENCE IN GALICIA

PATRICIA MAÑANA BORRAZÁS; REBECA BLANCO-ROTEA;
ANXO RODRÍGUEZ PAZ

Laboratorio de Patrimonio, Instituto de Estudios Gallegos Padre Sarmiento del CSIC

Resumen

En este texto se presentan una serie de trabajos de documentación geométrica de diversos elementos patrimoniales realizados con láser escáner 3D. En ellos hemos empleado el modelo de Leica HDS3000, un instrumento topográfico que permite una captura de datos densa y con una resolución milimétrica. El objetivo principal de este documento es evaluar las posibilidades de registro de este escáner en distintos tipos de sitios así como los problemas que se generaron. Como ejemplos, presentamos el proceso de trabajo para obtener la topografía de un castro, el registro de detalle de una excavación, el levantamiento de un edificio y de unos petroglifos.

Palabras-Chave

Topografía de Alta Definición; Láser Escáner 3D; Láser Escáner Terrestre, Metodología de Registro Arqueológico; Representación Gráfica; Reconstrucciones Tridimensionales.

Abstract

In this text we show some geometric documentation of various elements of Cultural Heritage. We use a Terrestrial Laser Scanner, a Leica HDS3000, a survey instrument that allows a high density register with pinpoint accuracy. The basic aim of this article is to evaluate the documentation possibilities of this kind of Terrestrial Laser Scanner and the different problems that emerged. As an example, we present the work processing of the topographic survey of a hillfort, the record in full detail of an archaeological excavation, the survey of a building and a two site of Rock Art.

Keywords

High-Definition Survey, Laser Scanner, Terrestrial Laser Scanner, Archaeological Documentation, Point Cloud, Graphic Representation, Three-Dimensional Reconstructions.

¹ Entregado el 18.03.2009

PRESENTACIÓN

El objetivo de este artículo es presentar la experiencia que en las últimas fechas hemos acumulado en el Laboratorio de Patrimonio (LaPa) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) sobre el uso de una herramienta topográfica algo novedosa en Galicia: el Láser Escáner 3D o Láser Escáner Terrestre. Este instrumento permite realizar documentaciones geométricas de superficies o volúmenes con precisión, gran densidad de información y agilidad en la captura de datos. Al Láser Escáner también se le denomina Láser Escáner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS, ver LICHTI *et alii*, 2008), por diferenciarlo de otros instrumentos LIDAR (*Light Detection and Ranging*) de características similares y que también operan con láser pulsado, como el LIDAR aéreo, que opera sobre una plataforma aerotransportada y permite la telemetría y la teledetección. Pero también se denomina Láser Escáner 3D (*3D Laser Scanner*), Escáner Láser, Escáner 3D, LIDAR Terrestre, *Close-range Laser Scanner*; *Ground-based Laser Scanner*; etc. Más allá de la denominación del propio instrumento, en algunos casos, al proceso de trabajo que lo emplea como herramienta de medición se le denomina Levantamiento o Topografía de Alta Definición (*High-Definition Survey*, HDS), Escaneado Láser 3D (*3D Laser Scanning*), incluso también se puede encontrar como Digitalización Láser.

El láser escáner es un instrumento habitual en proyectos de ingeniería y ha sido empleado en campos diversos, como la construcción de barcos o coches, diseños de infraestructuras industriales y civiles, etc., habiéndose trasladado con gran éxito al campo del Patrimonio Cultural. En los últimos años se ha convertido en un instru-



Figura 1. Láser Escáner estacionado en campo, en basílica de la Ascensión (Allaríz, Ourense).

mento más accesible y de uso más habitual en todo el mundo, y está en proceso de constituirse en un estándar de documentación del Patrimonio (ver LICHTI *et alii*, 2008; ISPRS). En España también se está generalizando su uso y se puede encontrar una amplia bibliografía sobre la captura de nubes de puntos por medio láser escáner 3D (p.ej., ARIAS *et alii*, 2005; LAMBERS *et alii*, 2007; LICHTI *et alii*, 2008; MARAMBÍO, GARCÍA, 2006; MONSERRAT, CROSETTO, 2008; PÉREZ, PÉREZ, 2007; ROCA-PARDIÑAS *et alii*, 2008; RODRÍGUEZ *et alii*, 2008; SCHULZ y INGENSAND, 2005).

En este artículo nos interesa incidir en las posibilidades de aplicación del láser escáner y exponer unos casos de documentación heterogéneos y su problemática, bien porque se trata de elementos patrimoniales muy diferentes, bien porque la escala de documentación o la necesidad de representación de los mismos es diversa. Nuestra experiencia se centra en el uso de un aparato y programas concretos, habiendo en el mercado diversos tipos de escáneres, marcas comerciales y una cantidad cada vez mayor de software para manejar esta información. Hemos empleado el modelo de escáner *HDS3000 de Leica* y los programas *Leica Cyclone* y *CloudWorx Pro for AutoCAD* para la toma de datos y post-procesado de los mismos. En la bibliografía mencionada se pueden encontrar diversas experiencias con este y otros instrumentos, con diversos programas, elementos documentados, etc., así como otros debates sobre esta herramienta o la precisión de los distintos aparatos², que en cierta medida reflejamos aquí.

Tipo de instrumento	Láser Escáner de impulsos de alta velocidad, con precisión, alcance y campo visual topográfico completo, con cámara digital integrada de alta resolución
Campo de visión	360° Horizontal × 270° Vertical
Clase láser	3R (IEC 60825-1), Color verde, visible
Precisión de superficie modelada / ruido	2 mm, 1
Alcance	300 m @ 90%; 134 m @ 18% de albedo
Velocidad de escaneo	Hasta 4.000 puntos/seg, velocidad máxima instantánea
Resolución de escaneo	<i>Tamaño del punto:</i> " 6 mm desde 0-50 m (basado en definición Gaussiana) <i>Espaciamiento entre puntos:</i> Selección horizontal y vertical; 1,2 mm de espaciamiento mínimo, cubriendo todo el alcance <i>Densidad máxima de muestra:</i> 1,2 mm

Tabla 1. Especificaciones del Láser Escáner 3D Leica HDS3000 según fabricante.
 Más información técnica en <http://www.leica-geosystems.com/>

² Un estudio en el que se comparan diversos modelos de láser escáner, su capacidad de registro y fiabilidad se encuentra en BOEHLER *et alii*, 2003.

Como se detalla en la tabla, el modelo empleado es un láser escáner de impulsos (sistema de medición *pulsed time-of-flight*) que mide a través de un haz láser y puede alcanzar una densidad milimétrica, como máximo un punto cada 2 mm. La distancia a la que puede registrar datos está entre 1 m y los 250-300 m, lo que permite documentar zonas amplias de terreno, edificios, etc. Realiza un barrido de la superficie captando miles de puntos por segundo y como resultado se obtiene una nube de puntos en 3D compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas cartesiano (x, y, z). La visualización de esta nube de puntos puede alcanzar gran realismo ya que permite representar el color de la superficie documentada. Esto es posible gracias a que relaciona de manera directa cada punto medido con el láser con el valor de luminosidad y color del píxel correspondiente de la fotografía que se obtiene con la cámara fotográfica que el instrumento tiene integrada.

El modelo de láser escáner que hemos empleado tiene una forma muy similar a la de una estación total aunque de mayores dimensiones y peso, siendo necesario emplear además para la toma de datos en campo un ordenador portátil y unas baterías externas para alimentar el instrumento, lo que supone un importante esfuerzo para trasladar y colocar el aparato.

La captura de datos tiene cierta problemática y hay condiciones que empeoran la calidad del registro (BOHELER *et alii*, 2003) y aumentan el ruido o residuos de la nube de puntos, es decir, en la nube se representan puntos que no se corresponden con la realidad. Los casos en los que este *ruido* aumenta son, por ejemplo, al registrar una superficie que se encuentra en una posición oblicua respecto a la situación del escáner o en los bordes de los elementos registrados; también debe tenerse en cuenta la distancia a la zona medida, ya que a partir de cierto límite la precisión es menor. Esto se debe básicamente a que, cuando se miden zonas en las que el láser percute con un ángulo sesgado, la información que le vuelve al escáner de un único impulso es de diferentes localizaciones, lo que genera puntos residuales (el tamaño de láser es importante para evitar este ruido, cuanto más pequeña sea el área de incidencia del láser, mayor precisión). Otra cuestión son las propiedades reflectantes de las superficies (albedo) (BOHELER *et alii*, 2003) que influyen en la fuerza de la señal de retorno que recoge el escáner. Por ejemplo, las superficies de colores oscuros tienen un factor de reflexión más débil y las blancas más fuertes, por lo que los colores oscuros tienen un factor de desviación más alto y acumulan más error, aunque eso también depende del tipo de espectro del láser (rojo, verde, etc.). Además del color, las propiedades reflectantes también están influidas por la textura: las brillantes y lisas tienen un factor de reflexión más fuerte que las mates y rugosas. También es habitual el residuo que resulta de la interferencia de ele-

mentos móviles entre el escáner y el elemento en el momento de la medición, como coches o personas, aunque es un efecto más controlable.

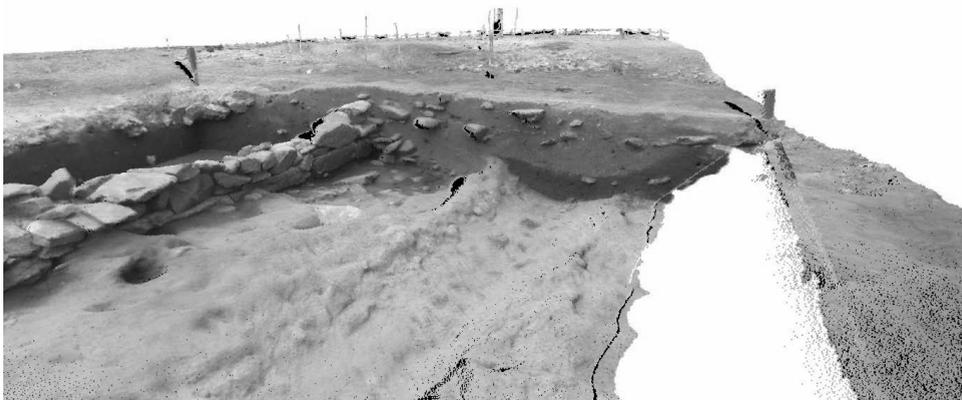


Figura 2. A la derecha de la imagen, residuos de la medición de la esquina de una zanja de excavación, en Vía de la Plata (Lalín, Pontevedra).

Con todo, y teniendo en cuenta esta problemática, la capacidad de registro del escáner es muy elevada, generando bases de datos con cientos de miles de puntos, e incluso millones de puntos, con lo que difícilmente pueden ser manejados por programas que no estén específicamente diseñados para ello y que además suelen ser de elevado coste. Uno de los temas de discusión más amplio que se encuentra en la bibliografía sobre este aspecto es precisamente cómo procesar estas nubes de millones de puntos (ver LICHTI *et alii*, 2008). En este momento existe un escaso grado de automatización del procesado de la nube de puntos, por lo que la eliminación de esa información residual, o crear dibujos de líneas, se tienen que hacer de manera manual, lo que supone una carga de trabajo muy fuerte y resta eficacia al procedimiento. Pero, precisamente, una de sus virtudes principales es esa gran capacidad de captura de datos, con lo que se puede obtener una base de datos densa y precisa.

Otro de los aspectos que consideramos reseñable es la posibilidad de obtener diversos productos de este registro geométrico, tanto en el momento de la captura como en un futuro. Esto es muy útil cuando, por ejemplo, se ha planificado la documentación con el escáner de una iglesia para obtener sus volúmenes principales (muros, vanos, etc.) pero a medida que se desarrolla el proyecto son necesarios unos detalles que en un principio no se habían previsto (unas secciones de áreas distintas de las iniciales o el detalle piedra a piedra de un muro). Si este escaneado se

ha hecho con una resolución e intensidad suficientes, esta información *extra* se puede recuperar en la base de datos sin tener que volver al sitio, incluso aunque éste ya haya desaparecido.

De esta documentación se pueden obtener una gran variedad de representaciones de diverso tipo: p.ej. dibujos de líneas en 2D y 3D, ortoimágenes, modelos tridimensionales o animaciones y vídeos. En este sentido, la posibilidad de crear infografías a partir de las nubes de puntos acrecienta el valor de esta tecnología, porque permite incidir en la capacidad informativa del elemento registrado y presentar de una manera muy visual y accesible a todos los públicos la información arqueológica o patrimonial, tanto en ámbitos técnicos (p.ej., para visualizar cómo proyectos futuros pueden afectar a estos elementos patrimoniales) como para difusión en general, creando, por ejemplo, reconstrucciones virtuales.

Otra virtud es que esta información también se puede integrar en sistemas de información existentes, ya que estos datos se pueden georreferenciar y vincular a otros datos que se obtienen con otras herramientas, como el GPS o la Estación Total.

PROCESO DE TRABAJO

La documentación geométrica es un requerimiento básico en los proyectos en los que está involucrado el Patrimonio. Por nuestra experiencia, lo más habitual es que se soliciten representaciones en 2D (plantas, secciones, alzados), pero en un mundo cada vez más digital, crece la demanda para que estos elementos se representen en 3D e incluso, que se represente gráficamente por medio de modelos 3D tanto la geometría del edificio como el aspecto del elemento documentado³. El uso de instrumentos topográficos y la fotogrametría permiten obtener esta representación tridimensional con precisión. Del mismo modo, con el láser escáner se adquiere una información con una precisión equiparable a la de estos métodos. Quizás la particularidad de la topografía, bien sea mediante Estación Total o Láser Escáner, frente a la fotogrametría es que mientras la primera trabaja sobre una información capturada directamente sobre la superficie de los objetos, la fotogrametría lo hace sobre una representación de esos objetos.

³ Es un referente la labor del CIPA (*International Committee for Documentation of Cultural Heritage*, <http://cipa.icomos.org/>) uno de comités internacionales del ICOMOS (*International Council on Monuments and Sites*) establecido en colaboración con ISPRS (*International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) que promueve, entre otros objetivos, el registro y la documentación del Patrimonio Cultural, proponiendo actividades, intercambio de ideas, simposios, publicaciones, que permitan avanzar en estos campos, entre los que se incluye la documentación geométrica con escáner.

Pero esta labor no se acaba en la toma de datos de los elementos, sino que también es necesario tener en cuenta los procedimientos necesarios tanto para procesar como para presentar esta información, de manera que podamos lograr una representación lo más fidedigna posible de la forma, el volumen y el tamaño del elemento que estemos documentando en un momento concreto de su vida. Finalmente, también es necesario valorar el procedimiento de archivo con el fin de que esta información sea intercambiable y manejable con el tiempo.

Por lo tanto, el proceso de trabajo tiene varias etapas fundamentales: el registro de datos, el procesado de los mismos y la obtención de diversos resultados. Respecto a la cuestión de archivo digital (RICHARDS, 2002; JANTZ y GIARLO, 2005), éste es un tema complejo que excede de las intenciones de este artículo, aunque reconocemos la importancia de este tema ya que mediante este procedimiento vamos a obtener un archivo digital en unos formatos concretos que puede perderse cuando estos formatos varíen con el tiempo.

REGISTRO DE DATOS

El proceso de trabajo con el Láser Escáner comienza con la captura de datos en el sitio. Esta primera fase conlleva una planificación previa del trabajo en la que se debe tener en cuenta, en primer lugar, la finalidad del escaneado y, en consecuencia, la intensidad de la captura. Por nuestra experiencia, es necesario establecer un equilibrio entre la intensidad de registro de puntos y el tiempo de ejecución, ya que se puede optar por registrar a la mayor densidad de captura, lo que en la mayoría de los casos no permite mejorar la representación del elemento registrado y, en cambio, multiplica el tiempo de captura. Por lo tanto, debe valorarse qué grado de densidad es necesario en función de las necesidades de representación del proyecto.

En la mayoría de los casos se busca digitalizar el volumen completo de un elemento, por lo que hay que combinar distintas posiciones del escáner para documentar las caras que no son visibles desde la posición anterior. Esto también supone una labor de organización y cierto análisis visual, buscando las posiciones en los que los campos de visión-captura se complementen mejor y que, al mismo tiempo, se haga con el menor número de posiciones posibles. Hay ciertas condiciones que implican un mayor número de posiciones para abarcar la totalidad del elemento a registrar: por ejemplo, si hay muchos elementos que ocupan el espacio a documentar y ocultan parte de lo que se quiere registrar, como el mobiliario, columnas, árboles, vegetación, coches, etc. o las situaciones en que se tienen perspectivas muy restringidas o con quiebros, como pasillos, escaleras, callejones, etc.

En nuestro caso, para combinar los registros desde distintas posiciones hemos empleado unas dianas de control, un elemento que el láser escáner mide con precisión y que sirve para vincular las distintas escenas. Aunque hay programas que permiten la unión de varios escaneos sin la necesidad de usar dianas, como los que nosotros empleamos, el uso de dianas asegura una unión con un reducido margen de error, (desde \varnothing 6 mm en la posición de cada diana).

Una cuestión importante es la necesidad o no de relacionar esta información con la posición global de los elementos registrados. En la mayor parte de los trabajos que aquí presentamos hemos relacionado el registro del escáner con coordenadas UTM empleando para ello GPS y Estación Total. Tras obtener las coordenadas del sitio, normalmente hemos amplificado la red de estaciones con una Estación Total, y con ella hemos medido la posición exacta de cada diana. Al relacionarse los registros con las dianas que tienen coordenadas absolutas, la nube de puntos adquiere también una posición global y se pueden unir áreas que difícilmente pueden compartir dianas de control.

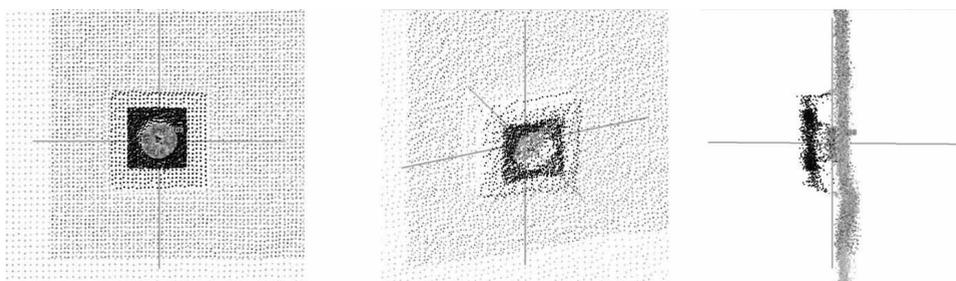


Figura 3. Detalle de una diana de control y cómo se registra en la nube de puntos, con una cruceta marcando su centro exacto; en la derecha, se puede ver el efecto residual que produce una superficie poco reflectante (los puntos más oscuros).

PROCESADO DE LA INFORMACIÓN

El primer resultado de este trabajo de campo es la obtención de una base de datos formada principalmente por imágenes y nubes de puntos, que suelen estar compuestas por millones de puntos aunque evidentemente esto depende de la superficie y la densidad de registro. La base que obtenemos en nuestro caso tiene una extensión propia de *Leica Cyclone (.imp)* y gran capacidad de compresión: en uno de los trabajos más intensos que aquí se presenta, el de la *Basílica de la Ascensión* y *O Forno* (Allariz, Ourense) con unas 23 posiciones de escáner, las fotografías correspondientes desde cada posición y unos 102 millones de puntos, se ha generado un archivo de 2 GB.

Esta base de datos en sí misma ya es un resultado ya que, aunque no logremos obtener de forma inmediata todo el partido posible a estos millones de puntos, es un registro preciso y de detalle que puede tener gran valor documental, sobre todo en el caso de elementos que puedan cambiar (un edificio que va a ser rehabilitado, una pared que va a ser revocada, una unidad estratigráfica que va a ser eliminada) o incluso desaparecer con el tiempo (por ejemplo, el registro en excavación).

El inicio del procesado de la información suele ser la unión de los distintos escaneos. El *Leica Cyclone* permite su unión precisa en base a dianas de control que pueden tener o no coordenadas absolutas, como ya se comentó. Una fase importante de este proceso suele ser la eliminación del ruido de la nube de puntos, que puede deberse a la vegetación, transeúntes, mobiliario, cableado, posiciones oblicuas, etc. Esta limpieza se lleva a cabo a través de un proceso de depuración manual y controlado, con lo cual se excluyen puntos residuales que pueden llegar a distorsionar los resultados de representación del elemento registrado.

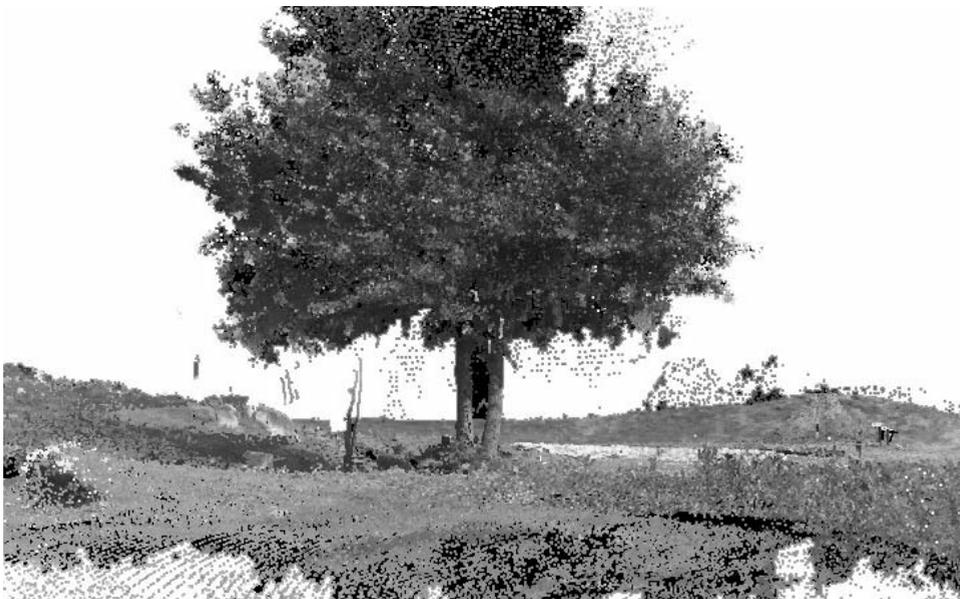


Figura 4. Vista de elementos que obstruyen el objeto a registrar: el rastro que dejan personas pasando y la vegetación, en el castro de Castrolandín.

Existen diversos productos que permiten representar el elemento digitalizado y que se obtienen muy ágilmente y con poco tiempo de postprocesado. Por ejemplo, se pueden seleccionar partes concretas de la nube de puntos y extraer perfiles, secciones, plantas, alzados. También se puede visualizar esta nube desde distintas pers-

pectivas, con lo cual se puede lograr imágenes en perspectiva, ortoimágenes, vídeos, etc. Otra posibilidad que presenta este programa es el modelado de la superficie a partir de los puntos. Es posible triangular y crear mallas, lo que mejora la visualización del elemento e incluso se puede así incidir en las posibilidades analíticas de los datos, aunque la calidad de la triangulación que hemos logrado según nuestra experiencia no es todavía óptima.

Un aspecto interesante y que ha dado buenos resultados para ampliar la capacidad de representación de los datos capturados con el escáner es rectificar fotografías o calcos sobre la nube de puntos o mallas. Aplicar una fotografía con un color y contraste de mejor calidad que el que se obtiene con el escáner o un calco en donde estén representados, por ejemplo, los surcos de un grabado, permite mejorar el reconocimiento de elementos concretos.

El uso de los programas del entorno CAD es habitual para la presentación de elementos arqueológicos con los cuales, por medio de líneas, se representan los diversos contornos de un elemento concreto. La gran cantidad de puntos de las nubes no permite manejar directamente el archivo en CAD, por lo que es necesario el uso de un plug-in (en nuestro caso, el *Leica Cloudworx*) que facilite un uso dinámico o la selección de partes concretas. Gracias al uso de este programa podremos crear dibujos de líneas en 2D y 3D de formato habitual y fácilmente compartible.

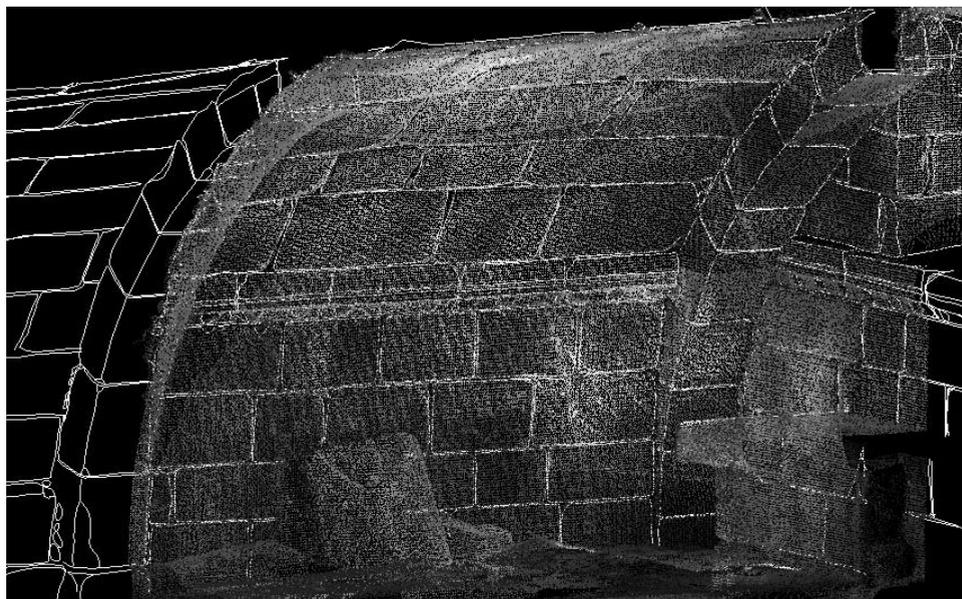


Figura 5. Dibujo en AutoCAD del detalle “piedra a piedra” de *O Forno* de la Basílica de la Ascensión (Allariz, Ourense) sobre una nube de puntos simplificada.

Pero este trabajo es arduo, ya que esta tarea no se encuentra mecanizada e implica un dibujo manual sobre la nube de puntos, en el que el operador tiene que detectar y seleccionar el punto concreto de la nube al que quiere vincular la línea que está dibujando. Todavía hace falta desarrollar procedimientos y programas que permitan una automatización o semi-automatización de este proceso y que reconozca y dibuje, por ejemplo, bordes, superficies, etc. Algún programa de este tipo parece que está empezando a implantarse en el mercado, cuyo desarrollo está vinculado principalmente a la ingeniería.

Es este último punto uno de los escollos de esta metodología de registro ya que, frente una captura de datos rápida, su procesado es costoso, manual y para obtener ciertos resultados con calidad necesita una gran inversión de trabajo de técnicos especialistas. Es precisamente en este ámbito donde se está debatiendo más ampliamente e intentando buscar soluciones desde distintas disciplinas, que se centran, por ejemplo, en cómo procesar automáticamente las nubes de puntos (ver LICHTI *et alii*, 2008, BUCKSCH y LINDENBERGH, 2008) o cómo lograr una triangulación óptima de objetos altamente irregulares (ARAYICI, 2007; MONSERRAT y CROSETTO, 2008; ROCA-PARDIÑAS *et alii*, 2008).

CASOS DE TRABAJO

Se presentan a continuación varios ejemplos de la aplicación de esta herramienta en la documentación tridimensional de distintos tipos de elementos patrimoniales. Estos proyectos, realizados por el LaPa desde mediados del 2007, creemos que sirven para ejemplificar tanto el tipo de trabajo que se puede llevar a cabo con esta herramienta, como los tiempos de ejecución, así como varios resultados que se han obtenido a partir de ellos.

Un levantamiento topográfico: el Castro de Castrolandín (Cuntis, Pontevedra)

El Castro de Castrolandín es un asentamiento fortificado de la Edad de Hierro cuyo recinto principal tiene una superficie aproximada de 3.500 m². El LaPa lleva años actuando en el yacimiento, en colaboración con los agentes locales (Fundación Terra Termarum), con un proyecto de excavación y puesta en valor que se ha ejecutado en sucesivas campañas a partir de 2004 (AYÁN, 2002; OTERO y PORTO, 2007). Dentro de este proyecto, se decidió realizar un levantamiento del yacimiento con Láser Escáner con el objetivo de aportar material de calidad con el que poder llevar a cabo nuevas visualizaciones (imágenes o vídeos), MDT, info-

grafías, etc., orientadas hacia la difusión del yacimiento ante el público general. Por otra parte se pretendía obtener un levantamiento mediante el cual poder registrar en detalle los indicios de estructuras enterradas, como terrazas, fosos o terraplenes.

El yacimiento está situado sobre una elevación y, en el momento de la captura de datos, la parte superior del recinto se encontraba limpia de maleza, con hierba baja, mientras que el entorno estaba cubierto por vegetación arbustiva y monte alto. Aunque ya se había realizado un levantamiento topográfico con una Estación Total unos años antes, se planteó realizar este nuevo levantamiento con el objetivo de obtener una serie de mediciones actualizadas, uniformes y densas de la totalidad de la superficie del castro, principalmente del interior del recinto pero también de su entorno más inmediato.



Figura 6. Multi-imagen (composición automática que realiza el escáner a partir de imágenes individuales) desde una de las posiciones de registro en Castrolandín.

Para poder registrar la mayor parte de la superficie del sitio se emplazó el escáner en 9 posiciones, 5 rodeando la parte superior del yacimiento, sobre los restos de la muralla, y 4 en las laderas del castro, completando áreas que no eran visibles desde las otras posiciones. Fueron necesarias un total de 18 horas de trabajo en el sitio, lo que incluye, además de la captura de puntos e imágenes, el tiempo necesario para llegar a cada una de estas posiciones y estacionar el aparato, lo que en algún caso resultó algo complicado ya que en algunas posiciones había que trasladar el equipo, bastante aparatoso, campo a través y por fuertes pendientes. Con la intensidad de registro establecida (se planteó documentar en algunas zonas un punto cada 10 cm y en

otras uno cada 5 cm, calculado para el punto más lejano del área de captura desde el escáner) la nube de puntos con todas las posiciones del escáner alcanza casi los 23 millones de puntos y cubre un área de 250 m de diámetro.

Además, la nube de puntos obtenida tiene posicionamiento global ya que los distintos escaneos se unieron en relación con las coordenadas UTM que también se emplean en el registro de la excavación del castro, por lo que ambas informaciones se pueden integrar en una misma base de datos con total coherencia.

En el trabajo de post-proceso, una de las tareas más intensas que hubo que realizar sobre la nube de puntos fue la limpieza manual de la vegetación y otros elementos residuales, básicamente eliminando árboles y arbustos. En las zonas donde la vegetación superaba el 0,50 m se eliminó todo lo que sobresalía de la cota más baja registrada, por lo que en estas zonas la cantidad de puntos es mucho menor, incluso hay zonas casi despejadas de puntos.

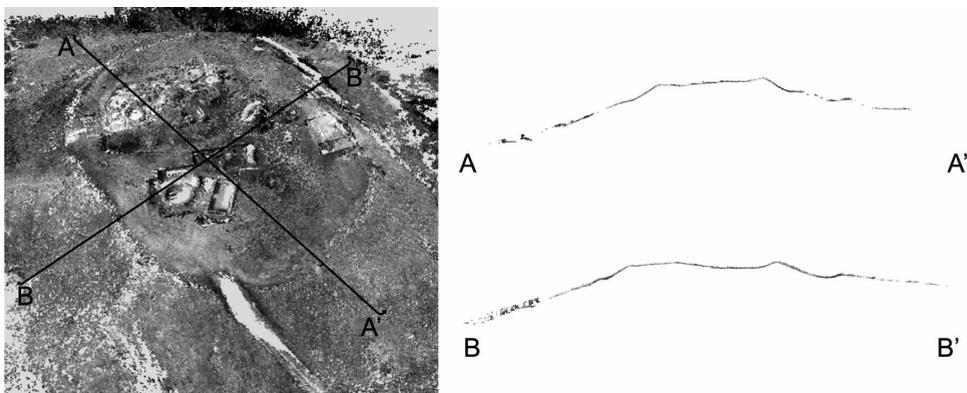


Figura 7. Vista de la nube de puntos del levantamiento de Castrolandín tras su “limpieza” vista desde el aire; a la derecha, secciones sobre la nube de puntos.

Como resultados, además de obtener imágenes de la nube de puntos del castro desde distintas vistas (aéreas o remotas) o secciones ortográficas, se creó una malla en base a la triangulación (TIN)⁴ de los puntos de la nube registrada que permite representar la superficie del castro de manera fidedigna, para lo que hemos empleado el programa *Leica Cyclone Modeler*.

Este trabajo de procesado de la información y obtención de la malla TIN supuso menos de 1 jornada laboral de un técnico especialista.

⁴ Una malla TIN (*Triangulated Irregular Network*) que triangula en relación a la perpendicular del plano de referencia, en este caso, la superficie terrestre, y que no superpone triángulos respecto a la vertical.



Figura 8. TIN de Castrolandín a partir de la nube de puntos.

De esta manera, se ha obtenido un registro muy detallado del yacimiento y su entorno inmediato. Este registro es preciso en el interior del castro, gracias a la ausencia de vegetación y a que la única interferencia eran un árbol y la escombrera de la excavación. Aquí destaca la documentación de elementos singulares del castro como los afloramientos, que son parte de la configuración del propio asentamiento en la Edad de Hierro y cuyo volumen se ha registrado con gran densidad. En cambio, éste tiene una menor precisión hacia el exterior de la muralla, donde se registró también la vegetación de monte bajo (sobre todo helechos, hierba alta y tojos), por lo que la diferencia con la cota real es de entre 20 cm y 1 m, en general con más imprecisión cuanto más alejado de la parte superior del castro. Aunque se eliminaron los puntos que más sobresalían para corregir en lo posible esta diferencia de cota, estas zonas no tienen la misma resolución y fiabilidad que hacia el interior. Lo ideal sería registrar estas zonas limpias una vez rozadas, pero no fue posible en aquel momento; incluso en algunas zonas que habían sido rozadas recientemente ya había crecido la vegetación. Con todo, consideramos interesante documentar también estas zonas con vegetación porque nos iba a permitir representar de manera general la forma del castro, su extensión y pendientes, sobre todo cuando

la escala de representación es muy amplia y el margen de error que implica esta diferencia no es significativo. Es decir, a pesar de esta traba, consideramos que el registro de las laderas del castro ha sido interesante para poder registrar ciertas zonas del terreno con ondulaciones, terrazas y depresiones que pueden estar indicando la presencia de estructuras de diverso tamaño o un posible camino de acceso al recinto habitacional. Además, al haber hecho este registro en relación a las coordenadas UTM que se emplean en las intervenciones del castro, en un futuro es posible incorporar a la nube de puntos el registro de estas zonas una vez que se limpie la maleza y, por lo tanto, con mayor precisión y densidad.

LEVANTAMIENTO DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS⁵ – LA BASÍLICA DE LA ASCENSIÓN Y *O FORNO* (ALLARIZ, OURENSE)

Este trabajo se llevó a cabo en el marco de un proyecto desarrollado por la *Unidade de Arqueoloxía da Arquitectura* del LaPa cuyos objetivos fueron la identificación de la evolución constructiva del edificio fundamentalmente a través de metodologías específicas de la Arqueología de la Arquitectura⁶, la lectura estratigráfica de alzados entre otras, así como la realización de un levantamiento volumétrico⁷.

Nuestra labor se imbricó en el proyecto arquitectónico *Actuación no entorno do Forno da Santa*, dirigido por el arquitecto Manuel Seoane, que se centraba en la adecuación del acceso y señalización del sitio, además de la consolidación de la parte de los alzados que presentaba problemas estructurales. Respecto al levantamiento, era necesario documentar geoméricamente el edificio en su totalidad antes de esta intervención arquitectónica, tanto por el exterior como por el interior, lo que incluía la cripta de la planta baja, conocida como *O Forno da Santa*, y la *Basílica da Ascensión*, en la planta alta, un edificio inconcluso. El edificio presenta una serie de deformaciones y problemas estructurales, por lo que la documentación geométrica de todos los paramentos con detalle y densidad era uno de los objetivos del levantamiento, además de servir de apoyo documental y gráfico al estudio del conjunto realizado desde la de Arqueología de la Arquitectura.

⁵ Recientemente hemos publicado un artículo en el que se presenta nuestra experiencia de la documentación de otros espacios construidos empleando Láser Escáner y que complementa a este trabajo, ver MAÑANA-BORRAZÁS *et alii*, 2008.

⁶ Para el desarrollo de estas metodologías ver: MAÑANA *et alii*, 2002, BLANCO 2001 y 2005

⁷ Este proyecto fue promovido por la *Dirección Xeral de Patrimonio Cultural* de la *Consellería de Cultura e Deporte* de la *Xunta de Galicia*. Los resultados del mismo se pueden consultar en BLANCO-ROTEA *et alii*, 2009a y b.

Para obtener un levantamiento con posición global, se establecieron una serie de bases de referencia por medio de GPS, que posteriormente se densificó y extendió con la Estación Total. En base a esta red de bases se unieron los distintos escaneos realizados en todo el edificio, con lo que se obtuvo una nube completa de todos sus espacios. Esta fue la solución más viable para conectar las distintas zonas de un edificio muy compartimentado y que comparte pocas zonas comunes, con un acceso muy restringido a la planta baja (únicamente a través de 2 estrechas escaleras de tres tramos y una ventana).

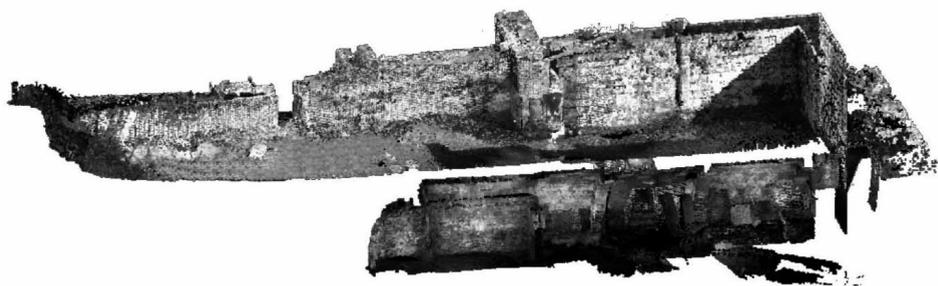


Figura 9. Vista de la mitad N de la nube de puntos de la Basílica y O Forno.

Fueron necesarios un total de 23 posicionamientos del escáner para barrer la totalidad del edificio, 11 de ellos en la cripta y escaleras de acceso a la misma y 12 en la planta alta (5 para documentar el interior de la basílica y 7 para el exterior). Una de las zonas más difíciles de documentar fueron las escaleras, muy estrechas y angostas, y la parte exterior Sur, que se encuentra a una cota inferior que el terreno, y que está contenida por un muro de hasta 3 m de alto que apenas se separa 1,20 de las fachadas exteriores de la basílica. Además, en el interior del edificio tuvo que emplearse iluminación artificial de manera que pudiéramos obtener unas fotografías con el escáner que presentaran un color e iluminación lo más uniformes posible en todas las estancias. Aunque este cuidado supuso un importante porcentaje del tiempo de trabajo en el sitio, los resultados visuales son muy satisfactorios. La densidad de captura de puntos también fue intensa, estableciendo por lo general la captura de 1 punto cada 5 mm en el extremo más alejado del elemento a registrar.



Figura 10. Ortoimagen de la “Piedra Formosa” de O Forno.

Fueron necesarias un total de 54 horas de escaneado repartidas en 9 jornadas de trabajo. Esta dilatación en el tiempo se debe tanto a condicionantes del proyecto en sí mismo como al traslado del equipamiento al sitio y su colocación. Además, este tiempo está limitado por la capacidad de alimentación de las baterías, a pesar de disponer de un grupo electrógeno *in situ*.

La intensidad de este trabajo ha supuesto que el archivo de datos de este edificio esté compuesto por unos 102 millones de puntos, además de las fotografías correspondientes desde cada posición. El archivo, de extensión propia del *Cyclone*, es de unos 2 GB.

A partir de esta documentación se extrajeron directamente sobre la nube de puntos, y con escaso trabajo de post-proceso, los contornos de la planta alta y baja, alzados y secciones del conjunto, así como las ortoimágenes de la planta y alzados. Estas ortoimágenes han servido como soporte para plasmar las UE (Unidades Estratigráficas) identificadas durante la lectura estratigráfica del conjunto, pudiendo emplearse esta información desde los primeros momentos del proyecto y en el propio proceso de análisis del edificio.

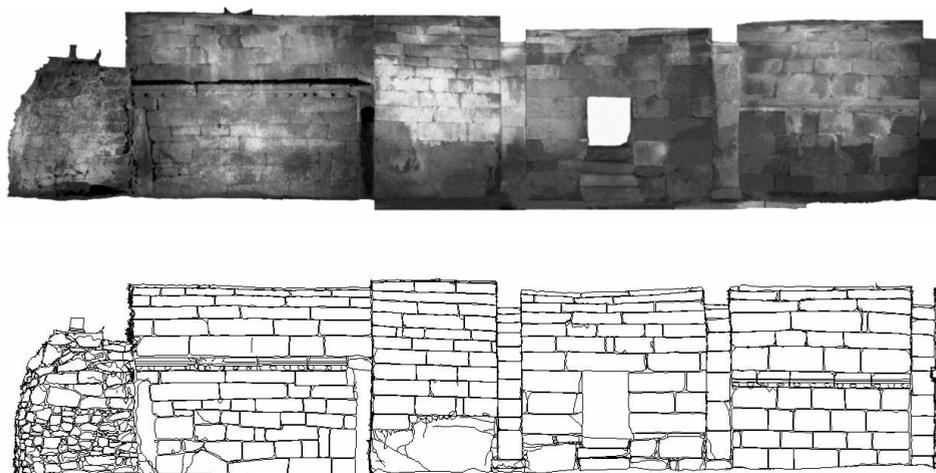


Figura 11. Alzado E-W de *O Forno*, vista de la mitad N; arriba, de la nube de puntos y abajo, del dibujo en AutoCAD.

A partir de aquí, se procedió en un primer momento a dibujar en AutoCAD las líneas definitorias del volumen del edificio, así como perfiles (10) de las zonas más significativas del mismo. Esta fase supone un intenso trabajo manual sobre la nube de puntos, lo que implicó en torno a unas 45 horas de trabajo de un técnico especializado. En estos momentos se está procediendo a aumentar el detalle de la zona de la cripta, dibujando cada piedra de los alzados, para lo cual hemos estimado que en total son necesarias unas 200 h de trabajo⁸.

De los resultados obtenidos cabe destacar, de cara al proyecto, varios aspectos: por un lado, la posibilidad de visualizar tridimensionalmente la conexión real existente entre la basílica y la cripta, de forma que podíamos comparar los volúmenes de ambas y reflejar la evolución espacial que había sufrido el edificio a lo largo del tiempo; por otro, se recogió la geometría de las bóvedas y arcos fajones de la cripta, lo cual nos ha servido para explicar algunos problemas de tipo estructural⁹ que

⁸ Esta *ratio* entre tiempo de captura de datos y el de post-procesado es algo inferior a la que habíamos estimado en MAÑANA-BORRAZÁS *et alii* 2008 para el escaneado de otro edificio, donde además se hizo una comparación entre éste y los otros métodos de registro que empleamos en ese sitio. Creemos que esta reducción en el tiempo de post-procesado del detalle “piedra a piedra” se debe a que la construcción de la Basílica y *O Forno* está realizada básicamente con sillares, lo que simplifica mucho su dibujo frente a aquél, que presentaba un aparejo de mampostería irregular.

⁹ En ARIAS *et alii* 2005 se da cuenta de un levantamiento fotogramétrico digital de la parte superior del edificio (basílica) en cuyos resultados destacan la detección de problemas estructurales en el edificio.

se venían detectando en ambos elementos, como el desplazamiento de algunas dovelas. Gracias al levantamiento hemos observado que las bóvedas presentan diferencias formales, las tres bóvedas (la cripta está dividida en tres tramos) van aumentando progresivamente de cota desde el E hacia el W, es decir, desde el ábside hacia el *horno*. Aunque en el proyecto inicial no estaba previsto, los tramos se dividen posteriormente por arcos fajones que nacen en el suelo y que se adosan a las bóvedas y los alzados y el espacio entre las bóvedas y los arcos (resultante del aumento de cota) se rellena con pequeños mampuestos y mortero. Todo ello, unido a la construcción de la basílica sobre la cripta, ha contribuido a que exista un desplazamiento en algunas partes de las bóvedas el cual, posiblemente, intentó solventarse mediante la disposición de arcos fajones. Finalmente, la bóveda que cubre la estancia que antecede al horno, de medio punto, es de mayor altura que las de la cripta y presenta también una geometría diferente a la de los restantes espacios.

DOCUMENTACIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN DE UNA EXCAVACIÓN ARQUEOLÓGICA: LA VÍA DE LA PLATA (LALÍN, PONTEVEDRA)

En el marco del proyecto de *Control e Corrección de Impacto sobre o Patrimonio Cultural do Corredor Norte-Noroeste de Alta Velocidade (Eixo: Ourense- Santiago; Tramo: Abeleda - Baxán, Lalín)* se localizó un tramo del Camino de Santiago Meridional (Vía de la Plata) que iba a ser afectado por esta obra, por ello se decide llevar a cabo su excavación en área¹⁰ con anterioridad a la realización de las obras que iban a suponer su destrucción.

Bajo la capa de asfalto que cubría el trazado se documentaron tres momentos de uso del camino, adscritos desde época reciente hasta época medieval (el momento más antiguo podría ser altomedieval, como indica la presencia de materiales cerámicos de ese período), destacando además la existencia de unos muros de piedra seca de aproximadamente 0,50-0,70 m de alto en un tramo de 36 m de largo que delimitaban una de las fases del camino. Dado la extensión de la excavación (unos 170 m²) y la premura de tiempo, se planteó realizar la documentación geométrica con el láser escáner como un medio de registro óptimo y ágil de las 2 fases mejor definidas del camino y, con ello, lograr un registro tridimensional de detalle y evitar el esfuerzo y coste del dibujo manual de los pavimentos y de los alzados de los muros.

¹⁰ ABOAL FERNÁNDEZ R., 2008. *Excavación en área de un tramo del Camiño de Santiago Meridional (Vía de la Plata), Lalín, Pontevedra*. Informe Valorativo. Depositado en la *Dirección Xeral de Patrimonio Cultural, Consellería de Cultura e Deporte, Xunta de Galicia*. LPPP (USC): Santiago de Compostela.



Figura 12. Superficie del segundo momento del camino con el Láser Escáner posicionado para su documentación geométrica.

La primera fase registrada con el escáner se corresponde con el momento de uso más reciente, en el que se documentó un pavimento de tierra, losas y piedras medianas en el que además se identificaron unas roderas de tractor, lo cual lo vinculaba con un uso reciente. El escaneado de esta superficie se hizo desde 4 posiciones en 6 horas, con una densidad de captura milimétrica (de 5 x 5 mm), lo que permite una recuperación de la información hasta el detalle piedra a piedra. La nube de puntos, una vez eliminada la información residual, es de casi 20 millones de puntos.

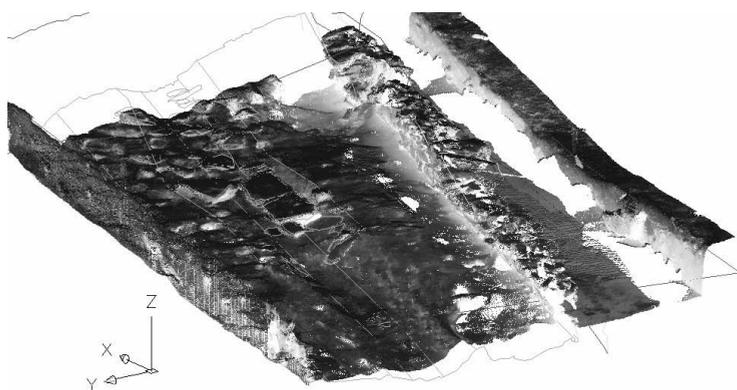


Figura 13. Vista en Autocad de la nube de puntos del primer momento de uso, con el dibujo de líneas extraído de ellas.

El segundo momento de uso, más antiguo, está definido por un empedrado realizado con mampuestos que oscilaban entre 25 y 1 cm de lado, perfectamente encajadas entre sí y que ocupaban toda la caja del camino, y con el que se relaciona la construcción de los muros que delimitan el camino. Como en el caso anterior, se ubicó el escáner en 4 posiciones desde las que se registró la totalidad de la superficie del camino y los muros, para lo que se necesitaron 7 horas y media a la misma densidad que en la ocasión anterior, obteniendo una nube de casi 25 millones de puntos.

La exigencia de representación gráfica del proyecto se centraba en el dibujo de los contornos de cada unidad estratigráfica y además, para la fase de uso más reciente, fue necesario también dibujar los detalles de las roderas, las losas y las piedras de la superficie del camino.

Para el trabajo de post-proceso, en primer lugar fue necesario unir los distintos escaneados de cada momento de uso, lo que se hizo en relación al sistema de coordenadas UTM que también se empleó en las otras fases de registro de la intervención. Una parte importante del procesado fue la limpieza de las nubes de puntos, que supuso unas 8 horas de trabajo, mientras que el dibujo de líneas 3D en AutoCAD de las unidades estratigráficas y diversos perfiles supuso 11 horas más. También se extrajeron ortoimágenes de los alzados de los muretes que delimitaban el camino como una representación con valor métrico.



Figura 14. Vista de la nube de puntos generada desde una única posición, del segundo momento de uso del camino.

Aunque era posible alcanzar más detalle en la representación no se consideró necesario en esta fase del proyecto, pero tenemos a nuestra disposición la información tridimensional necesaria para, por ejemplo, dibujar cada piedra del muro o del empedrado de la segunda fase¹¹. Tener esta información disponible y, por lo tanto, la posibilidad de representarla fidedignamente en un futuro, bien sea con dibujos en líneas, por modelados o analíticas de esta superficie, etc., creemos que es un valor que incrementa la eficiencia del láser escáner, sobre todo en sitios que ya han sido destruidos.

REGISTRO DE ROCAS CON ARTE RUPESTRE

La documentación de Arte Rupestre con esta herramienta tiene un valor añadido respecto a otros tipos de registro de este elemento arqueológico más habituales: es una documentación que implica que no hay contacto directo con la superficie de la roca. Por otra parte, el tipo de láser empleado no tiene intensidad para alterar la roca, líquenes o pinturas si las tuviera. Además, es capaz de registrar el volumen del soporte y los elementos grabados en él, permitiendo una representación bidimensional sin grandes distorsiones, algo que sí ocurre con los calcos.

Con todo, existen otros tipos de escáner que alcanzan una mayor resolución en las medidas (pueden documentar a un nivel de micras) y que son más apropiados para documentar este tipo de representaciones, sobre todo cuando los surcos son casi imperceptibles (ver p.ej. DIAZ-ANDREU *et alii*, 2006).

A Forneiriña (Campo Lameiro, Pontevedra)

A Forneiriña es un afloramiento de granito de forma irregular, redondeado, de unos 2 m de diámetro y 0,60 m de alto que se encuentra grabado: en la parte superior está inscrita una combinación circular de 7 círculos concéntricos y una cazoleta y en la parte inferior y más inclinada presenta 3 cuadrúpedos que son difícilmente perceptibles a simple vista.

Planteamos llevar a cabo esta experiencia para comprobar la capacidad de registro del escáner y las posibilidades de representación que se podrían obtener en este tipo de yacimientos. Se realizó un registro a la máxima resolución que permite este modelo de escáner y que alcanza un máximo de resolución de 2 mm. Se dispuso el

¹¹ Estimamos que el dibujo en detalle de estos elementos podría suponer unas 300 horas más de trabajo con los medios de los que actualmente disponemos.

escáner en dos posiciones complementarias, lo cual ha permitido obtener un registro completo de todo el bloque. En este trabajo se emplearon 3 horas, lo que incluye el posicionamiento del escáner, la captura de puntos y de las dianas de referencia para unir las nubes de ambas posiciones.



Figura 15. Desde una de las posiciones de captura de datos en A Forneiriña, vista de la composición de varias fotografías de alta resolución que realiza automáticamente el escáner.

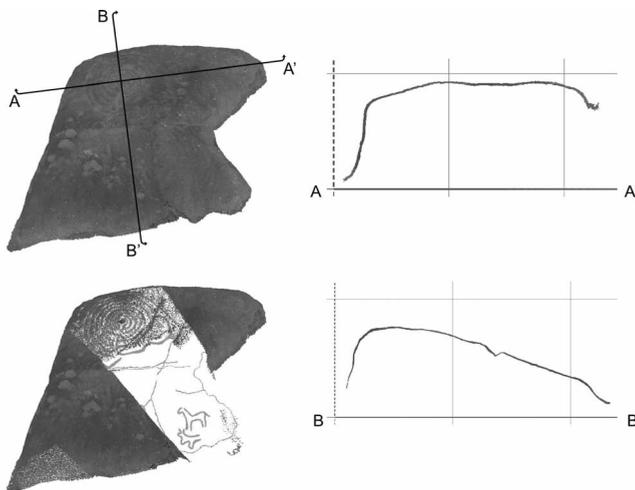


Figura 16. Izquierda, vista de la nube de puntos de Forneiriña, abajo con parte de los puntos con la imagen del calco rectificada Derecha, secciones de la nube.

La visualización directa de la nube de puntos permite observar sin problemas los motivos que tienen una mayor profundidad de surco (en este caso la combinación circular). En cambio, este sistema no permite aumentar la percepción de los motivos más problemáticos y que se ven con dificultad a simple vista. A pesar de esto, resulta interesante la definición con la que se registra la superficie del soporte y así obtener su registro tridimensional.

Pero, sobre estos datos, se pueden aplicar algunas técnicas que permiten mejorar la visualización de la roca y los motivos, e incluso aprovechar las posibilidades de analítica de los datos. Para ello, realizamos una malla TIN, que posibilita identificar de forma más precisa la volumetría de la roca, incluyendo los grabados. Posteriormente, importamos y rectificamos sobre la nube de puntos una imagen externa al escáner, un calco de los motivos y grietas, lo que aumenta la representatividad de los datos capturados con el escáner.



Figura 17. Malla TIN realizada a partir de la nube de puntos de A Forneiriña; derecha, rectificación del calco sobre la malla.

Laxe das Procesiões - Auga da Laxe (Gondomar, Pontevedra)

Este petroglifo se localiza en el extremo Sur de un gran afloramiento batolítico de formas redondeadas. Los motivos se encuentran grabados en un gran panel orientado al Sur, con la superficie inclinada unos 45° y que llega hasta el suelo. Esta zona del afloramiento mide unos 17 m de largo por 7 m de alto y presenta una gran cantidad de motivos inscritos que ocupan un área de 10,50 m por 4,80 m. Destaca además por tener unos motivos de considerables dimensiones, fundamentalmente armas, como puñales y espadas, además de “escutiformes” y un posible idoliiforme. El motivo de mayor tamaño y de diseño más complejo es una espada.

El empleo del escáner para registrar topográficamente el petroglifo se enmarcó dentro del proyecto *Delimitación de Bens de Interese Cultural para un conxunto de petroglifos situados na provincia de Pontevedra, Ano 2007*, promovido por la *Dirección Xeral de Patrimonio Cultural, Consellería de Cultura e Deporte, Xunta de Galicia*. Dentro de este proyecto, se procedió a documentar pormenorizadamente este petroglifo, obteniendo un registro detallado tanto de los motivos como del propio soporte.

En dicho proyecto se aplicó un proceso de documentación de los petroglifos (detallado en SEOANE, 2005) que permite mejorar la visualización y registro de los distintos motivos (por medio de diversos métodos de observación e identificación de los grabados, fotografía, calcos), por el cual se procede a pintar los surcos de los grabados presentes en la roca sin alterarlos, ya que se usan productos que no son agresivos con el soporte y que son fácilmente reversibles. El hecho de que los motivos estuvieran remarcados en el momento de realizar el escaneado ha mejorado substancialmente la capacidad de visualización de los grabados en la nube de puntos frente a la experiencia que presentamos para el caso de A Forneiriña. Aquí es posible situar en el soporte con total precisión motivos que no se pueden identificar en la nube de puntos por la escasa profundidad de los surcos que los forman.

En Laxe das Procesións limitamos la captura de información a la parte del soporte donde se encuentran los grabados. Debido a la amplitud del panel, establecimos 2 posiciones del aparato en los extremos de la roca, con lo que además, al combinar ambas posiciones que son oblicuas respecto a la superficie, pretendíamos ampliar la información volumétrica del soporte y de los grabados.

Como en el caso anterior, la resolución de la captura de puntos fue la máxima que permite el escáner, adquiriendo entre las dos posiciones un total de 10,5 millones de puntos, de los cuales casi 10 se corresponden a la superficie grabada del batolito. Se emplearon en este proceso de captura de datos un total de 3,5 horas, incluyendo el posicionamiento del aparato, la captura de puntos a máxima densidad y el registro de las dianas de control que ha permitido unir con precisión ambos escaneos.

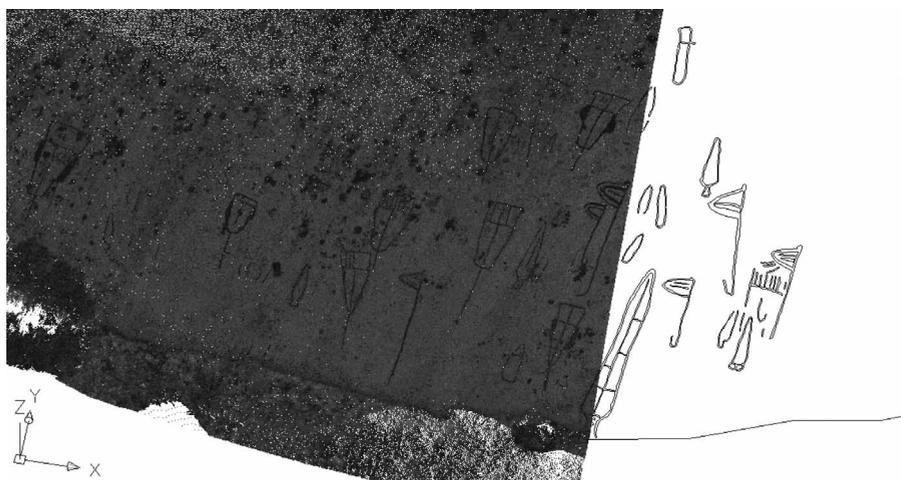


Figura 18. Nube de puntos de Laxe das Procesións visto en AutoCad, con el dibujo en líneas 3D de parte de las figuras.

El procesado de esta información fue sencillo, empezando con una limpieza de la nube de puntos, siendo la parte de trabajo más intensa el dibujo en 3D de los contornos de los grabados. Para ello se empleó el trabajo de 1 técnico durante 1 día, incluyendo la triangulación de la nube de puntos limpia para obtener el detalle de la superficie de la roca y de los motivos.

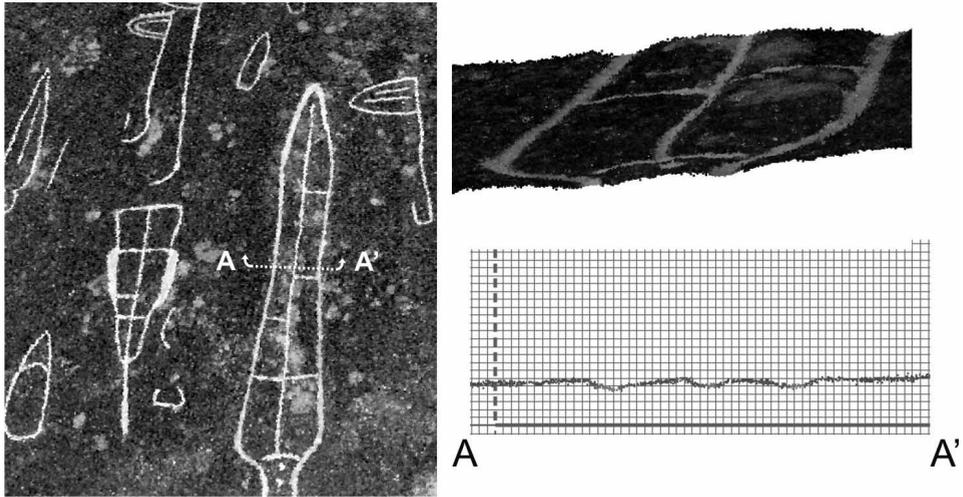


Figura 19. Detalle de la nube de puntos de varias figuras; derecha-arriba, vista en oblicuo de uno de los motivos, abajo, sección sobre nube de puntos con malla de 1 x 1 cm.

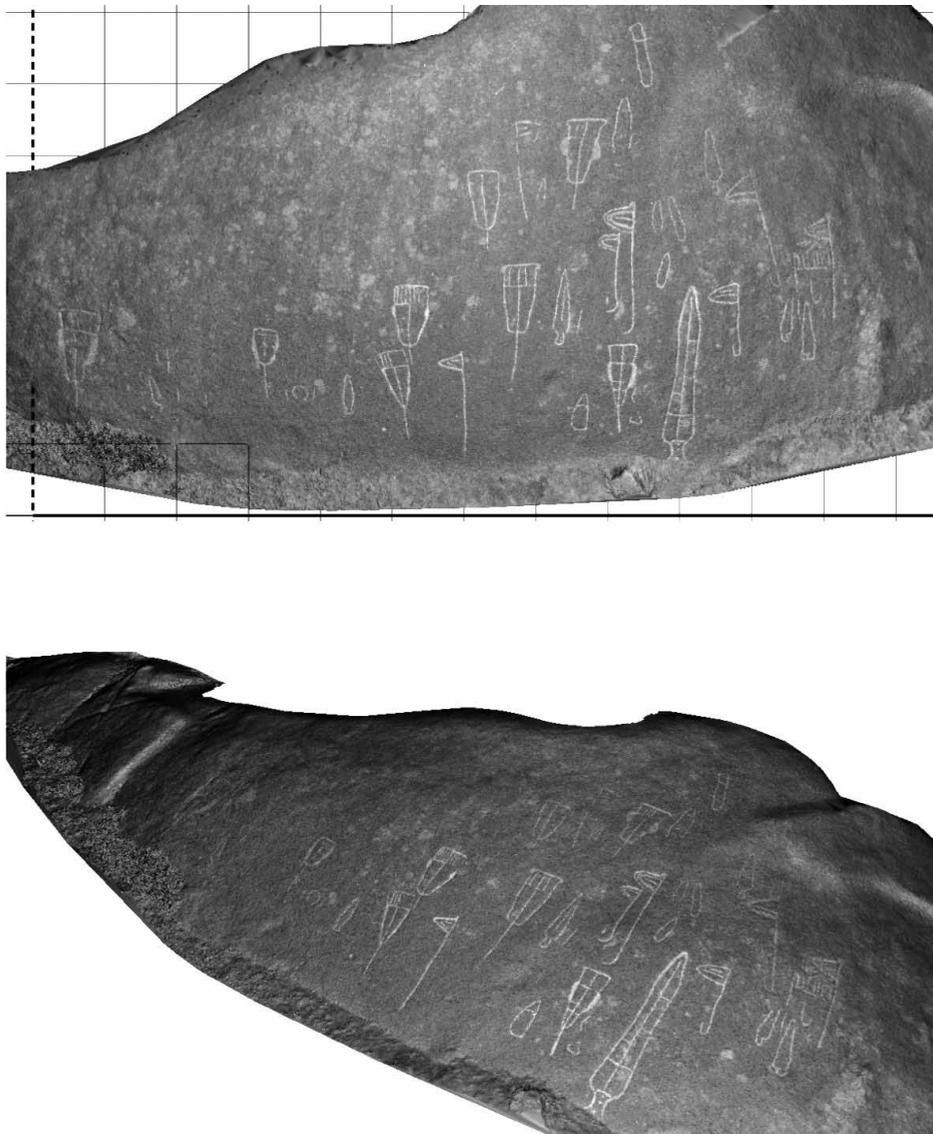


Figura 20. Superficie triangulada por medio de una “malla TIN”.
Arriba: vista ortoimagen en planta con malla de 1 x 1 m de referencia.

VALORACIONES FINALES

La intención de este artículo era, por una parte, presentar la herramienta Láser Escáner Terrestre y las características concretas del modelo que hemos empleado para llevar a cabo la documentación de varios elementos arqueológicos y arquitectónicos; por otro lado, también se traían a colación algunas de las áreas de discusión que sobre el Láser Escáner nos parecían más clarificadoras. Para ello, se han indicado los condicionantes y problemas generales que presenta la captura de datos, así como el proceso de trabajo, que se derivan de nuestra experiencia concreta.

Pero nuestro objetivo fundamental era presentar y valorar varios casos concretos de registro, con una selección de los proyectos que hemos realizado, con la presentando una serie de ejemplos variados con los cuales ilustrar algunos ámbitos de trabajo en los que se puede aplicar como técnica de registro fundamental el Láser Escáner Terrestre. La selección tenía como propósito, como decíamos, mostrar cierta variedad en los contextos registrados, que exigían resoluciones distintas. Creemos que, aunque algunos presentan cierta problemática, en general, el resultado es bastante aceptable.

Aun así, nos parece importante incidir en la problemática detectada en los ejemplos registrados. El primer problema que hemos detectado viene dado por la presencia de vegetación en el caso de realizar un levantamiento topográfico en un yacimiento localizado en una zona de monte. La vegetación, como se ha puesto de manifiesto más arriba, genera gran cantidad de residuos y la eliminación manual del archivo digital de estos puntos supone un importante esfuerzo respecto a la totalidad del trabajo. Este condicionante debe tenerse muy en cuenta a la hora de registrar elementos pequeños, en los que esta vegetación puede ocultar gran parte del sitio a registrar. Por otro lado, si el elemento se encuentra en una zona de monte alto la presencia de árboles podría ocultar también importantes zonas del ámbito de captura. Finalmente, si el elemento que queremos digitalizar presenta una superficie amplia, posiblemente supondrá la necesidad de establecer un gran número de posiciones hasta completar toda la superficie a capturar.

Sin embargo, si el objetivo es documentar elementos de gran tamaño con una representación de escala amplia, como ha sido el caso del Castro de Castrolandín, en los que la superficie esté cubierta de monte bajo, nuestra experiencia nos lleva a afirmar que, a pesar de esta distorsión (que puede suponer en algunas zonas que la cota real está aproximadamente 1 m por debajo de la nube de puntos registrada), el registro de estos datos aporta información suficiente y válida para representar las pendientes generales del castro o la forma del monte en el que se emplaza; es decir, podemos representar el objeto a una escala general. En este caso, la captura de

datos con el Láser Escáner se puede hacer con gran regularidad y densidad de puntos, sin dejar zonas vacías. Si comparamos este sistema, por ejemplo, con un levantamiento hecho con un GPS, puede suponer, frente a la captura mediante escáner, un gran número de horas de trabajo debido a la amplitud de superficie a cubrir, sobre todo si el objetivo es hacerlo con una densidad alta.

En cuanto al levantamiento en edificios, un aspecto que dificulta la captura está directamente relacionado con la división espacial interna o la existencia de varias plantas en altura, sobre todo si a ello sumamos que la conexión entre ellas se realice por un número escaso de vanos, y más si, como en el caso que expusimos, éstos son angostos. Si esta situación se produce supondrá la necesidad de establecer un mayor número de posiciones del Láser Escáner, con el consiguiente aumento del tiempo de captura en campo y de postproceso. En el caso del escaneado del edificio que aquí presentamos, valoramos muy positivamente el tiempo empleado en campo para la iluminación artificial de sitio, lo cual nos permitió obtener un registro fotográfico con el Láser Escáner de buena calidad y mejorar la identificación de los distintos componentes del edificio, lo que agilizó el tratamiento de los datos, como, por ejemplo, la extracción automática de ortoimágenes¹². El detalle del registro también ha permitido identificar con gran precisión las deformaciones y alteraciones de los arcos y bóvedas, como ya comentamos, u otros aspectos como las marcas de cantero.

En cuanto al resultado del registro de una excavación arqueológica, el tiempo empleado en campo fue bastante amplio en relación con la superficie registrada, ya que era necesario un nivel de detalle milimétrico que permitiera la digitalización de los restos arqueológicos, así como recuperar el volumen de cada piedra. Con estos planteamientos, hubo que realizar un registro muy denso que, aunque no ha sido necesario explotar en su totalidad, nos ha permitido obtener un archivo digital de un sitio que ya ha sido destruido y sobre el que podremos ampliar el trabajo en un futuro.

Respecto a la documentación de rocas con Arte Rupestre, una de las ventajas principales frente a otros tipos de registro es que el uso del Láser Escáner permite documentar tridimensionalmente el soporte, el cual constituye una información primordial en este tipo de sitios arqueológicos. Además, se evitan las deformaciones que suelen conllevar la documentación de los grabados a través de calco y que están aparejadas a la necesidad de convertir una superficie tridimensional, como la roca,

¹² Con todo, las ortoimágenes extraídas sobre nubes de puntos tienen una calidad que alcanza poco detalle (los puntos se visualizan como píxeles). Este aspecto se puede mejorar si estas ortoimágenes se obtienen de una malla (ver MAÑANA *et alii*, 2008).

en una superficie bidimensional, el plástico que se extiende sobre esta superficie. Como contraposición a esta ventaja, debe indicarse que la aplicación de este tipo de Láser Escáner no permite identificar los motivos que no se ven a simple vista ya que, debido a las limitaciones del aparato empleado, los surcos que no superen varios milímetros de profundidad no se pueden identificar en la nube de puntos. Por ello, para los grabados es más apropiado emplear un aparato con una capacidad de registro submilimétrico.

La digitalización por medio del láser escáner tiene como principal virtud la obtención de una documentación y un archivo digital de calidad y detalle en un momento concreto de la vida de un elemento patrimonial, lo cual posibilita la preservación digital de ese elemento. Creemos que este aspecto es importante sobre todo para sitios con riesgos de deformación o alteración o que van a ser excavados y/o destruidos. A pesar de ello, el archivo generado es denso, su manejo es laborioso y faltan programas que permitan una automatización de la extracción de información manejable en otros formatos, sobre todo la creación de dibujos de líneas y de mallas coherentes y fáciles de manejar.

Para finalizar, también nos parece importante reseñar que la generalización de la aplicación de este sistema de registro se encuentra limitada principalmente por el coste del aparato y de los programas que permiten manejar y editar las nubes de puntos; del mismo modo, es necesario personal especializado para su manejo. Con todo, su coste ha disminuido en los últimos años y se ha extendido su aplicación en el ámbito del Patrimonio Cultural, un proceso similar al que siguió la fotogrametría hasta ser, en la actualidad, un sistema más accesible y que permite obtener resultados de gran calidad y precisión.

Nuestra experiencia nos dice que no se puede pretender que esta herramienta ofrezca una solución a todos los problemas de registro, ni siquiera creemos que sea la herramienta ideal para todos los casos en los que la hemos aplicado. Hemos constatado que el uso combinado de varias técnicas e instrumentos se muestra como la mejor opción (también lo proponen así LAMBERS et alli, 2007; o YAS-TIKLY, 2007 con la fotogrametría). En relación con los datos obtenidos con el Láser Escáner, su combinación con otros sistemas de registro mejoran la capacidad de representación de los datos digitalizados, como, por ejemplo, con la rectificación de fotografía modificada o calcos sobre la nube de puntos, que permite visualizar sobre ella y ubicar tridimensionalmente elementos (como grabados) que no es posible reconocer directamente en la nube. El apoyo de otros instrumentos agiliza la edición posterior de datos, como el uso de la Estación Total para la toma de los datos de las dianas de referencia, que asegura una correlación precisa de la digitalización de, por ejemplo, los datos de distintas estancias de un edificio.

La aplicación o grado de preeminencia de distintas técnicas y su posterior combinación dependerá del tipo de representación gráfica que se quiera obtener del elemento a registrar, pero también del propio tipo de elemento patrimonial, de las posibilidades de acceder en un futuro a ese registro o de su fragilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAYICI, Y. 2007. "An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment", *Automation in Construction*, 16 (6): 816- 29.
- ARIAS, P.; HERRÁEZ, J.; LORENZO, H.; ORDÓÑEZ, C. 2005. "Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods", *Computers and Structures*, 83: 1754–66.
- AYÁN VILA, X.M. (coord.). 2002. *Pasado e futuro de Castrolandín (Cuntis): Unha proposta de recuperación e revaloración*. TAPA (Traballos de Arqueoloxía e Patrimonio), 29. Santiago de Compostela: IEGPS.
- BLANCO ROTEA, R. (Coord.) 2001. *Módulo 5. Metodoloxías de Intervención en el Patrimonio Arqueolóxico. Curso de Especialización en Gestión Arqueolóxica del Patrimonio Cultural*. Santiago de Compostela: Laboratorio de Arqueoloxía e Formas Culturais, IIT, USC.
- BLANCO ROTEA, R. 2005. "The study of mediaeval architecture from an archaeological perspective", en *Section 14: Archaeology and History of the Middle Ages*. General Sessions and Posters edited by Le Secrétariat du Congrès. Acts of the XIVth UISPP Congress, Belgium, 2-8 September 2001. BAR: Oxford.
- BLANCO-ROTEA, R.; BENAVIDES, R. 2008. "Mirando cara o futuro: coñecer para conservar", en MONTENEGRO RÚA, E.; BLANCO-ROTEA, R.; BENAVIDES, R. PORTELA, C. *Santa Eulalia de Bóveda*: 43-82. Pontevedra; Xunta de Galicia.
- BLANCO-ROTEA, R., GARCÍA-RODRÍGUEZ, S., MAÑANA-BORRAZÁS, P., MATO-FRESÁN, C., RODRÍGUEZ-COSTAS, A. 2009b (e.p.). "Levantamiento volumétrico e lectura de alzados do conxunto formado pola Igrexa da Ascensión e Forno da Santa. Santa Mariña de Augas Santas (Allariz, Ourense)", en VARELA CAMPOS, P. (coord.) (e.p.). *Actuacións Arqueolóxicas. Ano 2007*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
- BLANCO-ROTEA, R. MAÑANA-BORRAZÁS, P., MATO-FRESÁN, C., RODRÍGUEZ-COSTAS, A. 2009a (e.p.). "La basílica de la Ascensión y Os Fornos (Allariz, Ourense)", *Aquae Flaviae*, 41.
- BOEHLER W., BORDAS VICENT M., MARBS A., 2003, Investigating Laser Scanner Accuracy, *XIXth CIPA Symposium at Anatolya* (Turkey, 30 SEP – 4 OCT 2003), http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/cipa2003/laserscanner_accuracy.pdf
- BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R. 2008, "CAMPINO—A skeletonization method for point cloud processing", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (1): 115- 127.
- DÍAZ-ANDREU, M.; BROOKE, C.; RAINSBURY, M.; ROSSER, N. 2006. "The spiral that vanished: the application of non-contact recording techniques to an elusive rock art motif at Castlerigg stone circle in Cumbria" *Journal of Archaeological Science*, 33: 1580-87.
- ISPRS, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing <http://www.isprs.org/>
- JANTZ R., GIARLO M.J., 2005, "Digital Preservation: Architecture and Technology for Trusted Digital Repositories", *D-Lib Magazine*, 11:6 (Junio 2005). <http://www.dlib.org/>
- LAMBERS, K.; EISENBEISS, H.; SAUERBIER, M.; KUPFERSCHMIDT, D.; GAISECKER, T.; SOTOODEH, S.; 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 (10): 1702-1712
- Leica HDS3000 - Manual del Usuario http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs_5570.htm

- LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H-G. (eds.). 2008. *Theme issue Terrestrial Laser Scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (1).
- MAÑANA BORRAZÁS, P.; BLANCO ROTEA, R.; AYÁN VILA, X.M. 2002. *Arqueotectura 1: Bases teórico-metodológicas para una Arqueología de la Arquitectura*. TAPA (Traballos de Arqueoloxía e Patrimonio), 25. Santiago de Compostela: LPPP, USC..
- MAÑANA-BORRAZÁS, P., RODRÍGUEZ PAZ, A., BLANCO-ROTEA, R. 2008, 5: 15-32. “Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela).”, *Revista Arqueología de la Arquitectura*.
- MARAMBIO, A.; GARCÍA ALMIRALL, P. 2006. “Escáner láser: modelo 3d y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa Maria del Mar en Barcelona”, *ACE: architecture, city and environment*, 2: 178-187. Barcelona.
- MONSERRAT, O.; 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): 142-154.
- OTERO VILARIÑO, C.; PORTO TENREIRO, Y. 2007. “Castrolandín: el proceso de empoderamiento en un proyecto de gestión cultural”, en *Actas del IV Congreso Internacional sobre Musealización de Yacimientos Arqueológicos* (Santiago de Compostela, 2006): 377-383. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
- PÉREZ CAÑAS, S.; PÉREZ MARTÍN, E. 2007. “Levantamiento topográfico con la aplicación del Barredor Láser 3D del graderío romano en el yacimiento arqueológico de Tiermes: Reconstrucción digital y modelo digital del terreno”, *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 24 (141): 58-63.
- RICHARDS J. 2002. “Digital preservation and access”, *European Journal of Archaeology*, nº 5 (3): 343-366.
- ROCA-PARDIÑAS, J.; LORENZO, H.; ARIAS, P.; ARMESTO, J. 2008. “From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction”, *Computer-Aided Design*, 40 (5): 646 – 652.
- RODRÍGUEZ A., VALLE-MELÓN J. M., CASAR J. I., ESTEBAN J., 2008. “Aportaciones metodológicas a la gestión y explotación de nubes de puntos procedentes de escáneres tridimensionales, aplicados a la documentación geométrica del Patrimonio. El caso de la portada de los hierros de la catedral de Valencia”, en *IX Congreso Internacional (CICOP) de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación* (9-12 Julio de 2008, Sevilla): 357-362, Sevilla.
- SCHULZ, T.; INGENSAND, H. 2005. “El escaneado por láser terrestre: investigaciones y aplicaciones del escaneado de alta precisión”, *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 22 (131): 3-12.
- SEOANE VEIGA, Y. 2005. “Metodología de reproducción de grabados rupestres en Galicia: Levantamiento de calcos sobre plástico” *Cuadernos de Estudios Gallegos*, LII (118): 81-115.
- YASTIKLI, N., 2007. “Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning”, *Journal of Cultural Heritage*, 8 (4): 423 – 427.
- Más información sobre las publicaciones de los autores y de este Instituto en el Repositorio Institucional de CSIC de acceso abierto: **DIGITAL CSIC** <http://digital.csic.es/>
También puedes encontrar las imágenes en color de este artículo.