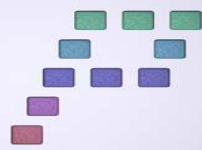

PFC



Gestión del Patrimonio Cultural
Nuevas Tecnologías

Año de realización:

Noviembre 2007

Método/Equipo

Restos arqueológicos en superficie/ Láser escáner y topografía clásica

TITULO: Levantamiento de restos funerarios de le época medieval mediante sistema láser-escáner 3D a escala 1:200 y del yacimiento arqueológico de Conimbriga a escala 1:500



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

1.2. Localización

1.3. Reseña histórica

2. REDES GPS

2.1. Descripción de la red local existente en el yacimiento

2.2 Red de apoyo de la basílica

3. LEVANTAMIENTO

4. TOPOGRAFÍA CLÁSICA

5. LEVANTAMIENTO MEDIANTE LÁSER ESCÁNER

6. EDICIÓN DE LA CARTOGRAFÍA

7. PRESUPUESTO

8. CONCLUSIONES

9. BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO I. RESEÑA DE LOS VÉRTICES DE LA RED

ANEXO II. PLANOS

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

Este proyecto tuvo por objetivo el aplicar diferentes técnicas de toma de datos en la realización del levantamiento topográfico del yacimiento de Conimbriga (Coimbra, Portugal), elaborando la cartografía derivada de la totalidad de este emplazamiento arqueológico a escala 1:500 y de la basílica paleocristiana a escala 1:200.

Para ello se efectuaron mediciones con la estación total TCR-705 y se aplicaron métodos de topografía clásica, con equipos GPS y las técnicas que conlleva, y con el equipo láser escáner 3D GX-200 de la casa Trimble.

1.2. Localización

El yacimiento arqueológico de Conimbriga está situado en el distrito de Coimbra, Portugal, concretamente en la comarca de Condeixa-a-Nova.



Figura 1: Localización de Coimbra



Figura 2: Localización de Condeixa-a-Nova



Figura 3: Fotografía aérea del yacimiento

1.3. Reseña histórica

Conímbriga fue una antigua ciudad romana localizada en la vía militar que iba de Olisipo (Lisboa) a Bracara Augusta (Braga), dentro del *Conventus Scallabitanus*, provincia romana de Lusitania. Muchos estudiosos sugieren que tenía su origen en un castro de

origen celta de la tribu de los Conios. Lo que se sabe al respecto, es que Conímbriga fue ocupada por los romanos en las campañas de Décimo Junio Bruto, en el 139 a.C.

En el reinado del emperador César Augusto (siglo I), la ciudad sufre importantes obras de urbanización, habiendo sido construidas las termas públicas y el Forum.



Figura 4: Reconstrucción del Foro



Figura 5: Termas

En el 468 los Suevos asaltan la ciudad y, a partir de entonces, Conímbriga comienza a abandonarse, acabando por perder su estatus de sede episcopal siendo reemplazada por *Aeminium* (Coimbra), que poseía mejores condiciones de defensa y supervivencia. Los habitantes que se quedaron, fundaron Condeixa-a-Nova, más al norte de la ubicación de Conimbriga. Después de las invasiones bárbaras la vida continúa en la ciudad como nos dice una inscripción del siglo VI, testimonio de la era visigótica y árabe.

Las primeras excavaciones comenzaron en 1899 gracias a una subvención concedida por la reina de Portugal, Amelia de Orleans, pero es a partir de 1955 cuando el ritmo de las investigaciones se intensificó.

2. REDES GPS

El primer paso realizado fue la comprobación de la red local del yacimiento para dotar a la cartografía de coordenadas locales propias. Las observaciones se realizaron con equipos GPS. Se escogieron un número de hitos señalizados que permitieran comprobar la bondad de la red creada específicamente para el yacimiento. Para ello se compararon las coordenadas de los puntos que configuraban la red con las obtenidas tras las observaciones realizadas en campo.

2.1. Descripción de la red local existente en el yacimiento

La red fue establecida por un alumno de la universidad de Hamburgo, Marcus Knorr, y su trabajo conformó su Proyecto de Fin de Carrera en Octubre de 1990. El nombre que recibió la red fue el de Knorr. La planificación de la red la llevó a cabo como una red local independiente, en la que los cálculos se efectuaron tanto en planimetría como en altimetría. De esta manera, ésta sólo contiene errores debidos a los instrumentos y a los métodos empleados.

Se utilizó mortero de cemento como base y una barra de hierro en su interior que representara el punto geodésico en su extremo. Las posiciones de los puntos los situó en la parte superior de la muralla y los alrededores del yacimiento para prevenir daños en las posteriores excavaciones.

Para la planificación de la red se impuso la condición de que debía garantizarse una precisión general de 10 cm, valor que fue considerado a lo largo de los trabajos. Según

el autor de la red, la experiencia establece que todo punto determinado a partir de otros contiene un error tres veces mayor que el de las referencias del cual se obtiene. Según este principio, se debía garantizar una precisión de 10/3 en X,Y, Z, es decir, 3 cm en este caso de los puntos de la red básica.

Observando el documento gráfico en el que se mostraba la ubicación de todos los vértices dentro del yacimiento, se decidió escoger cinco vértices, de los cuales cuatro de ellos configurasen un polígono cuyo perímetro abarcase la práctica totalidad del yacimiento y un quinto en el interior.

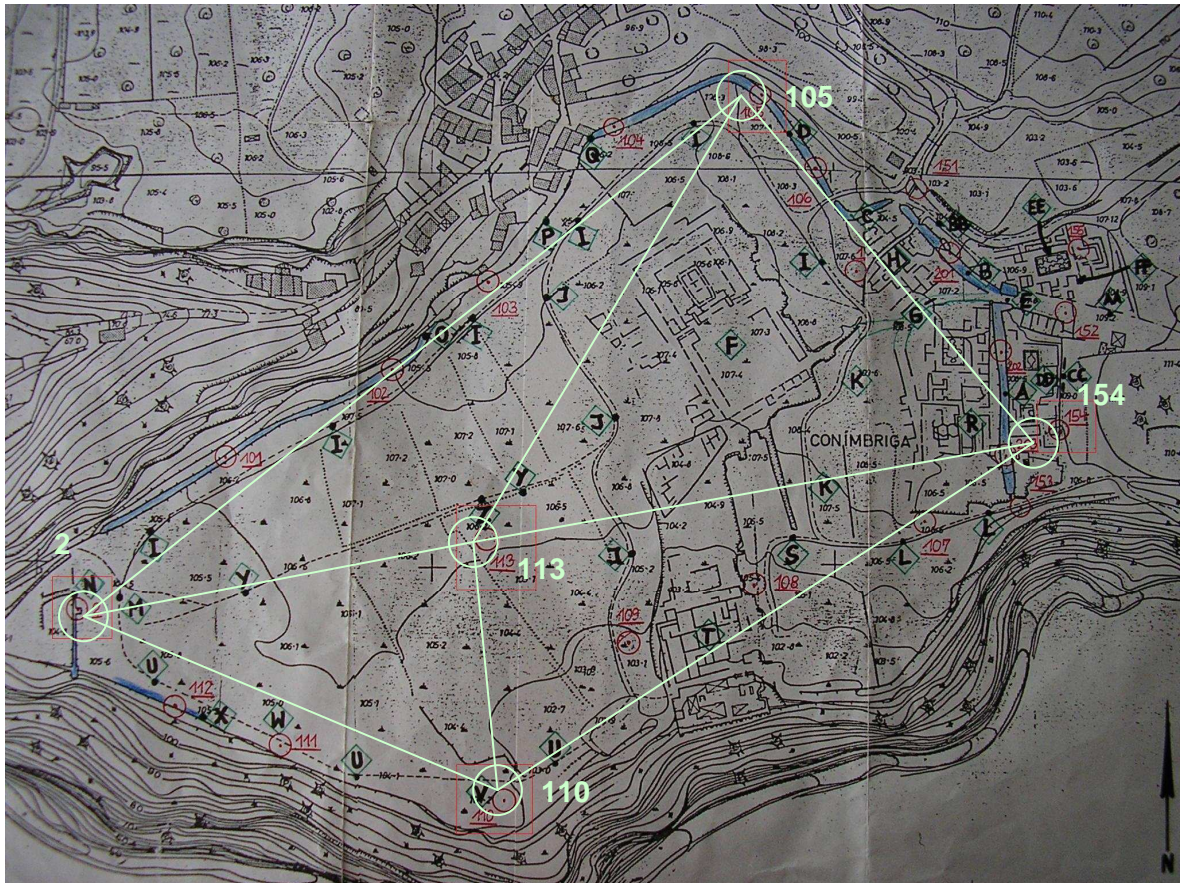


Figura. 6: Diseño de la comprobación de la red

La observación se realizó con tres receptores. Para aprovecharlos al máximo y conseguir la mayor redundancia posible se estacionaron sobre tres vértices de la red. Se dejaron los aparatos observando simultáneamente el tiempo necesario, aproximadamente 10 minutos. Cuando se cumplía el tiempo se interrumpía la observación de uno o dos de ellos, se grababan las observaciones y se cogía el equipo para colocarlo en el siguiente vértice, y se volvía a observar. Pasado el tiempo oportuno se cogía el aparato del vértice que no hubiera sido desplazado todavía y se estacionaba en el siguiente y se volvía a observar, y así sucesivamente hasta completar el proceso.

Al utilizar tres receptores observando simultáneamente en una primera observación se tienen los puntos bisecados por dos juegos de incrementos de coordenadas (por dos líneas base). Al mover uno y estacionar en el siguiente los que quedan fijos vuelven a ser bisecados, por tanto se han medido sus incrementos de coordenadas por cuatro caminos diferentes.

Se observó la red de acuerdo con la siguiente planificación de las sesiones:

	GPS 1	GPS 2	GPS 3
Sesión 1	110	105	154
Sesión 2	2	105	113
Sesión 3	2	110	113
Sesión 4	2	154	113

Debido a que las redes GPS tienen redundancia de medidas, éstas deben ser ajustadas para hacer consistentes las diferencias de coordenadas. Dicho ajuste de las líneas base en redes GPS se realiza aplicando mínimos cuadrados donde las ecuaciones de observación se escriben en función de los incrementos de coordenadas medidos y sus residuos.

Posteriormente se realizó la transformación de coordenadas. Se empleó la transformación de un paso, que consta de una transformación bidimensional de semejanza para la planimetría y una interpolación para la altimetría. Este tipo de transformaciones es el único permitido con un sistema de coordenadas planas.

2.2. Red de apoyo de la basílica

Una vez comprobada la red local del yacimiento y asegurada su bondad, se procedió a materializar, observar y calcular una red que diera cobertura al posterior levantamiento de la basílica con metodologías láser-escáner.

El objetivo de la creación de esta red era tener en las cercanías de la basílica una serie de puntos con coordenadas conocidas en el sistema local que habrían de servir de base para la observación y cálculo de la red de puntos de referencia para el levantamiento con láser-escáner.

Se decidieron colocar tres estacas, situadas en las proximidades de las esquinas de la basílica, de modo que las intersecciones que se produjeran fueran en todas las direcciones posibles (se descartó un estacionamiento en la esquina próxima a la muralla

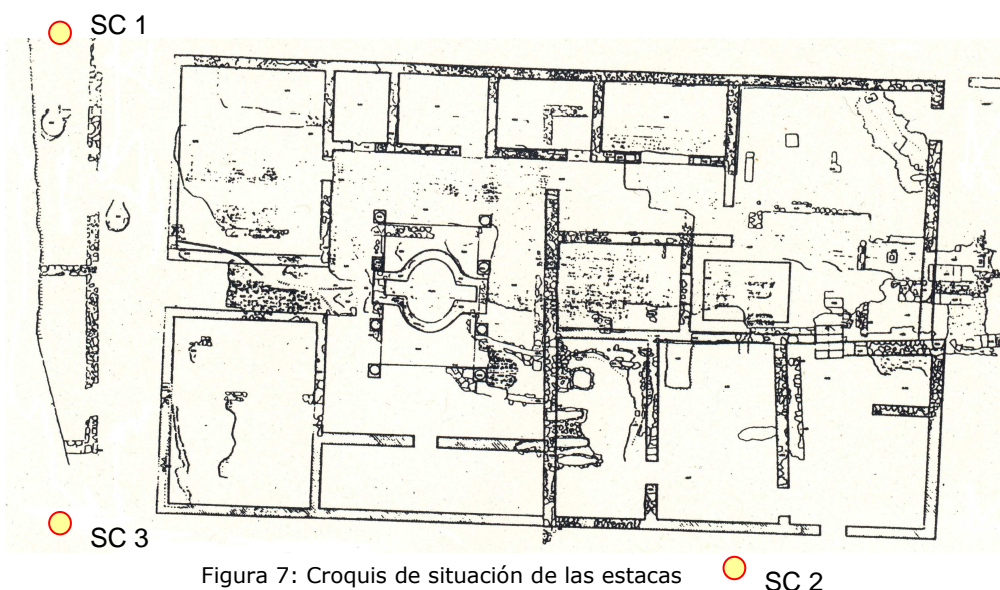


Figura 7: Croquis de situación de las estacas

por la imposibilidad de obtener una materialización perdurable en el tiempo. La ubicación se encontraba en el camino que transitan los visitantes al yacimiento, y por

ello estaba sujeto a posibles modificaciones de su ubicación). La distribución de estacionamientos fue la siguiente:

Se realizó el posicionamiento con el método relativo estático rápido en todas las bases. Un receptor se situó en el punto 113 y los otros se fueron colocando en los que conformaban la red de apoyo. Cada punto se observó durante un tiempo mínimo de 10 minutos.

3. LEVANTAMIENTO

Una vez comprobada la bondad de la red, se realizó el levantamiento de todo el yacimiento (aproximadamente 12 hectáreas) mediante métodos GPS cinemáticos en tiempo real (RTK). Su finalidad fue la de situar en un contexto topográfico la basílica. Para este tipo de levantamiento topográfico se optó por emplear equipos GPS con metodología RTK (levantamiento en tiempo real). El sistema GPS aporta rapidez al levantamiento taquimétrico, aunque presenta limitaciones en las cercanías de objetos altos por obstrucción de las señales de los satélites.

Se dejó el equipo emisor en el punto 113 habiéndole introducido al receptor las coordenadas ajustadas calculadas en la red. Los equipos móviles se montaron sobre jalones de dos metros y se procedió a levantar la totalidad del yacimiento arqueológico, de aproximadamente, 12 hectáreas.

El relleno fue tomado con los dos equipos trabajando a la vez. Se procuró tomar puntos con más densidad en las áreas de terreno más irregular que otras menos accidentadas y con pendiente constante, para lograr así una correcta definición del terreno. Hubo algunas dificultades a la hora de tomar puntos próximos a la muralla de la zona central del yacimiento, ya que debido a su altura había pérdidas de señal.



Figura 8: Receptor GPS fijo

4. TOPOGRAFÍA CLÁSICA

Para el levantamiento con láser escáner se creó una red de puntos de referencia necesarios para georreferenciar la nube de puntos tomada desde la estación escáner. Se dotaron de coordenadas con estación total utilizando el método de intersección mixta

con ángulos y distancias. Mediante las coordenadas de dichos puntos de referencia se puede transformar la nube de puntos del sistema de referencia instrumental al sistema de coordenadas local del yacimiento. De esta manera se consigue unir las diferentes nubes de puntos derivadas de las tomas parciales de la basílica y se crea un modelo tridimensional global con el que se puede trabajar en procesos posteriores.

Se visaron una serie de clavos situados en la zona de excavación que disponían de coordenadas en el sistema de coordenadas local del yacimiento para obtener las desorientaciones en los estacionamientos de las estacas. En segundo lugar y mientras el escáner barría los sectores indicados, se observaron a prismas reflectores situados en los lugares donde se habían colocado las esferas necesarias para unión de tomas. Como entre el centro de las esferas no coincidía con el centro óptico del prisma, se procedió a calcular la diferencia de altura que habría que aplicar en el postproceso.

$$m_{prisma} = 8 \text{ cm}$$

$$m_{esfera} = 5.5 \text{ cm}$$



Figura 9: Esferas empleadas en la georreferenciación de tomas

Por lo tanto, se aplica una diferencia de 3.5 centímetros. Se visaron 14 clavos diferentes para tener una mayor redundancia de datos y poder desechar observaciones erróneas, ya que algunos clavos se consideraron que podían haber sido desplazados de su posición original.

Una vez observadas las vueltas de horizonte se procedió al cálculo de las coordenadas de los centros de las esferas mediante un ajuste por mínimos cuadrados, donde intervienen ecuaciones de dirección y distancia. La redundancia era muy grande, ya que eran ocho los puntos a determinar (24 incógnitas) y se podían configurar un total de 72 ecuaciones normales (24 de dirección, 24 de distancia y 24 de desnivel).

5. LEVANTAMIENTO MEDIANTE LÁSER-ESCÁNER

Para el levantamiento de la basílica se necesitaba la colocación del escáner en varias posiciones distintas alrededor de él, tratando de poder cubrir la totalidad del objeto a escanear. La elección de estos emplazamientos fue complicada debido a la morfología de la basílica, ya que los restos de muros de las paredes tapaban las zonas adyacentes. La densidad de la nube de puntos se estableció en un punto cada dos centímetros; de esta manera se aseguró una precisión suficiente en la realización de la cartografía a escala 1:200, en la que la mínima distancia apreciable sería de 4 centímetros, el doble de lo establecido en la resolución de escaneado.



Figura 10: Toma de datos en la basílica con láser-escáner

En total se realizaron 6 escaneados, distribuidos como se muestra a continuación:

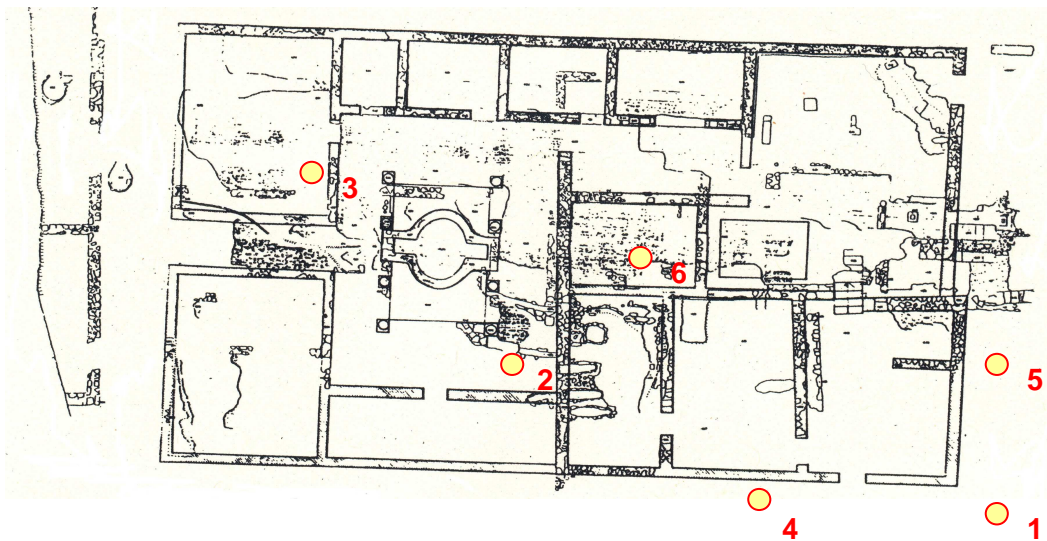


Figura 11: Croquis de las tomas con equipo láser escáner

En cada punto de vista se procedía al estacionamiento y nivelación del equipo láser escáner. Con el programa propio del equipo (*Pointscape*) se configuraron los parámetros del escáner en cada toma (área angular de barrido horizontal y vertical, resolución y número de puntos a tomar). Las observaciones se realizaban procediendo en este orden:

- 1) Barrido de 360° horizontal con baja resolución y toma de fotografías para una posible extracción de texturas para una reconstrucción tridimensional.
- 2) Escaneado de cada una de las esferas colocadas para su georreferenciación.
- 3) Selección de la ventana angular con información que interesaba escanear con resolución completa.

- 4) Escaneado de la selección con resolución completa.
- 5) Cambio de estacionamiento a otro punto de vista de la zona de estudio.

A continuación se muestra una simplificación de los puntos tomados diferenciados según el punto de vista con diferentes colores.

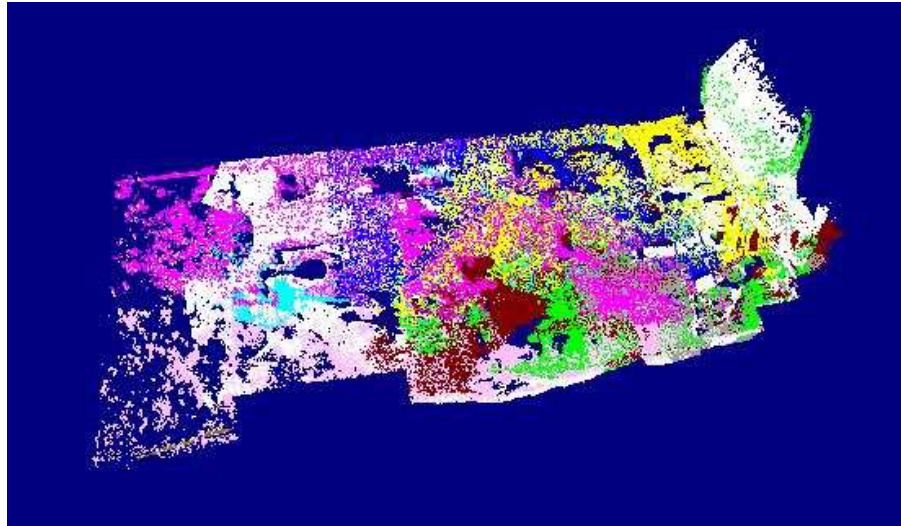


Figura 12: Nube de puntos por estaciones

En total se tomaron más de nueve millones de puntos, lo que indica la potencia de este tipo de metodologías.

El procesamiento de los datos recogidos por el láser escáner se realizó con el programa de Trimble Realworks.

Los puntos escaneados son guardados en un sistema de coordenadas relativo al instrumento. El punto origen de ese sistema es el lugar donde el haz láser se encuentra con el espejo. Para situarlos en un sistema global único para todas las tomas, se necesitan las esferas (u otros objetos) dentro de la escena con sus posiciones conocidas (y también la orientación en caso de paneles). Se llama registro del escáner al hecho de asignar valores del nuevo sistema de coordenadas a estos objetos. Las esferas fueron dotadas de coordenadas tal y como se indicó anteriormente. En cada una de las nubes de puntos escaneadas se tuvo que determinar la posición del centro de todas las señales de referencia en el sistema instrumental. El programa determina la posición de cada esfera de forma interactiva.

Una vez se selecciona el área de la nube de puntos donde está la esfera, se analiza la posición del centro de la esfera seleccionando un número de puntos que forman el contorno de la esfera. El programa de registro ofrece información cuantitativa de la precisión con la cual determina los puntos.

Completada la medición de esferas, se dotaron de las coordenadas calculadas para éstas por métodos clásicos al estacionamiento número seis. A continuación se enlazó la nube de puntos de la toma 6 (ya en coordenadas locales del yacimiento) con la nube de puntos procedente del estacionamiento 5. Posteriormente la nube de puntos 6 y 5 con la 4 y así sucesivamente. De esta manera se consigue una nube de puntos georeferenciada en coordenadas locales del yacimiento

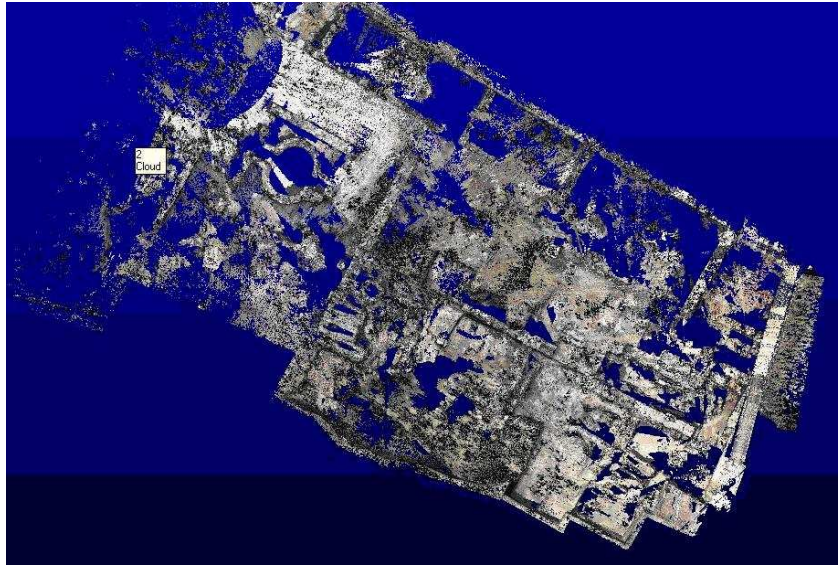


Figura 13: Nube de puntos con todas las tomas enlazadas y georreferenciadas

Una vez que todas las nubes de puntos se encuentran en el mismo sistema local propio del yacimiento se puede modelar el objeto de estudio. El programa Realworks permite el modelado y la extracción de ciertas geometrías, pero el espacio que requiere este tipo de archivos hace imposible la exportación de dichos ficheros a algún programa de CAD para su posterior tratamiento. En el programa Realworks se pueden hacer visualizaciones y rotar la nube de puntos para observarla desde múltiples perspectivas.

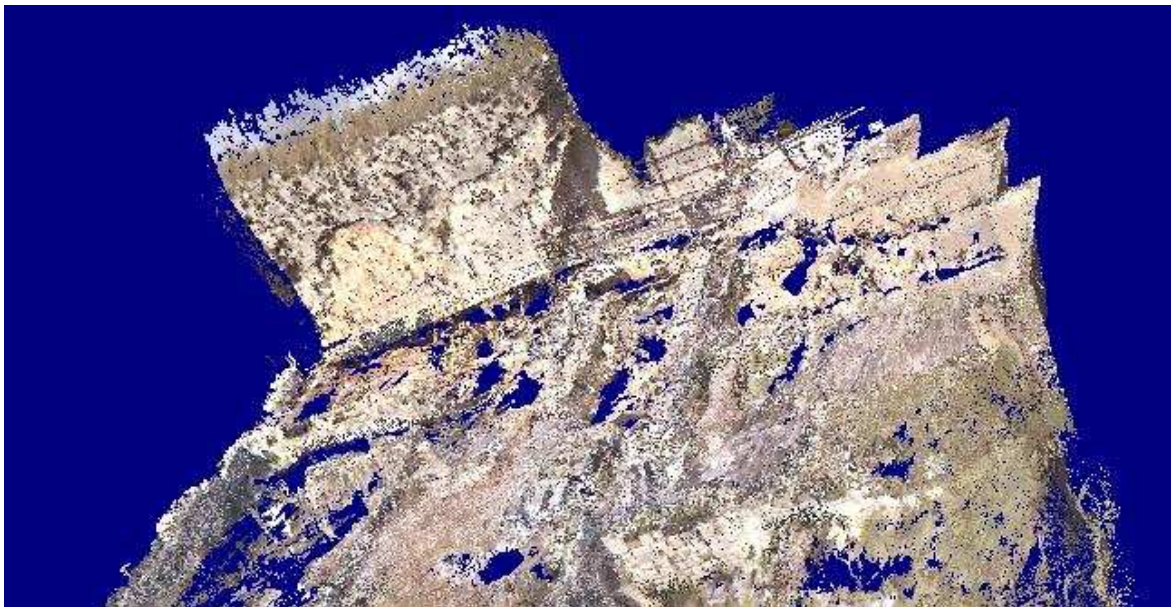


Figura 14: Perspectiva de la zona de la muralla

Para su tratamiento posterior, la nube de puntos presentaba varios problemas, siendo dos de ellos de mucha importancia. El primero de ellos era la existencia de zonas donde no se habían recogido puntos, debido a que había otros objetos interponiéndose en el camino del haz láser hacia esas zonas. Este problema se daba en las zonas próximas a los restos de los muros. El segundo lugar, en la zona de basílica existían multitud de matas de pequeña altura que afectaron a la toma de datos al ser captadas estas matas en lugar del objeto que se pretendía tomar.

El trabajo principal consistió en “limpiar” la nube de puntos de matas. Para ello se seguía el siguiente procedimiento:

- Segmentación de la nube de puntos en pequeñas zonas para poder manejarlas mejor. También se hace esto para evitar la eliminación de puntos no deseados al utilizar la herramienta apropiada.



Figura 15: Segmentación de la zona de las excavaciones

- Depurar la zona de matas quitando la mayor cantidad de puntos posibles para su posterior tratamiento, como puede ser una triangulación para la generación de un modelo digital o la generación de un curvado.
- Volver a enlazar los distintos fragmentos que se han ido segmentando de la totalidad de la nube de puntos.
- Digitalización de los elementos que aparecerán en la cartografía.

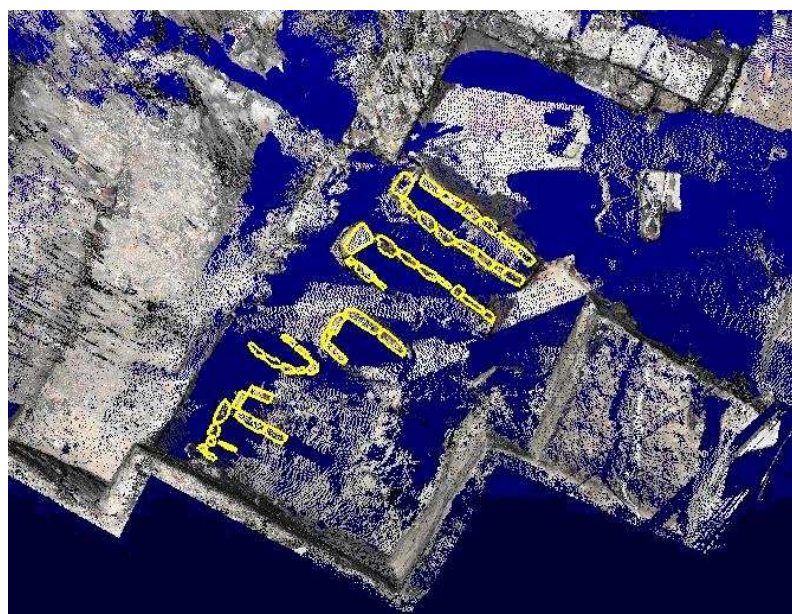


Figura 16: Digitalización de tumbas

Una vez depurada la nube de puntos y digitalizados los elementos de la cartografía, se exportaron los datos a ficheros .dgn y .dxf para poder realizar la cartografía.

6. EDICIÓN DE LA CARTOGRAFÍA

La última fase del proyecto consistió en obtener cartografía de la planta de la basílica.

Para la edición cartográfica de la basílica paleocristiana se tomaron como fuente de datos la nube de puntos editada en el post-proceso del láser-escáner. Con esta nube de puntos se procedió a una digitalización de los muros, piedras, tumbas... que se encuentran en la basílica.

Para dicha digitalización se utilizó la propia nube de puntos, que con su definición permitía la diferenciación de piedras, apoyada en croquis realizados por los arqueólogos y numerosas fotografías de la zona.

La digitalización se realizó en el propio programa Real Works, que tiene una herramienta que permite dibujado de líneas que posteriormente se pueden exportar en un .dxf para su posterior tratamiento con programas de CAD. La digitalización se realizó en dos dimensiones, ya que el objetivo final es una cartografía en planta.

También con el propio programa de Real Works se realizó el curvado. Obtuvimos dos curvados, uno a equidistancia 10 cm y otro a 20 cm. Una vez observado el resultado, y como ya se presumía por la complejidad de la zona, un curvado de una zona como la de trabajo no tiene validez, ya que el resultado es un curvado muy caótico en el que no se aprecia con claridad la altimetría.

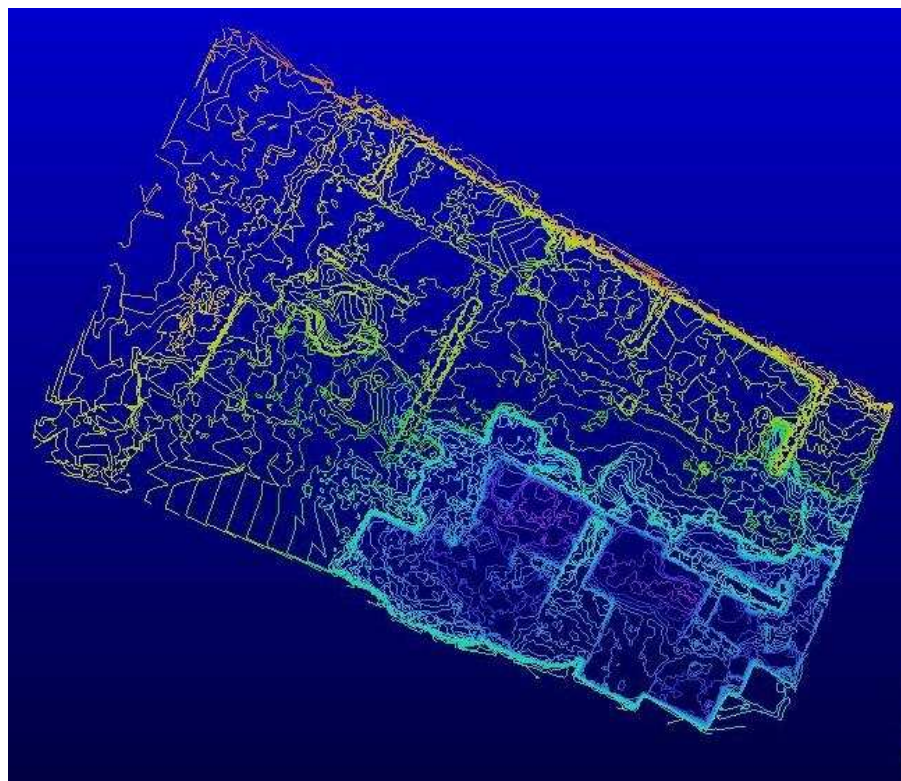


Figura 17: Curvado a equidistancia 10 centímetros

Ante esta situación se decidió que en lugar de representar la altimetría con curvas de nivel, se representara con puntos acotados. Los puntos se distribuyen por toda la basílica, también repartidos por la zona de muros, para así permitir conocer la dimensión de estos. También se ha densificado los puntos en zonas que se consideraba necesario (con más relieve, con más detalle...).

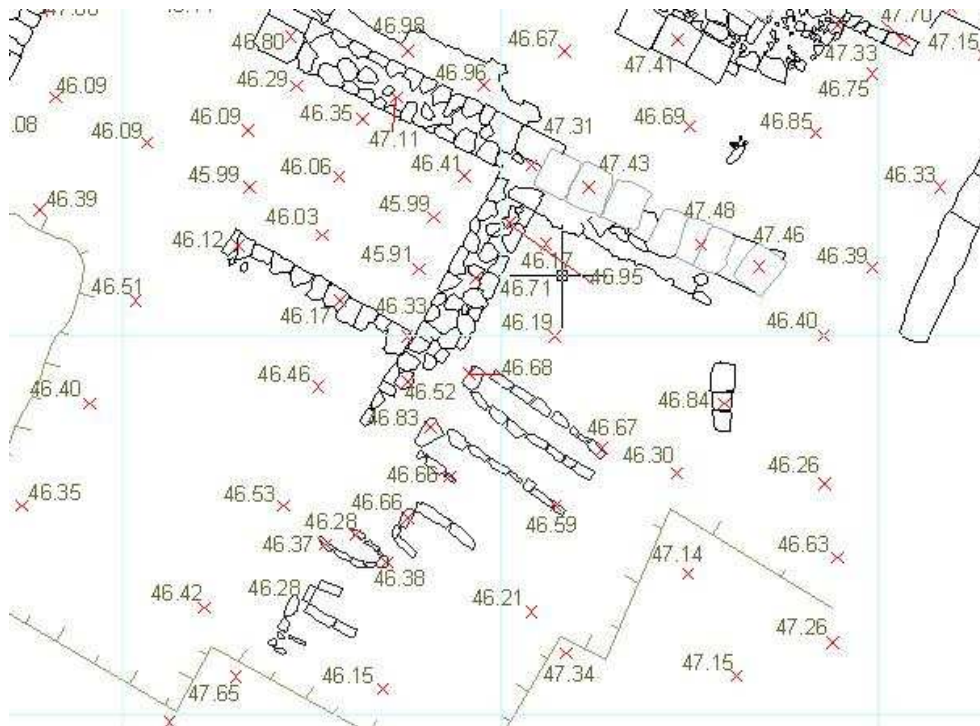


Figura 18: Puntos acotados

7. PRESUPUESTO

El presupuesto calculado para la realización de este proyecto se muestra a continuación desglosado en cada una de las actividades.

ACTIVIDADES	COSTE
Fase previa	590
GPS	2860
Láser escáner	3983
Cálculo de redes	312
Tratamiento datos escáner	1296
Edición cartografía	1990
Edición memorias	2874
Desplazamiento	184
SUBTOTAL	14089
Beneficios + I.V.A.	5.574,52
COSTE TOTAL	19,663,52 €

8. CONCLUSIONES

El sistema láser escáner permite un gran ahorro de tiempo en la toma de datos, e incluso hace posible trabajos que serían imposibles de realizar por métodos clásicos. No obstante, su uso acarrea una gran cantidad de desventajas, que en ocasiones pueden superar las ventajas que proporciona. Entre ellas cabe destacar:

- Gran abundancia de datos, lo que lleva a la eliminación de puntos y a no poder trabajar con la nube de puntos en su máxima resolución.
- Gran tamaño de los ficheros, que son imposibles de leer en la mayoría de ordenadores.
- Los programas que emplea son propios y únicos de cada casa constructora; sería bueno y conveniente un posible intercambio entre distintos programas.
- Se trata de un equipo muy delicado, que hay que cuidar mucho en campo; en nuestro caso, perdimos muchas horas de trabajo por sobrecalentamiento del equipo. Se desaconseja trabajar con equipos láser escáner jornadas enteras en épocas calurosas como en verano.
- Su uso en superficies muy irregulares (como en el caso de la basílica paleocristiana) genera una nube de puntos muy difícil de tratar.

En general, se puede resumir en que los equipos láser escáner reducen mucho el tiempo de trabajo en campo, pero su postproceso es más largo y tedioso. Por otro lado, con equipos láser-escáner pueden modelarse tridimensionalmente objetos y hacer reconstrucciones de edificios, tarea que no se ha realizado en este proyecto pero que bien podría haberse propuesto.



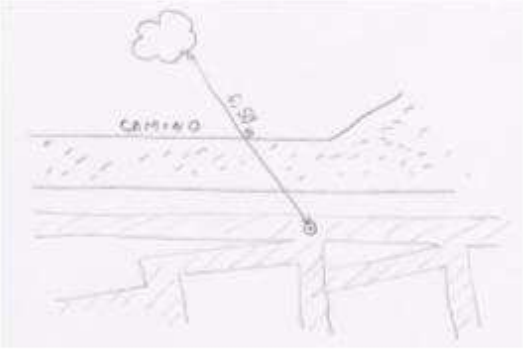
La herramienta del láser-escáner tiene un gran futuro por delante como elemento de toma de datos. Este proyecto ha servido para una toma de contacto con este nuevo tipo de metodologías.

Agradecimientos

A Bruno Pérez y Jesús M^a Garrido, y a todos los tutores y alumnos que han hecho posible el proyecto y la redacción de este informe.

ANEXO I. RESEÑA DE LOS VÉRTICES DE LA RED

ANEXO I. RESEÑA DE LOS VÉRTICES DE LA RED

Reseña del vértice	
NÚMERO: 154 NOMBRE: 154 DISTRITO: Coimbra FREGUESIA: <u>Condeixa-a-Velha</u>	FECHA DE REALIZACIÓN: Agosto 2007 TIPO DE SEÑAL: Clavo
COORD. GEODÉSICAS WGS84 LONGITUD: 8° 29' 34.53879" W LATITUD: 40° 05' 55.90272" N <u>H. ELIPSOIDAL:</u> 162.719 m	ACCESO En el exterior de la muralla antigua, junto al camino que va paralelo a la muralla y a los setos.
COORD. LOCALES KNORR E: 1074,810 m N: 888,077 m H: 49.782 m	
PLANO DE SITUACION 	FOTOGRAFIA 
CROQUIS 	

ANEXO II. PLANOS

ANEXO II. PLANOS

Plano general del yacimiento

