

Integración de sensores aéreos y terrestres para la producción de cartografía multiescala 3D en la Alhambra y su territorio.

Antonio Manuel Montufo Martín¹, José Manuel López Sanchez², Stefano Ferrario¹, Isidoro Gómez Cápitas², Isabel García Garzón¹

¹ Patronato de la Alhambra y Generalife. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. Granada. Spain

² TCA Geomática. Sevilla. Spain

Resumen

La elaboración de una nueva cartografía digital y ortofotografía para el conjunto monumental de la Alhambra y Generalife se inscribe en el marco del proyecto SIALH, para el desarrollo del Sistema de Información de la Alhambra. La producción cartográfica en el ámbito de la Alhambra supone un reto por el carácter patrimonial de los elementos a representar, la complejidad orográfica del territorio objeto de estudio y unas necesidades de precisión y nivel de detalle que exceden los estándares usuales en cartografía. El carácter multiescala de la cartografía, que debe dar soporte tanto a trabajos de escala local (hasta 1:5.000) como a levantamientos planimétricos de detalle, constituye otro de los desafíos del proyecto. La metodología empleada combina sensores aéreos y terrestres para garantizar la máxima precisión a la vez que enfatiza la importancia del modelo de datos como elemento clave para garantizar el carácter multiescala de la información y su empleo en proyectos de escalas muy diferentes.

Palabras Clave: ALHAMBRA, SIG, MODELOS DE DATOS, LIDAR, LÁSER ESCÁNER, GESTIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL.

Abstract

The production of new digital cartography and orthophotos for the monuments of the Alhambra and Generalife is part of the SIALH project, which aims for the development of the Information System of the Alhambra. Map production in the area of the Alhambra is a challenge due to various factors such as the heritage value of the elements to be represented, the complex topography of the territory under study and the requirements of precision and detail exceeding the usual standards in cartography. The need for a multiscale cartography which must support both local-scale projects (up to 1:5000) and detailed planimetric surveys also constitutes a challenge. The methodology employed combines aerial (LiDAR, digital photogrammetry) and ground sensors (laser scanning) to ensure maximum precision while emphasizing the role of data model as a key element for ensuring the multi-scale information and its usability in projects of very different scales.

Key words: ALHAMBRA, GIS, DATA MODELS, LIDAR, LASER SCANNER, CULTURAL HERITAGE MANAGEMENT.

1. Introducción

El programa de elaboración de una nueva cartografía digital y ortofotografía de la Alhambra y el Generalife y su territorio se inscribe en el marco del proyecto SIALH, para el desarrollo del Sistema de Información de la Alhambra.

El objetivo de SIALH es el de dotar al Patronato de la Alhambra y Generalife (en adelante PAG) de un sistema de información corporativo que proporcione el soporte tecnológico necesario para las actividades de investigación, protección, conservación y difusión del conjunto monumental.

SIALH se implementa sobre la base de un Sistema de Información Geográfica (GIS), por lo que la exigencia de una información geográfica de calidad es ineludible. Así, se desarrolla este proyecto para la elaboración de una nueva cartografía base y ortofotografía que proporcionen una representación fidedigna, precisa y actualizada del territorio Alhambra.

Para la toma de datos se han combinado los métodos más avanzados en la producción cartográfica, integrando sensores aéreos como el LIDAR, cámara de barrido de última generación y cámara matricial, y sensores terrestres como el láser escáner; todo ello apoyado con técnicas de georeferenciación GPS y topografía clásica.

Asimismo se ha trabajado en la definición de un modelo de datos multiescala que permite abordar de forma unitaria tanto la representación cartográfica a escalas urbanas como la representación planimétrica detallada de los elementos patrimoniales.

Como resultado de los trabajos se ha obtenido una cartografía digital 3D, de precisión, y multiescala que cubre la totalidad del territorio Alhambra, unas ortofotografías aéreas de elevada resolución, una red de referencia para los levantamientos planimétricos y un protocolo de actuación topográfica que contiene las normas técnicas de captura y el modelo de datos.

2. Definición de los trabajos

Ámbito de estudio

La zona de estudio se extiende desde el propio recinto amurallado de la Alhambra, pasando por las laderas que descienden desde la colina de la Sabika hacia la ciudad, e incluyendo el valle del río Darro aguas arriba, donde se localizan las captaciones que surten de agua al complejo alhambrense.

Se trata de un ámbito extenso y variado, en el que se combinan zonas urbanas con una trama urbanística densa y compleja y suelos rústicos extensivos, con densa cubierta boscosa en algunas zonas. Estas características han motivado que se distinguieran dos zonas de trabajo, en las que se establecían condiciones de restitución y representación diferentes.

Así en las zonas urbanas la restitución ha contado con un apoyo en campo de gran entidad, incluyendo el levantamiento exhaustivo con escáner 3D terrestre de todas las estructuras e inmuebles en el interior del recinto amurallado, mientras que en los ámbitos rústicos, el grueso de los trabajos se ha desarrollado por fotogrametría aérea.

Geodesia

La nueva estructura geodésica del Conjunto Monumental de la Alhambra está formada por el sistema de referencia geodésico y una red básica topográfica, donde se deben de apoyar la totalidad de trabajos planimétricos a desarrollar en el futuro.

El sistema de referencia geodésico es el ETRS-89, establecido como sistema de referencia espacial oficial en España (Real Decreto 1071/2007). Éste queda materializado por el marco geodésico definido por la red andaluza de posicionamiento (RAP), la red de estaciones de referencia GPS y la red geodésica nacional (REGENTE), así como todas sus posibles densificaciones.

El sistema de referencia de coordenadas (CRS) empleado para la representación planimétrica de todo el conjunto de datos geográficos será la ETRS89 – Transversa de Mercator huso 30 (ETRS89-TM30), mientras que la altitud se ha establecido en base a la Red de Nivelación de Alta Precisión, RENAP, utilizados de referencia altimétrica.

Protocolo de Actuación Topográfica

Se han definido las normas técnicas para la elaboración de la nueva cartografía del Conjunto y los futuros trabajos planimétricos, estableciendo las especificaciones para:

- Definición de los sistemas de referencia de coordenadas (CRS).
- Definición de los trabajos a desarrollar en el empleo de sistemas GNSS.
- Definición de los trabajos a desarrollar en el empleo de técnicas de topografía clásica.
- Definición de los tipos de transformación de coordenadas entre CRS diferentes.
- Normalización de los productos a entregar.

Red Básica Topográfica

Se ha establecido una red básica o trigonométrica y una red secundaria o topográfica, formadas por bases topográficas distribuidas por todo el Conjunto Monumental. El establecimiento de la red se ha efectuado siguiendo las especificaciones del Protocolo de Actuación Topográfica.

Se han empleado sistemas GNSS, concretamente GPS, para la obtención de coordenadas de cada una de las bases a cielo abierto, mientras que para las localizadas en el interior de inmuebles se aplicaron métodos clásicos. Estas observaciones han sido complementadas con una radiación topográfica de todas las bases, mediante itinerarios cerrados por topografía clásica empleando el método de Moinot.

La altitud de la red se ha establecido a partir de dos bases de la red de nivelación de alta precisión, trasladándose a la totalidad de bases por medio de nivelación geométrica doble cerrada.

3. Toma de datos

Vuelo Fotogramétrico

Se ha planificado un proyecto de vuelo con un GSD entorno a 5 cm/píxel. La compleja orografía del territorio Alhambra y la exigencia de una elevada resolución han determinado una cuidadosa planificación del vuelo y la selección de una aeronave que permitiese abordar los requisitos del vuelo con los necesarios márgenes de seguridad. Se ha empleado el avión Partenavia P68TC Observer, propiedad del grupo empresarial de TCA Geomática, y que presenta grandes ventajas por su versatilidad, tamaño y baja velocidad.

Posteriormente se ha realizado un segundo vuelo, circunscrito a la zona monumental, con una cámara matricial Ultra Cam XP-WA, con la idea de comparar los resultados con las imágenes realizadas por la cámara de barrido.

Una vez analizados ambos vuelos, se ha empleado el primero para la realización de las ortoimágenes, ya que ofrece mejores resultados para la ortorrectificación, y para la restitución en las zonas rústicas. El segundo vuelo se ha empleado para la restitución fotogramétrica de la zona urbana y monumental de la Alhambra y el Generalife, por disponer de un GSD menor resolución y una menor sombra arrojada.

Vuelo Lidar

Como complemento a las labores de la fotogrametría, ha sido realizado un tercer vuelo con sensor LiDAR (Light Detection and Ranging), con el objetivo de producir un modelo digital de elevaciones del territorio de la Alhambra.

El LiDAR consiste en un sensor aerotransportado con un láser que emite pulsos que se emplean para determinar el tiempo que tardan en rebotar en el suelo y regresar al sensor. Al estar integrado con sistemas de navegación GNSS y sistema inercial INS, permite medir la posición y altitud del sensor y la distancia al suelo.

La densidad de rayos emitidos permite incluso que en zonas de cubierta boscosa se puedan obtener datos de la altimetría real del suelo subyacente así como de la cubierta vegetal. Así en la figura 1 se aprecia como el perfil muestra las copas de los árboles, los

puntos correspondientes a la vegetación arbustiva y el nivel de cota del terreno.

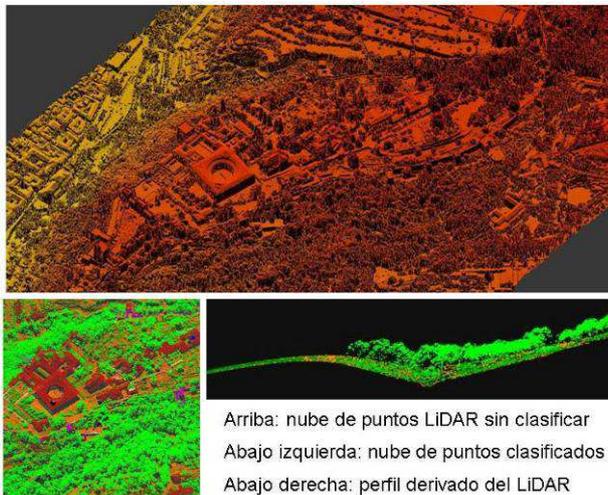


Figura 1: Datos LiDAR de la Alhambra

Como resultado del estudio se han registrado una media de 5 puntos altimétricos por m², generando un modelo digital de superficies y elevaciones que constituye el mejor conjunto de datos de este tipo del conjunto monumental.

Láser Escáner.

Para la documentación y registro de los inmuebles que conforman el recinto alhambrense se ha empleado el láser escáner. El objetivo ha sido el de obtener una buena precisión de los elementos que no son visibles en el vuelo fotogramétrico y que necesitan del mismo grado de definición que el resto; es el caso de las fachadas y aleros de los edificios del conjunto y determinadas zonas arqueológicas.

El láser escáner garantiza una serie de ventajas que lo hacen idóneo en la documentación de edificios patrimoniales como la rapidez de la toma de datos, intervención indirecta en el objeto, posibilidad de representación de elementos a distinto nivel (suelo y cubiertas), obtención de gran cantidad de datos de forma objetiva, lo que facilita el trabajo en gabinete, y el poder generar una réplica virtual tridimensional de enormes posibilidades para el conocimiento, difusión y gestión de los elementos patrimoniales.

El escáner utilizado, propiedad de TCA Geomática, corresponde al modelo Leica ScanStation C10.

4. Captura de la información

La complejidad que presenta el Conjunto Monumental de la Alhambra y Generalife en cuanto a su extensión, orografía, extensas zonas arboladas y boscosas y sobre todo la calidad y riqueza de su arquitectura, ha obligado a emplear varias técnicas de captura de información, en parte redundantes entre sí y a la vez complementarias.

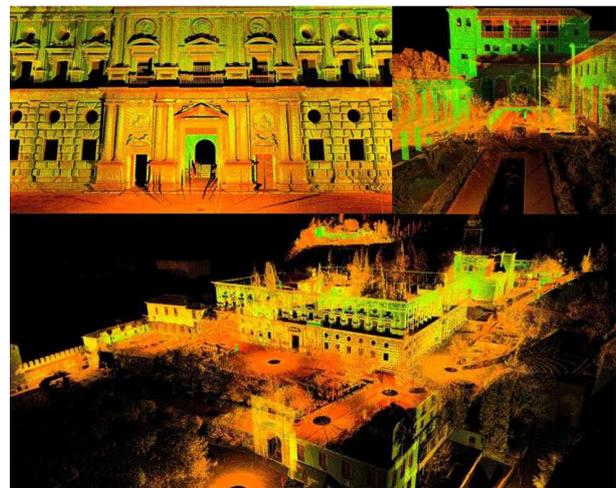


Figura 2: nubes de puntos obtenidos con láser escáner, se observa el nivel de detalle alcanzado

Las disciplinas utilizadas de forma integrada han sido la restitución fotogramétrica, la restitución desde los datos LiDAR, la restitución desde los datos de láser escáner y la topografía clásica.

De una manera generalizada la tecnología más utilizada en todo el proyecto ha sido la fotogrametría aérea, a la que se le ha añadido la utilización del resto de disciplinas, en especial el láser escáner para la representación de los edificios en el recinto amurallado, donde los niveles de precisión y la abigarrada trama urbana complicaban el uso exclusivo de la fotogrametría.

Los datos recogidos por el sensor LiDAR y el Láser Escáner han sido combinados en una única base de datos y clasificados en una única base de datos. Partiendo de ésta, se ha procedido a capturar desde la nube de puntos generada, los elementos que normalmente son añadidos a la minuta de restitución para la revisión de campo.

Básicamente los elementos capturados por este sistema han sido los siguientes: línea de fachada, línea de cornisa y vuelo de tejados, estructura de las cubiertas, estructura principal del pavimento, vegetación (troncos y setos), curvas de nivel, puntos de cota en todos los diferentes niveles de los elementos edificados, elementos de infraestructura hidráulica, electricidad, mobiliario urbano, etc.

5. Modelo de datos

Modelo de datos de Producción

El modelo de datos que TCA ha utilizado para la producción cartográfica GIS de la Alhambra, consiste en un modelo 3D, definido por elementos como el empleo de línea única, con generación de superficies, orientado a objetos, con criterios específicos de captura, controles de calidad en el proceso de producción, exportación directa a SIG y coherencia entre escalas.

El modelo de datos incluye varios elementos como el Catálogo de entidades cartográficas, el Modelo de producción y el Control de calidad.

El **catálogo de entidades cartográficas** recoge los contenidos de la información, el modo de adquisición, la codificación y la estructura gráfica y de asignación.



Figura 3: cartografía de línea única (abajo izqda.), y superficies (arriba) en 3D (abajo dcha.)

El contenido de dicho catálogo es fruto de un análisis en profundidad e intenta recoger toda la casuística que se presenta en este Conjunto Monumental. Se trata de un componente fundamental, por cuanto las necesidades de articulación de entidades en un ámbito de la relevancia patrimonial de la Alhambra exceden ampliamente los requisitos habituales en la producción de cartografía básica a escalas urbanas.

El **modelo de producción** detalla los criterios de restitución y edición para cada uno de los objetos cartográficos definidos en el catálogo.

El **control de calidad** pretende asegurar la integridad de la información generada, mediante una validación de los datos recogidos, tanto en la fase de captura de la información geográfica, como en la fase de revisión de campo y edición final.

Modelo de datos de explotación

El ciclo de vida de la cartografía en la Alhambra no finaliza con su aceptación y validación. Al contrario, la explotación de la misma en el PAG requiere la implantación de unos protocolos y de un modelo de datos adaptado a la praxis habitual de trabajo en la organización.

La elaboración del modelo de datos de explotación constituye así un reto técnico en un doble sentido, tanto porque un objetivo es el de diseñar un modelo de datos multiescala, como porque debe ser válido para su explotación en GIS y en CAD.

La justificación para este doble objetivo viene dada por las particularidades de la Alhambra. Hablamos de un conjunto monumental integrado por elementos patrimoniales de una inmensa relevancia (declarados Patrimonio Mundial por la UNESCO), que deben ser documentados planimétricamente con un nivel de detalle y precisión muy elevados, y al mismo tiempo hablamos de un extenso territorio, que se extiende unas 11 km² que demanda un nivel de representación cartográfica equiparable a las escalas urbanas.

Por otro lado, la Alhambra no deja de ser un elemento vivo y dinámico en el que junto a los bienes patrimoniales conviven elementos de infraestructura urbana como en cualquier ciudad y en el que se desarrollan y planifican de manera continua programas de conservación y mantenimiento, de restauración o intervención arquitectónica. La praxis habitual de trabajos que se desarrollan por el PAG y sus agentes colaboradores incluye la realización de planimetrías y proyectos en CAD.

Esta realidad hace que el formato CAD deba convivir con el GIS, a la vez que se entiende que la información debe ser única y unívoca.

Se ha realizado por tanto un esfuerzo notable para establecer un modelo de datos jerárquico y multiescala, válido en CAD y en GIS, que permite combinar los elementos estándares en cartografía básica con aquellos específicos derivados del carácter patrimonial de la Alhambra.

El modelo de datos permite trabajar de forma multiescala, con niveles de codificación jerárquicos referidos a niveles de detalle y precisión crecientes, válidos para levantamientos planimétricos detallados y para cartografías más generales. Se ha optado por un sistema de codificación de capas abierto, que sigue el modelo jerárquico en tres niveles de la cartografía catastral, adaptado a las necesidades de representación y codificación de las entidades existentes en la Alhambra.

Se trata de un sistema versátil que puede desarrollarse para una mayor definición de las entidades, admitiendo las ampliaciones a que puede ser sometido el sistema para dar cabida a los grandes saltos entre la escala cartográfica y la planimétrica de detalle.

Finalmente, se ha definido el protocolo para el mantenimiento de la información cartográfica y planimétrica en el que las bases de datos geográficas GIS constituyen el elemento nuclear, establecidas como repositorio de información y publicadas como documentación cartográfica a través de SIALH. Estas bases de datos geográficas tienen un versionado en CAD, empleado para su uso técnico especializado en redacción de proyectos de actuación e intervención.

La actualización de la cartografía se llevará a cabo respetando las especificaciones técnicas contenidas en el Protocolo de Actuación Topográfica.

Todas las actuaciones que tengan lugar en el Conjunto Monumental y supongan una modificación de la planimetría existente, deberán quedar reflejadas en la base cartográfica y planimétrica, siguiendo un proceso circular articulado en tres fases.

La primera corresponde a la Cartografía Base, que reproduce el estado actual de la Alhambra en el momento previo a la actuación y sirve como base para la redacción del proyecto.

La segunda es la Planimetría de Proyecto, que define el proyecto de actuación y las modificaciones planimétricas previstas, tratándose de una fase intermedia.

La tercera fase corresponde al Estado final de las Obras que alimentará el sistema, integrándose los nuevos elementos y modificaciones en la cartografía general, con lo que volverá a ser planimetría base para las siguientes actuaciones, cerrando así el ciclo.

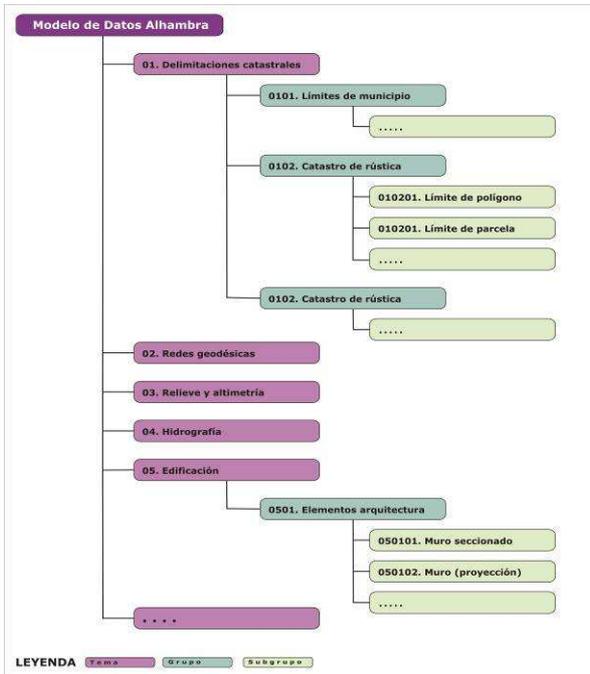


Figura 4: Modelo jerárquico de datos para la cartografía y planimetría en la Alhambra

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Patronato de la Alhambra y el Generalife, en especial a su Directora General, D^a. María del Mar Villafranca y a D. Francisco Lamolda, Jefe del Servicio de Conservación y Protección.

Bibliografía

CRUTCHLEY, S. (2009). “Using LiDAR in Archaeological Contexts: The English Heritage Experience and Lessons Learned”, in *Laser Scanning for the Environmental Sciences* (eds G. L. Heritage and A. R. G. Large), Wiley-Blackwell, Oxford, UK.

LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M. y VILLAYERDE, V. (2010) “Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study” *Journal of Archaeological Science*, Volume 37, Issue 3, pp. 499–507.

REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España Sistema Geodésico Oficial de España. BOE número 207 de 29/8/2007, páginas 35986 a 35989.

REMONDINO, F., GIRARDI, S., RIZZI, A. y GONZO, L. (2009) “3D modeling of complex and detailed cultural heritage using multi-resolution data”, *Journal on Computing and Cultural Heritage*, Volume 2, Issue 1, pp. 1-20

REMONDINO, F. y RIZZI, A. (2010) “Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples.” *Applied Geomatics* Volume 2, Number 3, pp. 85-100