

La fotogrametría y la ortofoto: técnica y aplicación práctica al proyecto de investigación e intervención del retablo mayor de la Capilla Real de Granada

Guillermo Tabares Esteban
Ingeniero Técnico en Topografía
Director del Proyecto de Consulting
Topográfico S.L.

Cesar Fernández de Gamboa Céspedes
Técnico en Fotogrametría.
Director del departamento de
Fotogrametría de Mapline S.A.

Ernesto Ballesteros García-Asenjo
Ingeniero Técnico en Topografía
Director del departamento de
Ortofotografía digital de Mapline S.A.

Introducción

El Retablo Mayor también denominado del los Santos Juanes se ubica el Presbiterio de la Capilla Real de Granada. Se trata de una obra Renacentista (1520-22) atribuida a Felipe Vigarny y a Alonso Berruete entre otros autores. A nivel técnico y material la estructura y arquitectura de este retablo está realizada en madera y su decoración, al igual que la de las esculturas, grupos escultóricos y relieves que se alojan en sus hornacinas y encasamentos, está realizada con diversas técnicas policromas, entre las que destacan las carnaciones realizadas al temple y al óleo, y las vestiduras y fondos, dorados con diversas técnicas: dorado bruñido, coladuras y brocado aplicado.

En este artículo pretendemos exponer tanto la metodología de trabajo realizada para atender el encargo que el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico ha formulado a nuestra empresa, como exponer la técnica de realización de la fotogrametría y de la ortofoto aplicada al conocimiento, documentación e intervención del Patrimonio Cultural.

Trabajos previos y documentación

En el caso del Retablo Mayor de la Capilla Real de Granada, la recopilación y preparación previa de do-

cumentación es muy importante y decisiva a la hora de realizar posteriormente el trabajo. Dado el poco tiempo del que se disponía para ello (desde las 5 h de la tarde hasta la mañana siguiente) sin interferir en los actos religiosos, hay que tener todo organizado y prever cualquier complicación.

Se parte de un plano de planta a escala 1/200 de la Capilla. En él observamos que la distancia máxima a la que se pueden estacionar las cámaras es de 14 metros debido a la situación del Sepulcro de los Reyes Católicos y que existen unas escaleras de acceso al altar con un desnivel cercano a los 2 metros.

Por otro lado las dimensiones del retablo son de 13 m. de altura y 9,50 m. de ancho.

En función de estos factores se deciden los siguientes puntos:

- Elección de una cámara métrica UMK.
- Utilizar un objetivo súper gran angular de 65 mm que nos permita hacer un único par fotogramétrico.
- El tipo de película elegida es una emulsión lenta que da mayor calidad y definición con dos sensibilidades: luz día y tungsteno.
- Elegir película color, dada la policromía del retablo.
- El montaje de un andamio de al menos 8 metros que nos permita una proyección frontal.
- La posible iluminación del retablo con cuatro focos de 1000 vatios, dado el desconocimiento de la iluminación del Retablo a la hora de la toma.

El otro dato fundamental a la hora de realizar el anteproyecto es la precisión requerida en el levantamiento.

Esta precisión viene determinada por la escala final (1/20) a la que vamos a obtener la restitución.

Toma de fotografías

Una vez en la Capilla Real se confirma la idea de instalar un andamio. Éste se monta paralelo al retablo y junto a la barandilla de bajada al Sepulcro de los Reyes Católicos, con una altura de ocho metros, lo que nos asegura una proyección más frontal del Retablo.

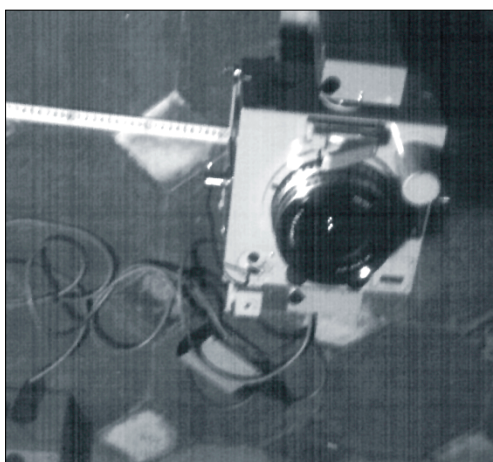


Foto 1. Cámara métrica UMK



Foto 2.
Negativo de 13 x 18 cm.
Corresponde a la cámara UMK. Se observan las marcas fiduciales.

Foto 3.
Negativo de 6 x 6 cm.
Correspondiente a la cámara semimétrica Rollei



El proceso de la toma de fotografías, aunque es el más convencional de las partes del trabajo, es quizá el más importante ya que va a determinar la calidad y precisión final de los planos y de la ortofoto.

Para dicho proceso se utiliza una cámara métrica que, por definición, es aquella que nos permite reconstruir perfectamente las condiciones de la toma y conocer las distorsiones radial y tangencial (véase foto nº 1). Para ello en los negativos se impresionan cuatro marcas fiduciales en el centro de cada uno de los lados. Las distancias entre estas marcas fiduciales las conocemos exactamente por la carta de calibración (Véase foto nº 2).

En fotogrametría terrestre las relaciones fundamentales en el registro de objeto son:

1. La existente entre la distancia al objeto y la base de la toma fotográfica.
2. La que debe haber entre la escala de la fotografía y la escala de dibujo del objeto.

Según esto a mayor distancia, la escala de la foto es menor. Por otra parte cuanto mayor es la distancia entre el objeto y la cámara, las ocultaciones debidas a diferentes planos es menor.

La base de la toma fotográfica es la distancia que hay entre las dos posiciones de la cámara para formar el par estereoscópico. Es importante reseñar que en fotogrametría terrestre no se tiene en cuenta el recubrimiento entre la fotos (suele ser del 100%) sino el posado en Z.

Para obtener un relieve idóneo se recomienda que la distancia de la base sea entre 1/5 y 1/10 de la distancia entre objeto y cámara.

En este trabajo, dada la distancia al retablo desde el andamio, se utiliza una distancia entre cámaras de 2,10 metros.

Las fotos están realizadas desde la parte superior del andamio, al no haber luz suficiente, se utilizan dos focos de 1000 vatios cada uno. Para mayor seguridad se utilizan los dos tipos de películas antes mencionadas y con distintos tiempos de exposición.

A cada lado del retablo en su parte inferior, están las estatuas de los Reyes Católicos. Para completar la fase de toma fotográfica se toman placas auxiliares de cada uno de ellos con una cámara semimétrica (Véase foto nº 3).

Una vez terminada la toma de fotos se procede al apoyo topográfico del retablo.

Como apoyo topográfico nos referimos al conjunto de operaciones necesarias para, en un sistema arbitrario de referencia, obtener coordenadas X, Y, Z de una serie de puntos del retablo, perfectamente identificables en las fotos.

En otros trabajos, donde el tiempo de acceso sea más amplio, es recomendable primero revelar las fotos para elegir con total seguridad los puntos identificables.

Para la elección de estos "puntos identificativos" debemos elegir puntos situados en los extremos del objeto y a diferentes alturas, en este retablo que posee distintos planos y profundidades, tendremos que elegir puntos en todos los planos y profundidades.

Se puede observar que los puntos elegidos son simétricos, respecto a un eje vertical, esto es debido a dos razones; una de fácil localización por parte del operador de fotogrametría y otra para la comprobación ante diferentes planos de desplome o paralelismo.

El número de puntos de apoyo es variable. En fotogrametría el mínimo de puntos es de 5. En este trabajo se dieron 25 puntos de apoyo dados los diferentes planos y profundidades. De cada uno de estos puntos, se ha realizado una reseña para su localización. (Véase gráfico nº 1).

Para dar coordenadas a los puntos elegidos se utiliza el método de bisección. Este consiste en: desde dos puntos en que se estaciona en cada uno de ellos un taquímetro, observar el mismo punto del retablo. El triángulo que forman los dos puntos de estación de los aparatos y el punto del retablo, deben formar un triángulo lo más parecido posible a un equilátero, y en cualquier caso, ninguno de sus ángulos debe ser menor de 30°.

Para este trabajo se han utilizado dos taquímetros WILD T-2 de un segundo de apreciación en la medida de ángulos.

Todas las observaciones realizadas se procesan con el programa topográfico TOPCAL obteniéndose una precisión en la determinación de las coordenadas de 1 mm.

Fotogrametría digital

La Fotografía, como técnica aplicada al estudio de objetos, es una herramienta comprobada y aceptada en multitud de disciplinas. La Fotogrametría nació, con carácter de ciencia independiente, abarcando el conjunto de técnicas y métodos para lograr la construcción de planos partiendo de series de fotografías aéreas o terrestres. Una fotografía es la proyección cónica del objeto fotografiado, mientras que el plano es una proyección ortogonal, y así, la Fotogrametría, viene a ser la operación inversa a la Perspectiva; tiene esta por finalidad hallar la proyección cónica de un objeto del que se conoce su planta y alzado, mientras que en Fotogrametría hemos de deducir la planta y alzado por medidas realizadas en los fotogramas.

Las operaciones necesarias para llevar a efecto esta transformación del sistema proyectivo, de cónico a

acotado, reciben el nombre de restitución, denominándose **restituir** a dibujar el plano del objeto fotografiado.

El fundamento geométrico de la Fotogrametría se estableció aun antes de que Daguerre descubriese la fotografía en 1839; ya en 1759, Lambert estableció los fundamentos para resolver el problema inverso de la Perspectiva, y Gay Lussac y Arago, en un informe al Gobierno francés, con motivo del invento de la fotografía, llamaron la atención sobre la posibilidad de reproducir los objetos fotografiados. El verdadero fundador de la Fotogrametría fue el coronel francés Laussedat, quien a partir del año 1852 consiguió obtener planos exactos de edificios por medio de fotografías. Sin embargo, la Fotogrametría no fue práctica hasta 1901, en que Pulfrich aplicó el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas mediante un aparato de su invención, el *estereo-comparador*.

Gráfico 1. Reseña de punto de apoyo

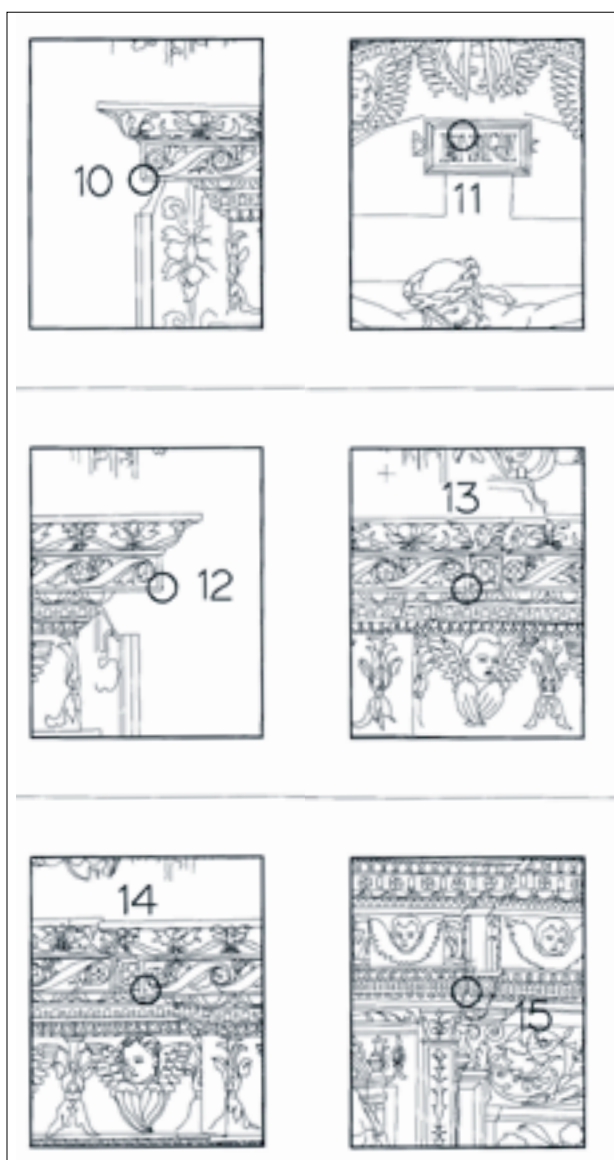




Foto 4. Restituidor analógico

Foto 5. Restituidor analítico

Foto 6. Restituidor digital



Las primeras aplicaciones de la Fotogrametría fueron precisamente en la restitución de fachadas de edificios y monumentos. Posteriormente se quiso aplicar a la superficie terrestre, pero había un problema, la cámara tenía que ser móvil, una vez resuelto éste, su montaje en aviones para fotografiar la superficie terrestre permitió realizar su cartografía.

La utilidad de la Fotogrametría aérea en la confección de cartografía de la superficie terrestre a distintas escalas es conocida y aplicada desde entonces, siendo hoy en día esencial su utilización.

La evolución de los restituidores y las técnicas fotogramétricas nos permiten hoy su aplicación en cartografía de cualquier tipo, tanto es así, que refiriéndonos a la materia que nos ocupa, la UNESCO y el Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (C.I.P.A.), recomienda adoptar métodos fotogramétricos que nos permitan disponer de un inventario métrico de los monumentos que forman el Patrimonio Cultural, con el fin de que sea posible su restauración y reproducción en caso de deterioro o destrucción, además de ayudarnos a su estudio y conservación.

La aparición de los **restituidores** va ligada a la de las Técnica Fotogramétricas. Estos han evolucionado desde que en 1908, Von Orel construyese el primero, solo aplicable a la restitución de fachadas.

Podemos distinguir tres fases en su evolución: Restituidores analógicos, analíticos y digitales. En los primeros, la solución del problema se realiza mediante una reconstrucción física a escala de la posición de los fotogramas en el momento de la toma, con ayuda de barras metálicas y elementos óptico-mecánicos. Estos restituidores analógicos, todavía hoy en uso, son aparatos de gran tamaño y peso por su complejidad constructiva, problema que fue solo parcialmente solucionado con la aparición de los restituidores analíticos gracias a la aplicación de la informática en la solución matemática del problema de la proyección. La utilización de restituidores analíticos y analógicos son de uso restringido a técnicos operadores de Fotogrametría, y la complejidad en su configuración óptico-mecánica obliga a una calibración y mantenimiento periódicos. En su utilización diaria, requieren de un proceso de ajuste interno y externo, y de una pericia y entrenamiento para la visualización estereoscópica y su manejo. (Véase fotos nº 4 y 5)

La nueva tecnología digital, aplicada en los **restituidores digitales**, supone un cambio radical que plantea la discusión de si se trata de una evolución o una revolución. Los restituidores digitales están compuestos por un ordenador de última generación con un software adecuado, lo cual conlleva la desaparición de los elementos ópticos y mecánicos, eliminando la necesidad de mantenimiento y calibración, y reduciéndose su coste sustancialmente. Esto posibilita su explotación en cualquiera de las disciplinas que nos ocupan: restauración, diagnóstico y conservación de monumentos, etc. (Véase foto nº 6).

La visualización estereoscópica tridimensional del objeto de estudio se produce sobre la pantalla del ordenador sin ningún tipo de esfuerzo, con la ayuda de unas gafas polarizadas muy ligeras y que ofrecen una excelente calidad de imagen gracias a su uso con los más modernos monitores de alta resolución. El manejo del restituidor digital se efectúa mediante ratones y otros periféricos de uso común en ordenadores, lo cual simplifica y extiende su uso.

Las ventajas que ofrece la migración a plataformas digitales son ilimitadas. La posibilidad de disponer en formato digital de las imágenes de los monumentos a tratar, conlleva su cómoda visualización en tres dimensiones de todos los detalles a cualquier nivel de zoom, y permite un análisis espacial que amplía las aplicaciones de este tipo de herramientas más allá de la simple restitución fotogramétrica.

Las posibilidades son enormes y aplicables a múltiples campos (Véase gráfico nº2):

- Medición en tres dimensiones de distancias y superficies sobre el objeto de estudio.
- Análisis espaciales complejos.
- Clasificación digital de imágenes según criterios cromáticos, constructivos, etc.
- Documentación e inventario métrico y cualitativo informatizado.
- Organización de la información en bases de datos vinculadas a las imágenes.
- Confección de modelos tridimensionales digitales.

Todo este nuevo mundo de posibilidades nos permite disponer de un inventario informático de los monumentos que forman el Patrimonio Cultural, y nos ayuda en su restauración y reproducción en caso de deterioro o destrucción, además de ayudarnos a su estudio y conservación.

Map-Line, S.A., empresa con experiencia en la producción cartográfica y la restitución, tanto terrestre como aérea, ha desarrollado y comercializa la **Estación de Fotogrametría digital ANALYZER RD-2001**, que ha demostrado ser una herramienta muy útil en el campo de la restitución digital, análisis y diagnóstico de fachadas, monumentos, retablos, etc.

Digitalización de imágenes

Los sensores óptico-electrónicos almacenan la información en forma de matriz bidimensional de elementos contiguos denominados celdillas o píxeles (píxel es la contracción de la expresión anglosajona picture element). La imagen completa se genera mediante el barrido de la superficie del sensor; correspondiendo cada píxel al campo de visión instantáneo del sistema.

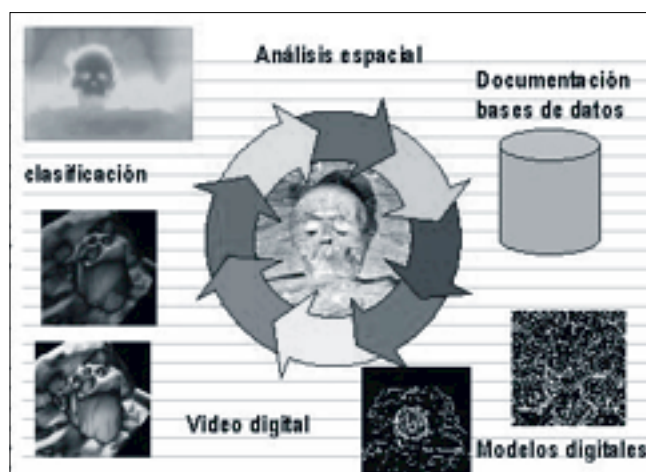
La capacidad de estos sensores para discriminar niveles o intensidades de estos valores es lo que denominamos resolución radiométrica, en definitiva viene determinada por el número de niveles de color que pueden obtenerse con el sensor. Al conjunto de estos

píxeles más alguna otra información como el número de colores empleados y los datos del número de filas y columnas en un soporte generalmente del tipo magnético, es lo que denominamos imagen digital.

Dado que en la actualidad el uso de cámaras digitales es muy limitado, nos centraremos en la conversión de la fotografía convencional a un sistema de registros electrónicos, denominados normalmente como escáneres.

Siendo el objetivo final la realización cartográfica del objeto fotografiado, deberemos tener en cuenta los parámetros que definen el nivel de precisión del proyecto, siendo estos, por un lado el tipo de película utilizada, el tipo de objetivo, la distancia, ángulo y luminosidad de observación del objeto y por otro la métrica y la semántica del mismo, es decir la escala necesaria para el desarrollo de la cartografía y la capacidad de discernir diferentes tonalidades ó niveles de color. En el primer caso viene determinado por los datos de campo en el otro de las capacidades de los escáneres utilizados.

Gráfico 2. Posibilidades de las estaciones digitales



La unidad más pequeña de información geométrica es el propio píxel, su dimensión por tanto estará determinada por la propia percepción visual (0,04 mm cuadrados) y por la capacidad de presentación del sistema utilizado.

En la práctica actual los valores medios de estos píxeles son de 14 micras en resolución geométrica y de 256 niveles digitales en resolución radiométrica (en el caso de fotografías en color tenemos que tener en cuenta su descomposición en tres canales Rojo, Verde y Azul "RGB" y que a su vez tienen una resolución radiométrica de 256 niveles cada uno).

Dados estos mínimos parámetros de partida, los escáneres deben de cumplir unos requisitos mínimos para su uso en cartografía. Estos implican la capacidad de disponer de un rango de funciones para su calibración tanto geométrica como radiométrica y de unas propiedades físicas que permitan mantener unos valores de fiabilidad adecuados. Como base una alta repetibili-

Gráfico 4. Marcas fiduciales

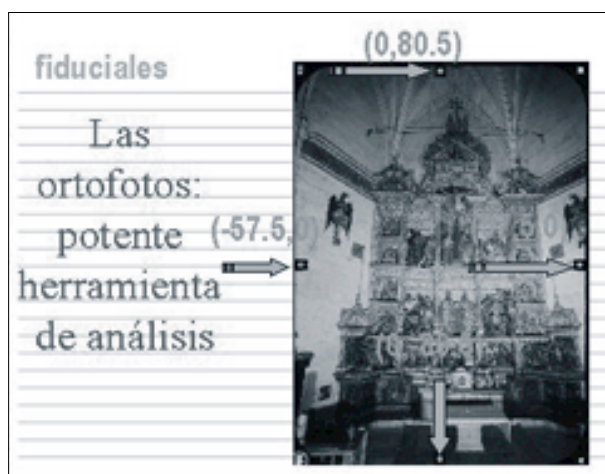
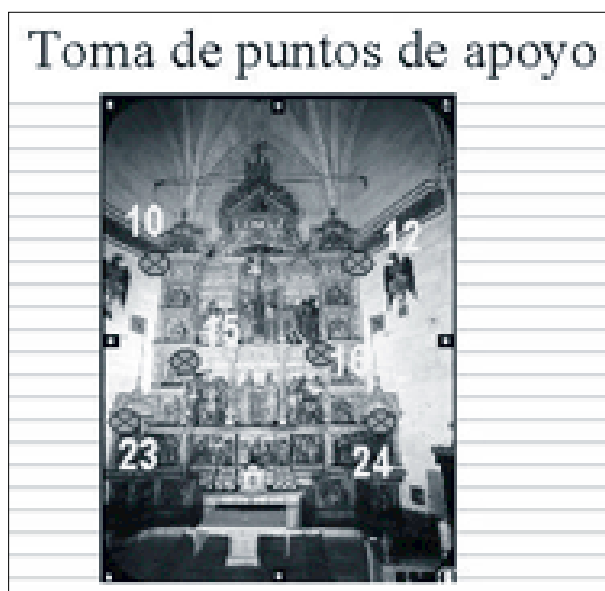


Gráfico 5. Distribución de puntos de apoyo



dad y un bajo error accidental. El modelo de error es determinado a partir de modelos matemáticos y van incluidos todos los errores sistemáticos del sistema (distorsión de lentes, movimientos no lineales de la plataforma de escaneo y detección de errores de montaje). En cuanto a su precisión radiométrica, igualmente debe de disponer de una calibración especial (normalmente el rango dinámico suele ser de 1024 niveles, que son posteriormente reducidos a los comentados 256). Precisiones geométricas entre un rango de 1 y 4 micras son los que determinan que dichos escáneres sean considerados fotogramétricos y por tanto utilizables en proyectos cartográficos.

Restitución

El proceso de restitución consta de tres fases: ajuste de interna, orientación relativa y orientación absoluta. El proceso de ajuste de interna en un restituidor tanto digital como analógico, consiste en la interpretación de las marcas fiduciales situadas en los extremos de la fo-

to, éstas tienen forma de cruz y sus coordenadas suelen expresarse en mm. El fin del ajuste consiste en tener referencia de las coordenadas foto en pixel a coordenadas mm. La bondad de este cálculo es realizado por el ordenador.

El de **ajuste de relativa** consiste en la interpretación de puntos comunes en la foto, lógicamente deben de estar bien distribuidos en lo que llamamos recubrimiento de las imágenes (zona común). Esta acción le permite al sistema poder representar correctamente la visualización tridimensional de una manera correcta, incluyendo su parte matemática. En este momento la medición de coordenadas están en coordenadas xyz y el sistema está expresado en mm.

El **ajuste de absoluta** consiste en la interpretación en el restituidor de los puntos de apoyo tomados en el objeto. Al disponer de coordenadas terreno de estos puntos, obtenidas del apoyo de campo, se consigue en esta fase pasar del sistema de referencia relativo (en mm), a coordenadas del mundo real (coordenadas terreno). En este estado y una vez que se han eliminado los errores que pudieran haberse generado se puede realizar la restitución del modelo visual.

La metodología a seguir en el caso de restitución terrestre (retablos, fachadas, etc.) consiste en la determinación de las formas de interés del proyecto en cuestión, siendo señalado éste a través de un cursor, que conectado a un sistema de dibujo asistido por ordenador (AutoCad, MicroStation, Digi, etc.) nos permite obtener su representación gráfica en la pantalla y así tratar el dibujo para conseguir el resultado final.

Los procesos indicados anteriormente se realizan actualmente de una manera simple y precisa al tener como base de cálculo un ordenador, realizando esté de una manera automática varias fases de las comentadas anteriormente.

La ortofoto digital

La ortofoto digital es un producto resultado de procesar informáticamente una fotografía de tal forma que se consigue transformar su proyección cónica, con diferencias de escala, obteniendo una imagen ortogonal, de escala uniforme y por tanto sobre la que podemos realizar medidas y análisis diversos, tanto en formato digital en el ordenador (disponiendo por tanto de coordenadas x, y, z del objeto en el sistema de referencia que se desee, zoom y demás herramientas informáticas de análisis), como mediante salidas impresas a distintas escalas.

Para su realización se deben disponer de los siguientes datos:

- Focal de la cámara métrica con la que se realizó la toma.
- Coordenadas de las marcas fiduciales de la cámara.
- Coordenadas de un mínimo de puntos identificables en el monumento (puntos de apoyo).

Con estos datos introducidos en la estación de Fotogrametría y los fotogramas escaneados, se realiza un modelo digital del objeto y se procede al cálculo de la ortoproyección.

En primer lugar se procede a colocar las marcas fiduciales sobre las fotos escaneadas de igual manera que se realiza para el ajuste interno en el proceso de restitución, anteriormente comentado. Si el objeto de estudio ha sido previamente restituído digitalmente en la propia estación de Fotogrametría, este proceso no es necesario repetirlo, siendo aprovechables los resultados del ajuste de interna del proceso de orientación previo a la restitución (Véase gráfico n° 4).

A continuación se marcan en el fotograma, con ayuda de los croquis, los puntos de control tomados en el monumento, de igual forma que se realiza la orientación absoluta en restitución, siendo por tanto también aprovechables estos datos si la restitución se realizó en la propia estación (Véase gráfico n° 5).

Con el resultado de la restitución se conforma un modelo digital del objeto de estudio. El proceso es el siguiente:

- Se calcula una trilateración (modelo TIN). Este modelo es una representación tridimensional formado por triángulos que abarcan la totalidad del objeto de estudio en sus tres dimensiones (Véase gráfico n° 6).

El modelo de triángulos se transforma a un modelo GRID en formato BMP para la edición de posibles errores y el control de calidad. Este modelo es una imagen que representa en colores los distintos planos de profundidad del objeto, según una gama de colores que van de los fríos a los cálidos. Esta imagen es muy intuitiva y fácilmente interpretable, por lo que analizándola se detectan los posibles errores que se hayan podido producir en la restitución y que se hayan transmitido al modelo digital (Véase gráfico n° 7).

Una vez comprobada la bondad del modelo tridimensional, dato fundamental para el cálculo informático de la ortoproyección, se realiza la transformación deformando matemáticamente la fotografía con el modelo digital del terreno (Véase gráfico n° 8).

Estos tres procesos, se realizan de forma interactiva en la Estación de Fotogrametría digital ANALYZER RD-2001, mediante los programas especialmente confeccionados para estas labores en entorno Windows. El resultado del proceso es una imagen digital ortorectificada y métrica, en la que es posible el análisis espacial en todos sus sentidos: mediciones lineales en tres dimensiones, mediciones superficiales, clasificación de imágenes, etc. (Véase gráfico n° 9 y 10).

Nuevos productos derivados de las técnicas digitales

La disposición de las imágenes y los datos del proyecto en formato digital, abre un mundo de posibilidades de explotación nuevo, hasta ahora ajeno a la Fotogrametría de objeto cercano.

La ortofoto digital, imagen métrica, nos permite además de la medición en tres dimensiones directamente sobre la pantalla del ordenador, el análisis radiométrico de la imagen digital con la finalidad de clasificar los valores radiométricos de los píxeles según unos criterios definidos por el propósito de es-

Gráfico 6. Modelo TIN para la formación del modelo digital

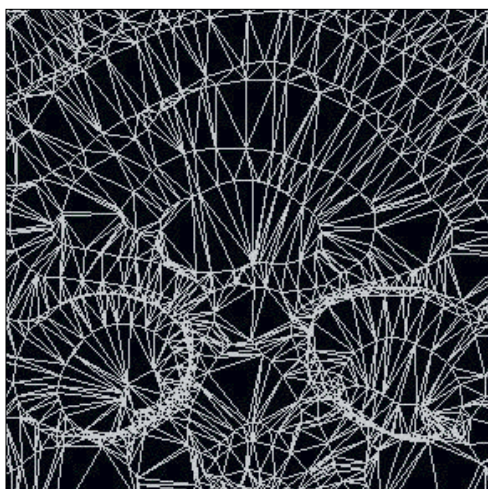


Gráfico 7. Control de calidad del modelo de triángulos mediante color



Gráfico 8. Modelo digital del retablo



Gráfico 9. Posibilidad de realizar medidas reales en la ortofotografía



Gráfico 10. Delimitación y medidas de área en la ortofotografía

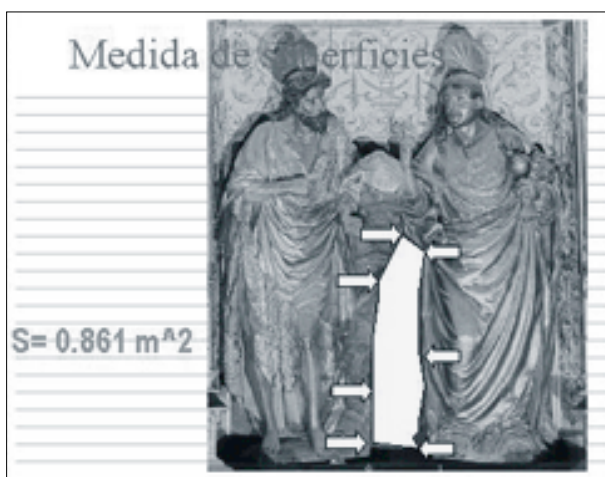
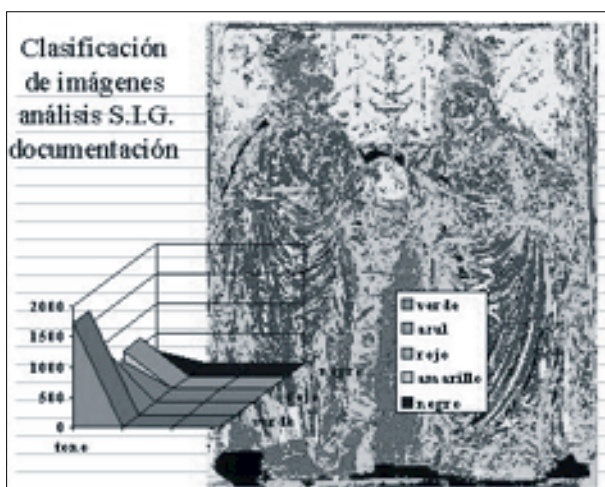


Gráfico 11. Clasificación de imágenes por color



tudio en cada caso. Esta operación nos permite realizar estudios muy diversos, análisis de humedades, cromatismos, opacidades, materiales y estado de los mismos, etc. El analista confecciona una tabla de clasificación, en la cual asigna a cada rango de valores de pixel que reflejan un dato diferenciado en el propósito del estudio, un color representativo. Con esta tabla y la imagen original, se genera automáticamente una nueva imagen que representa en los colores indicados en la tabla, la disposición geométrica sobre el objeto de los distintos valores relativos al estudio que se está realizando. (Véase gráfico nº 11).

Estas imágenes, además de ser impresas, pueden ser tratadas fácilmente en combinación con bases de datos, hojas de cálculo y otros programas específicos, permitiéndonos obtener datos alfanuméricos o estadísticos, muy útiles en la toma de decisiones acerca de los trabajos a realizar sobre el objeto de estudio.

Conclusiones

Como conclusiones finales de lo expuesto en el artículo, podemos destacar:

- Registro total de la realidad y objetividad de la toma de datos.
- Fácil manejo y archivo informatizado tanto de la cartografía confeccionada como de las imágenes ortorrectificadas.
- La toma de datos se realiza sin contacto físico con el objeto de estudio, por lo cual este permanece inalterado en esta fase.
- Gran utilidad de la aplicación de las técnicas de Fotogrametría digital en la restauración, documentación y conservación de monumentos.
- Destacar la ortofoto digital como una potente herramienta de trabajo en los proyectos de conservación y restauración, permitiéndonos de forma sencilla y rápida la medida de distancias y superficies, la clasificación de imágenes según distintos criterios, así como la elaboración de la cartografía temática de apoyo a la documentación y a la intervención (datos técnicos, alteraciones, tratamientos, etc.).