



Reutilización de pares fotogramétricos de elementos arquitectónicos para la obtención de modelos 3D y ortofotografías a partir de técnicas SFM

Re-use of photogrammetric pairs of architectural elements in order to obtain 3D models and orthophotographs by means of SFM techniques

Álvaro Rodríguez Miranda, Pablo Pérez Vidiella, Rosa Martínez Lázaro y José Manuel Valle Melón

Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (LDGP). Grupo de Investigación en Patrimonio Construido,
Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU
e-mail: ldgp@ehu.es

RESUMEN

En el presente artículo se analiza la posibilidad de reutilizar pares fotogramétricos obtenidos originalmente con vistas a su restitución vectorial, con el fin de obtener nuevos productos cartográficos como modelos 3D con textura fotográfica y ortofotografías. Para ello se aplican las técnicas de visión por computador denominadas SFM (*Structure From Motion*, estructura a partir del movimiento). El artículo muestra los resultados de la aplicación en diversos ejemplos de manera que se puede apreciar los factores que condicionan la calidad de los resultados. Finalmente, se incluyen algunas conclusiones respecto a la utilidad de los algoritmos SFM en el ámbito de la Arqueología de la Arquitectura.

Palabras clave: Fotogrametría; Structure From Motion (SFM); Pares estereoscópicos; Modelado 3D; Ortoimagen; Arquitectura; Preservación y reutilización de la información.

ABSTRACT

This paper analyzes the possibility of re-use of photogrammetric stereopairs -originally taken so as to make line drawings (stereoplotting)- and generate 3D models with photographic textures and orthophotographs by means of the techniques called "*structure from motion*" (SFM). The text includes many case studies so it is possible to see the factors defining the quality of the results. Finally, some conclusions are drawn concerning the usefulness of these algorithms for the Building Archaeology.

Keywords: Photogrammetry; Structure From Motion (SFM); Stereoscopic pairs; 3D modelling; Orthoimage; Architecture; Preservation and re-use of information.

Recibido: 20-10-2014. Aceptado: 13-01-2015.

Cómo citar este artículo / Citation

Rodríguez Miranda, A., Pérez Vidiella, P., Martínez Lázaro, R. y Valle Melón, J.M. 2015: "Reutilización de pares fotogramétricos de elementos arquitectónicos para la obtención de modelos 3D y ortofotografías a partir de técnicas SFM", *Arqueología de la Arquitectura*, 11: e024. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arq.arqt.2015.004>

Copyright

© 2015 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la Arqueología de la Arquitectura, la fotogrametría se reveló como una valiosa técnica que permitía documentar las estructuras y paramentos con gran precisión y nivel de detalle, facilitando así la realización de los análisis estratigráficos y su representación. Los avances de la fotogrametría también han ido encontrando su reflejo en la mejora de las posibilidades ofrecidas como soporte a la documentación de edificios arquitectónicos (Lerma, Cabrelles, Segui y Navarro 2011), así por ejemplo, si durante el denominado período analítico de la fotogrametría (que, en nuestro contexto, podemos establecer hasta el año 2000) se resaltaba el interés de los planos con el despiece detallado, los conocidos como «piedra a piedra» (Latorre y Cámara 1993; Azkarate 2002; Cámara y Latorre 2003; Caballero 2004), el cambio de siglo trajo consigo el desarrollo de las técnicas digitales que no sólo facilitaron la obtención de los productos ya consolidados sino que, además, dieron entrada a otros nuevos como las ortoimágenes (Parenti 2002; Santa Cruz 2003; Mileto y Vegas 2003; Almagro 2008; Lodeiro 2011) o los modelos tridimensionales con texturas fotográficas (Álvarez, Lopetegui, Mesanza, Rodríguez, Valle y Vicente 2003; Finat, Delgado, Martínez, Fernández, San José y Martínez 2011) (figura 1).

En un nuevo paso dentro de esta evolución constante, las técnicas denominadas de SFM (*Structure From Motion*) permiten la generación de modelos tridimensionales a partir del procesamiento de conjuntos de fotografías, con la particularidad, respecto a las técnicas fotogramétricas tradicionales, de que: no es necesario mantener fija la geometría de la cámara, que los requisitos respecto al número y distribución de los puntos de

apoyo se reducen considerablemente, que existe mayor flexibilidad en lo concerniente a la posición de los puntos de vista y que la intervención del operador durante el procesamiento es mínima (Pereira 2013).

Por esta razón, las técnicas de SFM se han utilizado con éxito para obtener interesantísimos productos a partir de conjuntos heterogéneos de imágenes (por ejemplo, fotografías de turistas tomadas en diferentes épocas con múltiples tipos de cámaras) cuya explotación métrica, hasta bien recientemente, no se consideraba abordable. Quizás uno de los casos que, por su repercusión, marcó un hito en el reaprovechamiento de fotografías convencionales antiguas fuese el modelado de los destruidos Budas de Bamiyan (Grün, Remondino y Zhang 2004), encontrando múltiples aplicaciones más recientes que se valen tanto de fotografías individuales como de fotogramas extraídos de grabaciones de vídeo (Angulo 2013; De Reu, Plets, Verhoeven, De Smedt, Bats, Cherretté, De Maeyer, Deconynck, Herremans, Laloo, Van Meirvenne y De Clercq 2013; Aparicio, Carmona, Fernández y Martín 2014; López-Romero 2014) y que incluso han cristalizado en proyectos que pretenden el aprovechamiento sistemático de las fotografías disponibles en la red (Ioannides, Hadjiprocopi, Doulamis, Doulamis, Protopapadakis, Makantasis, Santos, Fellner, Stork, Ballet, Julien, Weinlinger, Johnson, Klein y Fritsch 2013). A modo de ejemplo, las siguientes figuras muestran dos modelos resultantes de procesar fotografías de turistas obtenidas de la web (figura 2) y de un vídeo (figura 3).

Por otro lado, cabe mencionar que el software para el procesamiento de las imágenes mediante la SFM es muy asequible e incluso existen opciones gratuitas, lo que ha contribuido a su rápida popularización e incorporación al mercado laboral (ver nota al final del texto).

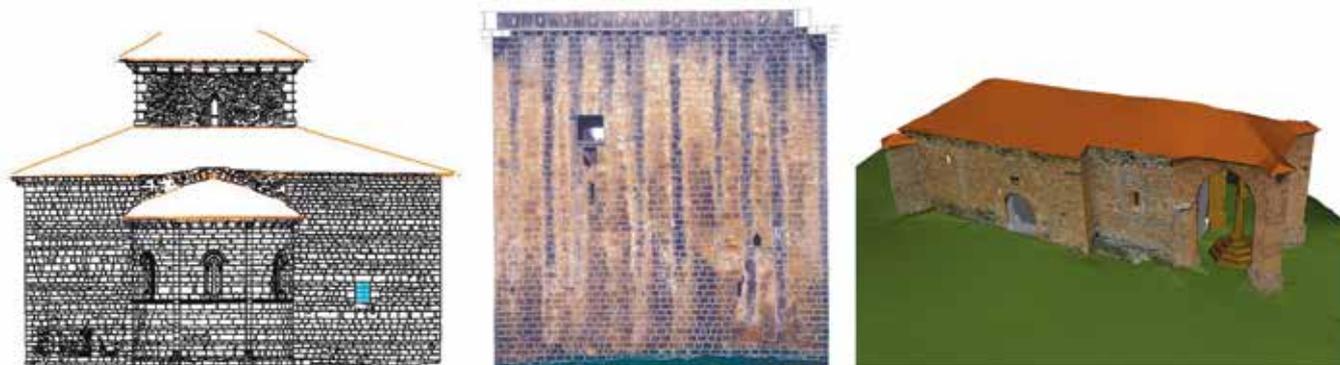


Figura 1.- Ejemplos de los tres tipos de productos fotogramétricos comentados, de izquierda a derecha: despiece vectorial obtenido por restitución estereoscópica (LDGP 2004), rectificación fotográfica (LDGP 2002) y modelo 3D con textura fotográfica (LDGP 2008).



Figura 2.- Modelo 3D de la Piedad de Miguel Ángel, realizado a partir de fotografías de turistas obtenidas de Internet.



Figura 3.- Modelo 3D del menhir de Canto Hito realizado a partir de los fotogramas de un vídeo (Parque Natural de Covalagua, Palencia).

Se da la curiosa circunstancia de que las técnicas de SFM suelen proporcionar mejores resultados empleando fotografías convencionales —que según los criterios tradicionales de la fotogrametría métrica son inadecuadas— que intentando procesar colecciones de pares estereoscópicos obtenidos con cámaras calibradas y conforme a la más estricta doctrina fotogramétrica. Sin embargo, durante décadas se han obtenido —y actualmente se siguen obteniendo— colecciones de pares estereoscópicos de monumentos que sería muy interesante poder reprocesar mediante estas técnicas debido, entre otros, a los siguientes motivos:

- La fotogrametría estereoscópica ha sido una práctica habitual de documentación, por lo que existe un número considerable de monumentos que cuentan con este tipo de fotografías.
- En ocasiones, corresponden a la documentación más precisa y exhaustiva existente; en consecuencia, es la fuente de información con mayor potencial descriptivo y métrico (sobre todo si nos referimos a elementos patrimoniales ya desaparecidos o modificados).
- Posiblemente se obtuvieron con vistas a su restitución. De ser así, los productos existentes corresponderán a dibujos lineales. La SFM obtiene modelos tridimensionales de mallas con textura fotográfica lo que supone un resultado complementario que ofrece posibilidades inéditas de medida, interpretación y difusión.
- Los pares fotogramétricos requieren para su procesamiento de equipos específicos (restituidores) que, actualmente, se encuentran en desuso dado que son costosos y necesitan ser manejados por personal especializado. Poder recuperar esta información con medios más asequibles (tanto económica como técnicamente) aumentaría en gran medida su utilidad.

En el presente artículo se expone el resultado de aplicar las mencionadas técnicas de SFM en varios casos de los que se dispone de colecciones de pares fotogramétricos estereoscópicos y se analiza la calidad de los modelos obtenidos atendiendo, en primer lugar, a su precisión, pero también a su completitud y estética. Asimismo, se realizan algunas consideraciones adicionales sobre la utilidad de las técnicas de SFM para la obtención de nuevos productos a partir de información ya existente y su posible aplicación en trabajos relacionados con la Arqueología de la Arquitectura.

2. ESTUDIO DE CASOS

La primera dificultad a solventar reside en el hecho de que las técnicas de SFM están diseñadas para funcionar con una geometría diferente de la que se utiliza en los pares. Esta circunstancia ocasiona que la información estereoscópica no sea especialmente adecuada para su procesamiento con los nuevos programas. La tabla 1 (figura 4) recoge cuáles son las principales diferencias.

	Pares fotogramétricos	SfM
Solape entre imágenes	mínimo 60 %	100 %
Dirección de las tomas	Paralelas	Convergentes
Necesidad de apoyo topográfico	Se apoya cada par por separado (lo recomendable es que se disponga de 6 puntos por par)	No es necesario apoyo para generar el modelo. Posteriormente se escala y orienta el modelo completo (es suficiente con 3 puntos)
Número de imágenes en las que aparece representada cada zona	Dos (dentro del par)	5 ó 6 veces

Figura 4.- Tabla comparativa de la geometría de las fotografías en pares estereoscópicos y programas de modelado SFM

Para comenzar el análisis, se trabajará con los pares fotogramétricos utilizados para la confección del modelo 3D alámbrico de la muralla de Logroño (La Rioja) (LDGP 2009a) que, por su fisonomía, va a permitir analizar el comportamiento de los algoritmos de SFM en diferentes tipos de geometrías (figura 5). De esta forma, seleccionaremos tres zonas de prueba: un lienzo recto de

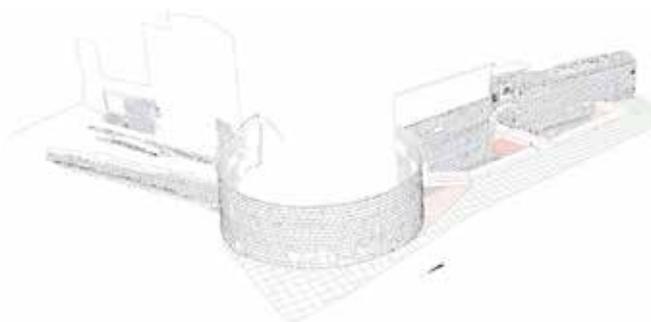


Figura 5.- Modelo 3D alámbrico obtenido por restitución a partir de pares estereoscópicos. Muralla de Logroño.

muralla (figura 6), la torre circular (figura 7) y el arco del puente de acceso (figura 8). Las imágenes utilizadas fueron tomadas con una cámara digital Canon EOS 5D (4.368 x 2.912 píxeles) con un objetivo de focal fija de



Figura 6.- Tramo aproximadamente rectilíneo de la muralla de Logroño.

Figura 7.- Torre circular (en realidad tronco cónica) de la muralla de Logroño, conocida como el «Cubo del Revellín», en 2009 antes de su restauración.

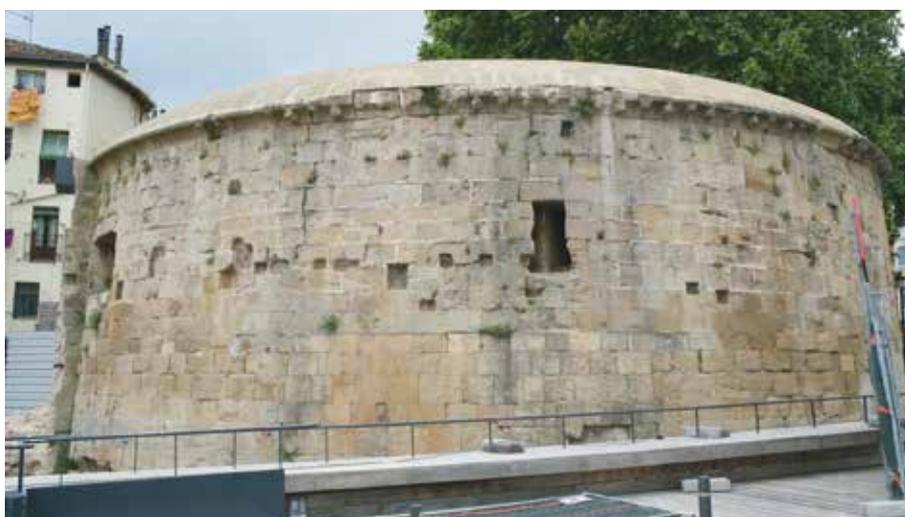




Figura 8.- Puente de acceso a la «Puerta del Camino» de la muralla de Logroño, en 2009 antes de su restauración.

35 mm convenientemente calibrado (aunque la información sobre dicha calibración no se va a introducir en el software de procesado).

La primera prueba corresponde al tratamiento de 8 pares del lienzo de muralla (figura 9). Se comprueba que el software es capaz de determinar, de forma automática, la posición relativa de las cámaras (señaladas mediante los cuadriláteros azules con un segmento negro que marca el eje óptico) y, al mismo tiempo, reconstruir un modelo con textura de todo el área fotografiada.

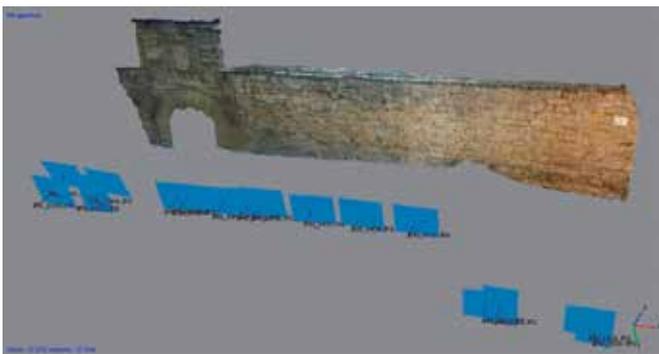


Figura 9.- Modelo mallado con textura fotográfica resultado del procesado de una pasada de fotografías del lienzo de muralla. Los cuadros azules representan la posición y la orientación de las tomas.

Al no haberse introducido ninguna información al respecto de la orientación, el modelo se presenta en coordenadas relativas, siendo necesario un cálculo adicional para escalarlo y referirlo al sistema de coordenadas del proyecto original. Para ello, se precisa identificar un mínimo de tres puntos en el modelo e indicar cuáles

son sus correspondientes coordenadas en el sistema del proyecto. Al tratarse de un trabajo pensado para su restitución fotogramétrica, se dispone de con varias decenas de dianas que se situaron sobre el paramento (figura 10), de las cuales se obtuvieron coordenadas mediante métodos topográficos y cuya finalidad era servir de apoyo a los pares fotogramétricos. Estas dianas son claramente identificables en el modelo con texturas fotográficas por lo que servirán, en primer lugar, para el cálculo de la transformación de coordenadas y, en segundo término, para la estimación de la precisión geométrica del modelo de texturas generado.



Figura 10.- Colocación de las dianas utilizadas como apoyo fotogramétrico y que van a utilizarse ahora para referir el modelo generado mediante la SFM al sistema de coordenadas del proyecto, así como para analizar la precisión de dicho modelo.

En concreto, del conjunto de dianas, se seleccionan cuatro que abarcan la mayor parte de la zona modelada para realizar la transformación de coordenadas (figura 11), utilizando el resto para estimar la precisión del modelo. Para ello, sobre el modelo ya transformado al sistema de coordenadas del proyecto, se midieron las coordenadas de las dianas utilizadas para los puntos de apoyo y se compararon con los valores que se obtuvieron por topografía clásica. El resultado obtenido en este caso son diferencias en el entorno de los 2 cm con discrepancias máximas de 4 cm.



Figura 11.- Puntos de control (representados mediante banderas) marcados sobre el modelo 3D para referirlo al sistema de coordenadas del proyecto.

Aunque esta precisión puede resultar escasa para ciertas aplicaciones —caso del análisis estructural—, puede ser suficiente para obtener productos métricos siempre que se determine la escala de representación adecuada. Analicemos, por ejemplo, la obtención de una ortofotografía de dicha fachada que combinaremos con el dibujo vectorial que se obtuvo por restitución.

Para calcular la escala máxima a la que se puede generar la ortofotografía, se separa la componente del error que corresponde al plano de la fachada y la componente en profundidad; en este caso, se comprueba que la mayor parte del error corresponde a esta última y que las diferencias en el plano de la fachada se mantienen en el entorno del centímetro. Con errores de 1 cm, la escala de representación de la ortofotografía puede llegar hasta el 1:50, siendo ésta la escala a la que se podrá combinar con el dibujo vectorial (figura 12), generando una nueva representación en la que la restitución original se enriquece con las información de la textura.

A continuación, se realiza una segunda prueba utilizando 65 pares correspondientes a la torre circular. Es interesante resaltar que esta zona es la más similar a las condiciones ideales de la SFM, es decir, que las fotografías se dispongan de manera convergente alrededor del objeto. Como puede comprobarse (figura 13) el



Figura 12.- Detalle del dibujo de líneas correspondiente al alzado obtenido a partir del modelo vectorial restituido estereoscópicamente al que se le ha incorporado, de fondo, la ortoimagen generada a partir del modelo 3D con textura fotográfica de la SFM.

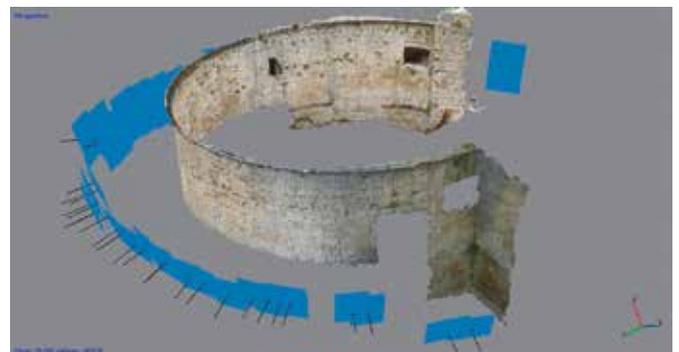


Figura 13.- Disposición de las fotografías y modelo 3D generado de la torre circular de la muralla.

procesado automático consigue orientar relativamente las fotografías y formar el modelo tridimensional. Al igual que para el lienzo recto de muralla, se utilizan las dianas establecidas como puntos de apoyo para referir este modelo al sistema del proyecto y comprobar la precisión geométrica del resultado obtenido. Los valores coinciden con los anteriores, es decir, unos 2 cm de diferencia promedio con discrepancias máximas no mayores de 4 cm.

La tercera zona de prueba corresponde al puente (44 pares). Aquí, la geometría de las tomas es divergente (se obtienen desde el interior hacia afuera) lo cual no es una buena situación de partida. Sin embargo, el resultado obtenido también es visualmente representativo (figura 14). La comprobación de la precisión geométrica se hace siguiendo el procedimiento descrito obteniendo de nuevo los mismos rangos de precisión que se han encontrado en las otras zonas de prueba.

En definitiva, en las tres zonas analizadas para el caso de la muralla de Logroño se han podido generar nuevos productos (modelos tridimensionales con texturas fotográficas y ortofotografías) mediante la aplica-

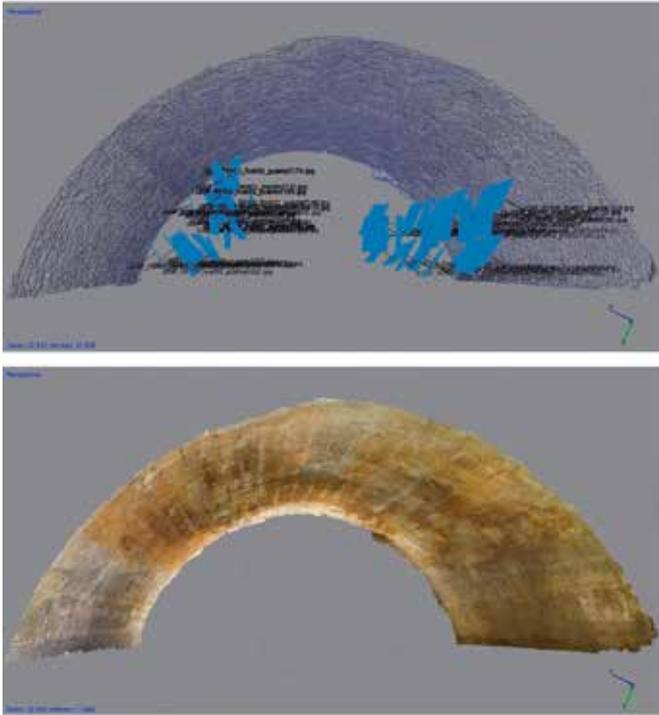


Figura 14.- Modelo de mallas con la posición calculada de las cámaras (imagen superior) y modelo con las texturas aplicadas (imagen inferior) del arco del puente.

ción de las técnicas de SFM. Gracias a la existencia de puntos de control, estos nuevos resultados pueden contrastarse para conocer su calidad métrica de forma que es posible determinar la escala a la que se pueden representarse, bien de forma aislada, bien en combinación con la información previamente existente, aportando así una mayor riqueza interpretativa gracias a las texturas fotográficas y a la posibilidad de explorar un modelo realista en 3D.

Sin embargo, no se puede establecer de forma automática que en todos los casos vaya a ser posible reprocesar con éxito los pares estereoscópicos mediante las técnicas de SFM. En ocasiones, los pares estereoscópicos fueron tomados en condiciones que son muy poco favorables a la fotogrametría convergente. Por ejemplo, en la imagen siguiente (figura 15) se muestra el proceso de toma de pares de la torre y fachada principal de la iglesia de Agoncillo (La Rioja) (LDGP 2009b), la cámara utilizada fue la misma que en el caso analizado anteriormente. Dicho proyecto contó con una grúa para situar la cámara en las posiciones más adecuadas para registrar la fachada, no obstante, con el fin de agilizar el trabajo de campo se procuró reducir al mínimo las maniobras de la grúa, por lo que los pares resultantes tienen las siguientes características:



Figura 15.- Toma de los pares estereoscópicos de la fachada de la iglesia de Agoncillo con ayuda de una grúa autoportante.

- La cesta de la grúa sólo se posicionó en tres puestos diferentes, desde los cuales era posible abarcar la totalidad de la zona a documentar sin dejar zonas sin recubrimiento estereoscópico.
- Las dos imágenes de cada par se obtuvieron desde los extremos de la cesta de la grúa que formaba la base del estereopar.
- Desde una misma posición de la grúa se obtuvieron pares a toda la zona visible de la fachada, lo que requería realizar un mosaico de 3 x 3 pares.

Este ahorro en campo resulta muy negativo para el procesamiento mediante SFM, el cual recomienda disponer de un mayor número de puntos de vista. Como puede comprobarse (figura 16), al procesar los pares se consigue determinar la posición relativa de las cámaras —en las tres posiciones de la grúa que se realizaron— pero no se llega a reconstruir el modelo de la fachada en su totalidad ni con suficiente precisión y al aplicar las texturas se aprecian deformaciones muy evidentes.



Figura 16.- Resultado del procesado de los pares, en el que se muestran las tres posiciones desde las que se obtuvieron los pares. También se aprecia que las texturas aparecen claramente deformadas en algunas zonas.

Este tipo de situaciones será previsiblemente más frecuente en colecciones de pares analógicos ya que, en estos casos, el coste de cada fotografía era elevado y se tendía a optimizar el número de tomas. La recuperación de este tipo de material (figura 17) presenta algunos condicionantes adicionales:

1. Se trata de un material susceptible a degradarse a lo largo del tiempo: los negativos en fundas dentro de carpetas que se almacenan verticalmente en estanterías tienden a deformarse, las placas de vidrio son frágiles, la luz y la humedad afectan a las imágenes, etc.

2. Es necesario escanearlos, lo que siempre es una posible fuente de error que repercutirá negativamente en la calidad final. Los mejores resultados se obtienen con escáneres fotogramétricos debidamente calibrados (tanto geométrica como radiométricamente) y mediante un cuidadoso proceso que garantice la máxima limpieza de las superficies y la planicidad de la película. Sin embargo, no siempre se dispondrá de esta opción, cuando se recurre a equipos convencionales la resolución de salida puede ser menor de la que permite la película, se introducen distorsiones, suciedad y efectos ópticos como los anillos de Newton (en el caso de que se coloque un vidrio para aplanar la película).
3. El recorte de la imagen digitalizada es arbitrario y no está relacionado con la posición del centro óptico. En el proceso analógico, esta relación se recuperaba mediante la operación denominada «orientación interna», que consistía en marcar un conjunto de señales de referencia (marcas fiduciales) cuyas coordenadas en el sistema de coordenadas imagen era conocido previamente gracias al certificado de calibración de la cámara. Por el contrario, la fotografía procedente de cámaras digitales no requiere de esta operación y, en consecuencia, el software de SFM no la contempla, lo que ocasiona que la geometría interna de cada

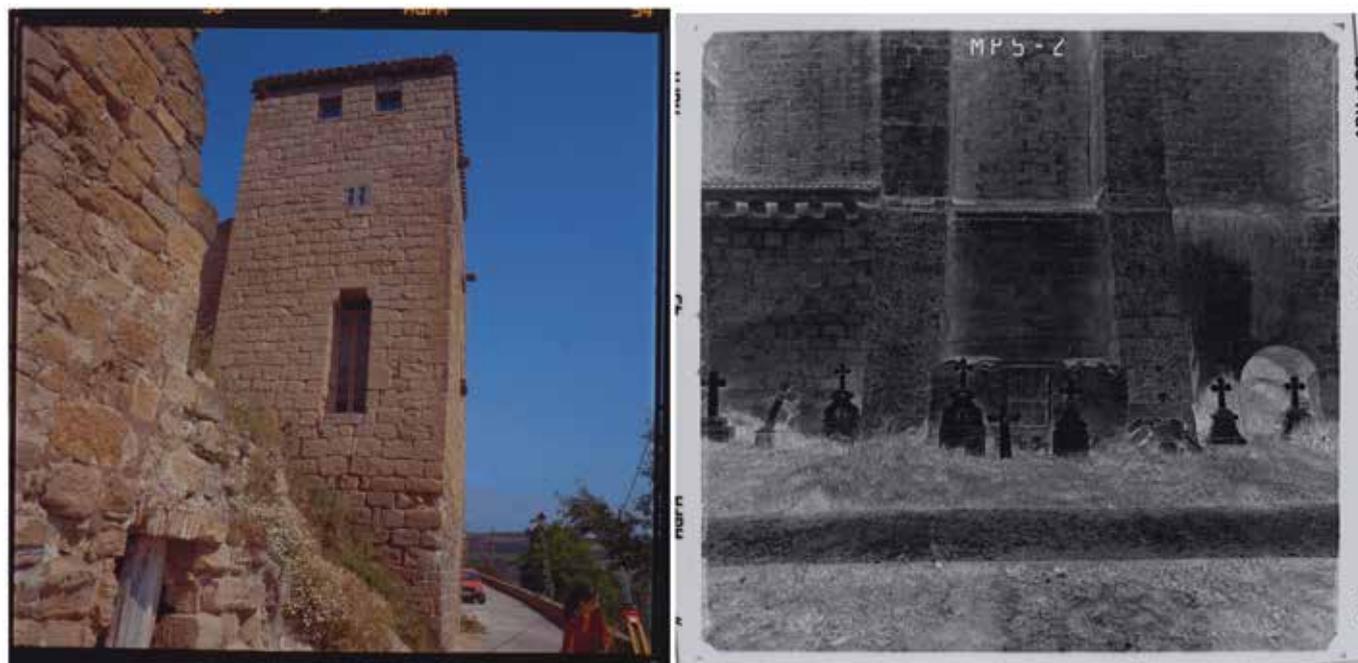


Figura 17.- Fotogramas en película obtenidos con cámaras semimétricas de formato 6x6 cm. La imagen de la izquierda corresponde a una diapositiva tomada con una Rollei Metric 6006 y la de la derecha a un negativo obtenida con una Hasselblad 903 SWC. Ambos corresponden a la documentación de las murallas de Labraza (Álava) (LDGP 2003).



Figura 18.- La imagen de la izquierda corresponde a una vista general del estado del interior de la torre durante el trabajo de documentación. Las dos imágenes centrales son los croquis de dos pares fotogramétricos en los que se aprecia cómo aparecían los andamios (los números corresponden a los puntos de apoyo). A la derecha se presenta el dibujo final, producto de la restitución estereoscópica manual.

una de las imágenes escaneadas, aun procediendo de la misma cámara, sea completamente diferente.

4. Al hilo del punto anterior. Un método habitual de disponer las marcas fiduciales en las cámaras utilizadas para la documentación era mediante una placa de vidrio que presentaba un patrón de cruces (*placa réseau*). Estos elementos, además del borde de los negativos y cualquier otra información que aparezca impresa en la película suponen ruido para los algoritmos de correlación.

A la vista de los puntos 3 y 4 de la lista anterior, se podría pensar en pre-procesar las imágenes escaneadas con el fin de incluir su orientación interna, recortar el borde y, adicionalmente, eliminar distorsiones (se trataría de un proceso similar al conocido como «idealización» en algunos programas de fotogrametría). Con ello es previsible que se mejoren los resultados, pero supone un incremento importante en el volumen de trabajo por lo que será necesario evaluar su utilidad de manera particularizada en cada situación.

Otro hecho que se da con cierta frecuencia en los pares fotogramétricos es la presencia de obstáculos. Para ilustrar esta situación vamos a analizar la documentación que se realizó del interior de la Torre de Muñatones en Muskiz, Bizkaia (LDGP 2005a), la cámara utilizada en esta ocasión fue una Canon EOS 300D (3.072 x 2.048 píxeles) con un objetivo de focal fija de 35 mm. Como puede apreciarse (figura 18), para poder acceder a la totalidad de los muros se instaló un andamio que aparece representado en las fotografías, por este motivo, cada par tiene zonas ocultas que, durante la restitución, debieron completarse con otros pares o fotografías complementarias.

Por supuesto, a diferencia del operador de restitución, los algoritmos de la SFM no realizan el proceso de interpretación de cuáles de los elementos fotografiados pertenecen al elemento a documentar y cuáles no, así como el trabajo de descartar las zonas ocultas y tratar de completarlas con información de otros pares. Por este motivo, al procesar automáticamente estas fotografías comprobamos que dichos obstáculos generan errores en la geometría reconstruida y que además se proyectan en las texturas del paramento (figura 19), generando en conjunto un modelo 3D deficiente.

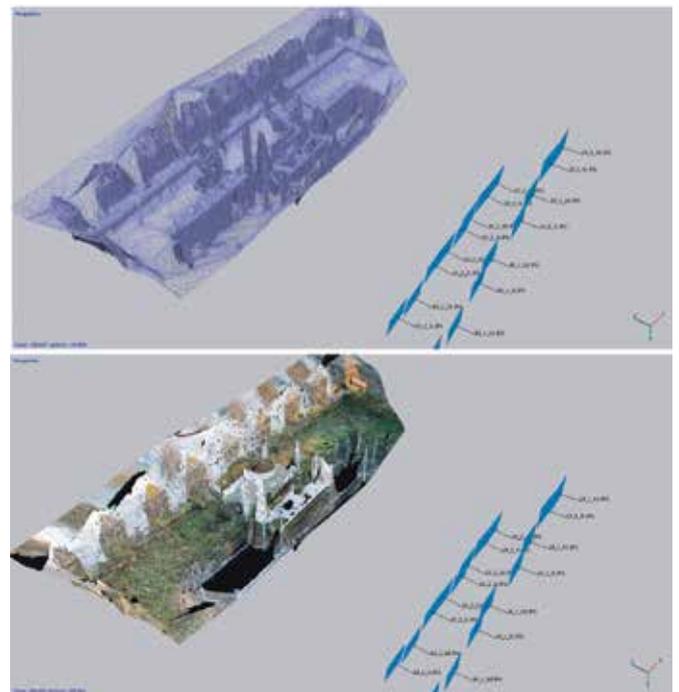


Figura 19.- Resultado de procesar automáticamente dos pasadas de tres pares cada una. Como puede comprobarse, tanto la geometría resultante como las texturas aplicadas presentan importantes deficiencias.

Al hilo de este caso, cabe mencionar otra particularidad que se produce con frecuencia en los pares estereoscópicos cuando éstos corresponden a vistas cenitales. En estas situaciones, suele ser muy útil recurrir a sistemas auxiliares de sujeción que permitan suspender la cámara con el eje de la toma perfectamente vertical y que, además, posibiliten el desplazamiento lateral para la toma del correspondiente par. En estas imágenes no es extraño que parte de dichas estructuras, o su sombra, aparezcan en las imágenes (figura 20). El problema es que estos elementos no pertenecen al elemento fotografiado y que su posición cambia entre las tomas, como consecuencia, generan errores en los algoritmos de correlación y aplicación de las texturas.



Figura 20.- En la imagen superior se muestra la estructura de sujeción de la cámara para la toma de pares cenitales del empedrado del suelo del puente de la Venta de Piqueras en Lumbreras (La Rioja). La imagen inferior corresponde a una de las fotografías del par en la cual aparece uno de los pies de la estructura y su sombra (LDGP 2005b).

3. CONCLUSIONES

Respecto a la utilidad de las técnicas de SFM para la documentación de elementos patrimoniales, en primer lugar, es preciso diferenciar entre (1) su aplicación a nuevos proyectos que se vayan a acometer y (2) el reprocesado de información ya existente. En el primer caso, su utilidad es indudable ya que permiten obtener unos productos de calidad contrastable con unos requerimientos mínimos respecto a los tipos de cámaras a emplear, apoyo topográfico, costes del software, formación de los operadores que generan los productos, etc. En el segundo caso, que es el objeto del presente artículo, y para el caso concreto de pretender reprocesar pares estereoscópicos obtenidos con vista a su restitución, se ha comprobado que los algoritmos de la SFM son muy versátiles y que, en general, permiten calcular la posición de las cámaras, así como generar modelos tridimensionales con texturas fotográficas de los elementos documentados con independencia de su geometría.

Al utilizar la expresión «calidad contrastable», queremos referirnos al hecho de que dicha calidad puede evaluarse y, en consecuencia, que es posible determinar la adecuación de los productos a los diferentes usos que se prevean. En ocasiones, dicha evaluación indicará que los resultados no son aceptables para los fines propuestos, bien sea por la magnitud de los errores geométricos o debido a otros factores como pueden ser la complejidad del modelo generado o su estética (fallos en las texturas, diferencias apreciables de tonalidad, etc.). Los factores determinantes a este respecto que se han podido extraer de los ejemplos analizados son la escasez de puntos de vista significativamente diferentes y el hecho de que se tratase de pares estereoscópicos en los que fuese necesario un importante nivel de interpretación del contenido, selección de los elementos de interés, necesidad de completar zonas ocultas, etc. En cualquier caso, es preciso indicar que el hecho de que, en estas situaciones, no se hayan podido generar modelos 3D con texturas satisfactorios mediante las técnicas de SFM no significa que no sea posible hacerlo aplicando otros procedimientos fotogramétricos.

En relación a las posibles aportaciones de estas técnicas a los estudios de elementos patrimoniales y, más concretamente, a la Arqueología de la Arquitectura, son destacables, en primer lugar, que —respecto a los dibujos vectoriales obtenidos originalmente de los pares fotogramétricos— los nuevos productos generados mejoran las posibilidades de análisis de los elementos

patrimoniales al representarlos de forma tridimensional recubiertos con sus correspondientes texturas fotográficas, ofreciendo así la opción de realizar nuevos tipos de estudios, reinterpretarlos o difundirlos a un público más amplio utilizando tecnologías más acordes a los hábitos actuales de los usuarios. Por otro lado, también permiten la generación de modelos 3D de estados pasados de los edificios (de los que se disponga de documentación fotográfica) con vistas a su comparación con los modelos tridimensionales que puedan obtenerse en la actualidad, bien sea mediante estas mismas técnicas de SFM, láser escáner, etc.

Evidentemente, no será posible obtener productos como los descritos en el presente artículo si previamente no se ha realizado un esfuerzo en la preservación de la información fotográfica, su correcta clasificación y puesta a disposición de los usuarios.

Otro aspecto a considerar es la dificultad de preservar los equipos de restitución necesarios para la explotación métrica tradicional de los pares. Por este motivo, resulta muy ventajoso poder tratar esta información mediante herramientas más versátiles pero que permitan igualmente obtener productos válidos. Por otro lado, el archivo de los pares fotogramétricos con vistas a su preservación también conlleva la necesidad de conservar los certificados de calibración de las cámaras utilizadas, así como los croquis de distribución y las listas de coordenadas de los puntos de apoyo. Las técnicas de SFM, al no requerir tanta información, permiten estructurar dichos sistemas de archivo de una manera más simple, facilitando así la preservación y la reutilización de los datos; por otro lado, al basarse en software de bajo coste y manejo sencillo, se aumenta el número de usuarios potenciales, mejorando la rentabilidad de los propios archivos y permitiendo que las organizaciones que los gestionan puedan incorporar entre sus funciones y servicios nuevos usos de la información, incrementando, de esta manera, su impacto en la sociedad.

En cualquier caso, es preciso destacar que la funcionalidad de las técnicas tradicionales sigue estando vigente: la visión estereoscópica es una cualidad interesantísima para la exploración de la imagen fotográfica y el dibujo vectorial (bien sea por restitución de un par o por digitalización sobre ortoimágenes), más allá de una mera representación, supone un proceso que genera conocimiento sobre los elementos documentados (Almagro 2004: 14). En consecuencia, los nuevos productos deben considerarse como una oportunidad de aumentar las posibilidades de adquisición y difusión de dicho conocimiento.

Por otro lado, nada impide que fotografías que, de dos en dos, produzcan pares estereoscópicos adecuados para su restitución, formen parte también de colecciones más amplias que estén preparadas para su procesamiento en bloque por algoritmos del tipo SFM. El procedimiento en campo puede partir de la configuración diseñada para realizar un recubrimiento estereoscópico por pares y completarla incorporando las tomas oblicuas necesarias para ir resolviendo y enlazando los diferentes modelos mediante fotogrametría convergente.

Nota

En el cuerpo del presente artículo se ha preferido no hacer referencia a ningún software de procesamiento debido a que se trata de un campo sujeto a una rápida evolución. Algunas de las alternativas comerciales más utilizadas actualmente son: Agisoft Photoscan (<http://www.agisoft.com/>) —que es el que se ha empleado en los ejemplos presentados en el presente artículo— y Pix4D (<http://pix4d.com/>). Por lo que respecta al software gratuito, caben mencionar: VisualSfM (<http://ccwu.me/vsfm/>) y Autodesk 123D Catch (<http://www.123dapp.com/catch>).

BIBLIOGRAFÍA

- Almagro Gorbea, A. 2004: *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.
- Almagro Gorbea, A. 2008: “La puerta califal del castillo de Gormaz”. *Arqueología de la Arquitectura*, 5, pp. 55-77.
- Álvarez González, I., Lopetegui Galaraga, A., Mesanza Moraza, A., Rodríguez Miranda, Á., Valle Melón, J. M. y Vicente Espina, I. 2003: “Diferentes propuestas para la representación geométrica de edificios históricos”. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, pp. 9-12.
- Angulo Fornos, R. 2013: “La fotogrametría digital: una herramienta para la recuperación de arquitecturas perdidas. Torre del Homenaje del Castillo de Constantina”. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), pp. 140-144.
- Aparicio Resco, P., Carmona Barrero, J. D., Fernández Díaz, M. y Martín Serrano, P. M. 2014: “Fotogrametría Involuntaria”: rescatando información geométrica en 3D de fotografías de archivo”. *Virtual Archaeology Review*, 5(10), pp. 11-20.
- Azkarate Garai-Olaun, A. 2002: “Intereses cognoscitivos y praxis social en Arqueología de la Arquitectura”. *Arqueología de la Arquitectura*, 1, pp. 55-71.
- Caballero Zoreda, L. 2004: “Una experiencia en Arqueología de la Arquitectura”. *Arqueología de la Arquitectura*, 3, pp. 127-143.
- Cámara Muñoz, L. y Latorre González-Moro, P. 2003: “El modelo analítico tridimensional obtenido por fotogrametría. Descomposición, manipulación y aplicaciones en el campo de la restauración arquitectónica”. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, pp. 87-96.
- De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Van Meirvenne, M. y De Clercq, W. 2013: “Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage”. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), pp. 1108-1121.
- Finat Codes, J., Delgado del Hoyo, F. J., Martínez García, R., Fernández Martín, J. J., San José Alonso J. I. y Martínez Rubio, J. 2011: “Hacia una

- integración de los sistemas de documentación, información y gestión del patrimonio. Resultados y retos”, en J. M. Lodeiro Pérez (dir.) *Documentación gráfica del patrimonio*. NIPO: 551-11-006-4. Ministerio de Cultura (España). pp. 164-177.
- Grün, A., Remondino, F. y Zhang, L. 2004: “Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan”. *The Photogrammetric Record*, 19(107), pp. 177-199.
- Ioannides, M., Hadjiprocopi, A., Doulamis, N., Doulamis, A., Protopapadakis, E., Makantasis, K., Santos, P., Fellner, D., Stork, A., Balet, O., Julien, M., Weinlinger, G., Johnson, P. S., Klein, M. y Fritsch, D. 2013: “Online 4D reconstruction using multi-images available under Open Access”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, pp. 169-174.
- Latorre González-Moro, P. y Cámara Muñoz, L. 1993: “La restauración de la torre de Hércules de La Coruña (Galicia-España)”. *Informes de la construcción*, 45(427), pp. 67-80.
- LDGP 2002: *Documentación del conjunto formado por la Torre de Martiartu y la ermita de San Antonio (Erandio, Bizkaia)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/10258> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2003: *Documentación geométrica y restitución fotogramétrica de la muralla exterior de Labraza. Álava*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/14312> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2004: *Documentación geométrica de la Basílica de Armentia (Vitoria-Gasteiz, Álava)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/10380> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2005a: *Documentación geométrica y modelado virtual del Castillo de Muñatones (Muskiz, Bizkaia)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/13244> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2005b: *Seguimiento topográfico y levantamiento fotogramétrico de la excavación arqueológica de la Venta de Piqueras, campaña de 2005. Lumbreras (La Rioja)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/14342> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2008: *Generación de ortoimágenes de la ermita de la Concepción de Enciso (La Rioja)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/13638> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2009a: *Documentación geométrica de la muralla del Cubo del Revellín de Logroño (La Rioja)*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/13314> consultado 5/2/2015]
- LDGP 2009b: *Estudio topográfico de las deformaciones del conjunto arquitectónico de la iglesia de Nuestra Señora de la Blanca (Agoncillo, La Rioja) [Julio 2007 – Octubre 2009]*. Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio (UPV/EHU). [en línea: <http://hdl.handle.net/10810/7050> consultado 5/2/2015]
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Seguí, A. E. y Navarro, S. 2011: “Aplicación de la fotogrametría terrestre al levantamiento de alzados de edificios singulares”. *Revista ph*, 77, pp. 127-129.
- Lodeiro Pérez, J. M. (2011): “La documentación gráfica en el IPCE”, en J. M. Lodeiro Pérez, (dir.) *Documentación gráfica del patrimonio*. NIPO: 551-11-006-4. Ministerio de Cultura (España). pp. 8-17.
- López-Romero, E. 2014: ““Out of the box”: exploring the 3D modelling potential of ancient image archives”. *Virtual Archaeology Review*, 5(10), pp. 112-116.
- Mileto, C. y Vegas, F. 2003: “El análisis estratigráfico constructivo como estudio previo al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación”. *Arqueología de la Arquitectura*, 2, pp. 189-193.
- Parenti R. 2002: “Dalla stratigrafia all’archeologia dell’architettura. Alcune recenti esperienze del laboratorio senese”. *Arqueología de la Arquitectura*, 1, pp. 73-82.
- Pereira Uzal, J. M. 2013: “Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion”. *ph investigación*, 1, pp. 77-87.
- Santa Cruz Astorqui, J. 2003: “La fotogrametría digital en el levantamiento de planos de edificios”. *Informes de la construcción*, 55(488), pp. 31-40.