

'STRUCTURE FROM MOTION' ALTERNATIVA DE BAJO COSTO PARA EL REGISTRO DEL PATRIMONIO EDIFICADO^(*)

'STRUCTURE FROM MOTION' LOW-COST ALTERNATIVE FOR THE REGISTRATION OF BUILT HERITAGE

NADIA SÁNCHEZ CHACÓN^(**) Y PAULO SHIMABUKURO SHIMABUKURO^(***,*)

Fecha de recepción: 26 de octubre de 2015
Fecha de aprobación: 07 de diciembre de 2015

RESUMEN

El siguiente artículo, de carácter aplicativo e instrumental, fue elaborado a partir de los resultados de una serie de proyectos arquitectónicos cuya intervención en edificios patrimoniales dio oportunidad de mirar más allá de los métodos y procesos tradicionales para la documentación gráfica. Se desarrolló una metodología que implica el uso del software *Visual Structure from Motion System*^{****}, que permite obtener un modelo tridimensional; mediante una combinación de técnicas de representación se mejora la documentación gráfica y el relevamiento de lesiones patológicas del edificio. Dos recursos fueron optimizados para poder lograr la viabilidad de los proyectos: el tiempo y el presupuesto, ambos escasos. Tal escenario llevó a plantear una estrategia basada en métodos que permiten un rendimiento en el proceso de la documentación gráfica, pues garantizan la fidelidad de la representación actual del edificio, y sus lesiones y patologías.

PALABRAS CLAVE

Patrimonio edificado, levantamiento y registro digital, *Structure from Motion* (SfM)

ABSTRACT

The following article is of applicative and instrumental character and was drawn from the results of a series of architectural projects in which the intervention of buildings considered heritage gave opportunity to look beyond traditional methods and processes for graphical documentation. A methodology was developed that involves using the Visual System software *Structure from Motion*, from which a three-dimensional model is obtained; through a combination of imaging techniques the graphic documentation and survey of pathological lesions of the building is improved. Two resources were optimized to achieve the viability of the projects: time and budget, both scarce. This led to the proposal of a strategy based on methods that allow optimal performance in the process of graphic documentation, ensuring fidelity in the current representation of the building, and its injuries and pathologies.

KEYWORDS

Built heritage, lifting recorder, surveying and digital recording, *Structure from Motion* (SfM)

(*) El presente artículo es una parte de una serie de investigaciones personales que parten de un proyecto de investigación de mayor extensión sobre el desarrollo de estrategias de optimización para los procesos de diseño arquitectónico que aplican algoritmos genéticos y principios evolutivos.

(**) Egresada de la Maestría de Conservación de Patrimonio por la Escuela de Posgrado de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes de la Universidad Nacional de Ingeniería, bachiller egresada de la FAUA.UNI, ha participado en diversas obras y proyectos en relación a la conservación y restauración del patrimonio, con énfasis en la etapa de registro y diagnóstico. Contacto: nasa145@hotmail.com

(***) Arquitecto graduado de Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes de la Universidad Nacional de Ingeniería, cursa el último ciclo de la maestría en Historia, Teoría y Crítica en Arquitectura en la Escuela de Posgrado de la misma. Es docente en los talleres de diseño Arquitectónico de la Universidad de Ciencias Aplicadas. Contacto: paulo.shimabukuro@hotmail.com

(****) *Visual Structure from Motion* o *VisualSfM* es un software que basa en la generación y representación de un modelo tridimensional aplicando la estrategia del *structure from Motion* o SfM. Estas estrategias de fotogrametría fueron desarrolladas para el campo de la visión artificial y permiten realizar modelos 3D a partir de colecciones de imágenes no estructuradas. (Changchang W., 2011)

Los proyectos arquitectónicos que requieren una intervención de remodelación, ampliación, puesta en valor, rehabilitación, restauración o conservación de un inmueble de carácter patrimonial o valor cultural, es de suponer que requieren de la elaboración de un estudio técnico de valor documental, histórico, técnico, constructivo y arquitectónico¹.

Para ello se requiere de un complejo y amplio registro de las características físicas del inmueble, las cuales representan las tecnologías constructivas de las épocas; son condicionantes de una carga histórica que a lo largo del tiempo van acumulando, como un ente que vivió durante varios periodos, de los cuales fue testigo y quedaron registrados. Esto lleva a citar *La Carta del Rilievo*², donde se afirma que “requisito previo a cualquier intervención en el patrimonio cultural debe ser el conocimiento del bien arquitectónico y ambiental, considerando en su globalidad y en su completa articulación... de sucesivas intervenciones, realizadas muchas veces con criterios y técnicas constructivas diferentes” (Jiménez & Pinto, 2003, p. 48). Precisamente a que el patrimonio edificado compromete una serie de valores culturales y materiales expuestos a los cambios a través del tiempo se debe la importancia del registro, que abarca más que un momento; es parte de la historia desde los orígenes hasta las generaciones venideras que lo intervendrán. Esta cualidad atemporal es característica de cada edificio que cumpla con dichas particularidades; pasa a estar dentro de una escala cultural mundial para la humanidad.

El siguiente artículo expone seis casos de estudio para el registro del patrimonio edificado, cuyos mayores aportes son el recorte del tiempo de trabajo, la reducción del costo en los procesos de relevamiento y la facilitación de la elaboración de documentación gráfica. La mayoría de casos son resultado de un proyecto de gran envergadura, que consistió básicamente en el mejoramiento de 56 fachadas³ durante un plazo de casi tres meses -levantamiento, digitalización, registro de lesiones patológicas, diagnóstico de lesiones, propuesta de mejoramiento a nivel arquitectónico con detalles y propuesta de iluminación decorativa-. Se debía elaborar 1.6 fachadas por día: ello significa que prácticamente el mismo día que se realizaba el levantamiento se debía tener listo el expediente.

Este ritmo de trabajo se pudo lograr gracias a la aplicación de una metodología que requiere como trabajo de mínimo y el uso del software Visual Structure from Motion (VisualSFM)⁴, que genera de forma rápida y automática un conjunto de nube de pun-

1. En el capítulo “El conocimiento como proceso y estrategia”, de Jiménez y Pinto (2003), el proceso de conocimiento está en función de quién recoge, del receptor, de lo que este es capaz de retener y recuperar; el mirar, escuchar, leer, dependen de una estructura preexistente en lo perceptual, que evoluciona del espectador del conocimiento de forma directa e indirecta.

2. *La Carta del Rilievo* (Jiménez & Pinto, 2003)

3. Este es caso del proyecto para el mejoramiento de 56 fachadas monumentales del programa Recuperemos Barrios Altos, organizado por la Empresa Municipal Inmobiliaria de Lima (EMILIMA) en conjunto con el interés del Banco Interamericano de Desarrollo, del cual los autores participaron como parte del equipo del denominado Proyecto N°1 -Arquitectura/Monumentos/Vías. La contratación de servicios fue en el rubro “Especialista en renovación urbana/ conservación de monumentos del Proyecto N°1 – Mejoramiento y rehabilitación de vías urbanas en el Centro Histórico de Lima en el sector de Barrios Altos, y mejoramiento de fachadas con valor monumental, delimitado por las avenidas Abancay, Jirón Amazonas, Jirón Maynas, Jirón Junín, Jirón Huanta y Jirón Huallaga – Eje Ancash y Eje Junín”.

4. VisualSFM o Visual Structure from Motion, es un programa desarrollado por el ingeniero Changchang Wu (www.ccwu.me), cuya aplicación facilita la generación de modelos 3D a partir de imágenes 2D restituída por algoritmos mediante la producción tridimensional de una nube de puntos. Estas nubes de puntos forman un conjunto de puntos descritos por coordenadas espaciales XYZ y valores RGB (se refiere a Red-Green-Blue) que crea un efecto de textura original a través de las nubes de puntos densas. (1) Changchang Wu, “Towards Linear-time Incremental Structure From Motion”, 3DV 2013. (2) Changchang Wu, “VisualSFM: A Visual Structure from Motion System”, <http://ccwu.me/vsfm/>, 2011

tos tridimensional del edificio que permite crear un modelo 3D fotogramétrico⁵. Este software es una plataforma para generar la nube de puntos a partir de las estrategias del Structure from Motion o SfM⁶. Estas técnicas se basan en la representación virtual del edificio mediante el movimiento de la cámara: a diferencia de la fotogrametría, no requiere de calibración o excesivos preparativos.

La Documentación Gráfica Digital

Actualmente en nuestro medio ya se trabaja con herramientas sofisticadas que asisten a la documentación gráfica digital, como el escáner laser, del cual se espera un beneficio significativo en el proceso de documentación, así como el registro de gran precisión en la recopilación de información. Usualmente se emplean proyectos medianos o de gran envergadura, donde se puede justificar el costo tecnológico digital con facilidad. Si bien la tecnología está ahora al alcance instrumental, aún no es accesible para la gran mayoría de proyectistas, sobre todo a pequeña escala, por ejemplo para la fachada de una vivienda, una casa patio o un balcón.

Así, en dicho rubro el método más empleado actualmente es el relevamiento con instrumentos analógicos o levantamiento manual⁷-no estamos subestimando el trabajo manual, es más, fue complementario a nuestro método, pues el levantamiento arquitectónico es un sistema abierto que permite otros métodos y técnicas⁸. Para trabajar a pequeña escala y con poca disponibilidad de tiempo es necesaria una considerable cantidad de personal para realizar el registro, lo cual eleva el costo; con poco personal se obtienen resultados muy lentamente, tras varias semanas. Lamentablemente, los cortos plazos y el temor a los sobrecostos repercuten negativamente en la calidad de la documentación gráfica.

Representación Gráfica, el Valor Histórico

El dibujo arquitectónico es la principal fuente de representación. Se trata de un proceso que registra gráficamente las propiedades, y características geométricas y constructivas de los edificios. Esta representación se realiza mediante dibujos de planta que indican distribución de ambientes, cortes, elevaciones, y axonometrías constructivas y volumétricas. Complementariamente, en la actualidad se emplean fotografías, videos y modelados tridimensionales realizados por computadora, donde el adecuado equilibrio entre la precisión del dibujo y el detalle es la variable principal que determina la obtención de una documentación eficaz:

- El dibujo arquitectónico: La interpretación bidimensional de la realidad, donde se distingue los elementos fundamentales que se desean registrar.
- La fotografía: El registro gráfico, que requiere de una interpretación acompañada de bocetos o apuntes de campo en una bitácora.
- Los modelos informáticos tridimensionales: En este artículo nos referiremos a los gráficos bidimensionales como planimetrías y a los modelos tridimensionales digitales como modelos 3d.

5. El conjunto de nube de puntos del edificio es la base métrica tridimensional virtual del edificio, pudiendo convertirse en un Modelo tridimensional o Modelo3D. (Talaverano, 2014)

6. Técnica inspirada en la fotogrametría, desarrollado como herramienta en la visión artificial la cual permite realizar modelos 3D a través del movimiento del objeto observado o del observador. (Hartley & Adrew, 2004)

7. Método que toma mediciones a través del uso de winchas, distancionametros, jalones, prisma angular, niveles con cuerdas y mangueras para representar un edificio.

8. Revisar el levantamiento arquitectónico como sistema abierto (Jiménez & Pinto, 2003, p. 49)

Técnicas de Levantamiento para la Documentación Gráfica

Se entiende por levantamiento al conjunto de operaciones, medidas y análisis necesarios para comprender y documentar una obra arquitectónica contenida en un territorio y contexto urbano. Ello incluye sus características dimensionales, métricas, estructurales, constructivas, formales y funcionales, así como su complejidad histórica. El levantamiento implica la contemplación de las relaciones entre el edificio y su contexto, es decir, una lectura histórica del edificio, su entendimiento proyectual y constructivo para un adecuado proyecto de intervención.

Un adecuado levantamiento general (Jiménez & Pinto, 2003) debe brindar la información pertinente que permita obtener lo siguiente:

- Conocimiento, preciso, fiable y depurado críticamente, de la configuración morfológica del objeto
- Conocimiento técnico, tecnológico y material del objeto. Contribuye a la comprensión constructiva.
- Condiciones de alteración y degradación
- Observaciones históricas procedentes de una aproximación preliminar documentada

El presente artículo no pretende profundizar en las definiciones y generalidades que el levantamiento como método de documentación implica⁹; se explicará brevemente las distintas técnicas de levantamiento, agrupadas en tres categorías principales: manual, instrumental y fotogrametría.

Levantamiento manual

Este es el procedimiento tradicional, el cual consiste en tomar dimensiones lineales utilizando instrumentos simples y mecánicos como la wincha, el distanciómetro, los niveles de agua o el prisma. Requiere mucho tiempo y trabajo de campo, pero la digitalización es rápida y barata.

Permite una aproximación al edificio mediante la toma de mediciones con triangulaciones dentro de un sistema general de referencia. La medición manual siempre está sujeta al error humano, el cual se traslada al dibujar las planimetrías horizontales y verticales (plantas, elevaciones, cortes).

Levantamiento instrumental

Actualmente los principales instrumentos de medición incorporan un láser (distanciómetro, escáner 3D, estación total) para la medición. Esto ayuda a obtener datos a distancias lejanas o inaccesibles con precisión milimétrica. Existen la estación total y el escáner láser. El segundo, más autónomo, permite capturar más información en menor tiempo. El resultado es un conjunto de millones de puntos con coordenadas X, Y, Z (incluyendo color) llamado point cloud o "nube de puntos", un registro de alta definición o High-Definition Survey (HDS).

Levantamiento mediante fotogrametría

Esta técnica está basada en el uso de fotografías, a partir de las cuales se realizan mediciones e interpretaciones para obtener la información geométrica del edificio¹⁰.

9. Para mayor detalle revisar el artículo "Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas" (2014) de Rafael Martín Talaverano (rmartin@upm.es), publicado por la Universidad Politécnica de Madrid.

10. Esta definición está basada en la adoptada por la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (Jauregui, 2010).

Existe amplia bibliografía sobre el tema, pero en este caso solo mencionaremos algunas generalidades en lo que refiere al método.

a. La fotogrametría gráfica como técnica del uso de una proyección central a una interpretación de proyección ortogonal que está prácticamente en desuso.

b. La estereofotogrametría, que trabaja con la visión estereoscópica para recrear en la mente del observador un modelo virtual estereoscópico empleando un par fotográfico o estereográfico. Las imágenes deben ser capturadas desde dos puntos diferentes, ya que está basada en cómo trabajan el ojo y la mente humana para capturar la profundidad de los objetos.

Existen tres tipos de estereofotogrametría debido a sus diferencias técnicas y que están ligadas a un periodo histórico: la fotogrametría analógica (1900 a 1960), la fotogrametría analítica (1960 a 1990) y la fotogrametría digital (1990 a la actualidad) (Jiménez & Pinto, 2003).

- La fotogrametría analógica se realiza empleando aparatos de restitución óptico mecánica -restituidor¹¹. Es la técnica empleada generalmente para la cartografía. Un par fotográfico es manipulado para crear el modelo estereoscópico.

- La fotogrametría analítica combina el uso de aparatos restituidores analógicos y computadoras. La recolección de información es analógica y se completa mediante un modelado geométrico matemático. Permite obtener una base de datos tipo CAD.

- La fotogrametría digital puede emplearse técnicas diferentes: la fotogrametría tridimensional, y la fotogrametría bidimensional o rectificación fotográfica.

De la fotogrametría tridimensional se aplica la 'fotogrametría convergente' o 'multi-imagen', que permite generar de forma laboriosa un modelo 3D fotogramétrico¹². Se basa en un proceso de restitución digital y mixto. Da como resultado una imagen raster, una imagen vectorial¹³ y un modelo 3D fotogramétrico -modelo alámbrico, modelo de malla triangulada- en la Figura 1 de izquierda a derecha se muestran: Nube de puntos, visualización alámbrica, malla de triángulos 3D, modelo 3D fotogramétrico sin mapa de textura.

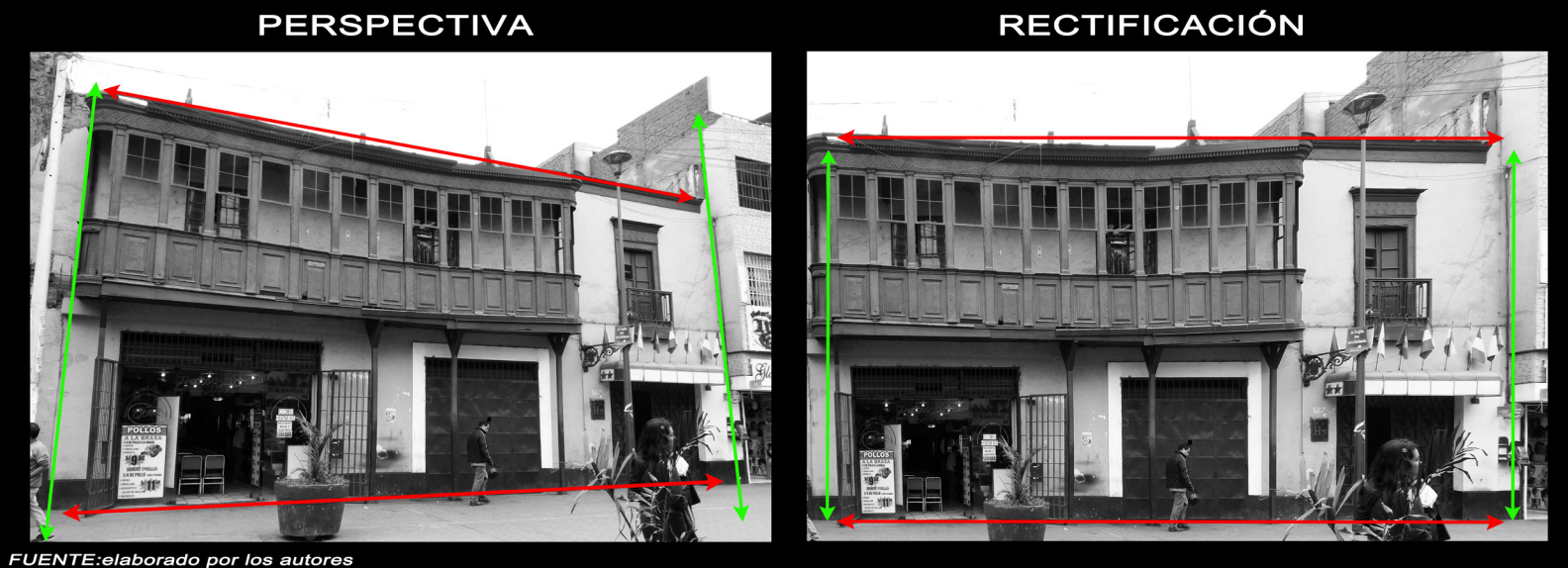
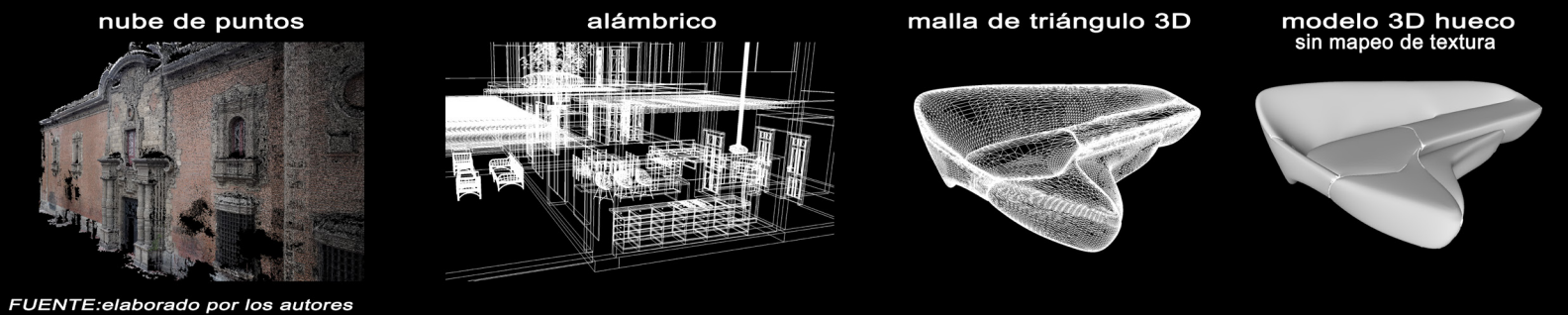
En nuestro medio se aplica más frecuentemente la técnica de rectificación fotográfica, que consiste en el uso de una sola imagen cuya perspectiva se altera para lograr una imagen de proyección ortogonal o imagen rectificadas, sobre la cual se pueden realizar mediciones. Algunos programas de computación como Photoshop, Perspective Rectifier y QGis permiten deformar la imagen en perspectiva, de forma manual o automatizada, para lograr una corrección ortogonal de la imagen, generalmente con un alto margen de error, por lo que se debe combinar con otras técnicas para reducirlo (Figura 2).

En cambio, la fotogrametría multi-imagen suele ser más exacta que la obtenida mediante la rectificación fotográfica. Brinda también datos de profundidad de elementos -no muy precisos-, y requiere de un trabajo sistemático y cuidadoso (Pérez, 2006).

11. Un restituidor fotogramétrico es un instrumento que permite determinar la posición de un punto de interés a partir de las intersecciones de dos haces perspectivos cónicos. Mediante un mecanismo físico de marcación se puede realizar la medición, la cual es reconstruida a partir de dos fotografías llamadas 'par fotogramétrico'.

12. El modelo 3D fotogramétrico es un modelo tridimensional hueco o cascarón, cuya superficie es una malla triangulada producto del proceso de conexión de todos los puntos de la nube. Al modelo se le puede adicionar un mapa de textura, siempre que la nube de puntos sea a colores.

13. La diferencia entre una imagen *raster* y una imagen vectorial es que la primera está basada en un mapa de bits que componen un conjunto de píxeles o puntos que contienen color, pero carecen de interpretación geométrica o de dibujo constructivo, mientras que una imagen vectorial se elabora a través de vectores que contienen información geométrica como distancias, espesor, forma y dirección.



Es una técnica que trabaja mediante un software, y que requiere la identificación de algunos puntos de medición en el edificio. También se debe relacionar con los puntos donde fueron tomadas las fotografías (Figura 3): se identifica un conjunto de puntos tridimensionales que permite elaborar un modelo tridimensional (Josefina, 2007). Existen algunos software -algunos gratuitos- que trabajan online, como Orthoware, PhotoModelerScanner y PhotoScan.

Structure from Motion (SfM)

Este método engloba a la fotogrametría y a las estrategias de reconstrucción virtual Structure from Motion¹⁴ o SfM en una nueva metodología, que solo tiene en común con la fotogrametría tridimensional la facultad de generar un modelo 3D fotogramétrico, en este caso a partir de una nube de puntos (Hartley & Adrew, 2004).

El SfM funciona identificando un punto en común entre una serie de fotografías en movimiento, a partir de lo cual reconstruye virtualmente el mismo (Figura 4). Mediante la identificación de un conjunto de puntos poco denso se obtiene una estructura base del objeto que se desea registrar, que sirve para generar un modelo 3D cuyas características son la profundidad de los elementos, el color y la precisión.

Figura 1. Diferentes representaciones de un modelo 3D

Fuente: Elaborado por el autor

Figura 2. Proceso de rectificación

Fuente: Elaborado por el autor

14. Changchang Wu, "Towards Linear-time Incremental Structure From Motion", 3DV 2013.

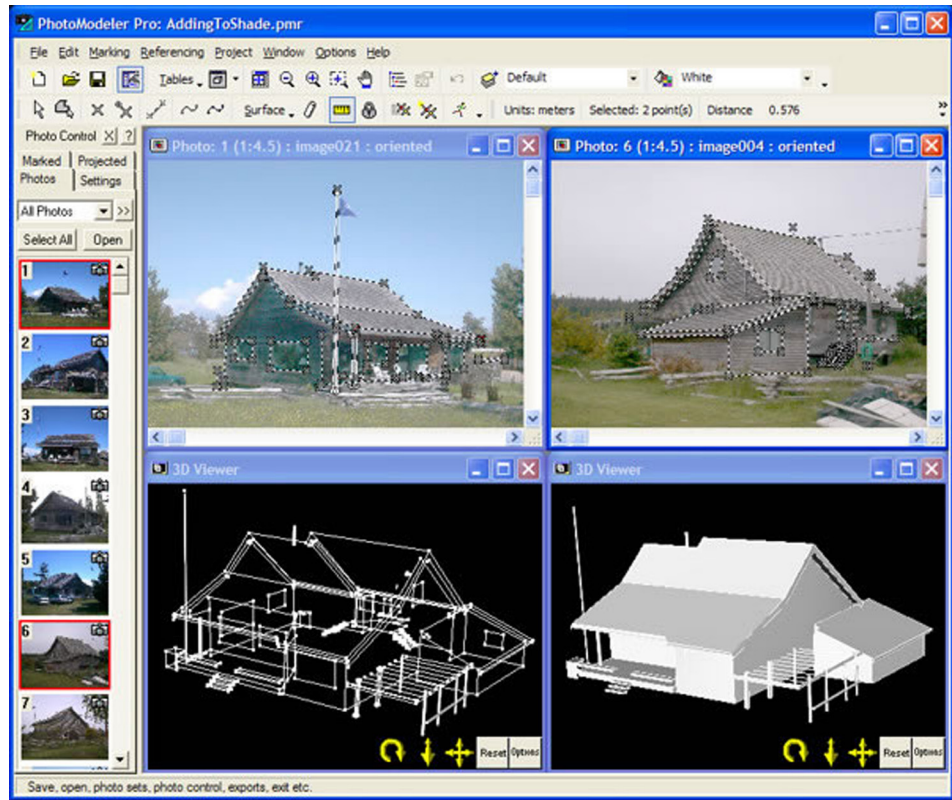
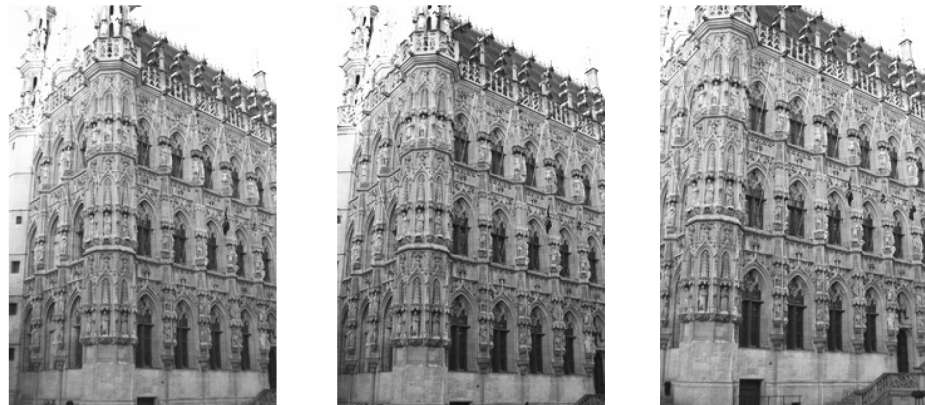


Figura 3. Fotogrametría convergente o multi-imagen. Nótese la construcción del modelo alámbrico al ir seleccionando manualmente cada punto y ubicado en el espacio tomando como referencia la fotografía
 Fuente: Elaborado por el autor

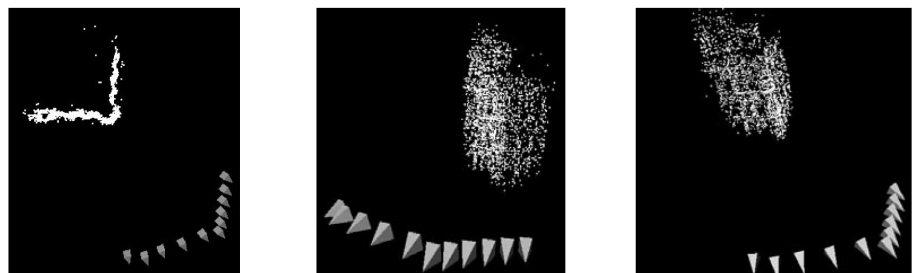


a

Figura 4. Structure from Motion o SfM en funcionamiento

(a) Tres fotografías tomadas desde diferentes locaciones, tratando de mantener como traslape la arista de la catedral.

(b) De izquierda a derecha: La generación de los puntos de la esquina desde una vista en planta, una vista lateral izquierda y otra vista lateral derecha. Se puede observar el proceso de identificación de los puntos entre los planos a través del movimiento



b

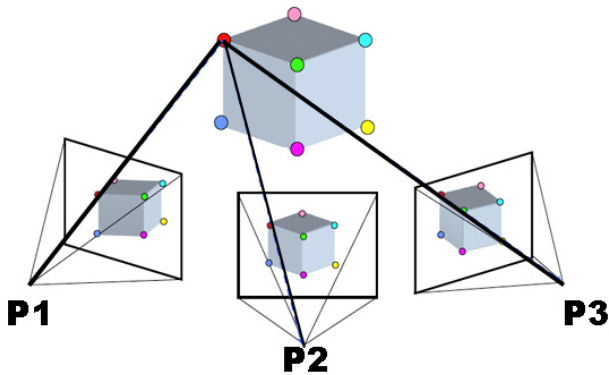
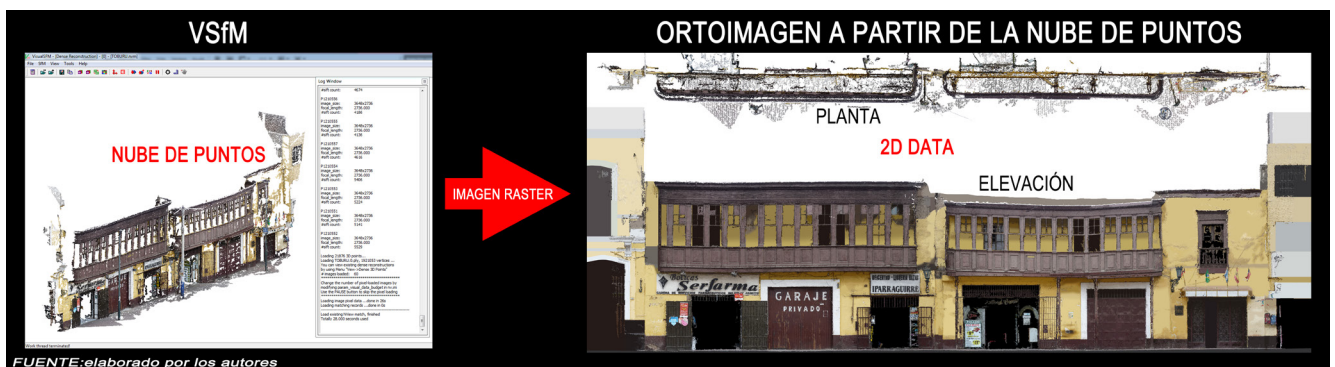


Figura 5. Principio básico del SfM: La relación de rasgos en común identificados entre las imágenes, proyectados de forma cónica para lograr la ubicación exacta del punto. Son necesarias, como mínimo, tres imágenes (Hartley & Adrew, 2004).

FUENTE: Recuperado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Sfm1.jpg>



Recordemos que Structure from Motion construye una nube de puntos¹⁵ a partir de la proyección cónica (Hartley & Adrew, 2004) a tres imágenes con diferentes ubicaciones (Figura 5). Esto se debe a que sus procesos de obtención de datos son análogos a la visión humana, donde el cerebro reconstruye el objeto tridimensional a partir de imágenes 2D proyectadas en la retina en principio por el movimiento del observador (Pereira, 2013).

Figura 6. Modelo 3D fotogramétrico generado con Visual Structure from Motion

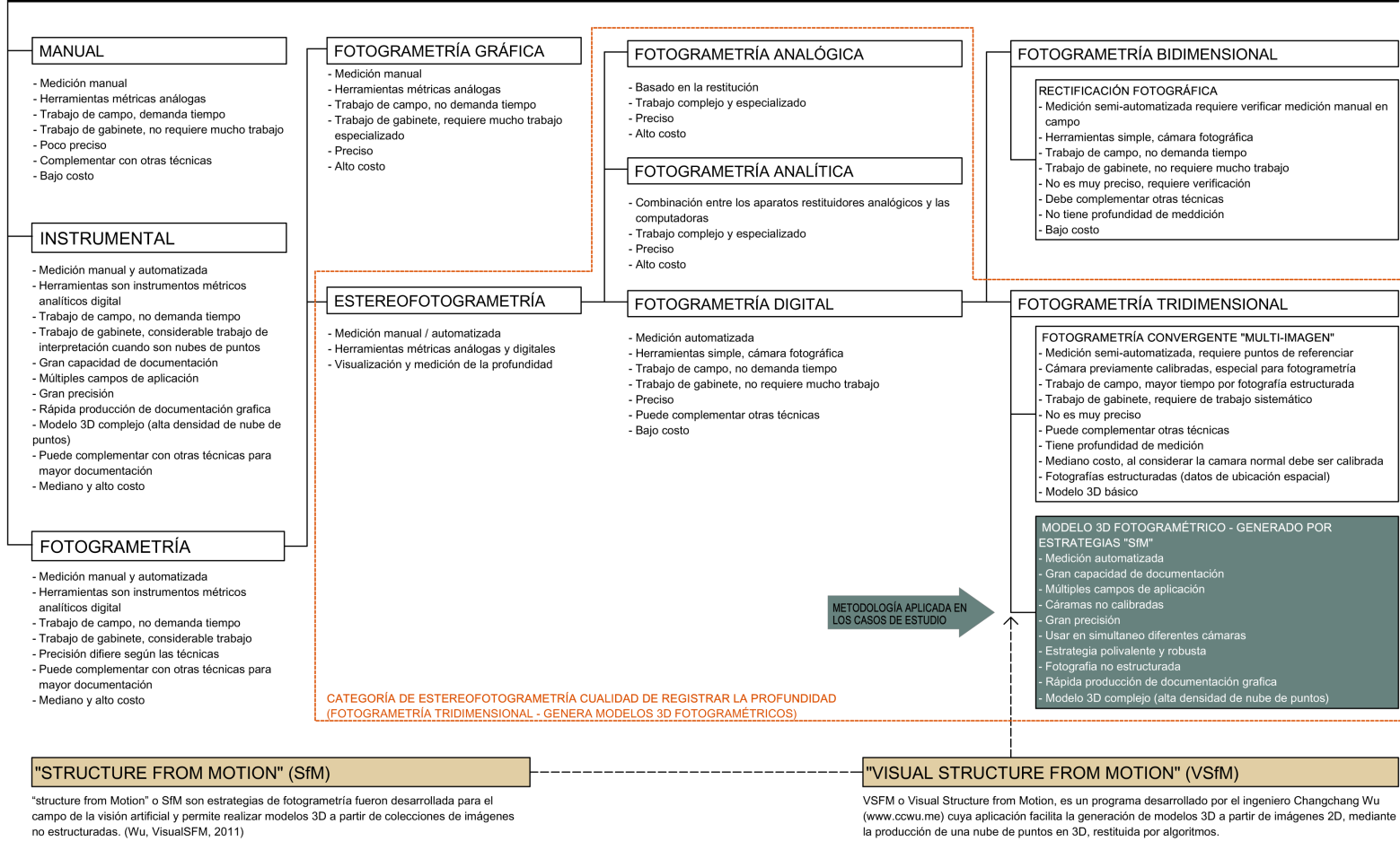
Fuente: Elaborado por el autor.

Visual Structure from Motion es un software que sirve como plataforma gráfica. Tiene incorporadas las estrategias de SfM y fue desarrollado por el ingeniero Changchang Wu¹⁶. Permite fácilmente la visualización del conjunto de puntos con valores de color en RGB; debido a la alta densidad de puntos, se crea un efecto visual de textura y volumen en el modelo 3D, el cual permite percibir profundidad de todos los elementos visibles y también los de difícil acceso (Figura 6). Se puede usar distintas cámaras, a diferencia de la fotogrametría tridimensional (Changchang, 2011). En la figura 6 se puede apreciar la planta y elevación de un caso, también se puede obtener un corte y también así como la ubicación exacta de todos los detalles (por ejemplo, se puede notar como el balcón está descolgado).

15. La alta densidad de puntos se logra a través del algoritmo basado en los Clustering Views for Multiview stereo (CVMS) diseñados por el ingeniero Yasutaka Furukawa (Furukawa, 2010).

16. Changchang Wu es un ingeniero de software que trabaja para Google. En la actualidad está trabajando en el Cardboard (VR), y su interés principal es la investigación en la visualización 3D computarizada. Realizó su doctorado con sus compañeros Marc Pollefeys y Jan Michael Frahm en la University of North Carolina at Chapel Hill -UNC-. Después de su graduación como doctor, ha trabajado con Steve Seitz y Brian Curless en la Universidad de Washington. Acabo de publicar, junto a Enliang Zheng, un artículo referido al SfM titulado "Structure from Motion using Structure-less Resection", ICCV, 2015. Es autor del programa VisualSfM, un sistema de reconstrucción Visual 3D que integra SiftGPU (Changchang, 2007) y Multicore Bundle Adjustment.

CATEGORIAS DE LEVANTAMIENTO APLICADAS A LA DOCUMENTACIÓN GRÁFICA



elaborado por los autores

Figura 7. Diagrama que muestra las categorías de levantamiento, las variadas técnicas y metodologías
 Fuente: Elaborado por el autor.

Otro aspecto favorable del uso de esta tecnología es que al hacer las tomas fotográfica no se requiere de ningún trabajo adicional; su uso es simple. Incluso existen aplicaciones para *tablet*, como 123DCatch¹⁷ de Autodesk (fabricante de Autocad) o Arc3D¹⁸.

Este es, hasta la actualidad, el horizonte en lo que respecta a herramientas y métodos aplicables para el levantamiento arquitectónico, en particular las categorías de levantamiento aplicadas a la documentación gráfica (Figura 7).

Aplicando SfM en la Documentación Gráfica

En el momento de su lanzamiento en 2008, la primera generación de procesadores Intel x86-64 Core i7 de cuatro núcleos¹⁹ tenía una velocidad de proceso de 2.2 GHz, y

17. Página web oficial: www.123dapp.com/catch

18. Página web oficial: www.arc3d.be

19. Especificaciones del producto disponibles en www.intel.com/content/www/us/en/processors/core/core-i7-processor.html

costaba alrededor de S/. 4,500.00 adquirir una laptop con tal característica -2.045 KS/GHz ratio del costo-. Actualmente las computadoras con gran capacidad de trabajo de procesos y gráficas, ideales para labores vinculadas a la arquitectura, cuentan con procesadores de 6ta generación y velocidad de 4.2 GHz, y cuestan alrededor de S/. 3,500 -0.83 KS/GHz ratio del costo-. Esto quiere decir que, además de que los avances tecnológicos han permitido incrementar la velocidad de procesamiento de datos -prácticamente se ha duplicado en 8 años-, los costos se han reducido a más de la mitad, lo que significa que hoy es más fácil acceder a la tecnología de punta a menor precio. Este fenómeno, inherente a la tecnología en las computadoras, alimenta el auge y evolución en el desarrollo de software, especialmente aquellos con procesos de iteraciones incrementales, como es el caso del SfM. Actualmente el aumento de la potencia y velocidad de los procesadores permite resolver la construcción de modelos 3D cada día más complejos -en base a nubes de puntos de alta densidad- con una eficacia y eficiencia realmente considerables, lo cual era impensable en la década del 80 (Pereira, 2013), cuando se empezó a desarrollar y trabajar con SfM.

Generalmente utilizar SfM requiere de una plataforma para la visualización, edición y control de la construcción de la nube de puntos, donde colocar las referencias y marcas entre imágenes; en la actualidad existen diversos software con diversas prestaciones, entre ellos algunos con sistemas de código abierto, lo cual permite su perfectibilidad.

¿Por qué VisualSfM?

A *Visual Structure from Motion System* es una plataforma que puede utilizarse sin necesidad de capacitación previa. Además, integra los procesos SfM en un solo software, que requiere del apoyo de algoritmos *cluster* que densifican la nube de puntos. Desarrollados por el ingeniero de Google Maps Yasutaka Furukawa, estos algoritmos CMVS/PMVS trabajan a partir de grandes colecciones fotográficas.

El resultado de un proceso estructurado de fotogrametría elaborado por las SfM es en una primera instancia es una nube de puntos discreta, cuya densidad es variable en función a la correlación de marcadores entre imágenes: puede llegar a tener miles de puntos²⁰. A este resultado se le conoce como ajuste Bundler, el cual consiste en la recolocación espacial de una serie de puntos coincidentes entre imágenes. Gracias a los procesos *Scale-invariant feature transform* o Sift, se generan automáticamente pares de imágenes y se obtienen puntos comunes o *key-points* (Lowe, 1999). Los ajustes Bundler de Noah Snavely están basados en los algoritmos de Levenberg-Marquardt (Pereira, 2013) conjuntamente con los trabajos de Yasutaka.

Es importante resaltar que gracias a las mejoras de los ajustes Bundler se ha vuelto accesible trabajar con una computadora doméstica (Changchang, Agarwal, Curless & Seitz, 2011). Sin embargo, la nube de puntos discreta no contiene suficiente información, por lo que para lograr mayor detalle se aplican los algoritmos CMVS/PMVS (Furukawa, 2010) -estos generan una nube de puntos de alta densidad, con millones de vértices- en coordenadas cartesianas X, Y, Z con una descripción colorimétrica extraída de los píxeles de las imágenes empleadas en el proceso (Figura 8.1).

Empleando la nube de puntos es posible generar, a través de diversos software de modelamiento 3D, un modelo 3D fotogramétrico (ISTI & CNR, 2014). Para los casos de edi-

20. A pesar de ello, aún no se le considera de alta densidad: la característica de una nube de puntos de alta densidad, generada a partir de resultados obtenidos mediante láser escáner, es que tiene millones de vértices, como aquella elaborada empleando un Geosistema Láser Escáner 3D incorporado a los procesos de trabajo BIM. www.leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners

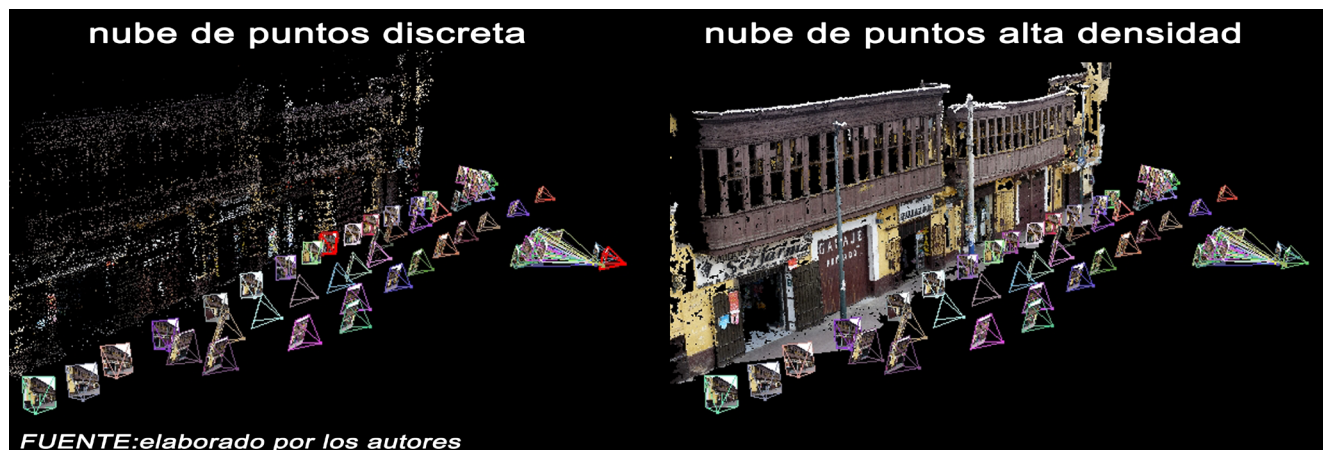


Figura 8.1. Diferencias entre la nube de puntos discreta y de alta densidad

Fuente: Elaborado por el autor.

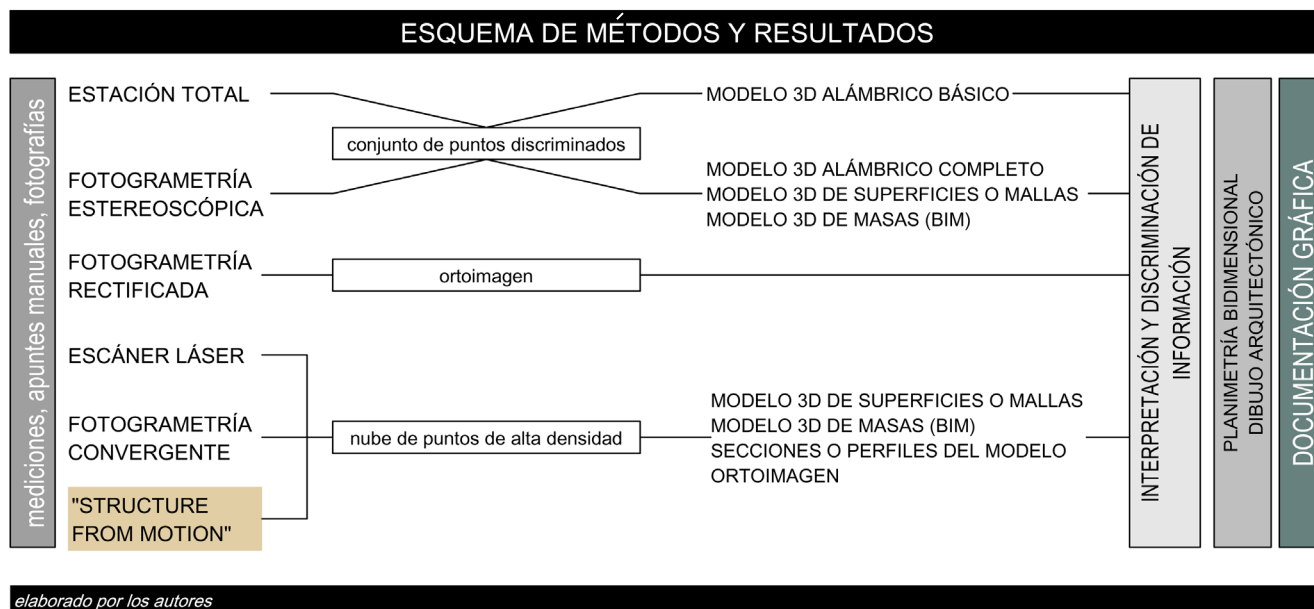


Figura 8.2. El programa MeshLab

Fuente: Elaborado por el autor



ficios patrimoniales, recomendamos usar el MeshLab²¹, que cuenta con un sistema de procesamiento de mallas triangulares 3D bastante potente, rápido y fácil de manejar. Se puede descargar el programa y el manual correspondiente desde su página web. Una característica particular del programa es la capacidad de generar un mapeado de texturas (Figura 8.2).

En resumen, gracias a los procesos SfM es posible obtener no solo mayor información de captura, sino también mejores resultados aplicados para cada particularidad del patrimonio edificado (Figura 8.3).

Metodología para la Documentación Gráfica de Bajo Costo

Trabajar con SfM no requiere de capacitación de personal ni de calibrar las cámaras, tampoco de sofisticados instrumentos. Es tan preciso como un láser escáner: solo requiere de muchas fotografías de buena resolución, tomadas con diferentes cámaras en distintos momentos.

Para aprovechar al máximo el software se debe tener presente algunos criterios básicos en función del mismo: evitar superficies transparentes o reflejantes; tener buena iluminación, natural o artificial; y tomar en cuenta que a mayor resolución mayor será el detalle. Por otro lado, para lograr el óptimo resultado es recomendable desarrollar un *workflow* o flujo de trabajo, en este caso basado en la experiencia del proyecto Recuperemos Barrios Altos²², para el cual se planteó una estrategia adecuada para el poco tiempo y presupuesto disponible, considerando también su complejidad y envergadura.

Figura 8.3. Con la nube de puntos de alta densidad se busca el mejor resultado para la elaboración de las planimetrías, mientras que el modelo 3D puede servir para reconstrucciones virtuales.

Fuente: Elaborado por el autor.

21. MeshLab (www.meshlab.sourceforge.net) es un programa de código abierto portátil, y un sistema extensible para el procesamiento y la edición de mallas triangulares tridimensionales no estructuradas. El sistema está destinado a ayudar a la transformación de modelos grandes no estructurados que surgen en la digitalización en 3D, y proporciona un conjunto de herramientas para la edición, limpieza, curación, inspección, representación y conversión de este tipo de mallas.

22. Proyecto para el mejoramiento de 56 fachadas monumentales, parte del programa Recuperemos Barrios Altos, organizado por EMILIMA en conjunto con el interés del BID, del cual los autores participaron como parte del equipo del denominado Proyecto N°1-Arquitectura/Monumentos/Vías.

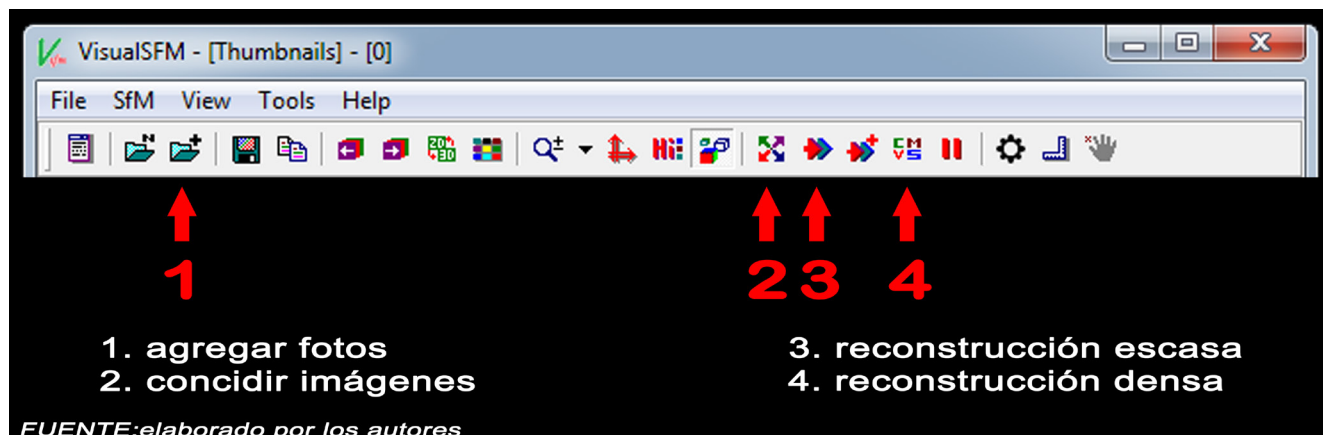
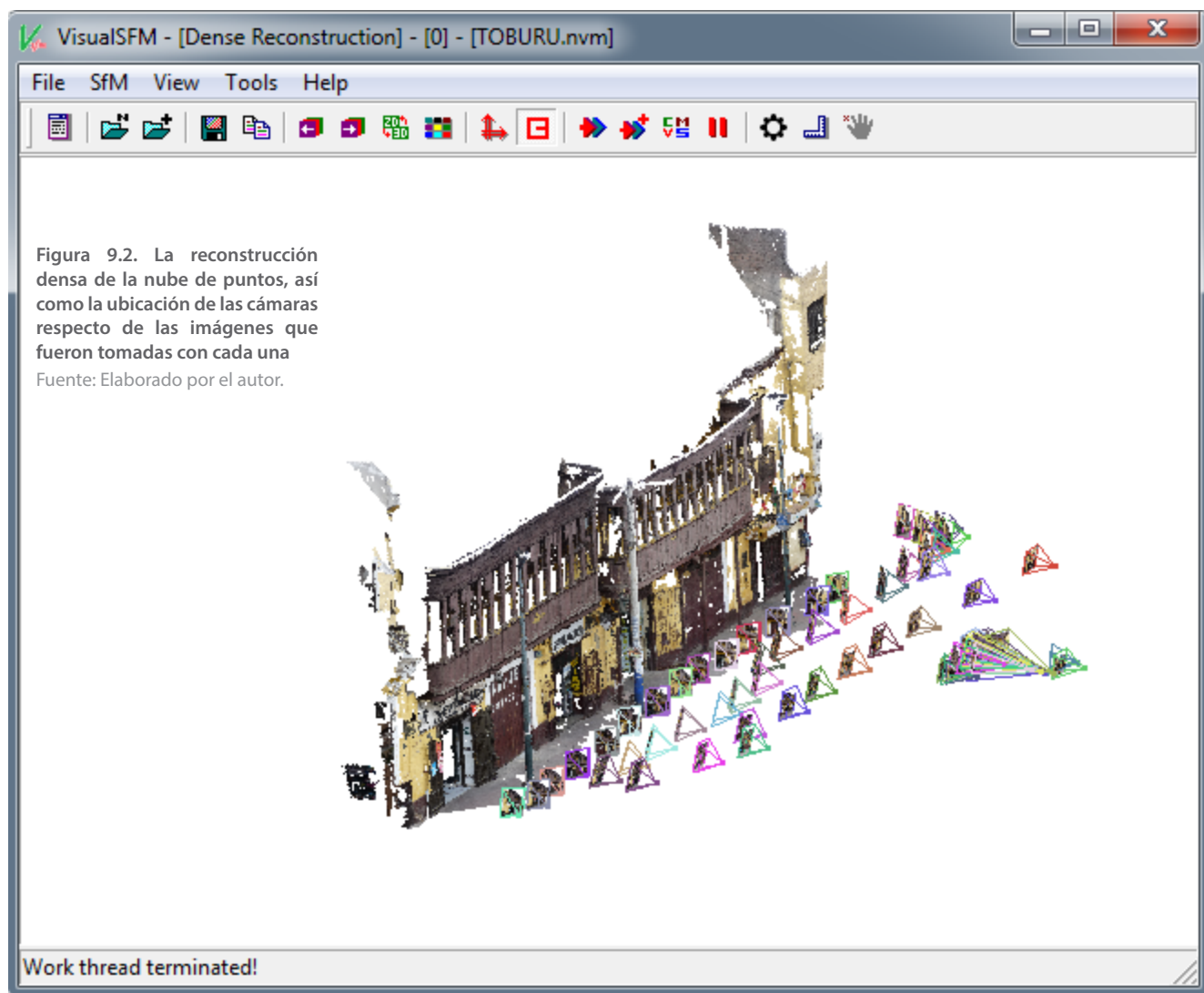


Figura 9.1. Los cuatro pasos que deben seguirse para utilizar VisualSFM

Fuente: Elaborado por el autor.



Para usar VisualSfM solo se debe seguir cuatro pasos (Figura 9.1):

1. Agregar la colección de fotografías (de preferencia, contar con traslapes y secuenciadas)
2. Coincidir las imágenes (es posible agregar más imágenes y volver a ejecutar este paso)
3. Realizar la reconstrucción escasa para generar la nube de puntos discreta
4. Llevar a cabo la reconstrucción densa para obtener la nube de puntos de alta densidad²³

Una vez terminado el proceso, se debe proceder a iniciar el visualizador de la reconstrucción densa de nube de puntos: para ello es solo necesario oprimir la tecla Tab (Figura 9.2).

Se puede aplicar este método en cualquier etapa de estudio del monumento: a partir de la nube de puntos se puede obtener un modelo 3D fotogramétrico para la contrastación histórica o un estudio estilístico; también se puede hacer un registro específico -a nivel forense- para un revelamiento físico con un nivel de detalle que permite la identificación de los procesos patológicos.

Workflow 2.0

Al comienzo el trabajo se debe dividir en dos grupos de procesos independientes, que no tengan un cruce entre sí. Por un lado, compromete una búsqueda de información documental, un proceso de investigación histórica; por el otro, implica obtener información del mismo edificio, mediante fotografías y anotaciones de mediciones (Figura 9.3).

En cuanto a la búsqueda documental, se realizan cuatro tipos de documentación, según la forma de obtención de la información (búsqueda en archivos, revisión de publicaciones, calas estratigráficas). Ello permite, al llegar el momento, evaluar la evolución histórica de la obra.

Respecto a la información sobre el estado actual del edificio, que debe ser registrado, se llevan a cabo dos procesos: el fotografiado y la toma de medidas. En cada caso se debe tener en cuenta la importancia de recopilar toda la información física posible.

Específicamente para la toma de fotografías, hay tres procesos que recopilar: fotos a detalle, fotos de lesiones y fotos generales para VisualSfM.

El proceso de medición consiste en dos procesos de recopilación: uno general, que recoge datos como el ancho de la fachada, y uno detallado, que considera los detalles arquitectónicos, medidas menores, entre los 2 y los 40 cm. Las dimensiones deben recogerse en perfil y frontal. Por ejemplo, los balcones y molduras deben considerarse en función a la escala gráfica a representar.

La ruta crítica es generar las ortoimágenes: se debe considerar que crear la nube de puntos densa empleando el VisualSfM puede tomar algunas horas y es uno de los procesos que se debe ejecutar primero.

23. Este proceso es el que mayores recursos de la computadora consume, por lo que puede tardar, dependiendo de la resolución y cantidad de las imágenes, así como de la cantidad de millones de vértices calculados.

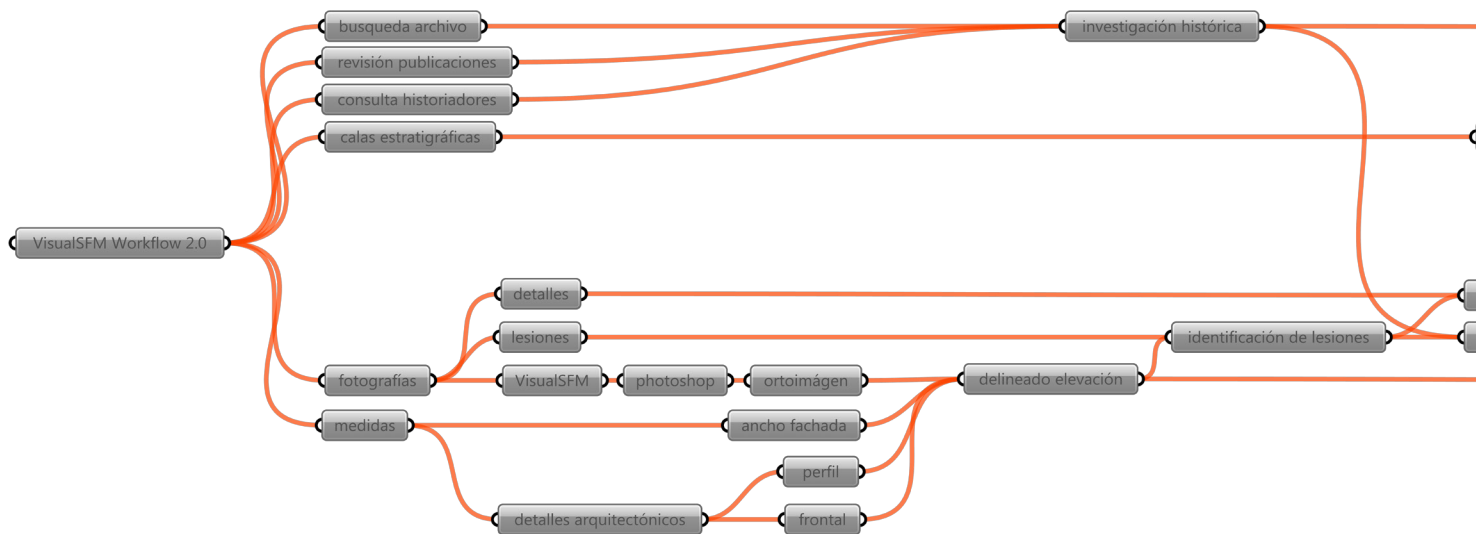


Figura 9.3. Workflow 2.0
 Fuente: Elaborado por el autor.

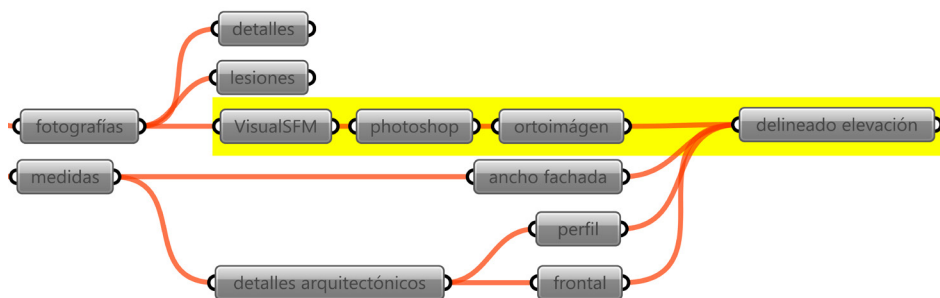


Figura 9.4. Se resalta el proceso de ruta crítica
 Fuente: Elaborado por el autor.

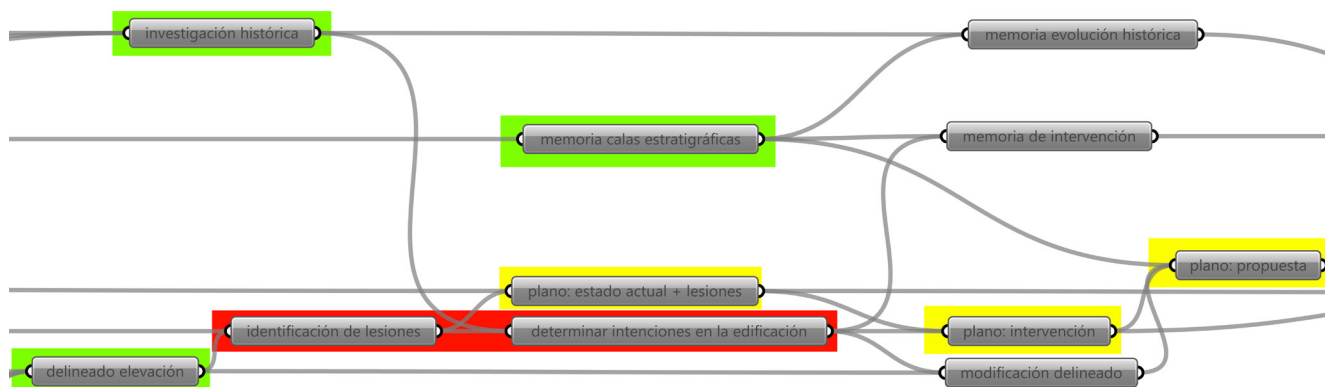
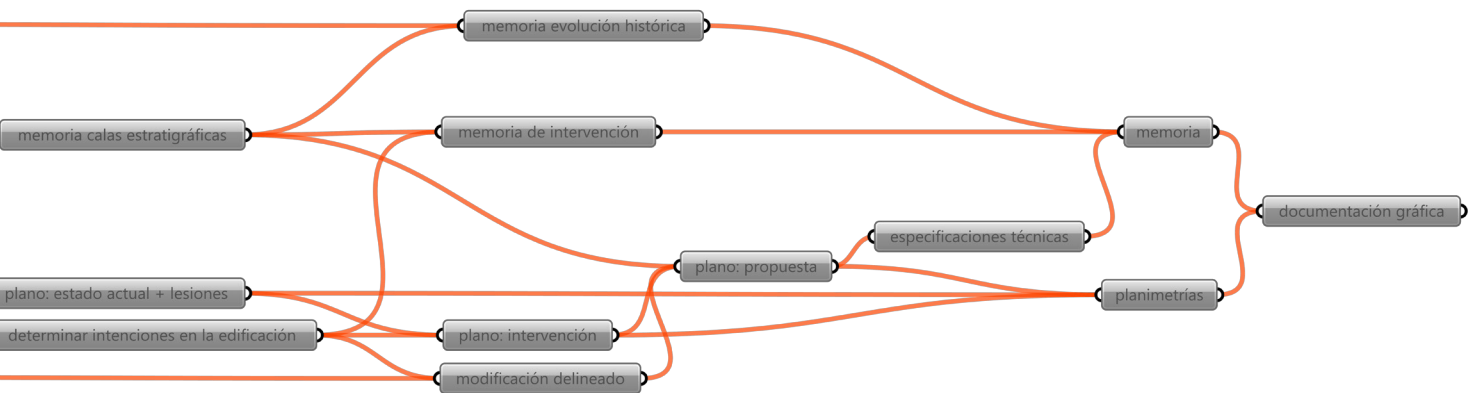


Figura 9.5. Se resalta el proceso de ruta crítica
 Fuente: Elaborado por el autor.



La ortoimagen exportada no siempre estará completa al 100%: es recomendable un retoque en Photoshop para facilitar el trabajo de interpretación al momento del delineado (Figura 9.4).

Una vez que se tiene el delineado, se procede a trabajar de forma secuencial, primero para elaborar el plano de estado actual con lesiones, luego el plano de intervención y, finalmente, el plano de propuesta (Figura 9.5).

El siguiente paso consiste en identificar las lesiones empleando las fotografías y las anotaciones realizadas en el trabajo de campo como referencia. Con esa información se completa el plano de estado actual con lesiones.

A continuación se elabora el plano de intervención que, sobre la base de la investigación histórica y el plano de estado actual, permite determinar las intenciones en la edificación.

Finalmente, respecto a las planimetrías, se elabora el plano de propuesta. Para ello se utiliza como base el delineado de la elevación y se modifica el dibujo según lo indicado en el plano de intervención.

Una vez finalizado el plano de propuesta, se puede terminar de realizar la memoria del proyecto con las especificaciones técnicas de la propuesta.

Aplicación del Método en Seis Casos de Estudio

Su versatilidad y fácil manejo automatizado permitieron explorar el resultado de un proceso fotogramétrico híbrido de SfM. Por esta razón, para el presente artículo se seleccionaron seis casos en función a su alto rendimiento en términos de eficacia y eficiencia en la elaboración del documento gráfico, tomando el tiempo en la cantidad de personal empleado para cada proceso del desarrollo de los expedientes técnicos.

Caso 1: Escuela Nacional Superior de Bellas Artes y muro lateral - Barrios Altos

El antiguo Hospital de San Pedro -hoy Escuela Nacional Superior de Bellas Artes-, un extenso edificio virreinal de un solo nivel en esquina, fue construido entre 1920 y 1924 por Manuel Piqueras Cotoí (Figura 10).

Respecto del proceso SfM, la complejidad del edificio estaba en el nivel de detalle de la fachada de ladrillo: era importante registrar el tamaño, así como la distribución fiel de cada ladrillo. La sorpresa fue descubrir que la nube de puntos del muro lateral, cubierto de grafiti, había capturado casi el 95% de la integridad de las pinturas. Por lo tanto, se logró registrar el arte urbano del muro lateral (Figura 11).



Figura 10. Ortoimagen de ambas fachadas de la Escuela Nacional Superior de Bellas Artes

Fuente: Elaborado por el autor.

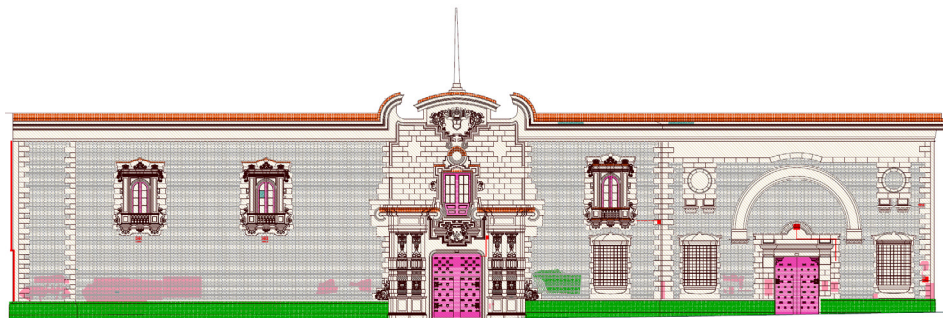


Figura 11. Ortoimagen y levantamiento arquitectónico con lesiones, Escuela Nacional Superior de Bellas Artes

Fuente: Elaborado por el autor.



El método empleado fue el siguiente (Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19):

Input: Fotografías: 126 / Resolución de la cámara: 3648 x 2736: 180 ppp

Construcción de nube de puntos: Tiempo de espera: 47.6 min / Densidad: 5'201,947 puntos

Imagen rasterizada: La calidad de las imágenes obtenidas permitió el delineado detallado de la fachada, e identificar al 100% las lesiones y daños patológicos.

Caso 2: Iglesia Santa Ana – Barrios Altos

Se trata de una edificación religiosa ubicada en esquina, con pequeño atrio abierto sobre la fachada lateral en Jr. Huanta y un minúsculo retiro cercado sobre Jr. Huallaga. La fachada principal da al Jr. Huallaga y está compuesta por una portada flanqueada por dos torres (Figuras 20 y 21).

Durante el proceso SfM, se logró obtener la huella del edificio, incluyendo las cúpulas y las linternas, para lo cual se accedió al segundo piso de la calle del frente para tomar fotografías desde un punto más alto. Existe una plaza en la esquina, lo que permitió tener más espacio para alejarse y tomar fotos más completas.



Figura 12. Ortoimagen, lesiones con pintura

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 13. Ortoimagen, detalles arquitectónicos

Fuente: Elaborado por el autor

Figura 14. Ortoimagen, detalle de fachada

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 15. Ortoimagen, grafiti 01

Fuente: Elaborado por el autor



Figura 16. Ortoimagen, grafiti 02

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 17. Ortoimagen, grafiti 03

Fuente: Elaborado por el autor



Figura 18. Ortoimagen, grafiti 04

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 19. Ortoimagen, grafiti 05

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 20. Ortoimagen, elevaciones Iglesia Santa Ana

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 21. Ortoimagen, planta, Iglesia Santa Ana

Fuente: Elaborado por el autor.



ORTOIMAGEN



ESTADO ACTUAL

Figura 22. Ortoimagen y levantamiento, estado actual con lesiones, Iglesia Santa Ana

Fuente: Elaborado por el autor.

El método empleado fue el siguiente (Figuras 22, 23 y 24):

Input: Fotografías: 112 / Resolución de la cámara: 3648 x 2736: 180 ppp

Construcción de nube de puntos: Tiempo de espera: 51.1 min / Densidad: 1'539,560 puntos

Imagen rasterizada: La buena calidad de las imágenes obtenidas permitió el delineado detallado de la fachada; se identificó al 80% las lesiones y daños patológicos.

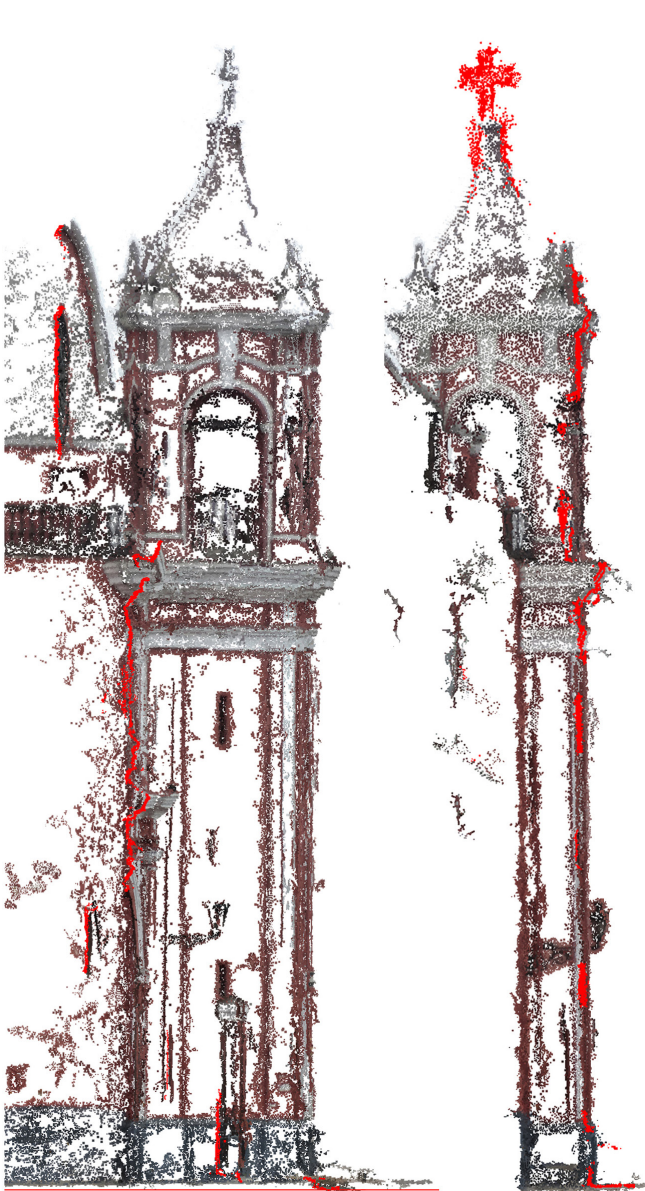


Figura 23. Nube de puntos. Corte de torre y fachada lateral de la Iglesia Santa Ana

Fuente: Elaborado por el autor.

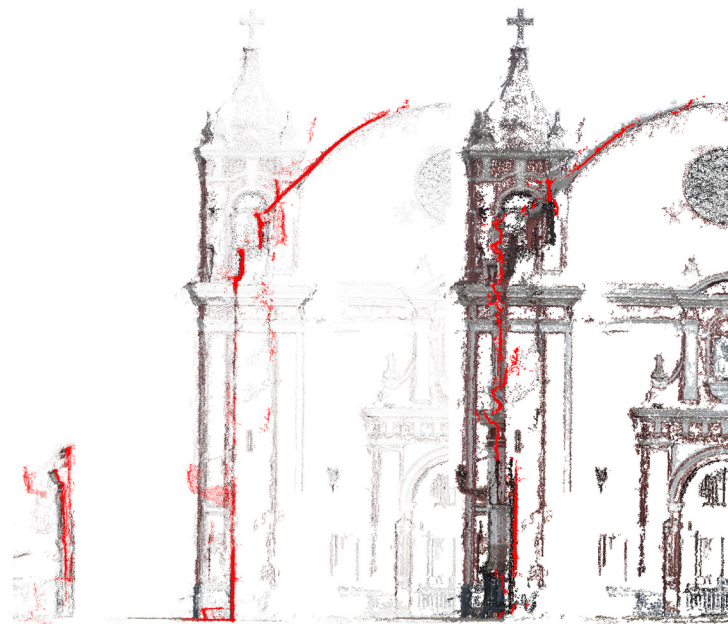


Figura 24. Ortoimagen, corte longitudinal del muro, nave de la Iglesia Santa Ana

Fuente: Elaborado por el autor

Caso 3: Iglesia Descalzos de San José – Barrios Altos

Esta extensa edificación religiosa está conformada por una iglesia ubicada en esquina, con frente hacia la Plaza Santa Ana- y un monasterio. El ingreso al monasterio está en el Jr. Junín, a través de un bloque moderno de dos pisos con sencilla portada de un cuerpo, puertas de tienda en primer nivel y sencillas ventanas en el segundo (Figuras 25, 26 y 27).

Respecto del proceso SfM, en este caso lo más relevante fue poder obtener, además de la huella, la geometría de una esquina con ángulo obtuso (que solo se puede apreciar en planta). El nivel de detalle con que se registró la lesión sufrida en uno de sus muros de adobe permite apreciar la pérdida de masa.



Figura 25. Ortoimagen, elevaciones, iglesia Descalzos de San José

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 26. Ortoimagen, planta, iglesia Descalzos de San José

Fuente: Elaborado por el autor.

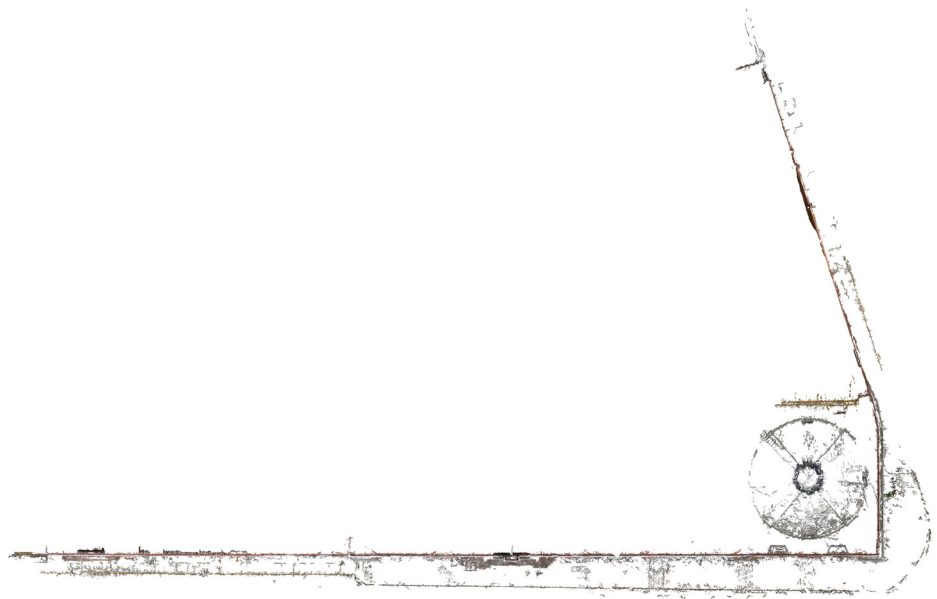


Figura 27. Ortoimagen, detalle de lesión, iglesia Descalzos de San José

Fuente: Elaborado por el autor.



El método empleado fue el siguiente (Figuras 28, 29, 30 y 31):

Input: Fotografías: 262 / Resolución de la cámara: 4608 x 3456: 180 ppp

Construcción de nube de puntos: Tiempo de espera: 47.6 min / Densidad: 5'201,947 puntos

Imagen rasterizada: La buena calidad de las imágenes obtenidas permitió el delineado detallado de la fachada; se identificó al 100% las lesiones y daños patológicos.



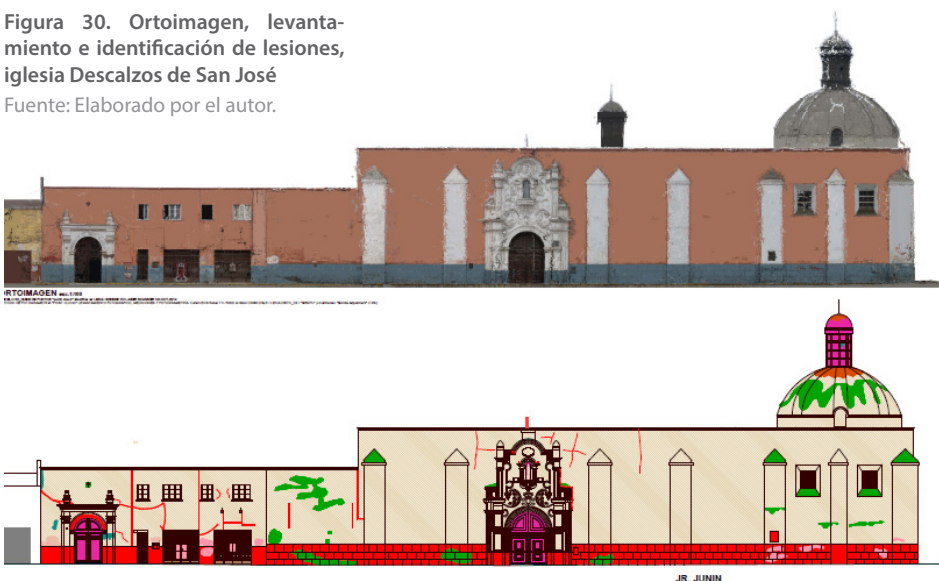
Figura 28. Ortoimagen, detalle de lesiones, iglesia Descalzos de San José
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 29. Portada mayor, iglesia Descalzos de San José
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 30. Ortoimagen, levantamiento e identificación de lesiones, iglesia Descalzos de San José
Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 31. Ortoimagen, detalle de las tres cruces, iglesia Descalzos de San José
Fuente: Elaborado por el autor.



Caso 4: Muro del Antiguo Convento de San Francisco – Barrios Altos

Esta fachada corresponde al antiguo cerco perimétrico del convento franciscano del Nombre de Jesús de Lima. Consiste en un muro ciego de arcos de ladrillo -aún perceptible debajo del revoque- y relleno de adobe.

Durante el proceso SfM, sorpresivamente se logró capturar una gran cantidad de lesiones, agujeros, perforaciones y pintas en todo el muro, pero lo más relevante fue la aparición de las rajaduras del muro y las formas de los arcos arbotantes que aún lo mantienen en pie (Figura 32).

El método empleado fue el siguiente (Figuras 33, 34, 35 y 36):

Input: Fotografías: 51 / Resolución de la cámara: 3648 x 2736: 180 ppp

Construcción nube puntos: Tiempo de espera: 64.8 min / Densidad: 2'201,138 puntos

Imagen rasterizada: La buena calidad de las imágenes obtenidas permitió el delineado detallado de la fachada; se identificó al 100% las lesiones y daños patológicos.



Figura 32. Ortoimagen, elevación del muro, antiguo Convento de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.

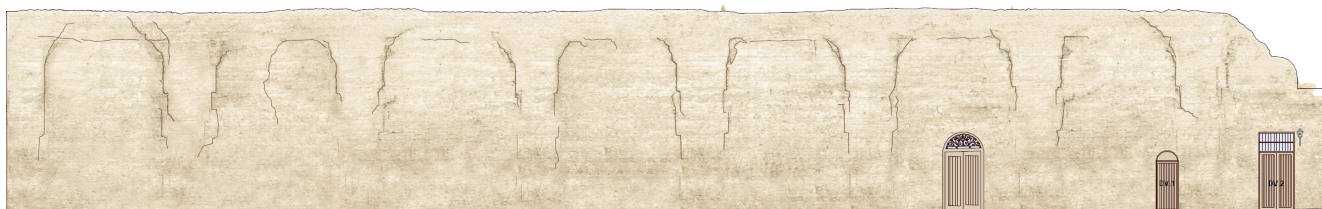
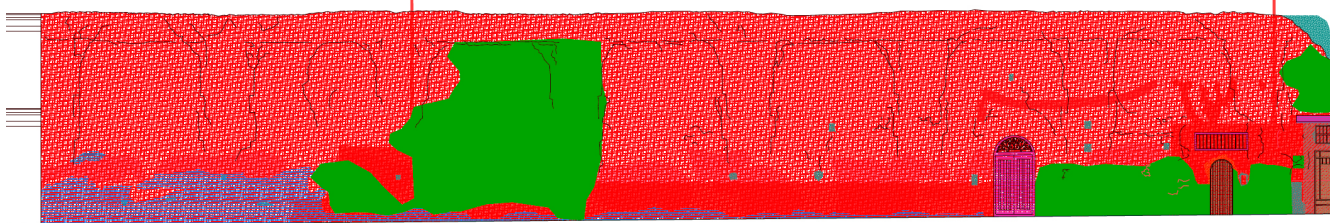


Figura 33. Ortoimagen, elevación, propuesta de mejoramiento del muro, antiguo Convento de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.



ESTADO ACTUAL esc.1:75



Figura 34. Ortoimagen, elevación, estado actual con lesiones del muro, antiguo Convento de San Francisco
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 35. Ortoimagen elevación, detalle de lesiones del muro, antiguo Convento de San Francisco
Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 36. Ortoimagen, elevación, detalle de lesiones del muro, antiguo Convento de San Francisco
Fuente: Elaborado por el autor.

Caso 5: Cúpula Mudéjar de la Iglesia de San Francisco – Cercado de Lima

En este proceso SfM, la complejidad residía en lograr reproducir la cúpula de la iglesia de San Francisco con todos los detalles de su carpintería mudéjar. Por esa particularidad, se requirió de una computadora con las mejores prestaciones posibles, capaz de realizar los complejos cálculos necesarios para identificar el intrincado revestimiento de madera.

El método empleado fue el siguiente (Figura 37, 38, 39 y 40):

Input: Fotografías: 75 / Resolución de la cámara: 3000 x 4500: 300 ppp

Construcción nube puntos: Tiempo de espera: 32.7 min / Densidad: 783,026 puntos

Imagen rasterizada: No se pudo realizar completamente el detallado del revestimiento de madera; solo se obtuvo imágenes referencias útiles para corroborar dimensionamientos generales o modulaciones.

Figura 37. Ortoimagen de la cúpula mudéjar, iglesia de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 38. Perspectiva isométrica de la cúpula mudéjar, iglesia de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 39. Ortoimagen, elevación de la cúpula mudéjar, iglesia de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.

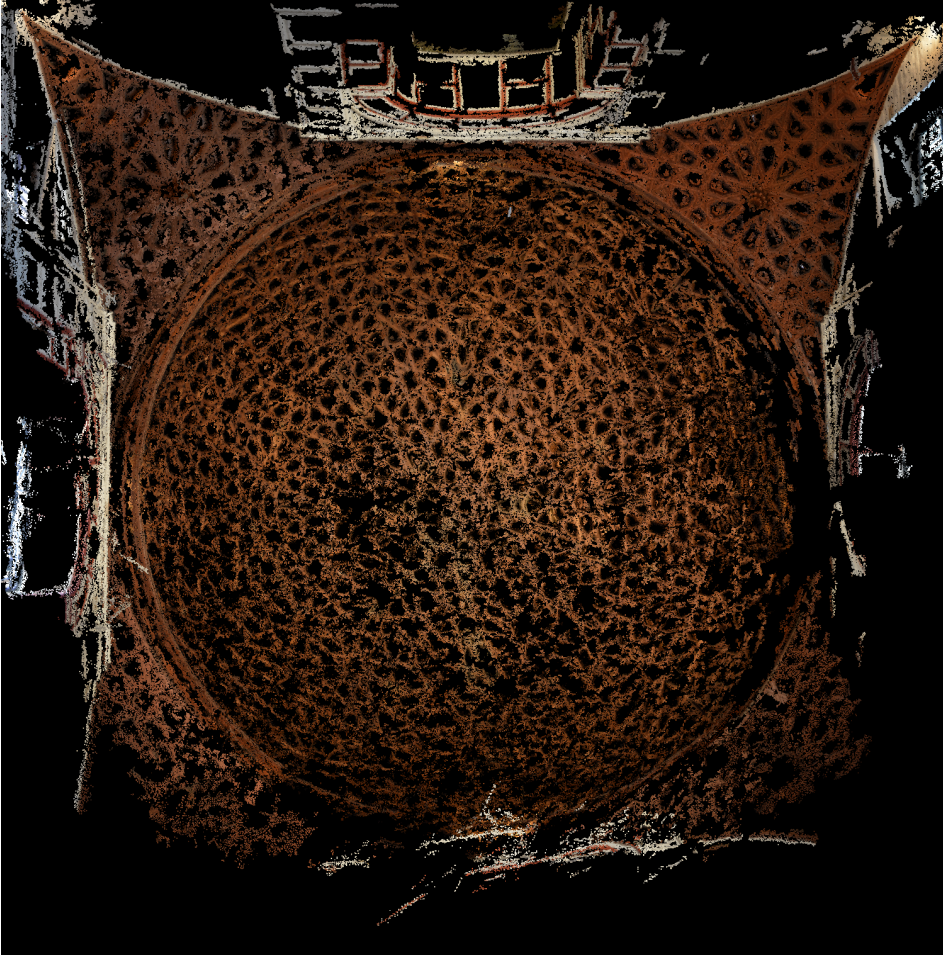


Figura 40. Ortoimagen, elevación de la cúpula mudéjar, iglesia de San Francisco

Fuente: Elaborado por el autor.

Caso 6: Casona declarada Monumento, Jr. Trujillo 334 – Rímac

El área a intervenir corresponde al segundo nivel de la primera crujía de una casa republicana. La distribución original de la casa ha sido modificada, ha perdido la escalera original y las crujías posteriores (Figuras 41, 42, 43 y 44).

Figura 41. Ortoimagen, planta de la Casona Jr. Trujillo

Fuente: Elaborado por el autor.

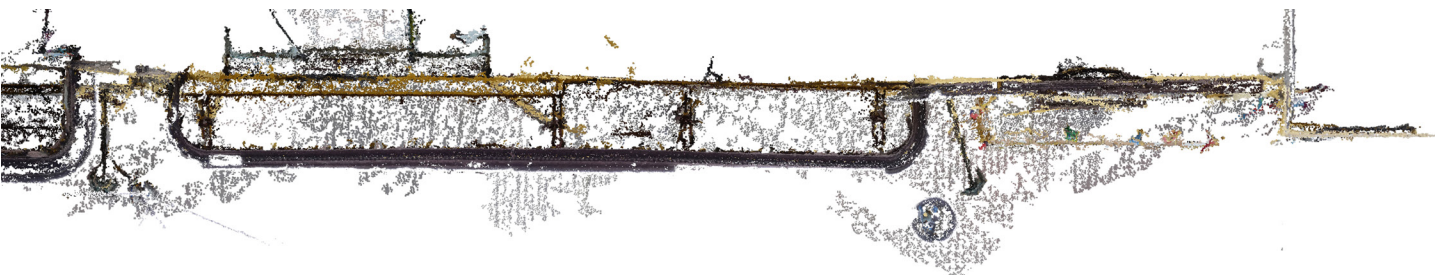


Figura 42. Ortoimagen, elevación del balcón de la Casona Jr. Trujillo
 Fuente: Elaborado por el autor.

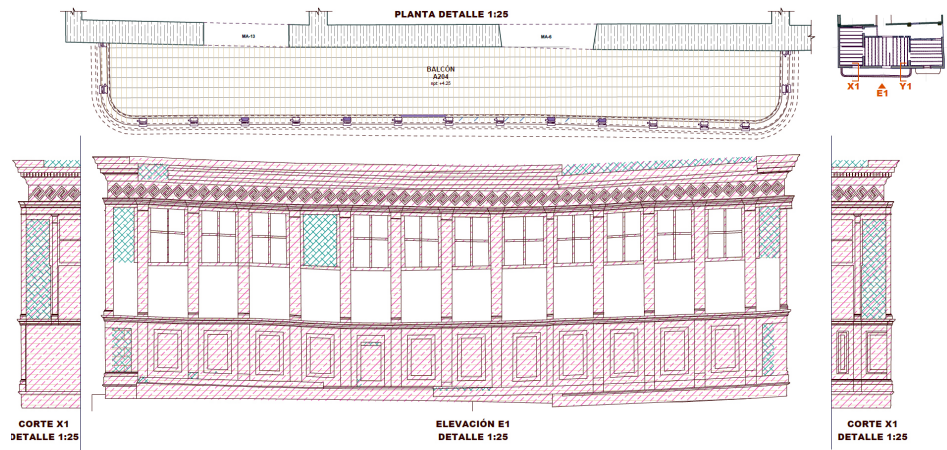


Figura 43. Planimetrías del balcón de la Casona Jr. Trujillo
 Fuente: Elaborado por el autor.



Figura 44. Ortoimagen, levantamiento de estado actual con lesiones, fachada de la Casona Jr. Trujillo
 Fuente: Elaborado por el autor.



Conclusiones

Los procesos realizados empleando SfM son de gran ayuda para la documentación del patrimonio edificado. Desde el punto de vista técnico-económico, resulta una buena alternativa para realizar documentación de bajo costo. Desde el punto de vista técnico, existen numerosos puntos a favor, como los siguientes:

- Precisión geométrica
- Accesibilidad
- Rapidez
- Es automatizado
- El nivel de detalle es controlable en función a la cantidad y resolución de las fotografías.
- Permite registrar en lugares de difícil acceso para instrumentos basados en LIDAR o luz estructurada.
- Requiere de poco tiempo, lo cual permite concentrar el trabajo de campo en la observación y detección de lesiones, pues ya no requiere de una planificación para las tomas fotogramétricas.
- La nube de puntos densa resultante del uso de SfM es fácilmente integrable a otros flujos de trabajo, que respectivamente permiten lo siguiente:
 - Generar un modelo 3D de malla triangulada y con un mapa de textura, potente representación virtual para animaciones y reconstrucciones
 - Trabajar actualmente con el BIM -Archicad19-
 - Ortoimágenes sin problemas o errores de perspectiva
 - Perfiles de las secciones o cortes
 - Es aplicable para realizar levantamientos en un terreno de forma y acceso complicado.
 - Genera la huella del edificio y de sus elementos principales como: las cúpulas, bóvedas o portada de una iglesia, las cuales son zonas usualmente inaccesibles.

Las técnicas de SfM recién empiezan a desarrollarse, y con el avance tecnológico como soporte tienen mucho potencial a corto y largo plazo.

Desde el punto de vista económico, respecto a las técnicas tradicionales de fotogrametría o de levantamiento manual, el empleo de SfM significa una notable reducción de costos, ya sea por equipos o por personal. Lo mejor es que con el mismo personal se puede hacer más por el registro, pues ahora el tiempo del que se dispone para el trabajo de campo se concentra en su mayoría a la observación y recolección de información, lo cual permite más importancia al trabajo de reconocer lesiones y patologías, favoreciendo la restauración.

Los procesos SfM han sido aplicados a diversos campos: por ejemplo, en la ciencia forense -que se empleó como referencia para el método aquí desarrollado-, mediante las fotografías de una huella de neumáticos (evidencia), se puede generar un modelo 3D susceptible de ser impreso para obtener un modelo de reproducción, utilizando yeso, por ejemplo.

Es importante el criterio de interpretación por parte de los especialistas, ya que para algunos definir detalles arquitectónicos se deberá recurrir a fotos y mediciones de campo, por lo que el dibujo no debe excluir ningún tipo de información; más bien

debe registrarse gráficamente el desgaste y el paso del tiempo, así como las malas prácticas de mantenimiento, para garantizar los resultados del estudio.

Cabe recordar que este método no requiere de ningún tipo de capacitación o del uso de instrumentos sofisticados; tampoco es necesario calibrar cámaras o colocar marcadores en el edificio. Por el contrario, se trata de un proceso bastante simple y efectivo, que puede resultar en un alto nivel de precisión si se tienen en cuenta las consideraciones mencionadas en la metodología. También es recomendable elaborar y seguir un protocolo de trabajo -se maneja mucho material fotográfico- para poder realizar una adecuada sistematización de la información.

Referencias

Changchang, W. (2007). *SiftGPU*. Recuperado el 15 de 09 de 2014 de <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>

Changchang, W. (03 de setiembre de 2011). *VisualSFM*. Recuperado el 15 de 09 de 2014 de <http://ccwu.me/vsfm/>

Changchang, W., Agarwal, S., Curless, B., & Seitz, S. M. (8 de enero de 2011). *Multicore bundle adjustment*. Washington.

Furukawa, Y. (17 de julio de 2010). *Clustering views for multiview stereo (CVMS)*. Recuperado el 15 de 09 de 2014 de <http://www.di.ens.fr/cmvs/>

Hartley, R. & Adrew, Z. (2004). *Multiple view geometry in computer vision*. New York: Cambridge University Press.

ISTI & CNR. (2 de abril de 2014). *Meshlab*. Recuperado de <http://meshlab.sourceforge.net>

Jauregui, L. (27 de junio de 2010). *Instituto de Fotogrametría, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes - Venezuela*. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/>

Jiménez, A. & Pinto, F. (2003). *Levantamiento y análisis de edificios. Tradición y futuro*. Sevilla, España: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

Josefina, G. L. (24 de enero de 2007). *Principios de la fotogrametría convergencia en la fotogrametría arquitectónica*. Extremadura, España: Universidad de Extremadura.

Lowe, D. (setiembre de 1999). *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*. Recuperado de <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>

Pereira, J. M. (diciembre de 2013). *Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion*. Recuperado de <http://www.iaph.es/phinvestigacion/index.php/phinvestigacion/article/view/12/33>

Pérez, C. (junio de 2006). *Aplicaciones de la fotogrametría convergente en la restauración y rehabilitación de edificios*. Recuperado de <http://oa.upm.es/5852/>

Talaverano, R. M. (enero-diciembre de 2014). Documentación gráfica de edificios históricos: Principios, aplicaciones y perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura*, 11, 26.