

NUEVAS TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS TRADICIONALES EN EL LEVANTAMIENTO DE PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO.

José Lázaro AMARO MELLADO
María AGUILAR ALEJANDRE
José Antonio BARRERA VERA

Universidad de Sevilla
Departamento de Ingeniería Gráfica

Resumen

El propósito de esta comunicación es demostrar, tomando como hilo argumental trabajos realizados como prácticas de alumnos, cómo empleando herramientas de bajo coste y aplicando adecuadamente las nuevas tecnologías, pueden efectuarse levantamientos de edificios patrimoniales gracias a una combinación de métodos tradicionales y nuevas tecnologías. Estos trabajos están encaminados a generar documentos gráficos (la mayoría de las veces tridimensionales) que sirvan como inventario del patrimonio, pero también como punto de partida para realizar intervenciones sobre el mismo. La documentación generada abarca desde dibujos de líneas hasta modelados 3D con texturas, consiguiéndose dichos resultados con escaso coste tanto económico como humano. Los elementos que conforman el patrimonio están sujetos a cambios con lo que resulta muy útil tenerlos documentados en una fecha determinada. Así, se puede establecer su evolución en el tiempo ya que los edificios están sometidos a un riesgo de deterioro, destrucción, o simplemente estudiarlos desde la observación.

Abstract

The aim of this paper is to demonstrate, basing our argument on several heritage documentation works elaborated as students work placements, how with low cost tools and applying new technologies properly, heritage building surveys can be done using a mixture of traditional and newer methods. These studies are designed to generate graphic documents (most of them in 3D) that can be useful as heritage inventory, but also as a starting point to carry out performances in it. Generated documentation may cover from line drawing to 3D textured models, achieving these results with a low economic and human cost. Elements which make up heritage, particularly architectonic elements, are always changing therefore it is very worthwhile to document on a specific date. Thus, evolution over time can be supervised because buildings are exposed to deterioration risks, destruction, or simply to study them from watching them.

INTRODUCCIÓN

Actualmente las nuevas tecnologías se extienden dentro de todos los ámbitos de la sociedad. En el caso del campo del patrimonio cultural están cobrando un auge cada vez mayor debido a la existencia de herramientas tecnológicas, tanto informáticas como "instrumentales", que facilitan los distintos trabajos de documentación e investigación patrimonial. Dichos dispositivos, que en un principio presentaban ciertas dificultades en su manejo y un elevado coste económico, han evolucionado hasta tal punto que aparecen hoy día como herramientas sencillas y de bajo coste. Este hecho ha procurado una democratización en el uso de las nuevas tecnologías aplicadas a la documentación del patrimonio por parte de los distintos técnicos.

OBJETIVOS

El propósito de esta comunicación es demostrar cómo con tan sólo una cámara digital, una cinta métrica, un portátil, el software adecuado y los conocimientos de geometría precisos, pueden llevarse a cabo levantamientos de edificios patrimoniales de gran complejidad gracias a una combinación de métodos tradicionales y novedosos. La documentación generada puede abarcar desde dibujos de líneas hasta modelados 3D con texturas, consiguiéndose dichos resultados con escaso coste tanto económico como humano.

Para demostrar este hecho tomaremos como hilo argumental varios de los trabajos de documentación patrimonial llevados a cabo por el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla como prácticas de los alumnos de la asignatura optativa de cuarto curso "Nuevas Tecnologías en Levantamientos Arquitectónicos"- "New Technologies en Architectural Surveys" (actualmente también se imparte en lengua inglesa). En dichos trabajos se han utilizado tanto los métodos gráficos convencionales -rectificación de fachadas a través de doble homología (Maestre, 2000) o el método ideado por Barrera (2006)-, hasta las más modernas aplicaciones tecnológicas como el escáner láser que genera nubes de millones de puntos así como los programas que las gestionan. Estos trabajos están encaminados a generar documentos gráficos (la mayoría de las veces



tridimensionales) que sirvan como inventario del patrimonio, pero también como punto de partida para realizar intervenciones sobre el mismo. Los elementos que conforman el patrimonio, en particular el arquitectónico, están sujetos a cambios con lo que resulta muy útil tenerlos documentados en una fecha determinada. Así se puede determinar su evolución en el tiempo ya que los edificios están sometidos a un riesgo de deterioro y destrucción, debida tanto a fenómenos naturales como a actuaciones humanas, o simplemente se posibilita el estudiarlos desde un papel, una pantalla de ordenador o una maqueta.

FOTOGRAMETRÍA BÁSICA Y LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

La fotogrametría trata de obtener información métrica y visual de objetos a partir del registro, medida y análisis de tomas fotográficas. Tradicionalmente ha estado básicamente orientada a la confección de mapas topográficos a partir de fotogramas aéreos, empleando instrumental muy específico y costoso como cámaras métricas, restituidores, estaciones fotogramétricas y personal de alta cualificación, sin embargo, hoy día dicho equipamiento es cada vez más asequible pudiéndose así utilizar en otros campos de forma asidua como es el caso de la fotogrametría de objeto cercano (*close-range photogrammetry*), comúnmente empleada para el levantamiento de patrimonio arquitectónico.

El objetivo de la fotogrametría es reconstruir la posición y orientación de la/s cámara/s en el momento de la toma, para definir el haz proyectivo en el espacio (*orientación interna*: distancia focal, punto principal y función de distorsión; y *orientación externa*: posición y orientación, tres ángulos), y consecuentemente, calcular la posición del conjunto de puntos que conforman nuestro levantamiento. Las condiciones geométricas de las tomas son muy estrictas, especialmente en fotogrametría estereoscópica, en cuanto a ángulos de inclinación, solapamiento, estereoscopia y calibración de las cámaras, entre otras limitaciones por lo que, si se requiere una alta precisión en el levantamiento, conviene ser muy riguroso en esta primera etapa.

En el proceso de restitución la fidelidad métrica va a verse distorsionada por dos factores fundamentales: la deformación perspectiva y la aberración de las lentes. La primera de ellas deriva de la transformación homográfica realizada para pasar de una perspectiva cónica a una proyección, mientras la segunda se debe a la mera aberración que introducen las lentes a la propia toma fotográfica distinguiéndose principalmente dos tipos de distorsión, la radial y la tangencial cuyo efecto en la imagen será el conocido como barril-cojín. Esta aberración no puede ser eliminada, pero sí conocida a través de la calibración de la cámara –diferente para cada conjunto de parámetros de la cámara–. Con ella se obtiene la función de distorsión, que establece la relación entre los ángulos de entrada y salida del objetivo, que idealmente deberían ser idénticos. El efecto barril es más que evidente en la parte superior de la figura 1 realizada a un patrón de calibración.

576

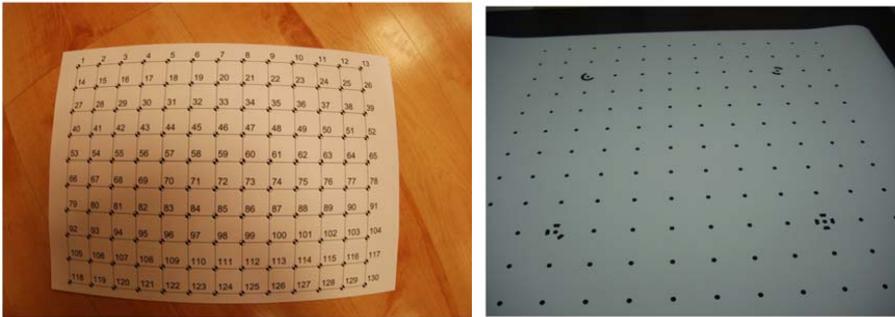


Figura 1. Patrones de calibración fotografiados. El de arriba es el propio del programa Asrix y el de abajo del programa Photomodeler. Alumnos de la asignatura Nuevas Tecnologías en Levantamientos Arquitectónicos

Según el proceso utilizado a la hora de tomar las fotografías del modelo y su posterior procedimiento de restitución, vamos a distinguir entre dos tipos de fotogrametría principales: la *monoscópica convergente*, en la cual las fotografías se han tomado desde puntos de vista independientes, y la *estereoscópica*, la cual permite la obtención de un modelo idéntico al original a través de pares de fotografías tomados bajo determinadas condiciones. Es el momento ahora de aclarar que en lo que a levantamientos de arquitectura se refiere, se utilizará la primera de las opciones cuando el objeto arquitectónico presente una geometría sencilla y pura, y la segunda como método más eficaz para volúmenes y formas complejas (Buill, 2007).

Fotogrametría monoscópica

Para entender cómo funciona la fotogrametría monoscópica aplicada al levantamiento de edificios, se expondrán varios métodos a lo largo de esta comunicación que irán creciendo en nivel de complejidad. Como comienzo, se tomará el caso de cómo levantar una fachada plana utilizando una fotografía, un par de medidas y una serie de transformaciones geométricas. Este método, que podría calificarse con el adjetivo de manual, servirá también como contraste en relación a aquellos otros más avanzados que se verán más adelante.

Como punto de partida, consideraremos pues, una técnica monoscópica específicamente geométrica, basada en la aplicación de los principios de la perspectiva cónica a fotografías oblicuas obtenidas con cámaras convencionales. Se trata de un método gráfico a partir del cual se obtiene información métrica de uno de los planos que aparezcan en la fotografía, mediante la transformación de la perspectiva cónica en una proyección ortogonal. Al tratarse de un método monoscópico, para resolver el haz proyectivo y determinar la geometría tridimensional del objeto a partir de su representación plana, se requiere que éste presente una geometría robusta (*strong geometry*) consistente en la presencia de aristas paralelas y un plano bien definido. Estas condiciones comúnmente se dan en gran parte de los edificios y arquitecturas que pueblan nuestro entorno.

Se trata de rectificar un plano cualquiera representado en la fotografía, en otras palabras, situar el plano objeto paralelo al plano del cuadro, para lo cual existen multitud de métodos, pero se han elegido como muestra el método de la doble homología (Maestre, 2000), consistente en pasar de un trapecoide a un rectángulo a través de un trapecio auxiliar. Para ello, como datos de partida se deben tener dos medidas -una horizontal y otra vertical- sobre el plano que se quiera rectificar y la propia fotografía. Cuanto mayores sean las distancias de referencia, menor será el error relativo obtenido. En el caso de optar por este método, la aplicación de programas de CAD es especialmente útil, ya que se pueden considerar escalas diferentes según las X y las Y, lo que hace la rectificación sea viable aunque no se conozcan esas distancias de referencia al realizar los pasos trapecoide-trapecio-rectángulo. En este caso, luego habría que escalar el resultado con factores diferentes para la X y para la Y.

Una característica de la perspectiva cónica y por tanto de la fotografía es que las líneas que son paralelas en la realidad convergen en un mismo punto en la representación. Los puntos de la perspectiva donde confluyen las líneas paralelas se denominan puntos de fuga (*vanishing points*).

Estos métodos, puramente gráficos, se ven fuertemente beneficiados por la utilización de programas de Diseño Asistido por Ordenador, CAD (*computer-aided design*) dado que el trazado y prolongación de las rectas, la determinación de las intersecciones y el trazado de paralelas y perpendiculares, etc. se hacen de una forma analítica, con unos errores despreciables, aparte de las ventajas de propias de visualización, edición, etc. Además, estos programas, aunque estén diseñados para el trazado vectorial, suelen tener aplicaciones que permiten visualizar imágenes, sobre las que "calcar" los elementos fundamentales de lo fotografiado.

Esta rectificación, hecha de forma "manual", se puede realizar también de manera automática, gracias a aplicaciones como Homograf, una herramienta diseñada para AutoCAD (Maestre, 2000) con la que definiendo cuatro de puntos de un plano en la fotografía y sus homólogos según el plano rectificado (normalmente un rectángulo) calcula la transformación proyectiva de 8 parámetros que los vincula. Así, todo lo que se "calque" sobre la fotografía será representado en verdadera magnitud en el rectángulo contenedor. Lo apuntado anteriormente sobre el empleo de escalas X e Y diferentes es válido también para esta metodología.

Una vez que la imagen ha sido rectificada, lo que se dibuje sobre la misma, en el plano de referencia, estará en verdadera magnitud, con lo que, por ejemplo, dibujar un alzado con precisión es viable sin problemas geométricos.



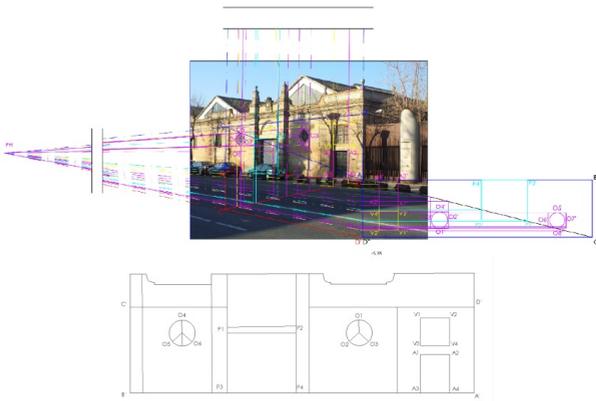


Fig 2. Arriba. Restitución de elementos de fachada contenidos en un mismo plano por el método de doble homología. Abajo. Restitución de los mismos elementos mediante Homograf. Nave en Avda. de la Raza (Sevilla) realizada con motivo de la Exposición Universal de 1929. Trabajo del alumno Emilio López Algaba (2012).

Con estos dos métodos hemos conseguido corregir el efecto de la deformación perspectiva, pero no hemos podido corregir la imagen de los problemas generados por la/s lente/s, que en los casos de buscar cierta precisión es indispensable abordarlos. Esto se conseguiría con la calibración de la lente para lo que se emplea un patrón de calibración, habitualmente una cuadrícula cuyos puntos tienen coordenadas conocidas, y gracias a los cuales puede calcularse la deformación.

También en ambos métodos hemos trabajado dibujando líneas teniendo como fondo la imagen y haciendo transformación con aquéllas. Otro de los métodos de trabajo de la fotogrametría monoscópica consiste en rectificar directamente la imagen, y no las líneas "calçadas" sobre ella, con programas como Asrix –que además permite calcular y considerar la distorsión radial a través de un patrón de calibración, como los mostrados en la figura 1–, el cual puede descargarse en versión demo durante 50 días. El fundamento es el mismo que el citado anteriormente, se pasa de un plano original a otro según una proyección ortogonal, solo que requiere que la transformación calculada sea aplicada a cada píxel de la imagen, en lugar de los puntos que definen las líneas. Así, se identifican puntos en la imagen cuyas coordenadas en el terreno sean conocidas (una opción es considerar una medida horizontal y otra vertical, como en los casos anteriores), obteniéndose la transformación que se aplica a la imagen. El número mínimo de puntos a identificar es cuatro, pero se pueden medir más y así tener un parámetro del error obtenido en la transformación.

578



Fig 3. Izquierda. Fotografía de Zollverein Design School realizado por SANAA en Essen (Alemania). Derecha. Imagen rectificada del mismo. Elaboración propia..

En este punto se debe diferenciar una fotografía rectificada de una ortofotografía: en la primera se transforma un plano de la fotografía, varios si se hacen a distintas profundidades, pero uno cada vez, en un plano según una proyección ortogonal, pero la imagen correspondiente a los puntos fuera de ese plano de la fotografía no estarán en su posición correcta en el fotografía rectificada ya la que la transformación no está hecha punto a punto, sino globalmente. Sin embargo, en la ortofotografía, la rectificación es diferencial, punto a punto, para lo cual es necesaria la información sobre la profundidad de cada punto sobre el plano de referencia y la aplicación de la condición de *colinealidad* (el punto en el terreno-fachada, el punto en la fotografía y el punto de pista están alineados). La ortofotografía es válida métricamente al igual que un plano-mapa. Ambas son imágenes no interpretadas, lo que puede ser una ventaja o un inconveniente dependiendo de las circunstancias. En el caso de los levantamientos arquitectónicos, la ortografía y la fotografía rectificada son de gran utilidad para la representación de alzados de edificios a escala y con texturas.

Hasta aquí han sido comentadas soluciones referentes a planos individuales, pero no a objetos tratados en su conjunto. En cualquier caso, son métodos en los que solo se emplea una única fotografía, con lo que la complejidad de los elementos a levantar no puede ser muy elevada. Otro paso más es trabajar con varias fotografías diseñando un marco, rectificar fachada a fachada y componerlas "manualmente" –para lo cual hay que conocer que forman las fachadas entre sí– y generar un "sólido" –que en realidad está hueco–.

Un salto conceptual es la generación de productos tridimensionales, para lo cual los puntos definitorios del objeto deben ser captados al menos en dos fotografías, para así poder obtener su posición tridimensional, basándonos en conceptos como el *paralaje* o la condición de *colinealidad*. En estos métodos todos los cálculos son analíticos y siempre habrá que considerar el error estimado.

La fotogrametría convergente permite determinar con gran precisión las coordenadas de puntos individuales gracias al cálculo de la intersección de rayos homólogos, es decir, los que se dirigen desde cada fotografía al mismo punto en el terreno-fachada. Hay que identificar los puntos uno a uno. El principio fundamental es el de *colinealidad*, que aplicado a distintas fotografías desemboca en el ajuste de haces de rayos, a través del cual se resuelve la posición de cada punto mediante sistemas de ecuaciones. El resultado será la determinación de las coordenadas de múltiples puntos (definitorios de las superficies-planos de interés). Cobra su mayor potencialidad cuando los elementos de interés son parametrizables, bien mediante líneas-planos, bien mediante superficies matemáticas que sigan un patrón a priori.

El procedimiento habitual cuando se emplea fotogrametría monoscópica convergente multifoto para obtener el modelo de un objeto arquitectónico consiste en, una vez realizadas las tomas fotográficas e introducidas éstas en el software específico, calcular la posición de las cámaras a través de la identificación de puntos comunes y posteriormente obtener las coordenadas de todos los puntos de interés. Cuando este proceso ha sido llevado a cabo, el siguiente paso no es otro que definir la geometría parametrizable del modelo a través de curvas, superficies y volúmenes. Culminadas estas dos etapas esenciales, dispondremos de un modelo previo al que podremos dar salida en diferentes formatos, tanto 3D, como 2D con y sin texturas.



Fig 4. Modelo 3D con texturas del edificio de Caja España (Sevilla).
Realizado por los alumnos de la asignatura Nuevas Tecnologías en Levantamientos Arquitectónicos.



Uno de los problemas con los que nos encontramos en fotogrametría es el referente a las *oclusiones*, pero esta limitación es inherente a la toma fotográfica. Debido a la superposición de volúmenes y superficies, hay puntos que por no aparecer en al menos dos fotografías, no puede ser calculada su posición. Este concepto es muy importante tenerlo en cuenta a la hora de la realización del trabajo de campo.

Tradicionalmente, las fotos se toman con solape porque solo se puede obtener información métrica tridimensional (sin información adicional, por ejemplo pertenencia a un plano) si el punto a medir es identificable en al menos dos fotogramas.

En el planteamiento docente llevado a cabo en la asignatura de Nuevas Tecnologías en Levantamientos Arquitectónicos impartida en la Escuela Técnica de Ingeniería de Edificación, el proceso de aprendizaje en el que se sumerge el alumno de cuarto curso, ya conocedor de cómo realizar levantamientos por métodos tradicionales no basados en la fotogrametría, es exactamente el mismo explicado hasta ahora. En primer lugar, el alumno aprende a restituir planos de fachada mediante el procedimiento de la doble homología y mediante el uso de la aplicación Homograf, en segundo lugar, entrena la competencia de rectificar imágenes de fachadas planas, y en tercer lugar, se enfrenta a la construcción 3D con texturas de un objeto arquitectónico existente mediante el uso de la fotogrametría monoscópica convergente. Esta última etapa, de mayor complejidad, se aborda poco a poco, comenzando por objetos de geometría muy sencilla hasta llegar a geometrías más complejas. La figura 4 es un ejemplo de ello. Posteriormente, se realiza al alumnado una introducción a la fotogrametría estereoscópica.

Fotogrametría estereoscópica

La fotogrametría estereoscópica, tradicionalmente empleada para formar mapas topográficos, tiene como principio fundamental de paralaje, cuyas condiciones geométricas son muy estrictas. Este método es especialmente útil para el levantamiento de superficies continuas y en él se determinan las coordenadas de una infinidad de puntos, a priori no seleccionados por el operador, que las definen. El resultado será una nube de puntos o un modelo digital del terreno –MDT– (elevaciones, superficies, profundidades), que tendrá la densidad que se desee, aunque lo correcto es que sea acorde a la calidad de los datos de partida. Esta nube de puntos-MDT nos permite obtener, junto con la orientación interna y externa de las fotografías y un plano de comparación, generar la ortofotografía correspondiente

Como ya se ha anunciado más arriba, la toma fotográfica de este tipo de fotogrametría se basa en los pares fotográficos, parejas de fotografías tomadas de dos puntos de vista ligeramente distintos los cuales han de cumplir unas características específicas relacionadas con la distancia de separación entre ambas posiciones de cámara –base–, la distancia entre la cámara y el objeto y el solape entre las tomas. En la fotogrametría estereoscópica la profundidad se hace efectiva en nuestro cerebro al ver el mismo objeto desde dos puntos de vista ligeramente distintos, como es el caso de la visión humana.

También para la generación de modelos utilizando este método existe en el mercado software de relativo bajo coste como es el caso de Photomodeler. El post-proceso, una vez tomados los pares e introducidos en el programa es diferente al protocolo comentado en el apartado de fotogrametría monoscópica multifoto, ya que, aunque se deban identificar puntos comunes para el cálculo, no debe ser impuesta una geometría parametrizable al modelo que será obtenido como nube de puntos. Por ello, como anunciábamos anteriormente, este método es de mayor utilidad en levantamientos de superficies de geometría compleja.

El escáner láser.

Otra forma de realizar levantamientos arquitectónicos de forma más directa pero también mucho más costosa a nivel económico es mediante el empleo de un escáner láser que desde una o varias posiciones vaya registrando grandes cantidades de puntos, con su posición e información de color correspondiente, que posteriormente manipularemos según nuestras necesidades.

Así llegamos a generar el producto más completo, un modelo tridimensional con texturas (RGB); nube de puntos con coordenadas XYZ de cada punto y con el valor de RGB de cada punto medido con el escáner láser, por lo que no requiere interpolación (ver figura 5); lo mismo que obteníamos en el caso de la fotogrametría estereoscópica, salvo que no hay un RGB cada punto sino una porción de la imagen más idónea para cada triángulo de la nube de puntos considerada que sí requiere interpolación.

Una vez que obtenemos esa nube de puntos con texturas se pueden generar multitud de productos derivados, como plantas, alzados, perfiles, secciones, vídeos, el modelo 3D texturizado en sí mismo, etc. La tendencia

actual, sobre todo en "fotogrametría de objeto cercano", es generar un sólido con texturas y trabajar bajo demanda (alzados, plantas, perfiles, secciones, etc.). Se puede apreciar una muestra de los mismos en la figura 5.

En el ámbito docente, el manejo del escáner láser se realiza a modo de demostración, dado el alto coste del instrumento, dejando a los alumnos la tarea de gestionar los datos obtenidos en el escaneado.



Fig 5. Nube de puntos capturada por el escáner láser con información RGB de cada punto. Reales Alcázares (Sevilla). Elaboración propia

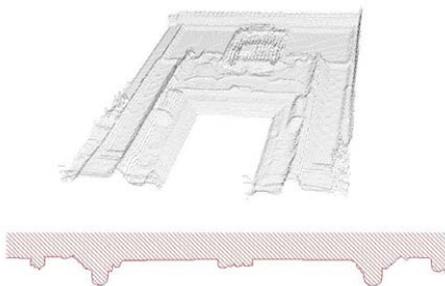


Fig 6. Arriba izquierda. Ortofotografía. Arriba derecha. Mapa de profundidades. Abajo. Perfil generado a partir de una nube de puntos. Reales Alcázares (Sevilla). Elaboración propia



CONCLUSIONES

En esta comunicación hemos presentado algunos ejemplos de cómo gracias a la democratización de la fotogrametría, fruto del mundo digital en el que vivimos y de la aparición de cada vez aplicaciones de bajo coste, el abordar levantamientos de edificios patrimoniales es una labor viable con unos medios muy asequibles -cámara digital convencional, cinta métrica, un ordenador portátil, etc.- y esto debe ser mostrado a los alumnos ya que es una posible salida profesional. El enfoque eminentemente práctico de una asignatura ya cercana a la finalización de los estudios consideramos que invita al alumnado a seguir profundizando en este campo del levantamiento de edificios. No se trata de que conviertan en especialistas, sino de que conozcan las herramientas que les pueden permitir afrontar nuevos proyectos, ya que el procedimiento es relativamente sencillo. Por las razones expuestas, además invitamos a los profesionales de los levantamientos a que se introduzcan en estas metodologías ya que a corto plazo comprobarán que los resultados son muy buenos en la mayor parte de los situaciones y además, en cualquier caso éstos pueden combinarse con los métodos tradicionales.

Referencias bibliográficas

- Barrera, J.A. 2006. *Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico*. Universidad de Sevilla.
- Buill, F. et al 2007. *Fotogrametría terrestre* en "Fotogrametría arquitectónica". Ediciones UPC. pp 24-25
- Maestre, R. 2000. *Levantamiento de planos de fachadas a partir de una fotografía: perspectivas*. Homograf 1, aplicación infográfica para Autocad 14. Universidad de Alicante.
- Grussenmeyer, P. Hanke, K. Strelein, A. 2002. *Architectural Photogrammetry* in "Digital Photogrammetry". Taylor and Francis, pp. 300-339.
- García, S., Amaro, J.L., Cardenal, J. 2008. *Análisis dimensional mediante perspectiva bajo entorno CAD: estudio de precisiones*. INGEGRAF 2008. Valencia.