



TESIS DOCTORAL
MODALIDAD DE COMPENDIO DE
ARTÍCULOS

**EVALUACIÓN EN CAMPO DE UNA
NUEVA TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA
DE RANGO CERCANO Y BAJO COSTE
BASADA EN LA CORRELACIÓN
AUTOMÁTICA DE IMÁGENES**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Martínez Rodríguez', is positioned above a dotted line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Fdo.

Santiago Martínez Rodríguez

**INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL
ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR**

SANTIAGO DE COMPOSTELA / LUGO

2014





AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

Dra. Dña. M^a Luz Gil Docampo y **Dr. D. Juan Ortiz Sanz**, Profesores Titulares del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela

Como Directores de la Tesis Doctoral titulada: **Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes.**

Por la presente **DECLARAMOS:**

Que la tesis presentada por D. Santiago Martínez Rodríguez

Es idónea para ser presentada, de acuerdo con el artículo 41 del Reglamento de *Estudios de Doctorado*, por la modalidad de compendio de ARTÍCULOS, en los que el doctorando tuvo una participación de peso en la investigación y su contribución fue decisiva para llevar a cabo este trabajo.

Y que está en conocimiento de los coautores, tanto doctores como no doctores, participantes en los artículos, que ninguno de los trabajos reunidos en esta tesis será presentado por ninguno de ellos en otra tesis de Doctoral, lo que firmamos bajo nuestra responsabilidad

Lugo, 3 de Noviembre de 2014.

Fdo. Dra. Dña. M^a LUZ GIL DOCAMPO

Fdo. Dr. D. JUAN ORTIZ SANZ



Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de la presente tesis doctoral, en especial a los directores Dr. Juan Ortiz y Dra. M^aLuz Gil, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación y apoyo recibidos a lo largo de estos años. Con un pequeño gran empujón, mis directores de tesis, a los que considero amigos, han conseguido que me ponga a finalizar algo que comenzó hace cuatro años y que creía inalcanzable.

No tengo palabras para agradecerle a mi mujer, Mayka, por la comprensión, la paciencia, el amor y el ánimo recibidos no solo en la elaboración de la tesis, sino en todas las demás facetas de mi vida; te quiero.

De forma especial quiero agradecer a mis padres, porque siempre me han ayudado y apoyado en todas mis decisiones y porque han sido y son un ejemplo, referencia y espejo en el cual me gustaría siempre verme reflejado; un beso papá y mamá.

A todos ellos, muchas gracias.





Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes

RESUMO

O patrimonio cultural engloba o conxunto dos bens, tanto materiais coma inmateriais, herdados de xeracións pasadas que deben ser considerados de interese relevante para a permanencia e identidade dun pobo. Actualmente, o patrimonio encóntrase exposto a unha gran cantidade de axentes externos danosos que comprometen a súa preservación no tempo. Os métodos fotogramétricos permiten documentar e rexistrar, ademais da información visual, información métrica 3D de practicamente calquera obxecto patrimonial a través do emprego de sensores pasivos (cámaras de fotos convencionais). Esta tese analiza a potencialidade da fotogrametría de rango próximo e a correlación automática de imaxes para documentar xeometricamente o patrimonio cultural e histórico co obxectivo de sentar as bases para unha estandarización metodolóxica na aplicación desta tecnoloxía en diferentes tipoloxías de elementos do noso patrimonio histórico e cultural. Para iso, desenvóléronse metodoloxías baseadas en Fotogrametría Multimaxen e Fotogrametría Dixital Automatizada que permiten a validación dos modelos 3D dixitais obtidos en elementos patrimoniais completamente diferentes: tamaño, forma, posición e textura. Desenvóléronse técnicas que teñen como obxectivo minimizar, no posible, os factores que afectan á calidade métrica e visual dos modelos 3D, sobre todo, aquelas encamiñadas á consecución dunha rede fotogramétrica robusta formada con fotos da maior calidade posible, con orientacións adecuadas para poder proporcionar nubes de puntos uniformes completas e precisas (calidade métrica) e texturas fidedignas en todas e cada unha das zonas do obxecto modelado (calidade visual).

PALABRAS CHAVE

Fotogrametría de rango próximo, modelo 3D, correlación automática de imaxes, documentación xeométrica, patrimonio cultural.

RESUMEN

El patrimonio cultural engloba el conjunto de los bienes, tanto materiales como inmateriales, heredados de generaciones pasadas que deben ser considerados de interés relevante para la permanencia e identidade de un pueblo. Actualmente, el patrimonio se encuentra expuesto a una gran cantidad de agentes externos danosos que comprometen su preservación en el tiempo. Los métodos fotogramétricos permiten documentar y registrar, además de la información visual, información métrica 3D de practicamente cualquier objeto patrimonial a través del empleo de sensores pasivos (cámaras de fotos convencionales). Esta tesis analiza la potencialidad de la fotogrametría de rango cercano y la correlación automática de imágenes para documentar geoméricamente el patrimonio cultural e histórico con el objetivo de sentar las bases para una estandarización metodológica en la aplicación de esta tecnología en diferentes tipologías de elementos de nuestro patrimonio histórico y cultural. Para ello, se han desarrollado metodologías baseadas en Fotogrametría Multimagen y Fotogrametría Digital Automatizada que permiten la validación de los modelos 3D digitales obtenidos en elementos patrimoniales completamente diferentes entre sí: tamaño, forma, posición y textura. Se han desarrollado técnicas que tienen como objetivo minimizar, en lo posible, los factores que afectan a la a la calidad métrica y visual de los modelos 3D, sobre todo, aquellas encaminadas a la consecución de una red fotogramétrica robusta formada con fotos de la mayor calidad posible, con orientaciones adecuadas para poder proporcionar nubes de puntos uniformes completas y precisas (calidad métrica) y texturas fidedignas en todas y cada una de las zonas del objeto modelado (calidad visual).

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría de rango cercano, modelo 3D, correlación automática de imágenes, documentación geométrica, patrimonio cultural.

ABSTRACT

Cultural heritage includes all the assets, both tangible and intangible, inherited from past generations considered to be of interest and relevance for the permanence and identity of a people. Cultural heritage is currently exposed to many harmful external agents which threaten its preservation over time. Photogrammetric methods can be used to document and record, in addition to visual information, 3D metric information from virtually any heritage object through the use of passive sensors (ordinary cameras). This thesis analyzes the potential of close-range photogrammetry and AIC to geometrically document cultural and historical heritage sites in order to lay the basis for a methodological standardization in the application of this technology for different types of elements of our historical and cultural heritage. To this end, we have developed methods based on Automated Digital Photogrammetry and Multi-image Photogrammetry which allow for the validation of digital 3D models obtained from cultural and historical sites which are completely different from each other in terms of size, shape, position and texture. Techniques have been developed that aim to minimize, as far as possible, the factors that affect the visual and metric quality of the 3D models and these techniques will especially aim at the achievement of a robust photogrammetric network formed of photographs of the best possible quality, able to produce complete, uniform and precise (metric quality) point clouds with reliable textures in each of the areas of the object modeled (visual quality).

KEYWORDS

Close-range photogrammetry, 3D model, automatic image correlation, geometric documentation, cultural heritage.



ÍNDICE

Resumen	I
Abstract	VII
1. ESTRUCTURA DE LA TESIS	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. INTRODUCCIÓN	7
3.1. LA FOTOGRAMETRÍA DE RANGO CERCANO Y LA CAI.....	8
3.2. LA NECESIDAD DE LOS MODELOS 3D DIGITALES	11
3.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS 3D DIGITALES	12
3.4. FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD VISUAL DE LOS MODELOS 3D DIGITALES.....	14
3.5. SISTEMAS DE ELEVACIÓN DE LA CÁMARA.....	15
3.6. LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MÉTRICA DE LOS MODELOS 3D.....	17
4. OBJETIVOS	23
5. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PETROGLIFOS	25
6. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE CASTROS	27
7. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE FACHADAS	29
8. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PAVIMENTOS	31
9. CONCLUSIONES	33
10. BIBLIOGRAFÍA GENERAL	37



Resumen

El patrimonio cultural engloba el conjunto de los bienes, tanto materiales como inmateriales, heredados de generaciones pasadas que deben ser considerados de interés relevante para la permanencia e identidad de un pueblo. Su importancia para nuestra sociedad radica no solo en el aspecto artístico y cultural, sino que también brinda ciertos beneficios y externalidades a las áreas en las que se encuentra, favoreciendo en términos de economía. Además, la cultura (y las actividades ligadas a esta) puede ser utilizada como un medio para transformar ciertas áreas geográficas y por lo tanto, forma parte de muchas estrategias de desarrollo económico local y regional.

Actualmente, el patrimonio se encuentra expuesto a una gran cantidad de agentes externos dañinos que comprometen su preservación en el tiempo. El 16 de noviembre de 1972, la "Convención para la protección del Patrimonio Cultural y Natural del Mundo", fue adoptada por la Conferencia General de la UNESCO con el objetivo de promover la identificación, protección y preservación del patrimonio cultural y natural de todo el mundo. Para alcanzar este objetivo, resulta esencial documentar geoméricamente el patrimonio cultural, es decir, adquirir, procesar, presentar y registrar los datos necesarios para la determinación de la posición, la forma y el tamaño de un monumento en el espacio tridimensional (3D) en un momento dado en el tiempo. Este proceso puede realizarse de forma rápida y precisa por medio de los métodos de modelado 3D en base a imágenes: la fotogrametría de rango cercano y la correlación automática de imágenes (CAI).

Los métodos fotogramétricos permiten documentar y registrar, además de la información visual, información métrica 3D de prácticamente cualquier objeto patrimonial a través del empleo de sensores pasivos (cámaras de fotos convencionales). Estos métodos de virtualización en 3D basados en imágenes han sido empleados en multitud de casos en los últimos años principalmente por su alta portabilidad y el reducido coste de sus sensores. A diferencia de los modelos teóricos o idealizados obtenidos mediante los métodos tradicionales, las técnicas de documentación 3D reproducen la morfología real del objeto, haciéndose más patente la diferencia en elementos irregulares o con alta variabilidad geométrica. Mediante la fotogrametría de rango cercano y los algoritmos de CAI es posible producir de forma automática, nubes de puntos en 3D de muy alta densidad en la superficie del objeto estudiado, almacenando además, cada uno de ellos, su información cromática (RGB). La continua evolución de estos algoritmos ha ido alcanzando cotas de precisión y automatismo muy elevadas. En los últimos años, destaca la denominada Fotogrametría Digital Automatizada y los algoritmos de Reconstrucción en 3D de Alta Densidad a partir de Múltiples Puntos de Vista, que permiten producir modelos 3D de alta precisión y calidad fotorrealista a partir de una colección de imágenes desordenadas de una escena u objeto, tomadas desde diferentes puntos de vista.

La calidad de medida de los modelos 3D digitales obtenidos mediante fotogrametría de rango cercano y CAI está afectada tanto por factores internos, intrínsecos a la tecnología, como por factores externos. Los errores sistemáticos están asociados a las características del software fotogramétrico empleado, a la cámara fotográfica convencional utilizada y a sus parámetros de configuración internos. Además, afectan a la precisión de los modelos 3D digitales las condiciones lumínicas existentes; la riqueza de la textura; la complejidad del objeto de estudio; la lente utilizada; el ajuste parámetros de configuración de la cámara; la configuración de la red

fotogramétrica (la ubicación y orientación de cada una de las fotografías que se emplearán en la generación del modelo 3D digital o en el proceso de calibración de la cámara); la nitidez en las fotografías y calidad de los puntos de control. La identificación y posterior referenciado de puntos homólogos entre fotografías durante la fase de procesado en gabinete también puede ser una fuente de error. Por otro lado, la calidad visual de un modelo 3D está ligada a la calidad de las texturas (existencia de textura, diferencias radiométricas o desigualdades de color), al nivel de detalle del modelo 3D, a la fidelidad con respecto el objeto real y a la presencia de defectos morfológicos (abultamientos, ondas, islas, agujeros o formas irregulares inexistentes en el objeto real).

Esta tesis analiza la potencialidad de la fotogrametría de rango cercano y la CAI para documentar geoméricamente el patrimonio cultural e histórico con el objetivo de sentar las bases para una estandarización metodológica en la aplicación de esta tecnología en diferentes tipologías de elementos de nuestro patrimonio histórico y cultural. Para ello, se han desarrollado metodologías basadas en Fotogrametría Multimagen y Fotogrametría Digital Automatizada que permiten la validación de los modelos 3D digitales obtenidos en elementos patrimoniales completamente diferentes entre sí: tamaño, forma, posición y textura. Se han desarrollado técnicas que tienen como objetivo minimizar, en lo posible, los factores que afectan a la a la calidad métrica y visual de los modelos 3D, sobre todo, aquellas encaminadas a la consecución de una red fotogramétrica robusta formada con fotos de la mayor calidad posible, con orientaciones adecuadas para poder proporcionar nubes de puntos uniformes completas y precisas (calidad métrica) y texturas fidedignas en todas y cada una de las zonas del objeto modelado (calidad visual).

Documentación geométrica de petroglifos mediante fotogrametría de objeto cercano y CAI

Los petroglifos son grabados que aparecen donde la roca ha sido labrada o trabajada en un proceso sustractivo y son documentos innegables de la historia del mundo, ya que representan el antepasado más cercano de los símbolos previos a la escritura. Han sido descubiertos en todo el planeta y a menudo son asociados con las Civilizaciones Antiguas representando uno de los pocos fragmentos materiales remanentes que son directamente accesibles. La arqueología ha utilizado de manera tradicional, tres métodos para documentar gráficamente el arte rupestre: dibujo a mano alzada, el calco sobre la roca y la fotografía.

La metodología de adquisición del modelo 3D de petroglifos se desarrolló en el Capítulo 5, titulado *A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras*. En él se describe la aplicación de la fotogrametría de rango cercano y la CAI para documentar geoméricamente petroglifos, con el objetivo de evaluar su utilidad en el estudio de este importante patrimonio cultural, a través de la creación de modelos 3D digitales. Se ha empleado software de Fotogrametría Multimagen (Eos System Photomodeler Scanner), una simple cámara convencional (Canon EOS 400D) y se ha prescindido de cualquier otra técnica de levantamiento. Con el fin de testar esta metodología se realizaron tres ensayos en Lugo (Galicia) sobre tres tipos de grabados rupestres diferentes, dos en granito y uno, de mucho menor tamaño, en pizarra (Petroglifo de Formigueiros, Samos). Los grabados realizados sobre granito se diferencian por tener desigual profundidad de surco (surcos anchos y profundos claramente perceptibles -Pena de Chaos, Antas de Ulla- y surco casi imperceptible a simple vista -Gurgulla, Antas de Ulla-) con el objetivo de analizar los resultados de la metodología y compararlos en ambas situaciones. Se ha desarrollado un sistema de evaluación de las nubes de puntos

generadas empleando únicamente un pie de rey. Para crear el modelo del Petroglifo “Pena de Chaos” se emplearon 44 fotografías oblicuas, dando lugar a un modelo 3D digital de 800.000 puntos (1.100.000 triángulos). En el de “Gurgulla”, de menor tamaño, fueron suficientes 18 imágenes, las cuales permitieron formar una nube de 600.000 puntos (750.000 triángulos). En el grabado más pequeño y singular de los tres, un laberinto de 11 circuitos en pizarra encontrado en el Castro de Formigueiros, se emplearon 30 imágenes para formar un modelo de 550.000 puntos (700.000 triángulos). Esta metodología permitió que un único operario se encargase de todo el proceso, ya que, al tratarse de una cámara fotográfica la movilidad es total, alcanzando rendimientos de 6-8 m²/h aproximadamente, aumentando este valor con la superficie. La precisión fotogramétrica evaluada de la nube de puntos en la dirección Z (la más débil) excedió nuestras expectativas, lo que garantiza la representación fiel del relieve de los petroglifos más erosionados. La desviación estándar máxima del error, en el peor de los casos (Petroglifo de “Gurgulla”), se sitúa en torno a un 1 mm. En el Petroglifo de Formigueiros se alcanzó una desviación estándar del error de 0,26 mm. En general, todos los estadísticos fueron muy bajos, lo que implica un alto potencial en la adquisición de datos para todos los casos. La resolución y nivel de precisión de los modelos 3D digitales generados son apropiados para resolver las cuestiones que los investigadores puedan plantearse respecto a la documentación de petroglifos. Se demostró que los métodos de digitalización en 3D basados en fotogrametría de rango cercano y CAI, para la documentación de petroglifos, permiten registrar mucha más cantidad y variedad de información que las metodologías tradicionales en 2D, poniendo al alcance de arqueólogos, conservadores y otros gestores de este patrimonio un amplio abanico de técnicas virtuales que, aplicadas de forma independiente o combinadas entre sí, pueden constituir una valiosa herramienta de análisis y difusión de este patrimonio. Además, se desarrollaron ejemplos de productos derivados de los modelos 3D con el objetivo de mostrar su capacidad de interrelación con otras disciplinas: visualización del modelo 3D sombreado (sin textura) y con el eje Z magnificado para apreciar mejor los surcos, restituciones 2D/3D de los surcos para extraer la realidad simplificada del grabado, ortofotos de alta resolución, simulación virtual de diferentes tipos de iluminación sobre el petroglifo, mapas de curvas de nivel, mapas de curvas de nivel coloreadas por altura (eje Z), etc.

Documentación geométrica de yacimientos arqueológicos (Castro de Formigueiros) mediante fotogrametría de objeto cercano, CAI y mástil.

El Castro de Formigueiros (Lugo) es un poblado fortificado, perteneciente a la cultura castreña, característica de la Edad del Hierro en el NW de la Península Ibérica y está situado entre dos importantes necrópolis megalíticas. En él se realizaron varias campañas de excavaciones, en las que participaron voluntarios de diferentes países del mundo. Su rasgo más sobresaliente es el poderoso y complejo sistema defensivo, con una muralla de piedra, que alcanzaría una altura de 6 metros y un ancho variable del adarve, alrededor de los 4 metros, complementado por un laberíntico entramado de fosos y parapetos. El lugar escogido para este trabajo fue el tramo de la muralla excavado, de gran valor monumental. Uno de los motivos fue su frágil estado de conservación, con peligro de desplome del paramento externo, y el grado de deterioro de la piedra en las escaleras de acceso al adarve. Pero también la propia dinámica de la investigación arqueológica, y de la necesaria y urgente restauración, obligaba a dismantelar varias construcciones tardías adosadas a la muralla, en el periodo en que ésta ya había comenzado a colapsarse. Antes de iniciar estos trabajos, buscábamos conseguir una documentación fidedigna del estado original, con gran calidad métrica, y abierta a usos de difusión cultural.

En el Capítulo 6 se adaptó la metodología propuesta en la documentación de petroglifos para su aplicación en excavaciones arqueológicas, más concretamente en el Castro de Formigueiros. Las principales complicaciones de este tipo de elementos son el tamaño y la necesidad de planificar la red fotogramétrica de manera que se puedan fotografiar y modelar correctamente las superficies orientadas hacia arriba (el suelo y la cara superior de los muros). Para ello fue necesario tomar fotografías desde el aire, con la cámara en posición oblicua, por lo que resultó fundamental el desarrollo de un sistema de elevación de la cámara adecuado. Dadas las peculiaridades geométricas de los castros (superficie, altura de los muros, volumen y distribución de los objetos) y el relieve (por lo general, su ubicación suele encontrarse en zonas de difícil acceso y a menudo, en un terreno elevado), se seleccionó un sistema de elevación de la cámara de tipo mástil. Consistió en un mástil telescópico de fibra de vidrio capaz de alcanzar los 6 m de altura (2 m plegado) con un peso de 20 kg. La cámara fotográfica se instaló sobre un cabezal móvil (movimiento horizontal y vertical) accionado por emisora, en el extremo superior del mástil. El sistema se diseñó para poder visualizar lo que captaba la cámara desde el suelo, a través de un sistema de visión en primera persona (FPV) y además, poder activar el disparador para la toma de imágenes. Se realizó un levantamiento topográfico con estación total para definir las coordenadas de los. El mástil desarrollado permitió obtener nubes homogéneas en cuanto a densidad de puntos (entre 1 y 3 cm de separación entre puntos), ya que la distancia de fotografiado de las superficies orientadas hacia arriba son similares a las distancias empleadas para fotografiar los paramentos verticales de los muros (fotografías con cámara en mano). Además, se ha conseguido un grado de detalle en soleras difícilmente alcanzable para otros sistemas de fotografía de baja altitud. El trabajo de restitución del Castro supuso una semana de planificación y preparación del equipo, dos días de trabajo de campo y 20 de gabinete para procesar las fotografías. El coste fue muy ajustado, ya que la metodología permitió utilizar la misma cámara fotográfica y software que en el estudio anterior. Se analizó la calidad de medida del modelo 3D digital a través de tres procedimientos diferentes: evaluación de las coordenadas XYZ de 12 dianas medidas con estación total (marcas predefinidas), evaluación de 17 distancias definidas entre dianas y por último, para poder contrastar la calidad de la nube, se estudió la planicidad de 9 planchas distribuidas por la zona. Los resultados de la evaluación de estos tres procedimientos fueron muy positivos, tal y como pone de manifiesto que el valor absoluto de casi todos los índices estadísticos evaluados se encuentre por debajo de 10 mm. Esto, en parte, se debe a la calidad de la red fotogramétrica y a la reducida distancia entre la cámara y el elemento. La complejidad y el difícil acceso de algunas partes del Castro, ha provocado que, en alguna zona se produjesen errores en las texturas por falta de perpendicularidad del eje de la cámara a ese punto. En estos casos, el software estira cada pixel para rellenar la superficie como si fuera “mantequilla” para cubrir con ellos toda la superficie. Al igual que en el estudio anterior, se crearon diferentes productos que mejoraron las posibilidades de análisis del modelo 3D: ortofotos, planos de secciones, restituciones 2D/3D, planos de curvas de nivel, etc.

La documentación geométrica de excavaciones arqueológicas mediante la creación de modelos 3D proporciona a los arqueólogos, conservadores y a los gestores del patrimonio cultural una más completa y detallada información que la que pueden ofrecer los métodos tradicionales, además de una gama de herramientas muy útiles para su análisis y difusión.

Documentación geométrica de fachadas de edificios históricos (Catedral de Santiago de Compostela) mediante fotogrametría de objeto cercano, CAI y mástil.

La Catedral de Santiago, prodigio arquitectónico de una enorme inteligencia técnica y tecnológica, es uno de los más importantes santuarios de toda la cristiandad, y su singularidad radica en poseer la tumba del Apóstol Santiago. Estos edificios históricos son elementos de valor excepcional que representan la historia y la memoria de una comunidad y su reproducción digital, con fines documentarios y conservacionistas, debe ser acogida como una práctica habitual, beneficiosa y responsable.

El Capítulo 7 permitió constatar la validez de la metodología propuesta basada en fotogrametría de rango cercano y la CAI sobre edificios históricos complejos. Para verificar el potencial de este método se aplicó a un caso real: las cubiertas de la Catedral de Santiago de Compostela (A Coruña, España). Las humedades halladas en torno al conjunto escultórico que conforma el Pórtico de la Gloria, por filtraciones desde la zona de cubiertas, ha promovido la ejecución del estudio. Las obras de recuperación de las cubiertas tienen como fin eliminar todas esas filtraciones perniciosas (agua y migraciones de sales) que se producen a través de la fábrica de piedra. La zona que se restituyó en 3D, origen de esas filtraciones, comprende parte de las dos torres de la Catedral, la del Campanario (torre sur) y la de la “Carraca” (torre norte) y el cierre de tribuna y sus aledaños. La necesidad de generar esta cartografía a partir del modelo 3D con una alta precisión y resolución, en un entorno complejo en cuanto a su geometría y situación, con condiciones climatológicas adversas y fuertes limitaciones espaciales para la toma de fotos, propició la elección del mástil como el sistema de elevación de la cámara más adecuado para este trabajo. En este caso, se desarrolló una evolución del mástil empleado en el anterior estudio sobre excavaciones arqueológicas. Se estableció, por la complejidad de la zona y la dificultad de acceso, que para abordar el modelo fotogramétrico completo de ambas torres y la tribuna era necesario dividir el área de trabajo en diferentes zonas. Estas zonas se georreferenciaron y se fusionaron entre sí para generar el modelo 3D completo gracias a un levantamiento fotogramétrico general realizado con dianas. Al igual que en anterior trabajo, paralelo al trabajo fotogramétrico, se realizó un levantamiento topográfico con estación total para georreferenciar el modelo y definir las coordenadas de los CP. Todo el proyecto fue realizado por dos personas en 22 semanas de trabajo, distribuidas de la siguiente forma: la preparación del material, la planificación del trabajo y la toma de fotos duró 8 semanas; la obtención de los modelos 3D y las ortofotos supuso 6 semanas y la restitución piedra a piedra consumió otras 8 semanas de trabajo. Por lo que respecta a la calidad de medida del modelo 3D, el error medio obtenido de las 20 observaciones se situó por debajo de 1,3 mm, siendo el error máximo de los valores absolutos del error, 10 mm. Las ortofotos de alta resolución obtenidas mediante la metodología propuesta posibilitaron dibujar, en CAD, detalles complejos con mucha facilidad y con una precisión del orden del milímetro independientemente del tamaño de la estructura.

La metodología permite obtener modelos 3D de alta calidad con un coste muy ajustado (en torno a los 6000€, incluyendo cámara, software, mástil y PC), lo que la convierte en una metodología muy competitiva, capaz de rivalizar directamente con el láser escáner terrestre, ampliamente utilizado, también, en este tipo de estructuras.

Documentación geométrica de pavimentos históricos (Calle Travesía das Dúas Portas en Santiago de Compostela) mediante fotogrametría de objeto cercano, CAI y mástil.

Los pavimentos históricos son componentes intrínsecos del patrimonio cultural y deben ser protegidos al igual que los propios monumentos. Por su naturaleza y condición, además estar expuestos, al igual que el resto de elementos patrimoniales, a agentes externos dañinos que

comprometen su preservación (contaminación, cambio climático, erosión, etc.), suelen verse afectados en mayor medida por otros agentes: el tráfico de vehículos ligeros, el turismo o la renovación de las infraestructuras urbanas. Los pavimentos tienen unas características peculiares, que hacen necesaria su documentación por otros motivos diferentes de los meramente patrimoniales. Los servicios de mantenimiento de este tipo de patrimonio se encuentran ante la dificultad añadida de que cada piedra del pavimento es única y diferente de las demás. Cuando hay que realizar reparaciones, los técnicos necesitan tener información fiel de cada una de esas piedras para poder construir la réplica que las sustituirá, fundamentalmente porque forma parte de un conjunto que cuenta con una pendiente que no puede verse alterada, pues se alteraría igualmente la vertiente de las aguas hacia los desagües.

En el capítulo 8 se evaluó el potencial de la Fotogrametría Digital Automatizada y los algoritmos de reconstrucción en 3D de alta densidad a partir de múltiples puntos de vista, en el proceso de recuperación de información métrica precisa de superficies irregulares con una gran automatización. El método se aplicó a la documentación geométrica de pavimentos históricos, más concretamente, en un tramo de calle representativo de Santiago de Compostela, la Travesía das Dúas Portas, aunque este es extensible a cualquier tipo de vía o plaza. A diferencia de los tres estudios anteriores, este trabajo fue realizado mediante el software comercial Agisoft PhotoScan. La fotogrametría de rango cercano y la CAI, junto con el mástil, es la metodología que mejor se adapta a las necesidades de este tipo de elementos por diferentes motivos: coste reducido del equipo y del proceso, totalmente compatible con el tráfico rodado y peatonal, alta precisión, calidad visual elevada, producto final manipulable por personal no especializado en 3D y una gran flexibilidad de trabajo. Para evaluar la calidad de medida de la reconstrucción 3D se realizaron tres estudios diferentes: en la primera prueba se analizaron las coordenadas de 32 PC medidos en el modelo 3D y con estación total; en la segunda, se compararon los modelos individuales de 4 losas con esas mismas 4 losas medidas en el modelo completo y en la tercera, se analizó la fidelidad alcanzable en la representación de la microtopografía de las losas, incluyendo en la escena, en una posición aleatoria, una losa de mármol, de dimensiones similares a las piedras del pavimento, nivelada y cuya superficie es perfectamente plana. La calidad métrica alcanzada ha resultado suficiente, ya que el error medio de los CP medidos con la estación total y el PhotoScan es de 5,5mm y la desviación típica de 3mm. La segunda y tercera prueba han cosechado resultados más favorables todavía, media de 0mm (desviación típica de 2mm) y desviación típica de 1mm, respectivamente.

Tras el análisis de los resultados de este cuarto estudio, se puede afirmar que la utilización de la metodología propuesta, combinada con el mástil y software de Fotogrametría Digital Automatizada, es una opción altamente interesante para la documentación geométrica de estos bienes patrimoniales. Los resultados a nivel métrico, muy por encima de las limitaciones marcadas por los técnicos del servicio de mantenimiento, y la posibilidad de ejecutar el levantamiento fotogramétrico sin interferir en la rutina normal de la ciudad, refuerzan esta afirmación. Los resultados obtenidos son concordantes, en términos de costes de trabajo y tiempos de ejecución con los de otros estudios previos lo que avala el empleo del método para la documentación 3D respecto de otras técnicas de modelado 3D. En cuanto a la inversión económica y amortización, tiempos de realización de la toma de datos y tiempos de posproducción en gabinete, es un sistema enormemente competitivo.

Abstract

Cultural heritage includes all the assets, both tangible and intangible, inherited from past generations considered to be of interest and relevance for the permanence and identity of a people. Its importance for our society lies not only in its artistic and cultural facets, but also in that it provides certain benefits and externalities to the areas in which it is located, producing positive economic effects. Moreover, culture (and the activities linked to it) can be used as a means to transform certain geographical areas and therefore forms part of many strategies for local and regional economic development.

Cultural heritage is currently exposed to many harmful external agents which threaten its preservation over time. On November 16, 1972, the “Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage” was adopted by the General Conference of UNESCO in order to encourage the identification, protection and preservation of cultural and natural heritage around the world. To achieve this objective, it is essential to geometrically document locations which form part of cultural heritage, i.e. acquire, process, display and record the data necessary to determine the position, shape and size of a monument in three-dimensional (3D) space at a given moment in time. This process can be done quickly and accurately using 3D modeling methods based on images: close-range photogrammetry and automatic image correlation (AIC).

Photogrammetric methods can be used to document and record, in addition to visual information, 3D metric information from virtually any heritage object through the use of passive sensors (ordinary cameras). This virtualization-based 3D image method has been used in many cases in recent years mainly because of its high portability and low cost of its sensors. Unlike models obtained by traditional methods, 3D models reproduce the real morphology of the object, better rendering irregularly shaped object and objects with highly variable geometric elements. Through the use of close-range photogrammetry and AIC algorithms, 3D point clouds of high density can be produced automatically on the surface of the object being studied, each of them also storing their color information (RGB). The continuing development of these algorithms has produced very high levels of accuracy and automation. Worthy of particular note in recent years has been the so-called Automated Digital Photogrammetry and Digital Multi-View 3D Reconstruction algorithms which allow for the production of high-precision 3D models of photorealistic quality from a collection of disordered images of a scene or object taken from different viewpoints.

The measurement quality of digital 3D models obtained by close-range photogrammetry and AIC is affected by both internal factors, intrinsic to the technology, and external factors. Systematic errors are associated with the photogrammetry software features used, the camera used and its internal configuration parameters. Other factors that affect the accuracy of digital 3D models include: lighting conditions, the richness of the texture, the complexity of the object, the lens used, the camera parameter settings, the photogrammetric network configuration (the location and orientation of each of the photographs used in the generation of the digital 3D model and the calibration of the camera), the sharpness of the photographs and the quality of the control points. The identification and referencing of homologous points between photos during the processing phase in the lab can also be a source of error. Furthermore, the visual quality of a 3D model is tied to the quality of the textures (existence of texture, radiometric

differences and color differences), the level of detail of the 3D model, its fidelity to the real object and presence of morphological defects (bumps, waves, islands, holes or irregular shapes that do not exist in the real object).

This thesis analyzes the potential of close-range photogrammetry and AIC to geometrically document cultural and historical heritage sites in order to lay the basis for a methodological standardization in the application of this technology for different types of elements of our historical and cultural heritage. To this end, we have developed methods based on Automated Digital Photogrammetry and Multi-image Photogrammetry which allow for the validation of digital 3D models obtained from cultural and historical sites which are completely different from each other in terms of size, shape, position and texture. Techniques have been developed that aim to minimize, as far as possible, the factors that affect the visual and metric quality of the 3D models and these techniques will especially aim at the achievement of a robust photogrammetric network formed of photographs of the best possible quality, able to produce complete, uniform and precise (metric quality) point clouds with reliable textures in each of the areas of the object modeled (visual quality).

Geometric documentation of petroglyphs using close-range photogrammetry and AIC.

Petroglyphs are engravings that appear where rock has been carved or worked in a subtractive process and are documents of historical importance in that they are the closest ancestors of pre-writing system symbols. They have been discovered all around the world and are often associated with ancient civilizations, being one of the few remaining material fragments of them that are directly accessible. Archaeology has traditionally used three methods to graphically document rock art: freehand drawing, making rubbings on the rock and photography.

The methodology for producing 3D models of petroglyphs is described in Chapter 5, titled, *A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras*. It describes the application of close-range photogrammetry and AIC to geometrically document petroglyphs in order to evaluate their usefulness in the study of this important element of cultural heritage through the creation of 3D digital models. Multi-image Photogrammetry software (Eos Photo Modeler Scanner System) and a simple conventional camera (Canon EOS 400D) were used to this end. No other technique was used. To test this methodology three trials were carried out in Lugo (Galicia) on three different rock engravings, two in granite and another one, much smaller, in slate (Formigueiros Petroglyph, Samos). The engravings on granite differ from each other, one has an uneven groove depth (wide and deep grooves, clearly visible (Pena de Chaos, Antas de Ulla) while another (Gurgulla, Antas de Ulla) has a groove almost imperceptible to the naked eye. They were chosen in order to analyze the methodology used and compare the results found. An evaluation system for point clouds has been developed which only requires a caliper. To create the model of the Pena de Chaos petroglyph 44 oblique photographs were used, resulting in a digital 3D model of 800,000 points (1,100,000 triangles). 18 images sufficed in the case of the smaller Gurgulla petroglyph and they produced a 600,000 point cloud (750,000 triangles). In the smallest of the three, a maze of 11 circles in chalk found in the Formigueiros Hill Fort, 30 images were used to make a model of 550,000 points (700,000) triangles. This methodology allows one operator to carry out the whole process as all that is required is a single camera which means that he or she has total mobility; a performance of approximately 6-8 meters m²/h was achieved, this figure increasing with the surface. The photogrammetric precision achieved

in the point cloud in the Z axis (the weakest) exceeded our expectations, and ensured the faithful representation of the relief on the most eroded petroglyphs. The maximum standard error deviation in the worst case (the Gurgulla petroglyph) was around 1mm. The Formigueiros petroglyph had a standard deviation error of 0.26mm. In general, all the error statistics were very low, which shows the high potential for data collection in these cases. The level of resolution and accuracy of the digital 3D models generated are suitable for solving issues that may arise regarding documentation of petroglyphs. It was shown that the 3D scanning methods based on close-range photogrammetry and AIC for documenting petroglyphs make it possible to resolve many of the questions researchers may pose regarding the documentation of petroglyphs. These 3D methods also gather more and better information than traditional 2D methods and make available to archaeologists, curators and other heritage managers a wide range of virtual techniques which, applied separately or in combination, can be a valuable tool for analysis and dissemination of this heritage. Furthermore, examples of products derived from 3D models have been developed with the objective of showing their capacity for relating to other disciplines: shaded 3D (no texture) with the Z axis magnified to better appreciate the grooves, 2D/3D restitutions of the grooves to extract the simplified reality of the engraving, high-resolution orthophotos, virtual simulation of different types of illumination on the petroglyph, contour maps, contour maps colored by height (Z axis) etc.

Geometric documentation of archaeological sites (Formigueiros Hill Fort) using close-range photogrammetry, mast pole and AIC.

The Formigueiros Hill Fort (Lugo) is a fortified Iron Age settlement in the north west of the Iberian Peninsula and is located between two major megalithic necropolises. Several excavation campaigns have been carried out there in which volunteers from different countries participated. Its most outstanding feature is the powerful and complex defensive system, which includes a stone wall reaching a height of 6 meters and a parapet of variable width, reaching about 4 meters, supplemented by a labyrinthine network of trenches and parapets. The location selected for this work was a section of the excavated wall which has great monumental value; one of the reasons for this was its fragile state of preservation, with its outer facing in danger of collapse and a high level of deterioration of the stone stairs to the parapet. Another issue was the very dynamic of archaeological research itself and the necessity for urgent restoration, requiring the dismantling of various structures which had been later attached to the wall in the period when it was already starting to collapse. Before work commenced we sought to obtain reliable documentation of its original state, with a high level of metric quality and suitable for cultural dissemination purposes.

Chapter 6 adopts the methodology proposed for the documentation of petroglyphs for use in archaeological excavations, more specifically the one at Formigueiros Hill Fort. The main difficulties presented by this kind of work are related to scale and the need to plan the photogrammetric network to make it possible to photograph and correctly model upward facing surfaces (the bottom and upper faces of the walls). To do this it was necessary to take photographs from the air, with the camera in an oblique position, so it was vital to develop an appropriate lifting system for the camera. Given the geometric peculiarities of hill forts (the surface area, height, volume and distribution of the objects) and their relief (they are generally located in areas difficult to access and often on high ground), a mast pole was chosen as camera elevation system. It consisted of a telescopic fiberglass mast with a reach of 6 meters (2 meters folded) and a weight of 20 kg. The camera was installed on a mobile head (pan and tilt) at the upper end of the mast and is controlled by a transmitter. The system was designed to visualize

from the ground what the camera could capture through a first-person view system (FPV) and also to allow the camera shutter to be activated and pictures to be taken.

A topographic survey with total station was conducted to define the PC coordinates. The mast pole camera yielded homogeneous clouds with regard to dot density (1 to 3 cm of separation between points) since the shooting range for the upward-facing surfaces was similar to the distances used for photographing the vertical faces of the walls (pictures with hand held camera). Furthermore, a level of detail was achieved for wall-plates that other systems of close-range altitude photography would find hard to match. The hill fort restitution work involved a week of planning and preparation of the team, two days of fieldwork and twenty days to process the photographs. The costs involved were very low as the same camera and software were used as in the previous study. The quality of the 3D digital model was measured through three different procedures: evaluation of the XYZ coordinates of 12 targets measured with total station (predefined marks), evaluation of 17 defined distances between targets and finally, the flatness of 9 plates distributed in the area was studied to check the quality of the cloud. The results of the evaluation of these three methods were very positive, as evidenced by the fact that the absolute value of almost all the statistical indices assessed was below 10 mm. This in part is due to the quality of the photogrammetric network and the short distance between the camera and the object. The complexity and the difficult access to some parts of the hill fort led to some errors in the texture of some areas due to the lack of perpendicularity of the axis of the camera at that point. In these cases, the software stretches each pixel in order to cover the entire surface with them. As in the previous study, different products were produced to improve the possibilities of analysis of the 3D model: orthophotos, flat sections, 2D/3D restitutions, contour maps, etc. The geometric documentation of excavations by creating 3D models provides archaeologists, conservationists and heritage managers with more complete and detailed cultural heritage information than traditional methods can offer, along with a range of useful tools for analysis and dissemination.

Geometric documentation of facades of historic buildings (Santiago de Compostela Cathedral) using close-range photogrammetry, mast pole and AIC.

The Cathedral of Santiago de Compostela, an architectural marvel of huge technical and technological intelligence is one of the most important shrines in Christendom, and its uniqueness lies in housing the tomb of St. James. Such historic buildings are of exceptional value and represent the history and memory of a community and their digital reproduction, for documentary and conservation purposes, should be accepted as a normal, beneficial and responsible practice.

Chapter 7 contributes to confirming the validity of the proposed methodology based on close-range photogrammetry and AIC for complex historic buildings. We applied this method to a specific real case: the roofs of the Cathedral of Santiago de Compostela (A Coruña, Spain). Dampness found around the sculpture that forms the *Pórtico da Gloria*, caused by leakage from the roof area, prompted the carrying out of this study. The restoration work on the roof was designed to eliminate all these harmful leaks (water and salt migration) that were occurring through the stone. The area restituted in 3D, the origin of these leaks, comprised part of the two towers of the Cathedral, the Belfry (South Tower) and the Tower da Carraca (North Tower) and the podium and its surroundings. The need to generate a map of this area based on a 3D model with high accuracy and high resolution in a complex environment in terms of its geometry and location, with heavy spatial constraints for taking pictures and in adverse weather conditions

led to the choice of a mast pole as the best lifting system for the camera for this task. In this case, a more developed version of the mast pole used in the previous study on archaeological excavations was created. Given the complexity of the area and the difficulty of access, a division of the workspace into different zones was established to carry out the full photogrammetric model of both towers and the podium. These areas were geo-referenced and merged together to generate the complete 3D model by a general photogrammetric survey conducted with targets. As in the previous study, as well as the photogrammetric work, a survey was conducted with total station to geo-reference the model and establish the CP coordinates. The entire project was carried out by two people in 22 weeks of work, distributed as follows: preparation of the material, work planning and taking the pictures took eight weeks; obtaining 3D models and orthophotos took six weeks and stone by stone restitution took an additional 8 weeks of work. With regard to the quality of the 3D model, the average error obtained from the 20 observations was below 1.3 mm, the maximum error of the absolute values of the error being 10 mm. The high resolution orthophotos obtained through the methodology enabled easy and accurate CAD drawings of complex details with a precision of one millimeter, regardless of the size of the structure.

The methodology used produced high-quality 3D models at a very low cost (around €6000, including camera, software, mast and PC), which makes it a very competitive method capable of competing directly with the terrestrial laser scanner, also widely used in these structures.

Geometric documentation of historic streets (Calle Travesía das Dúas Portas in Santiago de Compostela) using close-range photogrammetry, mast pole and AIC.

Historical streets are intrinsic components of cultural heritage and should be protected like historical monuments themselves. By their nature and similarly to other historical monuments they are exposed to harmful external agents (pollution, climate change, erosion, etc.) that may threaten their preservation. Moreover, they are also exposed to other threats such as light vehicle traffic, tourism and the renewal of urban infrastructure. Streets also have some unique characteristics, which make their documentation necessary for reasons other than those purely concerned with heritage. Those concerned with their maintenance are faced with the added difficulty that each paving stone is unique and different from all the others. Technicians need accurate data from every paving stone because each is unique. The shape of any replacement stones must preserve the original slope to ensure that the runoff to sewers is not modified.

Chapter 8 evaluates the potential of Automated Digital Photogrammetry and Digital Multi-View 3D Reconstruction algorithms based on multiple viewpoints for the recovery of exact metric information from irregular surfaces with a high level of automation. The method was applied to the geometric documentation of a historic street, more specifically, on a stretch of road in Santiago de Compostela, the Travesía das Dúas Portas, though it could be applied to any type of road or square. Unlike the previous three studies this one was carried out using commercial software, Agisoft Photoscan. Close-range photogrammetry and AIC plus mast pole is the methodology most suitable for this kind of work for a number of reasons: the low cost of equipment and processing, complete compatibility with vehicle and pedestrian traffic, high precision, high level of visual quality, a final product that can be manipulated by people not familiar with 3D and a high degree of work flexibility. To assess the quality of the 3D reconstruction three different studies were performed: in the first test the coordinates of 32 cloud points measured in the 3D model and with total station were analyzed, in the second the models of four individual paving stones were compared with the same four paving stones

measured in the complete model and the third test consisted of an analysis of the achievable accuracy in the microtopography of the paving stones, including a marble paving stone in situ, in a random position, level, and with a completely flat surface. The metric quality achieved was sufficient as the average error of the cloud points measured with the total station was 5.5mm and the standard deviation was 3mm. The second and third tests provided even better results with an average of 0mm (2mm standard deviation) and a standard deviation of 1mm respectively.

Once the results of the fourth study are analyzed, it is safe to state that the use of the proposed methodology combined with the mast pole and Automated Digital Photogrammetry is a very attractive option for the geometric documentation of this kind of cultural heritage. This affirmation is reinforced by the results at the metric level, much better than the limitations marked by maintenance technicians, and the possibility of carrying out a survey without disturbing the normal routine of the city. In terms of labor costs and execution times, the results are consistent with those in previous studies, which support the use of the methodology presented here for 3D documentation when compared to other 3D modeling techniques. In terms of economic investment and amortization, time of completion of data collection and post-production time at the photo lab, it is a highly competitive system.



1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Tras una justificación del interés de la investigación desarrollada en esta tesis, se aborda la sección introductoria, en la que se realiza, en primer lugar, una breve descripción de los métodos ópticos más utilizados, la fotogrametría de rango cercano, la CAI y las principales ventajas respecto a la tecnología láser escáner. A continuación, se analiza la necesidad de los modelos 3D digitales como sistema de documentación del patrimonio cultural e histórico y se exponen las ventajas respecto a los métodos tradicionales. Posteriormente, se revisan los factores que afectan a la precisión y a la calidad visual de los modelos 3D digitales. Tras ello, se revisan los diferentes sistemas de elevación de la cámara empleados en fotogrametría y se exponen las ventajas y desventajas del uso de los medios más comunes aparecidos en la bibliografía. Por último, se definen los principales procedimientos de evaluación de la calidad métrica de los modelos 3D digitales y se presentan las ecuaciones y estadísticos más comúnmente empleadas.

Una vez planteado el objetivo general y los específicos de esta tesis se exponen, en diferentes capítulos con formato artículo, los cuatro casos de estudio que se han desarrollado para alcanzar dichos objetivos:

- I. *A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras (Capítulo 5).*
- II. *Three-dimensional modelling of archaeological sites using close-range automatic correlation photogrammetry and low-altitude imagery (Capítulo 6)*
- III. *Recording complex structures using close-range photogrammetry: the cathedral of Santiago de Compostela (Capítulo 7).*
- IV. *Geometric documentation of historical pavements using automated digital photogrammetry and high-density reconstruction algorithms (Capítulo 8).*

A continuación, se presentan las principales conclusiones extraídas del estudio. Finalmente, se indica la bibliografía general empleada, excluyendo la recogida específicamente en cada caso de estudio que no se citó en el resto del documento.



2. JUSTIFICACIÓN

El patrimonio cultural físico o tangible, el cual incluye edificios y lugares históricos, monumentos, conjuntos urbanos, obras rurales y otros lugares con valor para la historia, la arqueología o la paleontología basa su importancia en ser el conducto para vincular a la gente con su historia. Encarna el valor simbólico de identidades culturales y es la clave para entender a los otros pueblos. Contribuye a un ininterrumpido diálogo entre civilizaciones y culturas, además de establecer y mantener la paz entre las naciones. En la actualidad, el patrimonio se encuentra expuesto a multitud de agentes externos dañinos que comprometen su preservación. Las amenazas más comunes que afectan al patrimonio suelen ser de carácter continuado y persistente en el tiempo y sus efectos dañinos suelen ser reducidos (contaminación, cambio climático, turismo, erosión, etc.). Por otro lado, los conflictos bélicos, las catástrofes ambientales (terremotos, tsunamis, erupciones, inundaciones, corrimientos de tierra, etc.) o la creación de infraestructuras (por ejemplo, carreteras y ferrocarriles) suponen un peligro mayor de destrucción de estos bienes. El deterioro o la desaparición de estos bienes culturales y naturales constituye un empobrecimiento nefasto del patrimonio de todos los pueblos del mundo (UNESCO, 1972). La importancia del patrimonio cultural y de cualquier proceso de investigación encaminado a planificar su conservación, está sobradamente justificada desde el punto de vista social, económico, artístico, cultural e histórico.

La consecución de este objetivo de conservación del patrimonio pasa por una mejora de los procesos de documentación general del patrimonio cultural, para lo cual resulta necesario disponer de información precisa y actualizada en lo referente a su forma geométrica, características arquitectónicas, materiales y análisis estructural (Genovese, 2005). La documentación geométrica registra el presente de los monumentos, como se han ido formando a lo largo del tiempo y es la base necesaria para el estudio de su pasado, así como el de su futuro (UNESCO, 1972); además, debe favorecer su integración interdisciplinar con, entre otros, la documentación histórica, la documentación arquitectónica, la documentación bibliográfica, etc., (Georgopoulos y Ioannidis, 2004). El desarrollo de la era digital y de la informática ha propiciado la expansión de técnicas dirigidas a la consecución de modelos 3D de alta calidad métrica y acabado fotorrealista que suponen una poderosa herramienta para mejorar la identificación, seguimiento, conservación y restauración de los elementos de estudio (Campana y Remondino, 2007). Éstas permiten documentar y registrar, además de la información visual, información métrica 3D de prácticamente cualquier objeto patrimonial a través de un proceso de virtualización de objetos, es decir, convertir la información geométrica real en información comprensible por el ordenador (Beraldin et al., 2000). La información obtenida mediante estas modernas técnicas proporciona un registro métrico y perceptual mucho más complejo, completo, riguroso y adecuado para la preservación, restauración y difusión del patrimonio que la proporcionada por las técnicas tradicionales, a las que comienza a relegar en muchos ámbitos. Las técnicas de virtualización no sufren algunas de las limitaciones asociadas a las empleadas tradicionalmente, en cuanto a precisión o consumo de tiempo, presentando un gran potencial en la documentación y registro del patrimonio (Díaz-Andreu et al., 2006; Chandler et al., 2007).

Los métodos de digitalización o virtualización en 3D basados en imágenes (métodos fotogramétricos), en combinación con los algoritmos de CAI, permiten obtener nubes densas de puntos de forma automática a partir de fotogramas obtenidos con cualquier cámara convencional. Esto supone una ventaja fundamental sobre otras tecnologías existentes (el láser

escáner): son altamente portables y sus sensores (pasivos) tienen un coste reducido. La adquisición precisa de datos con cámaras digitales de bajo coste se puede enseñar con relativa facilidad y el moderno software de fotogrametría digital es más fácil de usar de lo que mucha gente pueda imaginar, sobre todo para tareas rutinarias (Chandler et al., 2007). Además de las ventajas señaladas anteriormente, existen una serie de beneficios ligados al uso de los procedimientos fotogramétricos, como son: mayor flexibilidad durante el trabajo de campo, ya que no es necesaria la estabilidad física de otros equipos, o la posibilidad de emplear las mismas fotografías para la generación del modelo digital y de las ortofotos. Los métodos basados en rastreo, debido a su alto coste y a los problemas de transporte, junto con el alto consumo de tiempo y la complejidad en la gestión de datos, a menudo plantean ciertos problemas de practicabilidad en algunos trabajos de campo (Campana y Remondino, 2007).

Los métodos fotogramétricos (los más comunes son Fotogrametría Multimagen y Fotogrametría Digital Automatizada) están experimentando un buen crecimiento en la documentación de elementos patrimoniales, en parte por la gran difusión durante la última década, paralelamente al desarrollo y abaratamiento de las cámaras digitales, los equipos informáticos y las aplicaciones de software de bajo coste, a pesar de ello, el conocimiento de esta tecnología, aparentemente, no está tan extendida en la comunidad profesional encargada del patrimonio cultural (Havemann et al., 2010). La realidad de nuestra sociedad es que la mayor parte de los técnicos y expertos que actualmente trabajan en proyectos relacionados con la conservación del patrimonio cultural todavía emplean técnicas de corte tradicional (Arias et al., 2007). De entre estas, los métodos tradicionales de carácter manual son los más empleados por su sencillez de uso y coste, aunque su aplicación implica la pérdida de información durante la fase transferencia de datos desde el elemento real al modelo teórico (Yilmaz et al., 2008) y su precisión resulta, en muchos casos, insuficiente. A esto debemos sumarle que, por lo general, los historiadores de arte y conservadores se oponen a la idea de crear modelos 3D digitales de elementos patrimoniales para fines distintos a los de visualización en bruto, ya que presentan dudas respecto a la exactitud y fidelidad de estos, y porque desde su punto de vista, tienden a carecer de los matices y los detalles importantes para un especialista en la materia (Sitnik et al., 2010). Campana y Remondino (2007) explican que el uso de técnicas de digitalización de forma sistemática y correcta para documentación y conservación del patrimonio no se aplica, en muchos casos, por varias razones: el alto “coste” del 3D (respecto a las técnicas más tradicionales, como el croquis), la consideración de que se trata de un proceso opcional de interpretación con fines estéticos, la dificultad de lograr buenos modelos 3D, el problema de integrarlos con la documentación e información 2D y su uso episódico para análisis científico.

A partir de la documentación geométrica digital se puede generar una gran gama de productos derivados del modelo 3D digital que mejorarán el análisis del patrimonio cultural por parte de técnicos y profesionales encargados de su conservación. Entre estos productos destaca la creación de ortofotos georreferenciadas, de muy alta resolución, creadas en base a cualquier perspectiva; la recuperación de restituciones 2D (o incluso 3D) muy precisas y detalladas, que son una forma valiosa e insustituible de conocimiento de la realidad construida; la generación de modelos digitales de elevaciones del terreno; la creación de secciones de cualquier parte del modelo 3D y su restitución 2D; el cálculo de curvas de nivel; la creación de planos de pendientes o de orientaciones y la posibilidad de exportar el modelo 3D con textura fotorrealista a formatos como Adobe PDF3D (funciona con Adobe Reader) para poder visualizarlos fácilmente e interactuar con él (mediciones de coordenadas de puntos, distancias, superficies, secciones, etc.), son algunos ejemplos de los posibles productos derivados.

En esta tesis se pretende investigar el empleo de la fotogrametría de rango cercano en combinación con la CAI y diferentes sistemas de elevación de la cámara basados en mástiles, para conocer con precisión la posición, la forma, la textura y el tamaño de un monumento en el espacio 3D en un momento dado en el tiempo, así como el desarrollo de metodologías objetivas y de productos derivados de los modelos 3D digitales, todo ello de interés para el cumplimiento de los objetivos de identificación, protección y preservación fijados por la UNESCO.





3. INTRODUCCIÓN

El patrimonio cultural engloba el conjunto de los bienes, tanto materiales como inmateriales heredados de generaciones pasadas que deben ser considerados de interés relevante para la permanencia e identidad de un pueblo. Es innegable que los monumentos y conjuntos monumentales son construcciones de gran valor, ya que representan la historia y la memoria de una comunidad (Pegón, 2001), y por esa razón, muchos están catalogados como bienes públicos. Su importancia para nuestra sociedad radica no solo en el aspecto artístico y cultural, sino que también brinda ciertos beneficios y externalidades a las áreas en las que se encuentra, favoreciendo en términos de economía (Bedate et al., 2004). La cultura (y las actividades ligadas a esta) además de generar importantes flujos económicos, puede ser utilizada como un medio para transformar ciertas áreas geográficas y por lo tanto, forma parte de muchas estrategias de desarrollo económico local y regional (Herrero, 1997; Dziembowska y Funck, 2000).

El patrimonio cultural físico o tangible incluye edificios y lugares históricos, monumentos, conjuntos urbanos, obras rurales y otros lugares con valor para la historia, la arqueología o la paleontología. Hoy en día, este patrimonio se encuentra expuesto a una gran cantidad de agentes externos dañinos que comprometen su preservación en el tiempo. Algunas de las amenazas más comunes que afectan al patrimonio cultural son la contaminación, el cambio climático, el turismo o la erosión, entre otros. Su carácter es continuado y persistente a lo largo del tiempo y los daños suelen ser más reducidos. Por otro lado, los conflictos bélicos, las catástrofes ambientales (terremotos, tsunamis, inundaciones, corrimientos de tierra, etc.) o la creación de infraestructuras (por ejemplo, carreteras y ferrocarriles) suponen un peligro mayor de destrucción de estos bienes.

La "Convención para la protección del Patrimonio Cultural y Natural del Mundo", fue adoptada por la Conferencia General de la UNESCO, el 16 de noviembre de 1972, con el objetivo de promover la identificación, protección y preservación del patrimonio cultural y natural de todo el mundo, el cual es considerado especialmente valioso para la humanidad. La UNESCO y el Consejo Europeo han creado organizaciones especiales para la consecución de este objetivo, siendo el Consejo Internacional de Monumentos y Conjuntos Históricos (ICOMOS) la más importante. También participan activamente en esta tarea el Comité Internacional para la Documentación de Patrimonio Histórico (CIPA), la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS), el Consejo Internacional de Museos (ICOM), el Centro Internacional de la Conservación y Restauración de Monumentos (ICCROM) y la Unión Internacional de Arquitectos (UIA).

La documentación geométrica, considerada como una parte de la documentación general del patrimonio cultural (Georgopoulos y Ioannidis, 2004), fue definida por la UNESCO (1972) como: *“La acción de adquirir, procesar, presentar y registrar los datos necesarios para la determinación de la posición, la forma y el tamaño de un monumento en el espacio 3D en un momento dado en el tiempo. La documentación geométrica registra el presente de los monumentos, como se han ido formando a lo largo del tiempo y es la base necesaria para el estudio de su pasado, así como el de su futuro”*.

El cumplimiento de los objetivos de identificación, protección y preservación fijados por la UNNECO requieren que el proceso de documentación sea óptimo, pero para ello es necesario

contar con información de calidad de las características morfológicas, geográficas y pictográficas de cada elemento patrimonial estudiado. Esta información puede obtenerse actualmente de forma rápida y precisa por medio de los métodos de modelado en base a imágenes: la fotogrametría de rango cercano y la correlación automática de imágenes (CAI).

3.1.LA FOTOGRAMETRÍA DE RANGO CERCANO Y LA CAI

En las últimas décadas, y gracias a algunos grandes avances de la era digital, a la fotografía, croquis, calcos y planos, se han unido técnicas como la fotogrametría, la luz estructurada o el láser escáner. Éstas permiten documentar y registrar, además de la información visual, información métrica 3D de prácticamente cualquier objeto patrimonial. La información obtenida mediante estas modernas técnicas proporciona un registro métrico y perceptual mucho más complejo, completo, riguroso y adecuado para la preservación, restauración y difusión del patrimonio que la proporcionada por las técnicas tradicionales, a las que comienza a relegar en muchos ámbitos. Las técnicas de virtualización no sufren algunas de las limitaciones asociadas a las empleadas tradicionalmente, en cuanto a precisión o consumo de tiempo, presentando un gran potencial en la documentación y registro del patrimonio (Díaz-Andreu et al., 2006; Chandler et al., 2007). Algunos autores denominan a este proceso “virtualizar” objetos, es decir, convertir la información geométrica real en información comprensible por el ordenador (Beraldin et al., 2000).

Beraldin et al. (2000) y Remondino y El-Hakim (2006) clasifican estos métodos de modelado, reconstrucción y medición en 3D de objetos en: “métodos de contacto” y “métodos sin contacto”. En los primeros, es fundamental tocar la superficie del elemento de estudio con el propio instrumento de medición para su aplicación. En esta metodología se emplean, desde herramientas básicas de medición como reglas, calibres o plomadas, hasta instrumental de gran coste y complejidad, como sofisticadas articulaciones con sondas de contacto o máquinas de medición de coordenadas por puntero o “palpador” físico. Los métodos sin contacto se basan en la utilización de una fuente de energía proyectada sobre el objeto a través de sensores activos (p. e., láser o ultrasonidos), o aprovechando una que esté ya presente como la luz (sensores pasivos). Los sensores activos proporcionan directamente las coordenadas 3D de los puntos de la superficie del objeto necesarios para la generación de la triangulación, mientras que los sensores pasivos necesitan una fase de procesado posterior para generar esa información. Actualmente, las técnicas más empleadas en la digitalización en 3D son de tipo “sin contacto” basados en ondas de luz, bien sea a través de sensores activos o pasivos.

Siguiendo con la clasificación de Remodino y El- Hakim (2006), los métodos ópticos pueden subdividirse en tres grupos: basados en imágenes, basados en rastreo y basados en la combinación imagen-rastreo.

- Métodos de modelado en base a imágenes (Remodino y El- Hakim, 2006) (p. e., fotogrametría): Ampliamente utilizados en la reconstrucción 3D de elementos arquitectónicos (Yilmaz et al., 2008), modelado de terreno y ciudades (Aguilar et al., 2005; Gomez-Lahoz y Gonzalez-Aguilera, 2009) y monumentos y estatuas (Grün et al., 2004). Son altamente portables y sus sensores (pasivos) tienen un coste reducido. Es necesario un procesado posterior de la información para obtener las coordenadas 3D que conformarán el modelo.
- Métodos de modelado basados en el rastreo (Beraldin et al., 2000; Blais, 2004): Emplean sensores activos que capturan directamente la información geométrica 3D del objeto a través del uso de láser o de la proyección de patrones (luz estructurada (McPherron et al.,

2009) o luz codificada). Estos aparatos recuperan la información 3D aplicando diferentes principios de medición como la triangulación, tiempo de vuelo o la amplitud modular. Son sistemas robustos y caros y presentan un manejo complejo (El-Hakim et al., 2005) suponiendo, en ocasiones, serios problemas de operatividad en campo.

- Algunos autores combinan también estas dos técnicas entre sí, tratando de aprovechar mejor las cualidades más destacables de cada una, consiguiendo resultados muy interesantes en patrimonio. Ejemplos de ello son la Magdalena de Donatello (Guidi et al., 2004), los Palacios del Desierto en Jordán (Al-keder et al., 2009) o el Palacio Dolmabahce en Estambul (Yastikli, 2007).

Los métodos de virtualización en 3D basados en imágenes han sido empleados en multitud de casos en los últimos años y ello ha quedado reflejado en la extensa bibliografía que existe al respecto. Su expansión, todavía más ligada al ámbito de la investigación que al profesional, se ve favorecida por la reciente aparición de paquetes informáticos de menor coste (gratuitos en algún caso) y de su corto proceso de aprendizaje (p.ej. Agisoft PhotoScan, Acute3D Smart3DCapture, Autodesk Recap, Topcon Image Master, Eos System Photomodeler Scanner, Autodesk 123D Catch, etc.) y por la creciente demanda de este tipo de productos en campos muy diversos.

Los métodos basados en los algoritmos de CAI permiten producir a partir de pares de imágenes previamente orientadas y de forma automática, nubes de puntos en 3D de muy alta densidad en la superficie del objeto estudiado, almacenando además, cada uno de ellos, su información cromática (RGB). El proceso de cálculo de las coordenadas de cada uno de los puntos digitales que componen la nube, a partir de un par de fotos orientadas, se conoce con el nombre de problema de la estéreo-correspondencia (Orteu, 2009). La principal dificultad en la estereovisión es establecer las correspondencias de forma automática de los puntos homólogos presentes en pares de imágenes. Con los años, se han propuesto numerosos algoritmos para conseguir la correspondencia de imágenes. Una vez obtenida la nube de puntos, esta se puede transformar en una superficie poligonal. Los polígonos, generalmente triángulos, son normalmente el camino más flexible para representar con precisión los resultados de las mediciones en 3D proporcionando una descripción de la superficie óptima (Remondino y El-Hakim, 2006).

La integración de la CAI y la fotogrametría de rango cercano ha supuesto una revolución y prueba de ello es la abundante bibliografía existente que abarca multitud de campos como la biomecánica (Camomilla et al., 2009), reconstrucción de accidentes (Xinguang et al., 2009), análisis estructural y deformaciones (Hampel y Maas, 2009; Riveiro et al., 2011), ciencias terrestres (Smith et al., 2009), hidráulica (Wanek y Wu, 2006), microtopografía (Abd Elbasit et al., 2009) y que incluso se atreve con la modelización de la superficie de Marte (Di et al., 2008). Pero es en el campo de la arqueología, la arquitectura y del patrimonio cultural dónde esta expansión se hace más evidente, con ejemplos en arte rupestre (Chandler et al., 2007; Ortiz et al., 2010), edificios y monumentos (Yilmaz et al., 2008; Martínez et al., 2013), urbanismo (Koutsoudis et al., 2007; Núñez y Buill, 2009) o áreas arqueológicas extensas (Chiabrande et al., 2011; Giacomo et al., 2011; Hendrickx et al., 2011; Ortiz et al., 2013). Son muchos los autores que auguran un futuro muy prometedor a esta metodología, fundamentalmente por su coste, facilidad de uso, portabilidad, precisión y resolución. Aspectos como la resolución, la cual Chandler et al., (2005) establecían en un mínimo de 5 megapíxeles como punto de partida para la rutina de medición de superficies, no representa ningún problema a día de hoy y ya es posible encontrar incluso teléfonos móviles con sensores de igual o mayores prestaciones. La

adquisición de datos con cámaras digitales de bajo coste se puede enseñar con relativa facilidad y el moderno software de fotogrametría digital es más fácil de usar de lo que mucha gente pueda imaginar, sobre todo para tareas rutinarias (Chandler et al., 2007).

La continua evolución de los algoritmos de CAI ha ido alcanzando cotas de precisión y automatismo muy elevadas. A día de hoy, destaca la denominada Fotogrametría Digital Automatizada (SFM, Structure From Motion) y los algoritmos de Reconstrucción en 3D de Alta Densidad a partir de Múltiples Puntos de Vista (DMVR, Digital Multi-View 3D Reconstruction), que permiten producir modelos 3D de alta precisión y calidad fotorrealista a partir de una colección de imágenes desordenadas de una escena u objeto, tomadas desde diferentes puntos de vista (Koutsoudis et al., 2013). La gran precisión del sistema (Doneus et al., 2011; Martínez et al., 2015) y la baja desviación existente frente a los modelos obtenidos a partir de datos provenientes de escáneres láser son avaladas en trabajos como el realizado por Rodríguez-Navarro (2012).

El interés generado por las metodologías en base a imágenes con CAI ha incitado a la aparición, en la bibliografía, de múltiples comparaciones con otra de las técnicas de modelado 3D de mayor interés, el láser escáner (Kadobayashi et al., 2004; Rizzi et al., 2007 o Sturzenegger y Stead, 2009). La CAI es considerada por algunos autores como la única técnica de restitución que puede acercarse a la velocidad de captura de datos del láser escáner.

Además de las ventajas señaladas anteriormente, existe una serie de beneficios ligados al uso de los procedimientos fotogramétricos, como son: mayor flexibilidad durante el trabajo de campo, ya que no es necesaria la estabilidad física de otros equipos, o la posibilidad de emplear las mismas fotografías para la generación del modelo digital de elevaciones (DEM) y las ortofotos. Este aspecto cobra más sentido al compararlo con el problema que surge cuando se intentan hacer coincidir las fotografías digitales con el DEM generado por el láser escáner para producir una superficie con textura. En Fryer et al., (2005) se explica lo complejo de integrar datos de medios diferentes y como ello puede dar lugar a imprecisiones.

No cabe duda de que las nubes de puntos 3D obtenidas mediante otras técnicas como el escaneado láser tienen mayor densidad, son más precisas y se obtienen más rápidamente en campo de lo que es posible con los métodos fotogramétricos. Sin embargo, esto no significa que sea la técnica más adecuada en todas las situaciones si nos atenemos a ciertos aspectos recogidos por El-Hakim et al., (2005) y Fryer et al., (2005) tales como el coste, facilidad de uso, portabilidad, reflectancia y alimentación.

Por otra parte, como también aparece en Fryer et al., (2005), en ocasiones resulta imposible identificar puntos comunes superficies de naturaleza uniforme, y por lo tanto, no es posible generar nubes de puntos precisas por CAI. En este grupo se incluirían, por ejemplo, superficies con colores lisos, manchas de color uniformes como la del mármol o elementos totalmente homogéneos y como el de la mayoría de los metales. Esta limitación puede subsanarse dotando de textura a la superficie, mediante adhesivos o pinturas, lo que se conoce como un “speckle pattern” (Lecompte et al., 2006). Este sistema ya se aplica en algunos ensayos basados en la CAI de multitud de materiales: langostas en Sachs et al., (2006); tejidos humanos en Moerman et al., (2009) o sobre canales en Bambach (2009). Los elementos brillantes, traslúcidos y los transparentes, al variar su textura en función de la perspectiva desde la que se fotografíen, tampoco se pueden modelar correctamente. Estas limitaciones no suelen suponer, en principio, ningún problema en patrimonio cultural, ya que los materiales que constituyen estos elementos presentan, en general, una textura adecuada.

3.2.LA NECESIDAD DE LOS MODELOS 3D DIGITALES

La fase de documentación presenta múltiples posibilidades adecuándose a los diferentes campos, elementos o sucesos de los cuales pretendemos extraer información. La realidad de nuestra sociedad es que la mayor parte de los técnicos y expertos que actualmente trabajan en proyectos relacionados con la conservación del patrimonio cultural todavía emplean técnicas de corte tradicional (Arias et al., 2007). De entre estas, los métodos tradicionales de carácter manual son los más empleados por su sencillez de uso y coste, aunque su aplicación implica la pérdida de información durante la fase transferencia de datos desde el elemento real al modelo teórico (Yilmaz et al., 2008) y su precisión resulta, en muchos casos, insuficiente. Por otro lado, la utilización de metodologías tradicionales más avanzadas, como los métodos topográficos, ven limitada su funcionalidad cuando el elemento a estudiar presenta formas irregulares no asimilables a formas geométricas sencillas (Barazzetti et al., 2009).

La obtención de una documentación 3D del patrimonio histórico tiene innumerables ventajas respecto a los métodos tradicionales, no sólo a nivel divulgativo o de archivo, sino incluso como salvaguarda del patrimonio histórico y cultural, ya que permite el trabajo distribuido y ahorro de costes de desplazamiento para el estudio y planificación de las intervenciones. La idea de representar el espacio de manera 3D constituye un cambio conceptual y metodológico de la clásica visión bidimensional del patrimonio. Un ejemplo de dominio preferente de esta visión 2D lo observamos en las técnicas de documentación gráfica del arte rupestre que se emplean actualmente: dibujo a mano alzada, el calco sobre la roca y la fotografía (Stanbury y Clegg, 1990).

A diferencia de los modelos teóricos o idealizados obtenidos mediante los métodos tradicionales, las técnicas de documentación 3D reproducen la morfología real del objeto, haciéndose más patente la diferencia en elementos irregulares o con alta variabilidad geométrica (Riveiro et al., 2011). Estas técnicas no sufren algunas de las limitaciones asociadas a las empleadas tradicionalmente, como la menor precisión o un excesivo consumo de tiempo en campo y presentan un gran potencial en la documentación del patrimonio (Díaz-Andreu et al., 2006; Chandler et al., 2007). Además, la recuperación de modelos digitales permite generar productos derivados como restituciones 2D/3D muy precisas, que son una forma valiosa e insustituible de conocimiento de la realidad construida. Este tipo de productos resultan muy útiles a la hora de acometer obras de rehabilitación o restauración en edificios históricos, ya que en muchas ocasiones, los planos arquitectónicos originales son inexactos, si es que existen (Arayici, 2007).

Con la aplicación de estas técnicas se consigue, por ejemplo, en casos de deterioro o destrucción, elaborar réplicas exactas del objeto documentado. El ejemplo más ilustrativo de esta utilidad quizá sea el de los Budas del valle de Bamiyan (Afganistán), demolidos por las milicias Talibanes en marzo de 2001. Un equipo del Swiss Federal Institute of Technology (ETH) de Zurich elaboró un modelo digital 3D de la estatua del Gran Buda, a partir de fotografías extraídas de internet, que permitió obtener maquetas a escala del monumento una vez desaparecido (Grün et al., 2004).

La documentación del patrimonio cultural a través de técnicas digitales dirigidas a la obtención de modelos 3D de calidad fotorrealista se presenta, a día de hoy, como una práctica necesaria y vital a fin de proporcionar un completo seguimiento, protección y plan de mantenimiento (Al-kheder et al. , 2009), aunque este objetivo todavía está lejos de alcanzarse (Gomez-Lahoz y González-Aguilera, 2009) además, el conocimiento de esta tecnología,

aparentemente, no está tan extendida en la comunidad profesional encargada del patrimonio cultural (Havemann et al., 2010). Por lo general, los historiadores de arte y conservadores se oponen a la idea de crear modelos 3D de elementos patrimoniales para fines distintos a los de visualización en bruto, ya que presentan dudas respecto a la exactitud y fidelidad de estos, y porque desde su punto de vista, tienden a carecer de los matices y los detalles importantes para un especialista en la materia (Sitnik et al., 2010). Campana y Remondino (2007) explican que el uso de técnicas de digitalización de forma sistemática y correcta para documentación y conservación del patrimonio no se aplica, en muchos casos, por varias razones: el alto “coste” del 3D (respecto a las técnicas más tradicionales, como el croquis), la consideración de que se trata de un proceso opcional de interpretación con fines estéticos, la dificultad de lograr modelos 3D de calidad, el problema de integrar los modelos 3D con la documentación e información 2D y el uso episódico de los modelos 3D para análisis científico.

El mercado sigue fuertemente dominado por el láser escáner terrestre en lo que a patrimonio se refiere, seguramente debido a su alta tasa de adquisición de datos, su precisión relativamente alta y a la alta densidad de datos espaciales que proporcionan estos equipos (Ergun, 2010). Sin embargo, hay que tener presente que para la documentación de elementos de grandes dimensiones se suele recurrir al uso combinado de levantamientos topográficos de precisión y técnicas fotogramétricas junto al láser escáner terrestre (Grussenmeyer et al., 2008), y del mismo modo, se recurre a la fotogrametría para asignar texturas sobre elementos complejos adquiridos con sistemas láser (Valanis et al., 2010).

3.3.FACTORES QUE AFECTAN A LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS 3D DIGITALES

La precisión de los modelos 3D digitales obtenidos mediante fotogrametría de rango cercano y CAI está afectada tanto por factores internos, intrínsecos a la tecnología, como por factores externos. Los errores sistemáticos están asociados a las características del software fotogramétrico empleado, a la cámara fotográfica convencional (no métrica) utilizada como “dispositivo de medición” y a sus parámetros internos (Brown, 1972; Chandler et al., 2005). Además, otros factores relacionados con la fase de fotografiado, condiciones lumínicas existentes, riqueza de la textura y complejidad del objeto de estudio, lente utilizada (las lentes de tipo gran angular permiten una mejor reconstrucción de las relaciones espaciales del elemento que los teleobjetivos) y parámetros de configuración de la cámara, configuración de la red fotogramétrica, falta de nitidez y calidad en general en las fotografías y precisión, ubicación y número de los puntos de control afectan a la precisión de los modelos 3D digitales. La identificación y posterior referenciado de puntos homólogos entre fotografías durante la fase de procesado en gabinete también puede ser una fuente de error.

La evolución y mejora del software es continua, desde los primeros programas que permitían generar nubes de puntos consistentes en estaciones fotogramétricas de trabajo complejas, como la Z/I Imaging SSK ImageStation de Intergraph usada para el mapeado de pequeñas áreas (Aguilar et al., 2005), o la Leica Photogrammetric Suite (LPS desde 2010) usada en petroglifos (Chandler et al., 2007), hasta los sencillos programas de bajo coste actuales, como Photomodeler Scanner (PMS) o Agisoft Photoscan (PS). Son pocos los autores que comparan la precisión alcanzable por diferente software (Chiari et al., 2008; Barazzetti et al., 2011), principalmente por la dificultad de establecer un experimento compatible y único a todos ellos, bajo unas condiciones totalmente controladas. La tipología del software fotogramétrico comercial empleado en los actuales trabajos de modelización, caracterizado por los algoritmos de CAI y las ecuaciones matemáticas de ajuste propiedad de la empresa programadora influyen

en la precisión de los modelos 3D digitales obtenidos. Actualmente, los sistemas más comunes son los denominados Fotogrametría Multimagen y Fotogrametría Digital Automatizada. En los primeros, el operador debe de realizar labores manualmente, como son por ejemplo la calibración de la cámara fotográfica o la identificación de puntos homólogos como paso previo para poder generar el modelo 3D digital de un objeto. En este tipo de software se demandan fotografías convergentes con grandes ángulos de intersección para conseguir una mayor precisión. Por otro lado, con la Fotogrametría Digital Automatizada, de aparición reciente, es posible crear, de forma automática y bajo los parámetros marcados por el operador, un modelo que incluye la obtención de la nube de puntos, la generación de mallas poligonales y la inclusión de texturas fotorrealistas a partir de la toma de una secuencia fotográfica de un objeto (Rodríguez-Navarro, 2012). Este sistema recurre a imágenes consecutivas con ángulos de intersección reducidos para facilitar la detección y marcado automático de puntos comunes entre fotografías. Generalmente, para que no se produzcan errores en el proceso, estas deben formar un ángulo de intersección menor a 15 grados (Zhang et al., 2007).

El tipo y modelo de cámara fotográfica, la lente y su calibración, son factores que afectan de forma importante a la calidad de medida en fotogrametría, principalmente porque conforman el sistema de entrada de datos en el proceso fotogramétrico. La bibliografía recoge tres tipologías de cámaras diferentes: las métricas, las no métricas y las semimétricas (Lerma, 2002). Las cámaras métricas permiten recrear la orientación interna de cada fotograma mediante el empleo de marcas fiduciales o sensores de estado sólido calibrados, es decir, garantizan la posición de los puntos principales sobre la imagen. Nos permite reconstruir la geometría al momento de la toma fotográfica eliminando, de esta forma, la fase de calibración. Cámaras no métricas (cámaras digitales convencionales) se caracterizan por tener una geometría interna desconocida, por lo que se hace necesaria la determinación de los parámetros de calibración (orientación interna) simultáneamente con el trabajo. Las ventajas respecto a las cámara métricas son su tamaño y peso reducido, la capacidad de utilizar objetivos intercambiables, facilidad de compra y menor precio. Por último, algunos autores han empleado cámaras semimétricas. Se trata de una conversión de una cámara no métrica a métrica mediante, generalmente, la incorporación de una placa de *réseau*, es decir, una placa de vidrio que tiene grabada una retícula calibrada de cruces que se impresionan sobre la fotografía y que permiten controlar y corregir las deformaciones de la imagen que se producen por alteraciones dimensionales en su soporte (Almagro, 1995). A pesar de que la geometría interna de las cámaras comerciales convencionales no métricas es generalmente inestable, sobre todo de las lentes (Wackrow y Chandler, 2008), el desarrollo de la informática en los últimos años y la aparición de software de calibración ha supuesto la sustitución de las cámaras métricas y semimétricas.

La disponibilidad de los parámetros geométricos internos del sensor y de la lente empleados, así como su consideración y corrección mediante un proceso de calibrado, es imprescindible para extraer información métrica a partir de imágenes fotográficas (Brown, 1972; Lerma, 2002). Durante este proceso, al que también se le conoce por el nombre de orientación interna, se evalúan parámetros como la distancia focal de las lentes, distorsión radial y tangencial de la lente (Fryer y Brown, 1986), el centro óptico (Roelofs, 1951) o el tamaño del CCD (Shortis et al., 1995, Clarke et al., 1998), entre otros. Entre todos los parámetros de orientación interna, el que más influye en la deformación de la imagen es la distorsión de la lente (Gruen y Beyer, 2001). Además, es fundamental realizar el calibrado con el anillo de enfoque ajustado en el mismo punto en el que se realizarán las fotografías del objeto o escena a modelar, ya que alterar este aspecto supone modificar varios de los parámetros citados.

Algunos autores realizan el calibrado con el anillo de enfoque ajustado al infinito, lo que posibilita su aplicación a múltiples proyectos diferentes, pero supone una sensible pérdida de calidad en la nitidez global de fotografías. Los parámetros determinados en el proceso de calibración son archivados y considerados por el software fotogramétrico para procesar correctamente las fotografías de un proyecto realizado bajo los mismos criterios de configuración. La configuración apropiada de la red fotogramétrica para conseguir calibrar la cámara a través de un proceso de autocalibración ha sido descrito por varios autores (Fraser, 2006; Remondino y Fraser, 2006). Una visión general de los métodos de calibración se da en Clark y Fryer (1998). Algunos autores incluso realizan comparaciones entre algunos de los métodos existentes (Hieronymus, 2012).

La calidad métrica de una determinada técnica fotogramétrica depende en gran medida del diseño de la red fotogramétrica (Remondino y El-Hakim, 2006). Por lo tanto, la calidad de medida final en cualquier trabajo de fotogrametría no depende tanto de la instrumentación o la metodología como cabría pensar, sino de una buena planificación previa. Entre los factores que se deben tener en cuenta para el diseño correcto de la red se encuentran la elección de la escala de la fotografía, el porcentaje de recubrimiento longitudinal y lateral entre fotografías consecutivas, la distancian entre la cámara fotográfica y el objeto, la configuración geométrica de las estaciones de la cámara respecto al objeto, el estudio de las limitaciones espaciales del entorno del elemento o el número de estaciones necesarias para garantizar que cada superficie aparece en al menos tres fotografías, entre otras. Todos ellos son factores importantes que influyen en la calidad de medida para obtener las coordenadas de los puntos del objeto y los parámetros de calibración de la cámara (Atkinson, 1996).

Los puntos de control (CP, *Control Points*) se conocen, en fotogrametría de objeto cercano, como aquellos puntos, visibles en las diferentes fotografías tomadas de la escena, que es necesario emplear en el procedimiento fotogramétrico para mejorar la precisión de la orientación interna, la externa o el escalado, entre otros. Generalmente, tanto los programas basados en Fotogrametría Multimagen y Fotogrametría Digital Automatizada, estos CP pueden ser puntos claramente identificables en la escena (manchas, grietas, esquinas, etc.) o pueden ser puntos señalados con dianas (marcas predefinidas que resaltan la ubicación de un punto y que poseen información fácilmente reconocible para el software fotogramétrico que se incluyen en la escena previo al fotografiado (Ortiz et al., 2005)), lo que permite alcanzar una mayor calidad métrica.

3.4.FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD VISUAL DE LOS MODELOS 3D DIGITALES

Este apartado hace hincapié en el aspecto visual que presenta el modelo 3D digital. Esta característica puede no ser relevante para muchos trabajos de investigación, en los que prima la calidad métrica, pero en ciertos campos, como la arqueología, la paleontología, o la arquitectura, es esencial. Muchos de los trabajos relacionados con el patrimonio cultural son susceptibles de emplearse en centros de interpretación, museos on-line, capturas para generar ilustraciones en libros, simulaciones, presentaciones, reportajes, documentales, exposiciones, etc., y en todos estos casos se premia la calidad visual del modelo digital. Cuando se habla de la calidad visual se hace referencia a aspectos como la textura, la presencia de defectos morfológicos en el modelo 3D y en como este último se corresponde visualmente con el objeto real, independientemente del punto de vista escogido.

La calidad visual de un modelo digital, en una primera inspección, está ligada considerablemente a la calidad de las texturas. Uno de los principales defectos en la textura de

los modelos 3D digitales es la presencia de zonas sin documentar fotográficamente debido a una mala planificación de la red fotogramétrica, a las limitaciones que supone realizar fotografías únicamente desde el suelo o a la presencia de obstáculos. Generalmente se produce un fenómeno de estiramiento de la textura (Ortiz et al., 2013), en un intento del software por completar y maquillar esa parte carente de información pictográfica. Algunos sistemas aplican una textura de color liso (normalmente negro) y en otros caso se produce una doble proyección (Al-kheder et al., 2009). Este último se origina cuando la textura se aplica dos veces, una primera sobre la parte correcta del elemento, y otra sobre la zona oculta, es decir, los píxeles del elemento situado delante se proyectan sobre el que se encuentra detrás según la perspectiva de la foto. Las diferencias radiométricas en el mapeado de texturas (Apollonio et al., 2012) repercuten drásticamente en la calidad estética y en el realismo del modelo 3D, aunque su posición sobre la malla poligonal sea correcta. Estas se deben a las variables condiciones de iluminación que se van sucediendo durante el proceso de fotografiado y que ofrecen como resultado desigualdades de color entre los diferentes parches de textura extraídos de las diferentes fotografías seleccionadas por el software. Si el contraste no es excesivo, el software actual es capaz de corregir este defecto mediante técnicas de balance de color aplicadas sobre cada imagen. Trinchao et al., (2012) recoge también los errores en el color por la presencia de reflejos o brillos sobre el objeto durante el fotografiado.

Al visualizar el modelo sin aplicar texturas podemos observar de forma objetiva, fuera de parámetros métricos, si el modelo es fiel o no, el nivel de detalle que ofrece y si presenta defectos morfológicos. Estos pueden ser abultamientos, islas o formas irregulares inexistentes en el objeto real, normalmente originados durante la reconstrucción de superficies debido a un elevado nivel de ruido en la nube de puntos (grupo de puntos anómalo que se separa de la continuidad normal de la nube). El software fotogramétrico generalmente incluye algoritmos que se encargan de su eliminación. En algunos casos, pueden aparecer superficies o polígonos de gran tamaño (en relación al resto del modelo) originados generalmente durante la reconstrucción de la malla como consecuencia del rellenado de huecos existentes en la nube de puntos. Este defecto también se produce en el empleo del láser escáner y normalmente se manifiesta como una malla estirada correspondiente a los polígonos paralelos a la dirección del aparato (Appollonio et al., 2012). Las discontinuidades, saltos o desfases entre las mallas poligonales de diferentes estereopares dentro de un mismo trabajo o entre diferentes proyectos (en base a un mismo sistema de coordenadas), producidas por una imprecisa y deficiente orientación externa, son otro de los problemas que podemos detectar a simple vista.

3.5.SISTEMAS DE ELEVACIÓN DE LA CÁMARA

Por definición, la fotogrametría está ligada al “arte”, de acuerdo a la definición de McGlone et al., (2004): *“La fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtención de información fiable acerca de los objetos físicos y del medio ambiente a través del proceso de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”*. La palabra “arte” pretende poner de manifiesto la necesidad de conseguir una red fotogramétrica robusta, formada con fotos de la mayor calidad posible, con orientaciones adecuadas para poder proporcionar nubes de puntos uniformes, completas y precisas (calidad métrica) y texturas fidedignas en todas y cada una de las zonas del objeto modelado (calidad visual). Los mejores resultados (nube sin agujeros, con densidad uniforme y textura realista) se obtienen con imágenes horizontales, con el eje de la cámara perpendicular a la superficie del objeto, lo que implica requerir estereopares, prácticamente, para cada plano a modelar. La altura suele ser uno de los aspectos más

restrictivos de los elementos verticales (fachadas, muros, taludes, árboles u otros), ya que implica la utilización de sistemas de elevación de la cámara adecuados. Con estos se consigue obtener fotografías desde perspectivas superiores que fortalecen geoméricamente la red fotogramétrica y además, nos permiten capturar elementos no visibles correctamente desde las fotografías únicamente tomadas a nivel de suelo, bien sea por efecto de la perspectiva, la complejidad o porque se encuentran retranqueados respecto al plano principal. Además, en elementos con presencia de elementos tales como terrazas, molduras, bajorrelieves, estatuas o huecos, entre otros, se añade dificultad al proceso y esta va creciendo cuanto mayor sea el tamaño y complejidad del elemento patrimonial. Del mismo modo, si la pretensión es modelar el terreno, el suelo u otros elementos de tendencia horizontal, sería necesario obtener las fotografías desde el aire, con la cámara en una posición cenital. Es importante tener en cuenta también, las restricciones de trabajo asociadas al entorno, básicamente, a la presencia de objetos ajenos a la estructura que interfieren en el fotografiado, como peatones, andamios o tráfico; o al espacio de trabajo frente al elemento que se pretende virtualizar, es decir, a la distancia máxima vertical u horizontal a la que se pueden hacer las fotografías

La cuestión fundamental aquí es decidir a qué altura elevar la cámara para obtener las nubes de puntos, y para ello es necesario establecer los objetivos de resolución espacial y precisión, tanto vertical como horizontal. El método más lógico para incrementar la resolución/precisión de la información espacial es acercar el sensor al objeto (Smith et al., 2009) pero por otra parte, cuanto más altas sean tomadas las fotografías, mayor será la superficie abarcada por los estereopares y, por tanto, más eficiente será el trabajo. La altura de la cámara es entonces un compromiso entre los requerimientos de precisión/resolución y eficiencia. Por poner un ejemplo, para arqueología se requiere una resolución centimétrica, la cual limita la altura por debajo de los 200m (lo que se conoce como fotografía de baja altura). En muchos casos, el excesivo coste del alquiler de aeronaves tripuladas como aviones o helicópteros, la impracticabilidad de la zona o las restricciones de altura de vuelo imposibilitan el uso de estos medios para la toma de fotos (Smith et al., 2009).

La presente tesis doctoral se enmarca en el ámbito de trabajo de la fotogrametría de objeto cercano, por lo que se va a requerir de dispositivos propios de la fotogrametría terrestre o aérea de baja altura para elevar la cámara y obtener estereopares de las superficies en altura u orientadas hacia arriba. El estudio, desarrollo y utilización de sistemas de elevación de cámaras es una cuestión presente en artículos de investigación de diversos campos. Para fotografía de baja altura se han empleado globos, dirigibles y vehículos aéreos no tripulados (UAVs y reutilizables (Blyenburgh, 1999)) en estudios de cultivos (Obertür et al., 2007; Jensen et al., 2007), terreno (Lejot et al., 2007), análisis ambiental (Chen y Vierling, 2006; Vierling et al., 2006) y prospección arqueológica (Verhoeven et al., 2009); cometas, en la elaboración de mapas de geomorfología periglacial (Boike y Yoshikawa, 2003); torres, para análisis de vegetación (Leuning et al., 2006), mástiles, para el seguimiento de pequeños arroyos (Bird et al., 2010); e incluso cuerdas para registrar cambios en ambientes dinámicos (Baker et al., 2004).

En el caso específico de levantamientos fotogramétricos se ha recurrido a cometas (Bitelli et al., 2001), globos (Kemper et al., 2003), helicópteros de radiocontrol (Zischinky et al., 2000; Lambers et al., 2007), dirigibles (Gómez-Lahoz y González-Aguilera, 2009), grúas y andamiaje (Desmond y Bryan, 2003) y paramotores (Faustmann y Palmer, 2005), entre otros. Algunos autores, como Cabana et al., (2009), combina hasta tres sistemas de elevación diferentes para modelizar canchales en Lugo: cables, pértiga y globos. Estos dispositivos permiten elevar la

cámara convencional (no métrica) a fin de obtener pares estereofotográficos adecuados para la CAI (Chandler et al., 2005).

Las cometas representan el equipo más económico y son apropiadas para ser desplegadas rápidamente en el terreno para multitud de aplicaciones (Aber et al., 2002). Se caracterizan por ser relativamente manejables durante la fase de toma de fotografías, si bien pueden presentar problemas durante el izado y arriado del equipo. Dependen únicamente de la existencia de viento para poder funcionar, aunque este debe ser estable en cuanto a la velocidad.

Los globos y dirigibles económicamente resultan también muy interesantes pero son muy susceptibles a los vientos (Johnson et al., 1990). Su utilización queda imposibilitada cuando estos sobrepasan los 15 km/h. En Gruen et al., (2001) se puede leer como las condiciones de viento en la zona de trabajo impidieron obtener el suficiente solapamiento entre fotografías para poder procesarlas en su totalidad. Ries y Marzloff (2003) consiguen aumentar la estabilidad al viento optimizando el cuerpo y las aletas de un dirigible tipo Zeppelin durante un estudio de erosión realizado en la Cuenca Central del Ebro, en España.

Los UAVs tienen, en general, un coste bastante mayor y su alquiler suele ir vinculado a la contratación de un operario certificado como piloto de drones para su manejo. Su principal ventaja radica en que no están cargados con las limitaciones físicas y los costes derivados de los pilotos humanos y actualmente son capaces de transmitir a la estación de control terrestre, en tiempo real, video, fotografías y su posición instantánea. Generalmente, los UAV de ala rotativa son más adaptables a zonas complejas, mientras que los de ala fija son preferibles para grandes extensiones por su mayor autonomía (Yundong et al., 2008). En Eisenbeiß (2009) puede encontrarse una extensa revisión de estas plataformas.

En algunos proyectos de fotogrametría, el uso de este tipo de dispositivos aéreos puede verse limitado por la alta complejidad del elemento, la presencia de obstáculos, la climatología, el coste, la alta precisión/resolución buscada o la existencia de legislación que limite o prohíba su actividad, y puede ser necesario recurrir a otros sistemas. Además, generalmente las plataformas citadas están diseñadas para adquirir imágenes aéreas por encima de los 10-15 m de altura, y en algunas aplicaciones fotogramétricas esto puede suponer una limitación. Un ejemplo claro de ello aparece en Bird et al., (2010), donde la necesidad de modelar pequeños arroyos, por debajo del dosel de copas, hace inviable el uso de cometas, globos o UAV. Sin embargo, existen varias plataformas o sistemas que pueden ser utilizadas o adaptadas para adquirir imágenes a menor altura. El uso de cables o cuerdas, a pesar de que puede resultar interesante en elementos con relativa rectitud (modelización de tramos rectos de calles o muros), requiere un considerable tiempo de preparación y su aplicación no resulta ni portátil ni flexible. Dentro de este grupo de dispositivos de muy baja altura tenemos otro referente utilizado ampliamente en fotografía: los mástiles telescópicos. Se trata de sistemas duraderos, portátiles y ligeros, altamente transportables en campo gracias a la posibilidad de plegado en un único tramo de 1,5-2,5 m.

3.6.LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MÉTRICA DE LOS MODELOS 3D

Es importante conocer en qué medida, las dimensiones del modelo 3D digital generado mediante métodos de fotogrametría de rango cercano, se corresponden con la realidad y cómo se desvían, y por ello debe realizarse un análisis de la precisión/exactitud. Actualmente en la bibliografía no hay definido un procedimiento estándar o normas para determinar dicha calidad, tal y como existe, por ejemplo, en teodolitos (ISO 17123-3:2001), distanciómetros láser (ISO/R

1938-1971), GPS (ISO14978:2006), máquinas de medición de coordenadas (ISO 10360-1:2000), fotogrametría aérea (ISO 19115-2:2009) o en simples flexómetros y cintas métricas (ISO 9002). A pesar de ello, es posible aunar las líneas comunes de la mayoría de los trabajos a un sistema basado en tres operaciones básicas: obtención de puntos de contraste reales (TCP, “true check points”), obtención de los puntos de contraste fotogramétricos (PCP, “photogrammetric check points”) y el cálculo de la calidad de medida (MQ, “metric quality”) de la técnica fotogramétrica evaluada.

La primera fase consiste en definir las características métricas de los puntos de la escena que se emplearán para el contraste, los TCP, aplicando una técnica de referencia más precisa/exacta que la técnica fotogramétrica evaluada. La MQ de las mediciones realizadas mediante la técnica de referencia debe ser muy alta, dado que se va a asumir que es la medición real. Esta calidad va a depender del tipo, cantidad y modo de definición de los TCP empleados y de la técnica de referencia aplicada. En la bibliografía encontramos tres tipos de TCP: puntos que forman parte del objeto estudiado (Yilmaz et al., 2008; Gomez-Lahoz et al., 2009; Smith et al., 2009); puntos marcados sobre elementos ajenos al objeto de estudio (marcas predefinidas y/o elementos de geometría simple conocida) introducidos a tal fin en la escena (Chandler et al., 2005; Abdo et al., 2006) y por último, el uso combinado de ambos (Guidi et al., 2004; Aguilar et al., 2005). En la bibliografía, el número de TCP empleado para la realización del contraste de precisiones presenta una gran variabilidad. El mínimo de puntos de control es 2, pero suelen utilizarse más (algunos autores omiten este dato) dependiendo de la complejidad del elemento y de su tamaño, entre otros. Algunos ejemplos: El-Hakim et al., (2004) utiliza 11 TCP para evaluar la técnica en arte rupestre, Ortiz et al., (2005) recurre a 52 TCP para chequear el modelo de un molino, Arias et al., (2005) a 64 en un grupo arquitectónico y Smith et al., (2009) 18 para el modelado de una gran extensión de terreno. En el caso de la evaluación de nubes de puntos es habitual emplear centenares e incluso miles de TCP (Chandler et al., 2005). A este grupo pertenecen los trabajos que introducen en la escena elementos de geometría conocida (planos, esferas, cubos, etc.) para evaluar las diferencias con la nube de puntos generada de esa misma pieza. También es común la comparación con la nube extraída por otros sistemas de recuperación masiva de puntos como el láser escáner terrestre (Höhle y Höhle, 2009).

La calidad de las mediciones realizadas sobre los TCP depende en gran medida del modo en que se señalan estos en la realidad y su relación con el marcado de ese mismo punto en las fotografías. Es decir, el punto debe poder ser señalado fácilmente mediante las metodologías propias de la técnica de referencia (por ejemplo, un prisma) y las de la técnica fotogramétrica empleada. El uso de TCP pertenecientes a la superficie del objeto facilita ambas cosas, pero deben ser altamente identificables para que resulte viable su uso. Muchos autores recurren a elementos ajenos al objeto (dianas) compatibles con la técnica de referencia y la técnica fotogramétrica evaluada como pinturas, dianas impresas (codificadas o sin codificar) (Schneider et al., 2009), dianas reflectantes, dianas volumétricas (Ortiz et al., 2005), etc.

La tecnología empleada como técnica de referencia para el contraste de los TCP recogida en la literatura, a diferencia del resto de los parámetros descritos, es poco variable. A pesar de que hay trabajos que emplean tecnología específica, como por ejemplo un rugosímetro de agujas (dispositivo que permite obtener datos puntuales de altura a lo largo de un perfil obteniéndose perfiles paralelos separados por distancias regulares (Abd Elbasit et al., 2009)) o un sensor de desplazamiento para deformaciones a flexión (Jiang et al., 2007), la mayoría se decanta por la estación total (Desmond y Bryan, 2003; Arias et al., 2006; Fujii et al., 2009;

Barazzetti et al., 2011), un simple calibre (Ortiz et al., 2010), un láser escáner terrestre (Sturzenegger y Stead, 2009) o una estación total robotizada (Kvamme et al., 2006).

En una segunda fase, se extraen las características métricas de los PCP a partir del modelo 3D digital creado por software fotogramétrico. Los PCP son puntos obtenidos mediante la técnica fotogramétrica empleada que se corresponden, virtualmente, con los TCP. La calidad de las mediciones realizadas sobre ellos va a depender de la MQ de la técnica fotogramétrica empleada y de todos los factores que afectan a la precisión del modelo 3D digital explicados anteriormente. A pesar de que los PCP no deberían ser usados en el proceso de restitución directamente (Chandler et al., 2003), muchos autores utilizan erróneamente parte de los CP, empleados en la elaboración del modelo 3D para obtener la calibración, la orientación o el escalado (o varios a la vez), como TCP. Este error es frecuente en trabajos en los que se evalúan puntos discretos, pero por lo general no ocurre así en la evaluación de nubes de puntos o mallas poligonales. En estos casos, el proceso de generación de los puntos de la nube o de la malla final no repercuten en los parámetros de orientación de las imágenes, en el escalado y mucho menos en la calibración, más aún, son consecuencia del mejor o peor ajuste de estos procesos.

Para obtener una expresión numérica que proporcione una idea de la MQ de la técnica fotogramétrica evaluada es necesario seguir un procedimiento estadístico de comparación de las diferencias observadas en dos parámetros de contraste (errores en la estimación de coordenados y/o en la estimación de la distancias) entre los TCP y los PCP. La evaluación del error en la estimación de coordenadas se realiza mediante la comparación de las tres coordenadas de los n PCP con las propias de los n TCP, estas últimas consideradas verdaderas o de referencia. Para ello es necesario que los PCP y los TCP tengan el mismo sistema espacial de coordenadas, es decir, ambos sólidos deben estar acoplados mediante un procedimiento estadístico consistente en trasladar y girar los PCP de modo que se ajusten lo mejor posible a los TCP, minimizando así la diferencia de posición. Una vez optimizado el ajuste, se prescinde del sistema de coordenadas del modelo fotogramétrico y se emplea solamente el sistema de coordenadas de la técnica de referencia. De esta forma se obtiene:

Error cometido en la estimación de la coordenada X . Diferencia entre la coordenada X del punto i obtenida mediante la técnica fotogramétrica y la coordenada de dicho punto obtenida mediante la técnica de referencia.

$$\Delta_{x-i} = X_{i-PCP} - X_{i-TCP}$$

Error cometido en la estimación de la coordenada Y . Diferencia entre la coordenada Y del punto i obtenida mediante la técnica fotogramétrica y la coordenada de dicho punto obtenida mediante la técnica de referencia.

$$\Delta_{y-i} = Y_{i-PCP} - Y_{i-TCP}$$

Error cometido en la estimación de la coordenada Z . Diferencia entre la coordenada Z del punto i obtenida mediante la técnica fotogramétrica y la coordenada de dicho punto obtenida mediante la técnica de referencia.

$$\Delta_{z-i} = Z_{i-PCP} - Z_{i-TCP}$$

Error total cometido en la estimación de la posición del punto. Diferencia entre la posición del punto i obtenida mediante la técnica fotogramétrica y la posición de dicho punto obtenida mediante la técnica de referencia. Se determina analíticamente mediante la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los errores anteriores.

$$\Delta_{t-i} = \sqrt{\Delta_{x-i}^2 + \Delta_{y-i}^2 + \Delta_{z-i}^2}$$

Algunos autores evalúan los errores existentes entre TCP y PCP mediante la medición de distancias (Jiang y Jauregui, 2007). Para ello se comparan las distancias medidas entre n TCP tomados dos a dos, con las mismas distancias entre los n PCP, que se consideran verdaderas o de referencia. Matemáticamente implica estudiar la diferencia de la distancia entre el punto i y el punto k obtenida mediante la técnica fotogramétrica empleada ($d_{i-k-PCP}$) y la misma distancia obtenida mediante la técnica de referencia ($d_{i-k-TCP}$).

$$\Delta_{d-i-k} = d_{i-k-PCP} - d_{i-k-TCP}$$

A diferencia del análisis en base a las coordenadas, en este caso no es necesario que exista un sistema de coordenadas común ya que el único requisito es que el modelo se encuentre escalado.

Para poder llegar a dar un valor final representativo e indicativo de la calidad del método fotogramétrico, es necesario realizar un tratamiento estadístico de los parámetros comparados. Es importante también conocer los conceptos relacionados con la calidad métrica de un modelo fotogramétrico: exactitud y precisión. La exactitud nos informa de lo cerca que el resultado de una medición está del valor verdadero. Cuanto más cerca está el valor medido del real, más exacto es un método de medición. La exactitud de un instrumento o método de medición está asociada a la calidad de la calibración del mismo. Por otro lado, la precisión de un instrumento o método de medición está asociada a la sensibilidad o menor variación de la magnitud que se pueda detectar, es decir, a la dispersión del conjunto de los valores obtenidos de mediciones repetidas. Cuanto menor es la dispersión, mayor es la precisión.

Los autores recurren a diferentes estadísticos para calcular el valor numérico de la MQ. Los siguientes índices proporcionan información de la exactitud del método fotogramétrico empleado. La media aritmética, también llamada promedio o simplemente media, muestra el valor central de los datos observados, siendo la medida de ubicación que más se utiliza. La media es utilizada tanto para estimar el error entre distancias (Guidi et al., 2003) como en coordenadas (Aguilar et al., 2005; Smith et al., 2009). Algunos autores recurren a la media del error (Jiang y Jauregui, 2007; Lejot et al., 2007) o a la media del valor absoluto del error (Abdo et al., 2006; Barazzeti et al., 2011). Los errores absolutos se utilizan cuando interesa conocer la magnitud de los errores y no su signo y, por otra parte, permiten hacer afirmaciones de probabilidad sin necesidad de asumir una distribución simétrica (Höhle y Höhle, 2009). Otros índices empleados son, el MSE, que calcula la media aritmética de los cuadrados de los errores y permite cuantificar la cantidad en que difiere un estimador del verdadero valor de la cantidad que se estima (Ortiz et al., 2005) y el RMSE, una medida de la diferencia entre los valores pronosticados por un modelo o un estimador y los valores observados de la realidad (Arias et al., 2007; Aguilar et al., 2008; Yilmaz et al., 2008; Abd Elbasit et al., 2009).

Para la estimación de la precisión se recurre a la desviación estándar, también conocida como desviación típica. Es una medida de dispersión que nos da idea de cuánto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio en una distribución. En la literatura consultada se emplea como elemento estimador de la MQ tanto en el caso de que el contraste se efectúe con distancias como con coordenadas. Los más comunes son la desviación estándar del error (Chandler et al., 2003; Wackrow y Chandler, 2008; Chiabrando et al., 2011) y la desviación

estándar del valor absoluto del error (Aguilar et al., 2005; Abdo et al., 2006; Gomez-Lahoz et al., 2009).

La MQ puede expresarse tanto en error absoluto, como en error relativo. El primero calcula la diferencia entre el valor de la medida, obtenida con la técnica fotogramétrica evaluada y el valor obtenido con la técnica de referencia, tomado como exacto. El resultado tendrá las mismas unidades que las de la medida y puede ser positivo o negativo. Un ejemplo de la aplicación de la MQ en base a errores absolutos, en trabajos arquitectónicos, lo encontramos en Carbonell (1989), el cual clasifica los métodos fotogramétricos en tres grupos en función del grado de exactitud: métodos fotogramétricos muy precisos, exactitud de 1 mm o incluso menor; métodos fotogramétricos precisos, para rangos de exactitud en torno a 1 o 2 mm y métodos fotogramétricos sencillos y rápidos, métodos caracterizados por su simplicidad y el bajo coste del equipo requerido. Un error máximo por debajo de los 5 cm se consideraría aceptable. Por otro lado, el error relativo nos permitirá estimar la exactitud referida al tamaño del objeto y se expresará de la siguiente manera

$$1: \frac{D}{E}$$

Dónde: D : diagonal mayor del objeto estudiado y E : valor del estimador al que hace referencia ($\bar{\Delta}$, MSE_{Δ} , $RMSE_{\Delta}$, σ_{Δ} , etc.).

Algunos autores (Ortiz et al., 2010) aplican directamente la expresión descrita, aunque también existen trabajos en los que el error relativo se calcula respecto a la distancia medida en lugar de a la diagonal mayor (Guidi et al., 2004).

En base a la MQ, es posible realizar análisis comparativos de diferentes técnicas fotogramétricas empleadas. Se entienden, por tanto, como técnicas diferentes, aquellas que impliquen cualquier variación que afecte a la obtención de los PCP. En este sentido, los más habituales son aquellos trabajos que comparan técnicas que difieren en la cámara fotográfica empleada (Chandler et al., 2003; Chandler et al., 2005; Ortiz et al., 2005; Chiabrando et al. 2011), en el número de puntos de control empleado (Karras et al., 1999; Deng y Faig, 2001; Aguilar et al., 2008; Xinguang et al., 2009), en el número de fotografías realizadas (Stojic et al., 1998; Chandler et al., 2003), en la técnica de calibración empleada (Pappa et al., 2001; Chandler et al., 2003; Schneider et al., 2009; Smith et al., 2009) o en el software utilizado (Chiari et al., 2008; Barazzetti et al., 2011).



4. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es investigar la capacidad de los modelos 3D digitales creados, mediante métodos fotogramétricos de rango cercano y CAI para documentar geoméricamente el patrimonio cultural e histórico con el objetivo de sentar las bases para una estandarización metodológica en la aplicación de esta tecnología en diferentes tipologías de elementos de nuestro patrimonio histórico y cultural, garantizando su capacidad de interrelación con otras disciplinas. Es decir, se trata de proponer procesos estandarizados que ayuden a gestionar y vertebrar los resultados con el objetivo de facilitar una investigación interdisciplinar. Se ha seleccionado un conjunto de cuatro importantes representantes del patrimonio cultural gallego a fin de conseguir la mayor variabilidad de tipologías posible dentro de las limitadas posibilidades económicas existentes.

Para lograr este objetivo general fue necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Probar la aplicabilidad de la fotogrametría de rango cercano en combinación con la CAI en la documentación geométrica de petroglifos, de diferentes tamaños y características, de la zona de Antas de Ulla y Samos, Lugo. Realizar una valoración visual del modelo 3D generado y de los productos obtenidos a partir de este y evaluar la calidad de medida alcanzada con la metodología planteada. Este objetivo se alcanza en el primer caso de estudio (Capítulo 5).
2. Probar la aplicabilidad de la fotogrametría de rango cercano en combinación con la CAI en la documentación geométrica de excavación arqueológica, en concreto, sobre el Castro de Formigueiros en Samos, Lugo. Este proyecto fue financiado por la “Consellería de Cultura e Deporte de la Xunta de Galicia” supuso la primera aplicación del software (Photomodeler Scanner) en el ámbito de la fotogrametría para el levantamiento de este tipo de asentamientos. Realizar una valoración visual del modelo 3D generado y de los productos obtenidos a partir de este y evaluar la calidad de medida alcanzada con la metodología planteada. Este objetivo se alcanza en el segundo caso de estudio (Capítulo 6).
3. Probar la aplicabilidad de la fotogrametría de rango cercano en combinación con la CAI en la documentación geométrica fachadas históricas, en concreto, en el entorno del Pórtico de la Gloria, en las torres y la tribuna de las cubiertas de la Catedral de Santiago de Compostela. Este proyecto fue financiado por la Dirección Xeral de Patrimonio Cultural de la Xunta de Galicia (Programa Catedral de Santiago), Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE) del Ministerio de Cultura, Fundación Pedro Barrié de la Maza, Arzobispado de Santiago de Compostela y Cabildo de la Catedral de Santiago de Compostela. Realizar una valoración visual del modelo 3D generado y de los productos obtenidos a partir de este y evaluar la calidad de medida alcanzada con la metodología planteada. Este objetivo se alcanza en el tercer caso de estudio (Capítulo 7).
4. Probar la aplicabilidad de la fotogrametría de rango cercano en combinación con la CAI en la documentación geométrica de pavimentos históricos, en concreto, sobre uno de los más importantes de Galicia como es el enlosado de granito de Santiago de Compostela. Realizar una valoración visual del modelo 3D generado y de los productos obtenidos a partir de este y evaluar la calidad de medida alcanzada con la metodología planteada. Este objetivo se alcanza en el cuarto caso de estudio (Capítulo 8).



5. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PETROGLIFOS

Autores: Ortiz, J., Gil, M.L., Martínez, S., Rego, T., Meijide, G.

Título: A Simple Methodology for Recording Petroglyphs Using Low-Cost Digital Image Correlation Photogrammetry and Consumer-Grade Digital Cameras.

Ref. Revista: Journal of Archaeological Science. Volume 37, Issue 12, Pages 3158–3169

Date: 2010

Enlace: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440310002578>





6. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE CASTROS

Autores: Ortiz, J., Gil, M.L., Martínez, S., Rego, T., Meijide, G.

Título: Three-dimensional Modelling of Archaeological Sites Using Close-range Automatic Correlation Photogrammetry and Low-altitude Imagery.

Ref. Revista: Archaeological Prospection. Volume 20, Issue 3, Pages 205-217

Date: 2013

Enlace: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/arp.1457/>





7. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE FACHADAS

Autores: Martínez, S., Ortiz, J., Gill, M.L., Rego, T.

Título: Recording Complex Structures using Close Range Photogrammetry: the Cathedral of Santiago de Compostela.

Ref. Revista: The Photogrammetric Record. Volume 28, Issue 144, Pages 375–395

Date: 2013

Enlace: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12040/abstract>





8. DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA DE PAVIMENTOS

Autores: Martínez, S., Ortiz, J., Gill, M.L.

Título: Geometric Documentation of Historical Pavements using Automated Digital Photogrammetry and High-Density Reconstruction Algorithms.

Ref. Revista: Journal of Archaeological Science. Volume 53, Pages 1–11

Date: 2015

Enlace: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440314003720>





9. CONCLUSIONES

En el primer caso de estudio (Capítulo 5) de documentación geométrica de petroglifos, las principales conclusiones alcanzadas fueron:

1. La metodología resultó muy eficiente en cuanto al rendimiento de tiempos y muy rentable, produciendo de forma exitosa el modelo de elevaciones en 3D, con una desviación estándar de aproximadamente 1mm. Esto confirma la alta precisión alcanzable por los métodos fotogramétricos. Además, se pueden obtener fácilmente nubes con puntos separados 1:2000 respecto a la diagonal del objeto, lo que permite apreciar surcos de una profundidad de hasta 1:1000 de la diagonal del petroglifo.
2. Mediante un sencillo procedimiento y un pie de rey, es posible adquirir datos de chequeo, lo que permite estimar la calidad métrica del modelo final.
3. El software Eos System Photomodeler Scanner está muy bien optimizado para su uso a nivel usuario y puede utilizarse sobre ordenadores con un hardware básico, aunque cuando su uso pretende la obtención de modelos de alto detalle, aspectos como el procesador (CPU) y la memoria RAM deben ser potenciados.
4. Los métodos de digitalización en 3D para la documentación de petroglifos permiten registrar mucha más cantidad y variedad de información que las metodologías tradicionales en 2D, poniendo al alcance de arqueólogos, conservadores y otros gestores de este patrimonio un amplio abanico de técnicas virtuales que, aplicadas de forma independiente o combinadas entre sí, pueden constituir una valiosa herramienta de análisis y difusión de este patrimonio.
5. El estudio ha sido realizado tomando como objetos de estudio petroglifos situados en rocas con poca curvatura, de modo que un único estereopar es suficiente para generar nubes de puntos. Cuando la morfología del objeto es más compleja, puede ser necesario, para obtener el modelo 3D, emplear un mayor número de estereopares y por tanto, existe la necesidad de nuevas pruebas.
6. La técnica puede presentar limitaciones en lugares oscuros, como las cuevas, por lo que podría ser interesante la aplicación del método en condiciones de poca luz, mediante largos tiempo de exposición o empleando flash.

En el segundo estudio (Capítulo 6), se adaptó la metodología propuesta en el artículo anterior para su aplicación en excavaciones arqueológicas, más concretamente en el Castro de Formigueiros, en Samos, Lugo.

7. El método fotogramétrico desarrollado permitió adquirir satisfactoriamente el modelo 3D digital completo, con texturas fotorrealistas, del Castro de Formigueiros.
8. La metodología ha permitido comprobar el enorme potencial del software Photomodeler Scanner para la adquisición de nubes de puntos y la generación de modelos complejos empleando únicamente una cámara fotográfica convencional.
9. La documentación geométrica de excavaciones arqueológicas mediante la creación de modelos 3D proporciona a los arqueólogos, conservadores y a los gestores del patrimonio cultural una más completa y detallada información que la que pueden ofrecer los métodos tradicionales, además de una gama de herramientas muy útiles para su análisis y difusión.
10. Los arqueólogos pueden medir, con alta calidad métrica, directamente y de forma interactiva sobre el modelo 3D generado.

11. Los resultados finales han sido bien recibidos por arqueólogos expertos principalmente por la calidad métrica y visual, la rapidez del proceso y su coste.
12. La utilización del mástil como sistema de elevación de la cámara, unido a la fotogrametría de rango cercano y a la CAI, ha demostrado ser una combinación eficiente en el trabajo de campo y muy rentable, permitiendo obtener un error absoluto medio de 8,3 mm en las nubes de puntos. Las fotografías obtenidas se han obtenido correctamente a la distancia deseada, por lo que ha sido posible producir nubes de puntos homogéneas en lo que respecta a la resolución y a la precisión.
13. El reducido coste es uno de los principales beneficios del binomio mástil/CAI, ya que el equipo necesario para obtener las nubes de puntos y el modelo 3D del Castro tiene un coste inferior a 6500€ e incluye: cámara, PC, mástil y software.
14. La reducción de costes de la metodología y la calidad del producto final obtenido, es probable que contribuya al aumento del uso de esta técnica entre los usuarios finales.

El tercer caso de estudio (Capítulo 7) permitió constatar la validez de la metodología propuesta basada en fotogrametría de rango cercano y la CAI (Fotogrametría Multimagen) sobre edificios históricos complejos.

15. El método fotogramétrico propuesto se presenta como un sistema de documentación en 3D preciso, capaz de competir en igualdad de condiciones con otras técnicas modernas como el láser escáner, y superar ampliamente a las más tradicionales.
16. En este estudio se ha descrito también el proceso a seguir para producir planos en CAD en base a ortofotos creadas a partir del propio modelo 3D. La ortofoto generada posee una resolución muy alta dado que las fotos se realizaron desde muy cerca y esto permite restituir también con un nivel de detalle del orden de milímetros.
17. Las medidas de prevención permiten reducir la tasa de destrucción pero los modelos 3D digitales de un edificio histórico lo preservan indefinidamente en el tiempo.
18. El modelo 3D generado puede emplearse igualmente con otros fines, como la educación, exposición en museos virtuales, para permitir a los científicos estudiar el elemento de nuevas formas o incluso en turismo virtual, permitiendo a los “visitantes” interactuar y explorar el monumento desde sus propias casas. Además, la posibilidad de interactuar y estudiar los modelos 3D de forma remota mejora su difusión.
19. Es importante orientar los estudios futuros en el campo de la fotogrametría hacia una completa automatización del proceso de modelado 3D en gabinete sin pérdida de precisión. A día de hoy, la mayor parte de los sub-procesos son automáticos, pero alguno de ellos, como la creación de la malla poligonal en 3D (con o sin textura) necesita una intervención manual por parte de un operador. Eos System Photomodeler Scanner emplea algoritmos que trabajan con estereopares (cada estereopar está conformado por imágenes y es necesario seleccionar manualmente cada estereopar para generar la nube de puntos asociada y, en muchos casos, editarla de forma manual una vez generada. Actualmente, la Fotogrametría Digital Automatizada permite aplicar los algoritmos de CAI entre todas las fotografías a través de un proceso totalmente automático.
20. La aplicación de fotogrametría de rango cercano y la CAI, en combinación con mástil, permite obtener modelos 3D de alta calidad con un coste muy ajustado (el equipo está en torno a los 6000€, incluyendo cámara, software, mástil y PC), lo que la convierte en una metodología muy competitiva. Rivaliza directamente con el láser escáner terrestre, ampliamente utilizado en este tipo de estructuras.

21. La utilización del mástil fue decisiva para lograr fotografías cercanas de las zonas más altas e inaccesibles, consiguiendo puntos de vista imprescindibles para obtener los modelos 3D con el grado de detalle y definición requeridos
22. La metodología propuesta permite crear, de forma sencilla y precisa, modelos 3D de edificios históricos y monumentos con un mismo equipo independiente del tamaño del elemento, es decir, sin tener que invertir en equipo para diferentes estructuras.
23. Casi cualquier trabajo puede ser resuelto por un usuario que tenga conocimientos en fotografía y sepa usar el software, aunque no tenga conocimientos previos en fotogrametría.
24. Este trabajo permite mostrar el potencial alcanzable con esta técnica en la elaboración, tanto de los modelos 3D digitales, como ortofotos y planos completos en edificios muy detallados y complejos, con condiciones de espacio reducidas y en un contexto relevante y conocido mundialmente. Con ello se pretende motivar a los expertos en conservación para que comprueben sus bondades y recurran así a su uso en el futuro.

El cuarto caso de estudio (Capítulo 8) evaluó la aplicación del método a la documentación geométrica de pavimentos históricos, más concretamente, en un tramo de calle representativo de Santiago de Compostela, la Travesía das Dúas Portas.

25. Tras el análisis de los resultados del modelado 3D del tramo de pavimento se puede afirmar que la utilización de la metodología propuesta, combinada con el mástil, es una opción altamente interesante para la documentación geométrica de estos bienes patrimoniales. Los resultados a nivel métrico, muy por encima de las necesidades marcadas por los técnicos del servicio de mantenimiento, y la posibilidad de ejecutar el levantamiento fotogramétrico sin interferir en la rutina normal de la ciudad, refuerzan esta afirmación.
26. Los resultados obtenidos son concordantes, en términos de costes de trabajo y tiempos de ejecución con los de otros estudios previos lo que avala el empleo del método de para la documentación 3D respecto de otras técnicas de modelado 3D.
27. En cuanto a la inversión económica y amortización, tiempos de realización de la toma de datos y tiempos de postproducción en gabinete, es un sistema enormemente competitivo. La toma de datos es más ágil y rigurosa durante la inspección y evita el desplazamiento del técnico a la zona en cuestión. Todo ello, redunda de forma evidente en la gestión de las obras.
28. La utilización del mástil es fundamental para la obtención de fotografías oblicuas de gran calidad. Su sencillez y maniobrabilidad en campo ha sido muy satisfactoria y ha permitido establecer una red fotogramétrica homogénea que repercute en la calidad volumétrica y estética del modelo. Con la información pictográfica obtenida, Agisoft PhotoScan es capaz de generar un modelo 3D de muy alta calidad y con una densidad de polígonos uniforme en toda su extensión. Las texturas generadas, además de tener una calidad visual fotorrealista de muy alta resolución, son muy fiables (algo fundamental para realizar restituciones con precisión), ya que son el punto de partida de toda la reconstrucción 3D. Para crear unas texturas similares en modelos obtenidos mediante mallas provenientes de nubes de un láser escáner, el proceso de postproducción requiere de una fase amplia de elaboración y manejo de distintos software, tanto para la calibración y orientación de la cámara como para la creación de los mapas de texturas y su proyección final.
29. Las características del proyecto han permitido acotar la calidad de generación de la malla poligonal en el nivel medio. Agisoft PhotoScan sería capaz de elaborar, a partir del mismo material pictográfico, un modelo hasta dos grados de detalle mayor: alto y muy alto. Estos dos niveles supondrían un aumento de detalle a nivel de la microtopografía de cada losa (apreciación de la rugosidad, grietas finas, etc.) pero no supondrían una mejora de cara a las

necesidades del proyecto. Por la contra, la comparación automática de píxeles a ese nivel de detalle requiere un hardware de gran potencia y el consumo de tiempo para la generación del modelo sería mucho mayor.

30. Además, el número de triángulos final de la malla se ha restringido a 10 millones por limitaciones de hardware, ya que, en calidad media, el número resultante de triángulos, al no aplicar esta restricción, colapsarían el ordenador al mostrarse en pantalla. Posteriormente, se ha reducido el número de triángulos (2 millones de polígonos) y la resolución de las texturas (16000x16000 píxeles) para poder exportar el modelo para su utilización por terceros. Un modelo de varios millones de polígonos y texturas enormes, difícilmente podrá ser estudiado por un especialista sin conocimientos ni medios. Una de las tareas más importantes y necesarias de los profesionales que se encargan de la documentación métrica, independientemente del método seguido, es la de acercar el producto al cliente y enseñarle a cómo extraer información útil. Además, debe potenciarse el aspecto métrico de este tipo de productos sobre el puramente estético.

Por tanto, la fotogrametría de rango cercano y la CAI han demostrado un enorme potencial en la documentación geométrica del patrimonio cultural, desde elementos sencillos y simples, como los petroglifos, pasando por elementos de gran tamaño, como los castros o los pavimentos y hasta por elementos de alta complejidad y difícil acceso, como las fachadas de edificios históricos. Se ha reducido drásticamente el coste con respecto a otros métodos de adquisición de modelos 3D, como el láser escáner y además, se ha conseguido un nivel de automatismo muy elevado, sobre todo en este último estudio, con el software de Fotogrametría Digital Automatizada; todo ello consiguiendo una calidad visual y de medida muy altas.

A partir de los resultados obtenidos con la metodología fotogramétrica aplicada puede elaborarse una gran variedad de productos derivados del modelo 3D digital con el objetivo de garantizar la capacidad de interrelación con otras disciplinas, de manera que puedan ser estudiados por profesionales de diferentes campos que posiblemente no tengan conocimientos en fotogrametría. Ejemplos de productos derivados son: crear planos 2D/3D para arquitectos; ortofotos y DEMs para expertos en GIS; curvas de nivel, planos de pendientes y planos de orientaciones para topógrafos; renderizados del modelo 3D para ilustrar revistas; material audiovisual para la creación de reportajes o películas; generación de modelos en formatos estándar (OBJ, U3D, 3DS, 3DM, VRML, etc) para su visualización a través de visores 3D gratuitos (Adobe Reader permite visualizar modelos 3D integrados en un PDF) o incluso visores Web; planos de secciones con textura fotorrealista para arqueólogos; mapas de escorrentías para personal de planificación urbanística; etc. Los productos derivados facilitan la integración del modelo 3D original en multitud de disciplinas, lo que favorece en términos de difusión y promueve la realización de investigaciones paralelas, encaminadas, muchas de ellas, hacia el objetivo común de la conservación del patrimonio cultural.

10. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Abd Elbasit, M.A.M., Anyoji, H., Yasuda, H., Yamamoto, S., 2009. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification, *Hydrological Processes* 23, 1408–1417.
- Abdo, D.A., Seager, J.W., Harvey, E.H., McDonald, J.I., Kendrick, G.A., Shortis, M.R., 2006. Efficiently measuring complex sessile epibenthic organisms using a novel photogrammetric technique, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 339: 120–133.
- Aber, J. S., Aber, S. W., Pavri, F., 2002. Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large-scale, high-resolution, multiview-angle imagery, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (1): 6 pages.
- Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., Agüera, F., 2005. Mapping small areas using a low-cost close range photogrammetric software package with aerial photography, *Photogrammetric Record* 20 (112): 335–350.
- Aguilar, M.A., Pozo, J.L., Aguilar, F.J., Sánchez-Hermosilla, J., Páez, F.C., Negreiro, J., 2008. 3D surface modelling of tomato plants using close-range photogrammetry, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, XXXVII, Part B1, 6 págs.
- Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y., Haala, N., 2009. Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry, *Journal of Archaeological Science* 36 (2): 537–546.
- Almagro, A., 1996. Experiences in the use of semi-metric cameras in the School of Arabic Studies, XV International Symposium of Architectural Photogrammetry, Rumanía, Bucarest, 11 págs.
- Apollonio, F., Gaiani, M., Benedetti, B., 2012. 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: a framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area, *Journal of Archaeological Science* 39: 1271–1287.
- Arayici, Y., 2007. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment, *Automation in Construction* 16 (6): 816–829.
- Arias, P., Caamaño, J. C., Lorenzo, H., Armesto, J., 2007. 3D modeling and section properties of ancient irregular timber structures by means of digital photogrammetry, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22(8): 597–611.
- Arias, P., Herráez, J., Lorenzo, Ordóñez, H.C., 2005. Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods, *Computers and Structures* 83: 1754–1766.
- Arias, P., Ordoñez, C., Lorenzo, H., Herráez, J., 2006. Methods for documenting historical agro-industrial buildings: a comparative study and a simple photogrammetric method, *Journal of Cultural Heritage* 7: 350–354.
- Atkinson, K.B., 1968. The recording of some prehistoric carvings at Stonehenge, *The Photogrammetric Record* 6 (31), 24–31.
- Baker, A, Fitzpatrick, R., Koehne, S., 2004. High resolution low altitude aerial photography for recording temporal changes in dynamic surficial environments, *Regolith*, 21-25.

- Bambach, M.R., 2009. Photogrammetry measurements of buckling modes and interactions in channels with edge-stiffened flanges, *Thin-Walled Structures* 47: 485–504.
- Barazzetti, L., Binda, L., Cucchi, M., Scaioni, M., Taranto, P., 2009. Photogrammetric reconstruction of the My Son G1 temple in Vietnam, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5/W1).
- Barazzetti, L., Binda, L., Scaioni, M., Taranto, P., 2011. Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: application to the “G1” temple in Myson, Vietnam, *Journal of Cultural Heritage* 12 (3): 253–262.
- Bedate, A., Herrero, L.C., Sanz, J.A., 2004. Economic valuation of the cultural heritage: application to four case studies in Spain, *Journal of Cultural Heritage* 5: 101–111.
- Beraldin, J.A., Blai, F., Boulanger, P., 2000. Real world modelling through high resolution digital 3D Imaging of objects and structures, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 55: 230–250.
- Bird, S., Hogan, D., Schwab, J., 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy, *Earth Surface Processes and Landforms* 35 (8): 952–970.
- Bird, S., Hogan, D., Schwab, J., 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy, *Earth Surface Processes and Landforms* 35 (8): 952–970.
- Bitelli, G., Unguendoli, M., Vittuari, L., 2001. Photographic and photogrammetric archaeological surveying by a kite system, *Proceedings 3rd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin*, Elsevier, París, 6 págs.
- Blais, F., 2004. A review of 20 years of range sensors development, *Journal of Electronic Imaging* 13 (1): 231–240.
- Blyenburgh, P., 1999. UAVs: and Overview, *Air & Space Europe* 5(6): 43-47.
- Boike, J., Yoshikawa, K., 2003. Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography, *Permafrost Periglac. Process.* 14: 81–85.
- Brown, D. C., 1972. Calibration of close-range cameras, *International Archives of Photogrammetry* 19 (5): 26 págs.
- Cabana, A., Carral, E., Gil, M.L., Rego, M.T., 2009. Metodología. Os Caneiros do Miño no Concello de Lugo, TaTaTa, Concello de Lugo, 5 págs.
- Camomilla, V., Donati, M., Stagni, R., Cappozzo, A., 2009. Non-invasive assessment of superficial soft tissue local displacements during movement: a feasibility study, *Journal of Biomechanics* 42 (7): 931–937.
- Carbonell, M., 1989. Architectural photogrammetry, *Karara HM, Non-topographic photogrammetry*. Falls Church, Virginia, 321–47.
- Chandler, J.H., Bryan, P., Fryer, J.G., 2007. The development and application of a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras. *The Photogrammetric Record* 22 (117): 10–21.
- Chandler, J.H., Bryan, P., Fryer, J.G., 2007. The development and application of a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras, *The Photogrammetric Record* 22 (117): 10–21.

- Chandler, J.H., Buffin-Belanger, T., Rice, S., Reid, I., Graham, D.J., 2003. The accuracy of a river bed moulding/casting system and the effectiveness of a low-cost digital camera for recording river bed fabric, *Photogrammetric Record* 18 (103): 209–223.
- Chandler, J.H., Fryer, J.G., Kniest, H.T., 2005. Non-invasive three-dimensional recording of Aboriginal rock art using cost-effective digital photogrammetry, *Rock Art Research* 22 (2): 119–130.
- Chen, X., Vierling, L., 2006. Spectral mixture analyses of hyperspectral data acquired using a tethered balloon, *Remote Sensing of Environment* 103: 338–350.
- Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F., 2011. UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy), *Journal of Archaeological Science* 38 (3): 697–710.
- Chiari, Y., Wang, B., Rushmeier, H., Caccone, A., 2008. Using digital images to reconstruct three-dimensional biological forms: a new tool for morphological studies, *Biological Journal of the Linnean Society* 95 (2): 425–436.
- Clarke, T.A., Fryer, J.G., 1998. The Development of Camera Calibration Methods and Models, *The Photogrammetric Record* 16 (91): 51–66.
- Deng, G., Faig, W., 2001. An evaluation of an off-the-shelf digital close-range photogrammetric software package, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67 (2): 227–233.
- Desmond, L.G., Bryan P.G., 2003. Recording architecture at the archaeological site of Uxmal, Mexico: a historical and contemporary view, *The Photogrammetric Record* 18 (102): 105–130.
- Di, K., Xu, F., Wang, J., Agarwal, S., 2003. Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 Mars Exploration Rover mission, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63: 181–201.
- Díaz-Andreu, M., Brooke, C., Rainsbury, M., Rosser, N., 2006. The spiral that vanished: the application of non-contact recording techniques to an elusive rock art motif at Castlerigg Stone Circle in Cumbria, *Journal of Archaeological Science* 33 (11): 1580–1587.
- Doneus, M., Verhoeven, G., Fera, M., Briese, Ch., Kucera, M., Neubauer, W., 2011. From deposit to point cloud - a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations, *Proceedings of 23rd International CIPA Symposium, Praga, República Checa*.
- Dziembowska, J., Funck, R., 2000. Cultural activities as a location factor in European competition between regions: concepts and some evidence, *Annals of Regional Science* 34: 1–12.
- Eisenbeiß, H., 2009. UAV Photogrammetry, Ph.D. thesis, University of Technology Dresden, Zurich.
- El-Hakim, S.F., Beraldin, J.A., Gonzo, L., Whiting, E., Jemtrud, M., Valzano, V., 2005. A hierarchical 3D reconstruction approach for documenting complex heritage sites, *CIPA XX International Symposium, Torino*, 790–795.
- El-Hakim, S.F., Fryer, J., Picard, M., 2004. Modeling and visualization of aboriginal rock art in the Baiame Cave, *Proceedings of ISPRS XXth Congress, Estambul, Turquía*, 5 págs.
- Ergun, B., 2010. A novel 3D geometric object filtering function for application in indoor area with terrestrial laser scanning data, *Optics & Laser Technology* 42: 799–804.

- Faustmann, A., Palmer, R., 2005. Wings over Armenia: use of a paramotor for archaeological aerial survey, *Antiquity* 79 (304): 402–410.
- Fraser, C.S., 2006. Evolution of network orientation procedures, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5): 114–120.
- Fryer, J.G., Brown, D.C., 1986. Lens distortion for close-range photogrammetry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52 (2):51–58.
- Fryer, J.G., Chandler, J.H., El-Hakim, S.F., 2005. Recording and modelling an aboriginal cave painting: with or without laser scanning? *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5/W17).
- Fujii, Y., Fodde, E., Watanabe, K., Murakami, K., 2009. Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: The case of Ajina Tepa, Tajikistan, *Engineering Geology* 105: 124–133.
- Genovese, R.A., 2005. Architectural, archaeologic and environmental restoration planning methodology: historic researches and techniques of survey aiming to conservation, CIPA 20th International Symposium, Turín, Italia.
- Georgopoulos, A., Ioannidis, C., 2004. Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments, WSA1.1 Photogrammetric and Surveying Methods for the Geometric Recording of Archaeological Monuments, FIG Working Week, Grecia.
- Giacomo, G., Ditaranto, I., Scardozzi, G., 2011. Cartography of the archaeological surveys taken from an Ikonos stereo-pair: a case study of the territory of Hierapolis in Phrygia (Turkey), *Journal of Archaeological Science* 38 (9): 2051–2060.
- Gomez-Lahoz, J., González-Aguilera, D., 2009. Recovering traditions in the digital era: the use of blimps for modelling the archaeological cultural heritage, *Journal of Archaeological Science* 36: 100–109.
- Gruen, A., Beyer, H.A., 2001. System calibration through self-calibration, *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* 34: 163–193.
- Grün, A., Remondino, F., Zhang, L., 2004. Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan, *The Photogrammetric Record* 19: 177–199.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., Ringle, K., 2008. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (B5): 213–218.
- Guidi, G., Beraldin, J.A., Atzeni, C., 2003. Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3D models metric accuracy, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 33 (4): 667–676.
- Guidi, G., Beraldin, J.A., Atzeni, C., 2004. High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena", *IEEE Transactions on Image Processing* 13 (3): 370–380.
- Hampel, U., Maas, H.G., 2009. Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (4): 345–350.

- Havemann, S., Beckmann, P., Pan, X., Fellner, D.W., 2010. Practical 3D Reconstruction of Cultural Heritage Artefacts from Photographs – Potentials and Issues. II Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación, Sevilla, 67–75.
- Hendrickx, M., Gheyle, W., Bonne, J., Bourgeois, J., De Wulf, A., Goossens, R., 2011. The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage: an example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay, *Journal of Archaeological Science* 38 (11): 2968–2978.
- Herrero, L.C., 1997. Economía de la cultura y el ocio, nuevas posibilidades para la política económica regional, *Mercurio, Revista de Economía y Empresas*, Vol. 1.
- Hieronymus, J., 2012. Comparison of methods for geometric camera calibration, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 5 págs.
- Höhlea, J., Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (4): 398–406.
- Jensen, T., Apanb, A., Young, F., Zeller, L., 2007. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform, *Computers and Electronics in Agriculture* 59: 66–77.
- Jiang, R., Jauregui, D.V., 2007. A novel network control method for photogrammetric bridge measurement, *Experimental techniques* 31 (115): 48–53.
- Johnson, G.W., Meisner, D.E., Johnson, W.L., 1990. Aerial photography of the Nazca Lines, *Memoirs of the American Philosophical Society* 183: 271–283.
- Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H., Furukawa, R., 2004. Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (5): 401–406.
- Karras, G.E., Mavrommati, D., Madani, M., 1999. Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images, *Workshop Photogrammetric Measurement, Object Modelling and Documentation in Architecture and Industry*, Thessaloniki, Grecia, 22 (5W11): 8–11.
- Kemper, G., Celikoyan, T.M., Altan, M.O., Toz, G., 2003. Balloon-photogrammetry for cultural heritage, 4th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, 2003, Regensburg, Alemania.
- Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Chamzas, C., 2007. On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry, *Journal of Cultural Heritage* 8, 26–31.
- Kvamme, K.L., Ernenwein E.G., Markussen, C.J., 2006. Robotic total station for microtopographic mapping: an example from the Northern Great Plains, *Archaeol. Prospect.* 13: 91–102.
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., 2007. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru, *Journal of Archaeological Science* 34: 1702–1712.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, Sven, Sol, H., Vantomme, J., van Hemelrijck, D., Habraken, A.M., 2006. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering* 44 (11): 1132–1145.

- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.L., Allemand, P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform, *Earth Surf. Process. Landforms* 32, 1705–1725.
- Lerma, J.L., 2002. *Fotogrametría moderna: Analítica y Digital*, Universidad Politécnica de Valencia.
- Leuning, R., Hughes, D., Daniel, P., Coops, N.C., Newnham, G., 2006. A multi-angle spectrometer for automatic measurement of plant canopy reflectance spectra, *Remote Sensing of Environment* 103: 236–245.
- Martínez, S., Ortiz, J., Gil, M.L., 2015. Geometric documentation of historical pavements using automated digital photogrammetry and high-density reconstruction algorithms, *Journal of Archaeological Science*, DOI: 10.1016/j.jas.2014.10.003
- Martínez, S., Ortiz, J., Gil, M.L., Rego, T., 2013. Recording complex structures using close range photogrammetry: the Cathedral of Santiago de Compostela, *The Photogrammetric Record* 28 (144): 375–395.
- McGlone J. C., Mikhail E.M., Bethel J., Mullen R., 2004. *Manual of Photogrammetry*, 5th Edition, ISBN 1570830711 / 9781570830716.
- McPherron, S.P., Gernat, T., Hublin, J.J., 2009. Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds, *Journal of Archaeological Science* 36: 19–24.
- Moerman, K.M., Holt, C.A., Evans, S.L., Simms, C.K., 2009. Digital image correlation and finite element modelling as a method to determine mechanical properties of human soft tissue in vivo, *Journal of Biomechanics* 42: 1150–1153.
- Navarro, P.R., 2012. La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos, *Revista EGA* 19: 100–111.
- Núñez, A.A., Pozueloa, F.B., 2009. Evolution of the architectural and heritage representation, *Landscape and Urban Planning* 91: 105–112.
- Oberthür, T., Cocka, J., Andersson M.S., Naranjo, R.N., Castañeda, D., Blair, M., 2007. Acquisition of low altitude digital imagery for local monitoring and management of genetic resources, *Computers and Electronics in Agriculture* 58: 60–77.
- Orteu, J.-J., 2008. 3D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering* 47 (3–4): 282–291.
- Ortiz, J., Gil, M.L., Martínez, S., Rego, T., Mejide, G., 2013. Three-dimensional Modelling of Archaeological Sites Using Close-range Automatic Correlation Photogrammetry and Low-altitude Imagery, *Archaeological Prospection* 20 (3): 205–217.
- Ortiz, J., Gil, M.L., Martínez, S., Rego, T., Mejide, G., 2010. A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras, *Journal of Archaeological Science* 37(12): 3158–3169.
- Ortiz, J., Núñez, R., Rego, T., 2005. Use of volumetric targets to improve accuracy in architectural photogrammetry at low cost, *XX International Symposium*, Torino, Italia, 6 págs.
- Pappa, R.S., Giersch, L.R., Quagliaroli, J.M., 2001. Photogrammetry of a 5m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras, *Experimental Techniques* 25 (4): 21–29.

- Pegón, P., Pinto, A.V., Geradin, M., 2004. Numerical modeling of stone-block monumental structures, *Computers and Structures* 79: 56–81.
- Remondino F, Campana S, 2007. Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts, *Proceedings of the 35th International Conference on Computer applications and quantitative methods in archaeology*, Berlín, 36–42.
- Remondino, F., El-Hakim, S.F., 2006. Image-based 3D modelling: a review, *The Photogrammetric Record* 21 (115): 269–291.
- Remondino, F., Fraser, C.S., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (5): 266–272.
- Ries, J. B., Marzloff, I., 2003. Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp, *Catena* 50 (2-4): 309-328.
- Riveiro, B., Caamaño, J.C., Arias, P., Sanz, E., 2011. Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: an approach based on a discontinuous model of voussoirs, *Automation in Construction* 20 (4): 380–388.
- Rizzi, A., Voltolini, F., Remondino, F., Girardi, S., Gonzo, L., 2007. Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage. 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, Suiza, 16–24.
- Roelofs, R., 1951. Distortion, principal point, point of symmetry and calibrated principal point, *Photogrammetria* 7 (2): 49–66.
- Sachs, C., Fabritius, H., Raabe, D., 2006. Experimental investigation of the elastic–plastic deformation of mineralized lobster cuticle by digital image correlation, *Journal of Structural Biology* 155: 409–425.
- Schneider, D., Schwalbe, E., Maas, H.G., 2009. Validation of geometric models for fisheye lenses, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64: 259–266.
- Shortis, M.R., Snow, W.L., Goad, W.K., 1995. Comparative geometric tests of industrial and scientific CCD cameras using plumb line and test range calibrations, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 30 (5W1): 53-59.
- Sitnik, R., Bolewicki, P., Rutkiewicz, J., Michoński, J., Karaszewski, M., Lenar, J., Mularczyk, K., Załuski, W., 2010. Project “revitalization and digitization of the seventeenth century palace complex and garden in Wilanow – phase III” Task “3d digitalization of selected exhibits collection”, EuroMed2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage, Limassol, Chipre, 7–13
- Smith, M.J., Chandler, J., Rose, J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography, *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 155–161.
- Stanbury, P., Clegg, J., 1990. *A Field Guide to Aboriginal Rock Engravings*, Sydney University Press, 163 págs.
- Stojic, M., Chandler, J., Ashrnore, P., Luce, J., 1998. The Assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64 (5): 387–395.

- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts, *Engineering Geology* 106 (3–4): 163–182.
- Trinchao, B., Mazetto, C., Oliveira, J., Regina, O., Silva, L., 2012. 3D preserving XVIII century barroque masterpiece: Challenges and results on the digital preservation of Aleijadinho's sculpture of the Prophet Joel, *Journal of Cultural Heritage* 13: 210–214.
- UNESCO, 1972. *Photogrammetry applied to the survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology*, UNESCO editions, 1972.
- Valanis, A., Fournaros, S., Georgopoulos, A., 2010. Photogrammetric texture mapping of complex objects, EuroMed2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage, Limassol, Chipre, 52–59.
- Verhoeven G. 2009. Providing an archaeological bird's eye view - an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in archaeology, *Archaeological Prospection* 16: 233–249.
- Vierling, L., Fersdahl, M., Chen, X., Li, Z., Zimmerman, P., 2006. The Short Wave Aerostat-Mounted Imager (SWAMI): A novel platform for acquiring remotely sensed data from a tethered balloon, *Remote Sensing of Environment* 103: 255–264.
- Wackrow, R., Chandler, J.H., 2008. A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model, *The Photogrammetric Record* 23 (121): 6–18.
- Wanek, J.M., Wu, C.H., 2006. Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements, *Ocean Engineering* 33 (5–6): 723–747.
- Xinguang, D., Xianlong, J., Xiaoyun, Z., Jie, S., Xinyi, H., 2009. Geometry features measurement of traffic accident for reconstruction based on close-range photogrammetry, *Advances in Engineering Software* 40: 497–505.
- Yastikli, N., 2007. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning, *Journal of Cultural Heritage* 8: 423–427.
- Yilmaz, H. M., Yakar, M. and Yildiz, F., 2008. Documentation of historical caravansaries by digital close range photogrammetry. *Automation in Construction* 17(4): 489–498.
- Yundong, W., Qiang, Z., Shaoqin, L., 2008. A Contrast among experiments in three low-altitude unmanned aerial vehicles photography: security, quality & efficiency, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, XXXVII. Part B1, 5 págs.
- Zhang Z.X., 2007. From Digital Photogrammetry Workstation (DPW) to Digital Photogrammetry Grid (DPGrid), *Geomatics and Information Science of Wuhan University* 7: 565–571.
- Zischinsky, T., Dorffner, L., Rottensteiner, F., 2000. Application of a new model helicopter system in architectural photogrammetry, *IAPRS* 33, Amsterdam.

