

MODELADO GEOMÉTRICO DE MOLINOS HARINEROS DE VIENTO

Blanco Guadalajara, A.
www.topotectura.com, gblancoalexia@topotectura.com

Martínez García, J.J.
Universidad Politécnica de Cartagena, juanjo.martinez@upct.es

RESUMEN

En los últimos años se han desarrollado técnicas fotogramétricas para el modelado 3D de objetos mediante la utilización de múltiples imágenes tomadas desde distintos puntos de vista, motivadas por el avance de la tecnología digital, el desarrollo de programas informáticos y la disponibilidad de ordenadores muy potentes. Cada vez más, son de aplicación en el campo de la documentación del patrimonio, especialmente por la posibilidad de obtener modelos digitales de elementos patrimoniales.

Como aplicación práctica de estos procesos se ha realizado un modelo tridimensional con textura de un molino de viento harinero situado en la comarca del Campo de Cartagena, utilizando un programa específico para la generación de nubes de puntos y la reconstrucción geométrica de objetos a partir de distintas fotografías.

PALABRAS CLAVE

Molino, modelado, patrimonio, fotogrametría, reconstrucción.

1. INTRODUCCION

El estudio de la documentación del patrimonio cultural tiene hoy día un sólido soporte en las técnicas y procesos ofrecidos por la Geomática, que permiten crear productos virtuales en 2D y 3D con un gran detalle y precisión. De hecho cada vez más, en estos campos de conocimiento, se incrementa la necesidad de construir modelos 3D muy detallados para obtener distintos tipos de representación gráfica y conseguir una documentación que permita llevar a cabo análisis para conservación, restauración, estudios históricos o simplemente para visualización. Por ello, la investigación en estas materias se centra en el estudio de metodologías capaces de optimizar el rendimiento de las técnicas geomáticas y en reducir el tiempo y los costes en las fases de levantamiento y modelado.

En la documentación del patrimonio, y particularmente en la documentación de edificios o construcciones singulares, los parámetros básicos que las técnicas de levantamiento deben tener presentes en todo momento son la precisión, coste reducido, portabilidad y rapidez en la adquisición

de datos (Remondino & Rizzi, 2010). Aunque, en general, las técnicas topográficas basadas en la medida de ángulos y distancias producen medidas de más precisión, en los últimos años se han desarrollado otras técnicas de medida basadas en la adquisición de múltiples imágenes fotográficas de un mismo objeto, que están siendo muy útiles en la práctica y muy convenientes para la obtención de resultados de gran calidad (Barazzetti et al., 2011). En cualquier caso, no se puede prescindir totalmente de aquellas, que resultan ser un complemento indispensable de estas últimas. Además, las técnicas basadas en imágenes fotográficas utilizan diversos algoritmos derivados de la técnica denominada Visión por Ordenador conocidos como “Structure from Motion, SFM”, que son capaces de realizar automáticamente la mayor parte de los procesos de orientación de las imágenes y reconstrucción tridimensional en un tiempo reducido (Vergauwen & Van Gool, 2006). La metodología “Structure from Motion” permite la orientación de un gran número de imágenes sin el conocimiento previo de los parámetros geométricos de la lente de la cámara fotográfica. Esta orientación se consigue automáticamente mediante la identificación de puntos característicos comunes en las fotografías a través de algoritmos apropiados.

Otro de los algoritmos más interesantes procedentes de la Visión por Ordenador utilizados en las técnicas de modelado y reconstrucción tridimensional a partir de imágenes fotográficas es la denominada “Transformación Característica de Escala Invariante, SIFT”, (Lowe, 2004) (Scale Invariant Feature Transform) que permite realizar la correspondencia entre distintas imágenes tomadas desde diferentes posiciones, con diferentes escalas y diferente iluminación. Esto resuelve la complejidad ocasionada por la toma de imágenes fotográficas con distintas cámaras u objetivos, así como en distintas condiciones de luminosidad. Los parámetros geométricos de la cámara se calculan durante la fase de emparejamiento o correspondencia entre puntos homólogos de las distintas imágenes, procedimiento que se conoce como autocalibración. En estas técnicas todas las imágenes consecutivas son emparejadas mediante la correspondencia de puntos identificados sobre cada pareja de imágenes. De esta forma, se puede reconstruir la geometría epipolar y a partir de ella la geometría proyectiva de la escena. Los resultados de este proceso son los parámetros geométricos de la cámara, la orientación de las imágenes y la creación de una nube de puntos dispersa del objeto. Estos puntos no son útiles para obtener una reconstrucción satisfactoria del modelo, pero constituyen la base para las fases siguientes del tratamiento de las imágenes que nos permitirán obtener una nube de puntos más densa y con un mayor detalle.

La metodología “Structure from Motion” se utiliza actualmente en diversos programas de código abierto (Bundler, CMVS/PMVS2), en programas comerciales de fotogrametría (Photomodeler, Photoscan) y también en servicios de modelado 3D a través de internet (AutoDesk 123D Catch, ARC 3D Web Service, Photosynth de Microsoft). Estas aplicaciones están disponibles en internet y son gratuitas. Han sido creadas fundamentalmente para usuarios no experimentados y con el objetivo principal de obtener modelos para la visualización de objetos.

Todas estas metodologías procedentes de la Visión por Ordenador están diseñadas para automatizar los procesos de tratamiento digital de las imágenes más que para obtener precisión y exactitud (Barazzetti et al., 2011). Sin embargo, la utilización conjunta con las medidas de gran precisión obtenidas por Topografía clásica hacen de ellas unas herramientas muy potentes para la generación y reconstrucción virtual de modelos métricos 3D de una precisión notable para la mayoría de las aplicaciones en el campo de la documentación del patrimonio.

Desde hace algunos años, y de forma paralela, existe la posibilidad de obtener modelos métricos 3D mediante el empleo de los instrumentos denominados genéricamente láser escáner. Esta tecnología, de coste mucho más elevado que la basada en imágenes fotográficas, permite obtener modelos métricos de gran precisión con la ventaja de que se anula prácticamente la aparición de puntos no deseados (ruido) pertenecientes al entorno del objeto escaneado. No obstante, la metodología SFM que está en constante evolución, se viene dotando de herramientas cada vez más

potentes para conseguir modelos de calidad similar a la obtenida con láser escáner, mediante la programación de complejos algoritmos de tratamiento digital de las imágenes. Esto hace que, unido a la ventaja de su coste reducido, le sitúe como una gran competidora.

El objetivo de este trabajo es evaluar las posibilidades que ofrece la metodología SFM para el levantamiento y modelado 3D mediante aplicaciones en internet y con programas comerciales de coste reducido, para el análisis, documentación, divulgación y registro del patrimonio construido. Se ha realizado una aplicación práctica eligiendo para ello uno de los molinos de viento del Campo de Cartagena, el Molino del Tío Ginés, situado en la pedanía de Galifa, en las coordenadas geográficas GPS: $j = 37^{\circ} 36' 32''$ N y $l = 1^{\circ} 4' 37''$ W, figura 1.



Figura 1. Molino del Tío Ginés (estado actual).

2. MODELADO Y RECONSTRUCCION 3D.

En este contexto, resulta evidente que una herramienta eficiente de planificación para los gestores del patrimonio debe incluir la posibilidad de obtener modelos de zonas o elementos construidos de valor histórico para ser utilizados con diferentes propósitos: documentación de edificios históricos y monumentos para su reconstrucción o restauración si están dañados o destruidos, crear recursos educativos para estudiantes e investigadores del patrimonio histórico, simulación de nuevas construcciones, actualización y mantenimiento de las bases de datos y sistemas catastrales de información geográfica, visualización desde puntos de vista imposibles en la realidad debido al tamaño o accesibilidad de los objetos, interacción con estos elementos sin riesgo de daño, turismo virtual y divulgación del patrimonio histórico.

El alto grado de actualidad de la tecnología 3D se demuestra por un lado por el creciente interés en los sectores industrial y científico de producir modelos tridimensionales de las ciudades y por otro por el desarrollo de soluciones de captura de datos, visualización y manipulación de este tipo de datos por parte de las empresas involucradas en esta tecnología.

Las herramientas de modelado 3D sirven de ayuda para la creación de un marco dinámico para la planificación y el desarrollo de las zonas y elementos de interés cultural. Aunque generalmente son usadas para la visualización del entorno construido, cada vez más van desplazando a los tradicionales dibujos en dos dimensiones. Un modelo 3D está compuesto de objetos, materiales y capas formando una compleja estructura que permite su visualización por separado o de todos los

elementos en conjunto, permitiendo resaltar determinadas propiedades. La gran variedad de aplicaciones demuestran que los modelos 3D permiten a los usuarios procesar su contenido de forma diferente a partir de una representación digital de la realidad. Finalmente, los datos pueden ser integrados y exportados a otros programas especializados en un campo particular para un análisis específico y servir de base para la implementación de otros productos. Además con la creciente tecnología de la impresión 3D se pueden obtener modelos físicos a diferentes escalas.

3. CARÁCTER ETNOLOGICO DE LOS MOLINOS DE VIENTO.

Los molinos de viento constituyen una de las construcciones más típicas del Campo de Cartagena. Abundan por todo el paisaje de la comarca. Los agricultores de esta zona aprendieron a convertir los fuertes vientos de la costa en energía útil para labores como la molienda o la extracción de agua del subsuelo. La mayor parte de estos molinos fueron construidos entre los siglos XVIII y XIX. Se trata de un molino mediterráneo en la tipología A de Krüger, similar a los andaluces. Los molinos de viento cartageneros se clasifican en función de su uso en: molinos de viento de cereales o harineros, molinos de viento de extraer agua del subsuelo o de arcaduces, molinos de viento salineros y molinos de viento esparteros.

Los molinos de cereales se introdujeron en el s. XVI y funcionaron regularmente hasta bien entrado el s. XX (Romero-Galiana, 1995b). Entre éstos, al igual que ocurre con los andaluces orientales, pueden distinguirse los de dos cámaras, que son los más usuales, y los de una sola cámara, más modernos pues datan de finales del s. XIX (Aranda-Mercader, 2000). La característica principal y lo que los diferencia de otros molinos de viento en España es la utilización de la vela latina y techo giratorio, figura 2. Estos molinos son una señal de identidad de nuestra cultura mediterránea.

La estructura básica del molino consta de la torre de planta circular, tronco-cónica, construida en mampostería de piedra caliza, cubierta por una techumbre o chapitel que gira sobre la torre, donde se alojan el eje, los engranajes y demás elementos de soporte y mecanismos que transmiten el movimiento a las muelas, situadas en el piso superior, figura 3.

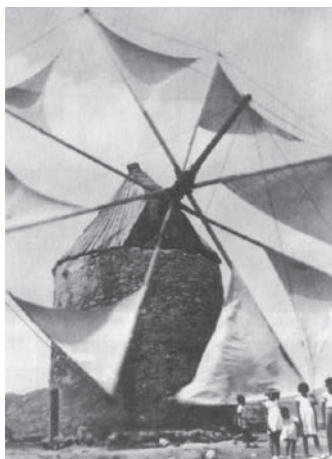


Figura 2. Molino La Corona (Imagen de 1939)

Actualmente se encuentran todos protegidos, aunque la mayoría de los que subsisten están en estado de ruina debido al desuso. Existen actualmente 146 molinos de viento en la comarca del Campo de Cartagena, catalogados e incoados BIC.

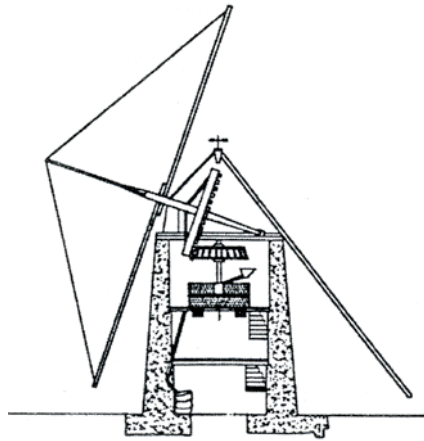


Figura 3. Sección de un molino harinero. (Fuente: Antología de los molinos de viento.)

4. METODOLOGIA.

Para la reconstrucción de la geometría del molino hemos utilizado un programa informático denominado Photoscan, basado en la tecnología SFM de modelado a partir de múltiples imágenes. Se trata de una herramienta fotogramétrica de bajo coste. Su utilización se ha incrementado en los últimos años en los proyectos de modelado y reconstrucción 3D de elementos del patrimonio cultural. Procesa imágenes tomadas con cámaras métricas y no métricas. No requiere ningún equipo fotogramétrico especializado, por lo que resulta suficiente utilizar una cámara digital convencional. Tampoco es necesario ningún requisito especial sobre la resolución de las imágenes aunque como es lógico esta influye en la calidad del resultado obtenido. El cálculo de los parámetros de calibración de la cámara se realiza de forma automática, si bien dispone de la opción para realizar una calibración previa de la misma.

4.1. CAPTURA DE IMÁGENES.

Las imágenes han sido tomadas con una cámara digital réflex, modelo Nikon D3200, con sensor CMOS de 23,2 x 15,4 mm. y un tamaño de imagen de 6.016 x 4.000 píxeles con 24,2 millones de píxeles efectivos, utilizando el objetivo Tamron 18-200mm f3.5-6.3 XR DI II AF Nikon, figura 4. El tamaño del pixel correspondiente a este sensor es de 3,9 mm.



Figura 4. Cámara Nikon D3200 y objetivo Tamron 18-200 mm.

Al tratarse de una construcción aislada, accesible alrededor del todo el objeto, la toma fotográfica se realiza según el esquema de la figura 5.

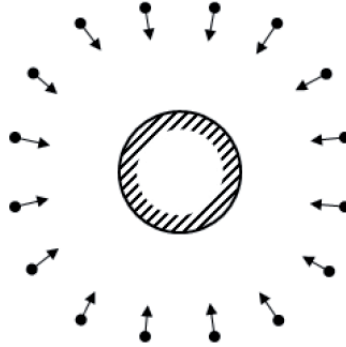


Figura 5. Disposición de la toma fotográfica. (Fuente: Photoscan User Manual)

Para obtener la reconstrucción del molino es importante garantizar un solapamiento adecuado entre las parejas de imágenes consecutivas, siendo recomendable un valor mínimo del 80%, tal y como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Secuencia de la toma de 3 imágenes consecutivas.

Dada la dimensión en altura del molino y ante la imposibilidad de realizar una toma desde zonas elevadas para obtener fotografías con más detalle de la parte superior, todas las imágenes fueron tomadas desde el suelo. Esto ha ocasionado que la parte superior del molino no haya podido ser reconstruida con mucho detalle.

El formato más adecuado del archivo digital de las imágenes es el RAW convertido a TIFF o directamente el archivo TIFF obtenido con la cámara. También se pueden utilizar archivos JPG aunque estos pueden producir ruido en el modelo generado debido a su compresión. Es importante no alterar las imágenes originales.

Las imágenes han de tomarse a la mayor resolución posible manteniendo el valor ISO más bajo, también para evitar la aparición de ruido en el modelo. Los valores de apertura del diafragma y velocidad de obturación han de ser los adecuados para obtener una buena profundidad de campo.

Antes de procesar las imágenes para su orientación, es posible definir sobre cada una de ellas una máscara para delimitar solo aquellas partes del objeto que queremos reconstruir, evitando así procesar la totalidad de la imagen con zonas de alrededor no deseadas como vegetación, cielo, etc., figura 7.



Figura 7. Máscara para delimitación del objeto.

Con la utilización de máscaras se consigue, además, una mayor rapidez en el procesamiento de las imágenes.

4.2. ORIENTACION DE LAS IMÁGENES.

Para estimar el punto de vista desde el que fueron tomadas las imágenes, Photoscan utiliza la información almacenada en la cabecera del archivo digital, conocida como EXIF. Cuando está disponible esta información, se consiguen mejores resultados en la reconstrucción del modelo 3D. Sin embargo, también es posible obtener modelos cuando no se dispone de los datos EXIF. En este caso, el programa supone que la distancia focal de la cámara es de 50 mm. y trata de orientar las imágenes con esta condición. Si el proceso de orientación falla o se obtienen resultados incorrectos es necesario, entonces, realizar una calibración previa de la cámara. Para obtener los parámetros geométricos de la lente del objetivo que se ha utilizado para la toma de las imágenes se aplica el modelo de distorsión de Brown.

En nuestro caso, disponemos de los datos EXIF en los archivos de las imágenes, por lo que no fue necesario la calibración previa.

En el proceso de orientación de las imágenes, el programa busca puntos comunes en las fotografías y realiza un emparejamiento de los mismos. Con ello se calcula la posición de la cámara en cada imagen y se refinan los parámetros de calibración de la misma. Como resultado se obtiene una nube de puntos dispersa, como primera aproximación al modelo 3D, figura 8.

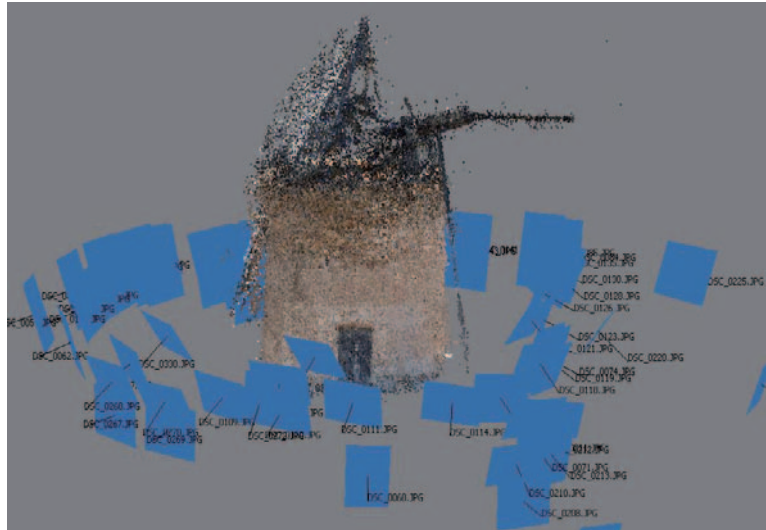


Figura 8. Nube de puntos dispersa y posición de las cámaras.

A partir del cálculo de la posición de cada una de las cámaras y en combinación con la nube de puntos dispersa, se puede generar un modelo con una nube de puntos más densa, que puede ser exportada a otros entornos gráficos de modelado para su tratamiento posterior, figura 9.



Figura 9. Nube de puntos densa.

4.3. RECONSTRUCCION GEOMETRICA.

La superficie 3D del objeto se reconstruye, a partir de los puntos de la nube densa, mediante la interpolación de una malla geométrica poliédrica formada por caras planas triangulares generada mediante los algoritmos que dan lugar a la conocida triangulación de Delaunay que se utiliza en los modelos digitales del terreno, figura 10.

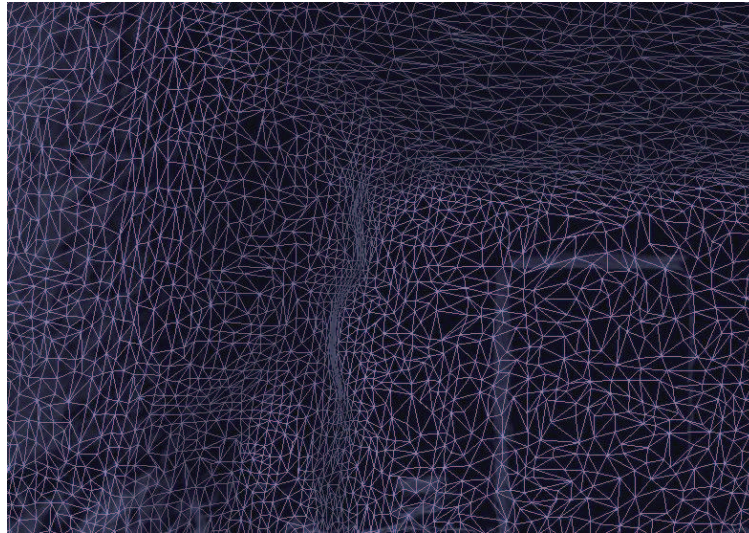


Figura 10. Reconstrucción geométrica mediante una superficie poliédrica.

De igual forma, este modelo geométrico puede ser exportado en diversos formatos para su tratamiento con otros programas de modelado, como Blender, MeshLab, etc.

4.4. APLICACIÓN DE TEXTURA.

Para poder visualizar el modelo geométrico con una mejor resolución y con un aspecto mucho más realista, se puede aplicar a la superficie 3D una textura procedente de las imágenes utilizadas. Existen varias formas de aplicar la textura al objeto así como la posibilidad de corregir el color en caso de que exista variación en la luminosidad de las distintas imágenes que se utilicen, figura 11.



Figura 11. Aplicación de la textura a la superficie poliédrica.

5. ESCALA DEL MODELO.

En muchas aplicaciones se requiere un modelo con un sistema de coordenadas establecido. Disponer de un sistema de coordenadas permite obtener la escala correcta del modelo así como la posibilidad de medir áreas y volúmenes. También hace posible que el modelo pueda ser tratado con programas denominados geovisualizadores. Para ello es necesario medir una distancia horizontal y otra vertical, e identificar en el modelo los puntos correspondientes mediante la colocación de marcadores, figura 12.



Figura 12. Marcadores para la determinación de la escala.

Otra posibilidad es la de obtener ortofotos del modelo que nos permitan, entre otras opciones, realizar un dibujo vectorial a escala de la superficie del objeto, figura 13.

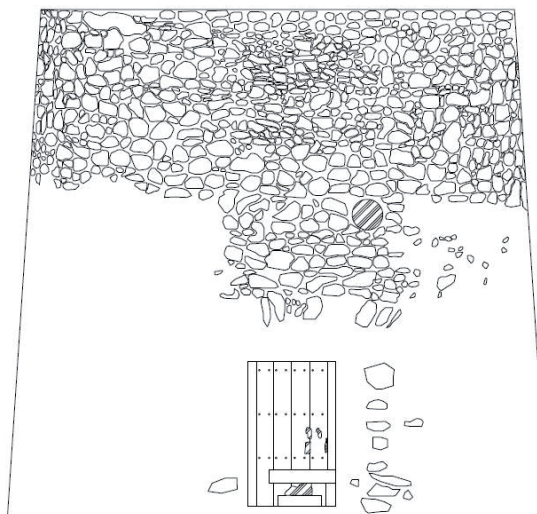


Figura 13. Dibujo vectorial sobre ortofoto.

6. FORMATOS DE EXPORTACION 3D.

Photoscan permite guardar y exportar el proyecto en sus distintas etapas de reconstrucción en diferentes formatos de visualización 3D. La nube de puntos puede ser exportada a OBJ, PLY, XYZ formato texto, ASPRS LAS, ASTM E57, U3D, potree, PhotoScan OC3 y PDF. Asimismo, el modelo geométrico puede ser exportado a formatos OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, PLY, STL, Autodesk FBX, Autodesk DXF, U3D y PDF.

En el caso particular del formato PDF, Photoscan permite exportar el modelo 3D incrustado en el archivo como un objeto U3D interactivo. El modelo resultante puede ser rotado y ampliado, y puede ser almacenado junto con otras nubes de puntos y datos del modelo. Esta opción es fácil de utilizar y ofrece una gran funcionalidad para la visualización del modelo, figura 14.



Figura 14. Modelo exportado a formato PDF 3D interactivo.

Otra opción muy interesante es la visualización del modelo a través de Sketchfab. Es una web que permite guardar y compartir los modelos 3D de forma interactiva y con un manejo sencillo. El modelo de este trabajo puede verse en la dirección indicada en la figura 15.



Figura 15. Modelo exportado a Sketchfab (<https://sketchfab.com/models/010ec436110d43e2b7cb800798c2846c>)

7. MODELADO A TRAVES DE SERVICIOS GRATUITOS EN INTERNET.

Existen numerosas opciones para realizar modelos 3D a partir de fotografías de forma gratuita a través de internet, entre ellos Autodesk 123D Catch, Autodesk Recap360, ARC 3D, Hyper 3D, Microsoft Photosynth, etc.

Por ejemplo, para utilizar Autodesk 123D Catch es necesario descargar en el ordenador un programa de enlace con el servicioweb (<http://www.123dapp.com/catch>). También existen aplicaciones 123D Catch para teléfono móvil en android e iOS. Con este entorno se eligen un máximo de 70 fotografías que se quieren utilizar para el modelado y se suben a los servidores de Autodesk, donde se realiza todo el proceso de forma automatizada. Para subir las imágenes se necesita una conexión con cierto ancho de banda, pero tiene la ventaja de que no se necesita un ordenador potente puesto que los cálculos se realizan de forma remota. Como aplicación de estos servicios hemos utilizado 70 imágenes del molino, de las utilizadas en Photoscan, obteniendo un modelo con Autodesk 123D Catch, figura 16.



Figura 16. Modelado con Autodesk 123D Catch.

8. CONCLUSIONES.

Hoy día, dada la disponibilidad de cámaras digitales con un coste razonable y con gran resolución, las técnicas fotogramétricas mediante múltiples imágenes se han convertido en la mejor alternativa para el modelado de objetos en tres dimensiones. El trabajo presentado en este escrito es una de las aplicaciones posibles, en el que se describen todas las fases necesarias para conseguir un modelo 3D a partir de la toma de múltiples fotografías. El molino del Tío Ginés, como construcción singular, forma parte de la arquitectura tradicional del Campo de Cartagena y, dada su situación, hemos realizado una reconstrucción 3D de su estado actual.

La primera conclusión que emerge es que esta construcción necesita una inversión económica para realizar los trabajos de restauración necesarios para su puesta en valor, mediante especialistas que tengan en cuenta la integración del molino con su entorno. En particular, el enfoque de este trabajo de modelado tiene, entre otras, las siguientes ventajas:

- utilización de herramientas gratuitas o de bajo coste para el modelado 3D de elementos del patrimonio cultural, accesibles a usuarios no experimentados.

- asegurar el acceso al contenido del patrimonio mediante modelos 3D disponibles en internet.
- desarrollo de soluciones para búsqueda, identificación, visualización e integración, junto a otro tipo de datos, en sistemas de información geográfica aplicados al patrimonio cultural.
- formar parte de soluciones eficientes para la gestión del patrimonio cultural.
- modelar objetos de geometría complicada.

El modelo desarrollado demuestra la importancia del uso de las técnicas fotogramétricas digitales para la obtención de modelos 3D y visualización de elementos del patrimonio histórico construido. La precisión obtenida en el modelo se corresponde perfectamente con la requerida para cualquier actuación técnica necesaria para la restauración del molino.

El uso de Photoscan como programa especializado nos ofrece la posibilidad de obtener de forma automatizada la nube de puntos, la reconstrucción de la geometría y el modelo con la textura original del objeto. El usuario solo tiene que eliminar los puntos o zonas alrededor del objeto que son innecesarios o no forman parte del modelo. La velocidad de los cálculos depende de la memoria, tarjeta gráfica y tipo de procesador del ordenador.

9. BIBLIOGRAFIA

Aranda-Mercader, J.D., (2000). *El dominio del viento*. Caja de Ahorros del Mediterráneo. Consejería de Educación y Cultura de la Región de Murcia. Cartagena. 207 pp.

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), pp. 253-262.

Biehler, J., Fane, B., (2014). *3D Printing with Autodesk: Create and Print 3D Objects with 123D, AutoCAD and Inventor*. Que Publishing.

García Martínez, G. (1969). *Los molinos de viento de Cartagena*.

Lowe D., (2004). *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. International Journal of Computer Vision, 60(2), pp. 91-110.

Redondo López, M.A., García Simó, I. (2008). *Molinos de viento en la Región de Murcia. Tipología, pautas y criterios de intervención*. Servicio de Patrimonio Histórico. Comunidad Autónoma de Murcia.

Remondino, F., El-Hakim, S., (2006). *Image-based 3D modelling: a review*. The Photogrammetric Record, 21(115), pp. 269-291.

Remondino, F., Rizzi, A., (2010). *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritages sites: techniques, problems, and examples*. Applied Geomatics, 2(3), pp. 85-100.

Remondino, F., (2011). *Heritage Recording and 3D Modelling with Photogrammetry and 3D Scanning*. Remote Sensing, Vol. 3, pp. 1104-1138.

- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T., Troisi, S., (2012). *Low-cost and open-source solutions for automated image orientation - A critical overview*. Proc. Euromed 2012, LNCS 7616, pp. 40-54. Springer, Heidelberg.
- Romero Galiana, C., (1995a). *Los molinos de viento cartageneros, retazos de su historia, funcionamiento, tipología, estado actual y consideraciones ante su problemática restauración*. Actas I Jornadas Nacionales Molinología. La Coruña. pp. 235-246.
- Romero Galiana, C., (1995b). *Cómo muere un molino cartagenero y otras curiosidades molineras de mi tierra*. Actas I Jornadas Nacionales Molinología. La Coruña. pp.247-258.
- Romero Galiana, C. (2003). *Antología de los molinos de viento. Cartagena. Siglo XXI*. Editorial Corbalán, 128pp.
- Vergauwen, M., Van Gool, L., (2006). *Web-based 3D reconstruction service*. Machine Vision and Application, 17, pp. 411-426.

