

# Aplicación de técnicas fotogramétricas en el estudio de la arquitectura maya

**Manuel May Castillo**

**Beatriz Martín Domínguez**

Instituto de Restauración del Patrimonio

Universidad Politécnica de Valencia

**Resumen:** *Durante los años 2009 y 2010, el equipo de investigación en Patrimonio Cultural y Cooperación para el Desarrollo del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia ha llevado a cabo el levantamiento arquitectónico de varios edificios en algunos asentamientos urbanos mayas del Noreste de Petén, utilizando técnicas de restitución fotogramétrica, lo cual ha permitido registrar con precisión milimétrica el estado de las superficies de muros y bóvedas. Asimismo ha posibilitado la reproducción exacta de sus elementos decorativos, tales como pinturas murales y grafitos, y el estudio de las patologías existentes en el momento de la toma de datos. En este sentido, el método fotogramétrico resulta de gran ayuda dado el peligro al que se encuentra expuesto el patrimonio cultural maya. Tanto las condiciones ambientales extremas como el expolio arqueológico constituyen serias amenazas para su preservación, siendo especialmente sensibles a estos riesgos los elementos decorativos que exhiben sus superficies, de ahí la importancia de emprender un adecuado registro y documentación de estas arquitecturas.*

**Abstract:** *In 2009 and 2010, the Cultural Heritage and Development Cooperation research team from the Institute for Heritage Restoration at the Polytechnic University of Valencia conducted an archaeological survey of various buildings at different Maya settlements in Northeast Petén, using photogrammetric restitution techniques. This made it possible to record the state of the wall and ceiling surfaces with millimetric precision, and allowed an exact reproduction of the decorative elements, such as wall paintings and graffiti, as well as a study of their physical state at the time of recording. The photogrammetric method has, in this respect, been of great assistance in view of the considerable threats facing Maya cultural heritage where both the extreme environmental conditions and on-going archaeological looting have posed serious hazards to their conservation, particularly with respect to the delicate decorative elements enhancing the structures, and subsequently underlines the importance of performing a suitable registry and documentation of these architectures.*

## Introducción

Uno de los principales objetivos del equipo de investigación Patrimonio Cultural y Cooperación para el Desarrollo del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) es el análisis del patrimonio arquitectónico maya, a fin de establecer las bases teóricas y prácticas que permitan su adecuada conservación y puesta en valor.

En este sentido es fundamental lograr una adecuada comprensión de las tipologías arquitectónicas mayas, así como un profundo conocimiento de sus sistemas constructivos y materiales. Esta es precisamente la motivación que ha impulsado distintas acciones a través de las cuales se han podido documentar numerosos edificios situados en más de veinte ciudades mayas ubicadas en el cuadrante Noreste del Petén guatemalteco.

El *corpus* de edificios documentados ha sido muy variado, ya que el estudio se ha centrado tanto en asentamientos urbanos que ya habían sido ampliamente investigados y restaurados, como en otros que permanecen olvidados y sepultados por la selva. Sin embargo, estas arquitecturas presentan un denominador común: su elevada vulnerabilidad, en mayor o menor grado, por el abandono y expolio al que se encuentran sometidas en unos casos, o por los peligros derivados del turismo masivo, en otros.

Son especialmente sensibles los elementos decorativos que exhiben los muros, donde se encuentran restos de pinturas murales o grafitos antiguos. Su exposición a la intemperie sin las adecuadas medidas de protección y conservación implica una rápida degradación. La desaparición de estos elementos supone no solo la pérdida de un bien artístico, sino también la pérdida del mensaje plasmado por los antiguos constructores en sus distintos niveles de significado. Una lamentable pérdida tanto para los investigadores

como para la sociedad en general, ya que estas expresiones artísticas constituyen una fuente imprescindible para comprender mejor la compleja sociedad maya de la antigüedad.

Por ello, nos propusimos desarrollar un sistema de documentación que permita registrar de un modo adecuado estas valiosas pero frágiles manifestaciones artísticas. En este sentido, nuestro equipo de investigación se centró en la experimentación con distintas metodologías de levantamiento arquitectónico que dieran como resultado unos contenidos gráficos en 2D y en 3D, susceptibles de facilitar el análisis de la arquitectura y su posterior difusión por medios electrónicos.

### Hacia una metodología de documentación de elementos arquitectónicos

En la arquitectura maya, desde el siglo XIX se realizaron los primeros intentos de documentar los edificios mediante el uso de la cámara lúcida y otros equipos que antecedieron a las cámaras fotográficas como las conocemos hoy en día (Fig.1). Merece especial atención la técnica empleada por A. Dixon y A. Le Plongeon quienes usaron por vez primera el principio de la estereoscopia para una mejor comprensión de los detalles arquitectónicos<sup>1</sup>, su técnica permitía “ver” el edificio en tres dimensiones mediante el uso de un par de fotografías y unos lentes estereoscópicos que hoy en día podríamos considerar “rudimentarios”. No obstante, el principio de la estereoscopia es en la actualidad, la base de los programas de fotogrametría para generar modelos tridimensionales. De modo que el binomio fotografía-investigación en la arquitectura es bastante añejo y su desarrollo se ha visto favorecido por el notable avance en la fotogrametría en los últimos años. Ello ofrece grandes ventajas a los investigadores de la arquitectura maya, pero es necesaria una metodología adecuada, dadas las especiales condiciones del patrimonio cultural maya.

Nuestra intención en este artículo es, mediante casos de estudio, describir una serie de experimentaciones metódicas aplicadas al levantamiento de diversos elementos arquitectónicos. Ya que el tema central de esta publicación trata de las manifestaciones artísticas en la arquitectura, decidimos centrarnos en aquellos elementos que nos parecieron importantes por su alto valor estético, y que al mismo tiempo transmiten mensajes con varios niveles de significado (algunos casos inclusive integran escritura jeroglífica), que ayudan a comprender mejor a la sociedad maya de la antigüedad.

El desarrollo de nuestro método se inicia en el año 2009 dentro del marco de dos proyectos: *Proyecto La Blanca* y *Proyecto Análisis de los sistemas y materiales constructivos para la restauración y puesta en valor del patrimonio cultural maya*<sup>2</sup>. Durante casi tres años, nos centramos en diseñar una metodología propia para la documentación de la arquitectura maya. En este tiempo hemos usado de manera conjunta las técnicas tradicionales, fotogramétricas y equipos láser, y de esta forma pudimos sacar el máximo rendimiento a nuestro trabajo en los sitios.

En el trabajo de campo, el bajo coste y la facilidad de transporte del equipo son factores decisivos, en especial en aquellas ocasiones en las que el edificio se encuentra en un lugar de difícil acceso, casi siempre en un entorno selvático y para llegar hasta él es necesario desplazarse por caminos sin pavimentar y ocasionalmente a pie, con el equipo a cuestas. Estas condiciones fueron las que encontramos en nuestros viajes por el Noreste de Petén<sup>3</sup>, de ahí la importancia que le damos a estos dos factores.

Desde luego, la metodología aquí presentada no es definitiva y seguramente será mejorada en trabajos futuros, no obstante los datos obtenidos, dada su precisión y fiabilidad, permiten profundizar en el conocimiento científico del objeto, garantizando una mejor comprensión de su naturaleza morfológica y artística.

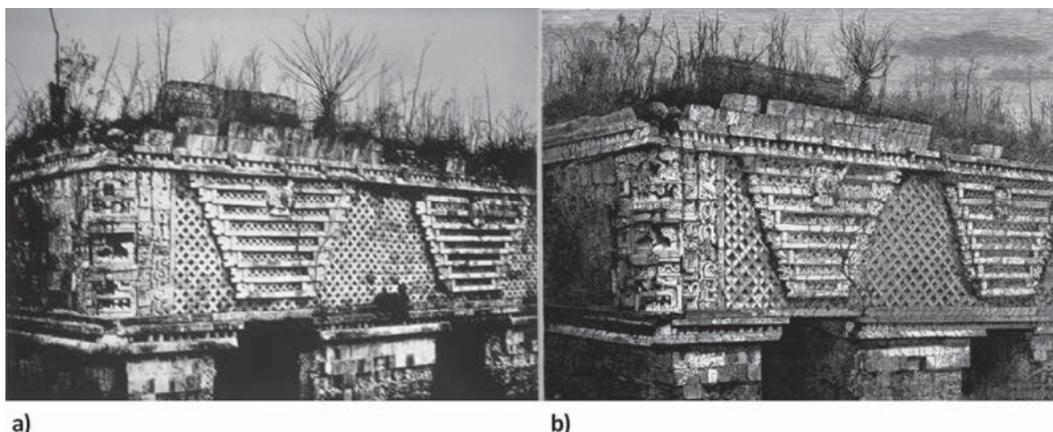


Fig. 1. Fachada oriental del “Palacio de las Monjas” de Uxmal, según D. Charnay (1882-1885). a) fotografía b) grabado.

1 DESMOND y BRYAN 2003.

2 El *Proyecto La Blanca* (Petén, Guatemala), está dirigido por Cristina Vidal (UV) y Gaspar Muñoz (UPV), y el *Proyecto Análisis de los sistemas y materiales constructivos para la restauración y puesta en valor del patrimonio cultural maya*, por Gaspar Muñoz (UPV).

3 MUÑOZ et al. 2010.

## Propuesta metodológica

Como primer paso, fue necesario realizar un inventario de los elementos arquitectónicos estudiados. Este inventario se efectúa mediante fichas electrónicas que permiten el manejo de la información en un lenguaje binario y facilitan su intercambio y difusión por Internet<sup>4</sup>. En cuanto al estudio de aquellos elementos decorativos o con propiedades estéticas de interés, se recurre a esta ficha para su identificación sobre el edificio en que se encuentran y para mantenerlos en todo momento localizados en su contexto más inmediato.



Fig. 2. Colocación de dianas para crear fotoplanos.

Una vez se tienen los datos en la ficha, se lleva a cabo el tradicional levantamiento, es decir, se realizan croquis a mano alzada<sup>5</sup> y toma de medidas generales<sup>6</sup> directamente sobre el edificio (Fig. 2). Paralelamente, se lleva a cabo una segunda toma de datos que permitirá la creación de ortofotografías (u ortofotos) con la finalidad de representar el objeto de forma bidimensional, pero con los colores y demás información que aporta la imagen fotográfica<sup>7</sup>. Las ortofotos poseen datos bidimensionales de tal forma que se pueden medir y restituir los elementos representados, permitiendo analizarlos en condiciones similares a la realidad. No obstante, algunos elementos de interés artístico requieren su representación en tres dimensiones para un mejor análisis, es decir, que los datos contengan valores en los tres planos coordenados (x,y,z), con lo cual es preciso generar modelos digitales en 3D. Lo que antes se hacía en forma de maquetas, actualmente lo realizamos mediante los llamados “sensores activos” (estaciones totales y escáneres láser) o “sensores pasivos” (cámaras fotográficas convencionales) en combinación con programas de fotogrametría. En nuestro método utilizamos la fotogrametría

de última generación por razones económicas y de facilidad de transporte, ya que solo se requiere agregar al equipaje una cámara digital y un trípode. La toma de datos, en este caso, consiste en un barrido fotográfico desde distintas posiciones procurando que las imágenes cubran toda la superficie del objeto. Los *targets* o dianas colocados para la generación de ortofotos<sup>6</sup> se reutilizan en el modelo 3D, de modo que nuestro modelo puede ser fácilmente puesto a escala, orientado e incluso localizado respecto a un sistema de información geográfica. Esto último es posible si las dianas se colocan con el apoyo de un GPS y una estación total.

Como paso siguiente, se procede a la restitución de los datos contenidos en las ortofotos mediante sistemas CAD (*Computer-Aided Design*) que producen información vectorial de naturaleza bidimensional en combinación con una matriz de color RGB (*Red, Green, Blue*) expresada en píxeles, de tal forma que para cualquier punto dentro de nuestro dibujo se obtienen tres valores numéricos, de los cuales dos de ellos representan sus coordenadas (x,y) y el tercero su matriz de color (RGB). Por su parte, los modelos tridimensionales generados mediante la fotogrametría generan cuatro tipos de valores numéricos (x, y, z, RGB), pero la desventaja de estos modelos es que la información de color es menos exacta que la de las ortofotos porque es generada a base de interpolaciones de píxeles que provienen de distintas fotografías. No ocurre esto con las ortofotos, que generan la información de color a partir de una sola fotografía, usualmente de alta calidad. A pesar de las desventajas entre unos y otros, tanto ortofotos como modelos tridimensionales generados con técnicas fotogramétricas proveen una matriz de color y una gran cantidad de datos que supera ampliamente los obtenidos por el método tradicional.

El paso final para la generación del modelo 3D consiste en el vaciado de las fotos en un *software* de fotogrametría que genera una nube de puntos a partir de los píxeles de las fotografías. Esta nube de puntos es transformada por el mismo programa mediante interpolación en una malla de triángulos a la que llamamos el modelo tridimensional. Este modelo se exporta a otros programas (CAD, 3dStudio, Rápidform, etc.) donde se refina la geometría, se pone a escala y se orienta.

Concluido este proceso, se procede al análisis del edificio en el que usaremos toda la información obtenida, tanto por el método tradicional como por los métodos fotogramétricos. El cruce de todos estos datos nos permite alcanzar un nivel de análisis altamente fiable. Si quisiéramos ir un paso más adelante, incluso podríamos comparar los datos con la información obtenida de forma independiente con el escáner láser y otros sistemas (Fig. 3). Por ejemplo, aquí hemos comparado nuestros datos con los dibujos de grafítos hechos a base de calcos en acetatos.

4 MAY y MUÑOZ 2010.

5 La complejidad de los dibujos de croquis como apoyo a la toma fotográfica es muy inferior a la que requiere un levantamiento realizado únicamente por medio del método tradicional, ya que la toma fotográfica recoge una gran cantidad de datos.

6 Para la toma de medidas hemos combinado el uso de distanciómetros y niveles láser como equipo complementario a la cinta métrica.

7 Respecto a estos métodos véase MUÑOZ *et al.* 2010.

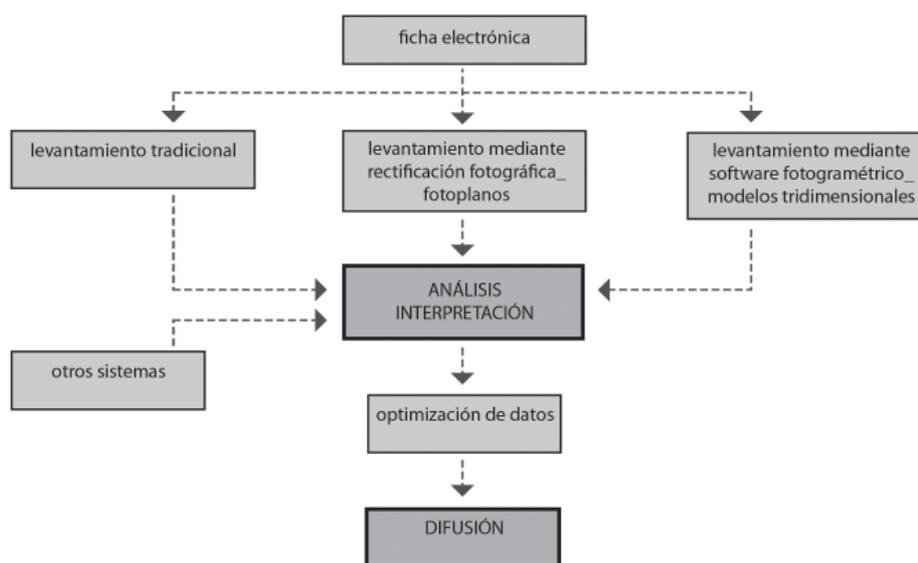


Fig. 3. Esquema metodológico.

### Ortofotos

La rectificación fotográfica es el proceso a través del cual se obtiene una ortofoto, es decir, una imagen digital generada en proyección ortogonal a partir de fotografías reales del elemento. La consecución de la ortofoto implica el paso de una proyección cónica a una proyección ortogonal en el que se corrigen las deformaciones debidas a la inclinación de la cámara respecto al objeto y a la perspectiva, así como la distorsión óptica introducida por el uso de una cámara digital convencional, y por lo tanto es posible realizar mediciones exactas en ella, ya que presenta las propiedades geométricas de un plano.

La principal limitación de esta técnica estriba en que es más fiable cuando se trabaja con elementos planos. Cuando se trabaja con superficies con fuertes relieves, curvas o quebradas debemos aceptar ciertos errores dimensionales debidos a los cambios de plano. Conocer estas limitaciones nos ha sido muy útil para la documentación de los muros de los edificios.

No obstante, el uso de la rectificación fotográfica presenta una notable ventaja, ya que con una toma de datos relativamente rápida y sencilla, queda registrada gran cantidad de información. Basta con tomar fotografías del modelo, cuidando que todos los puntos que queremos documentar queden convenientemente registrados, y tomar algunas medidas del modelo real. Esto es suficiente para la posterior generación de las ortofotos en el gabinete. Aunque el procedimiento a seguir en campo es sencillo, es imprescindible adoptar una metodología rigurosa para obtener un buen resultado. Además, es conveniente cualificar o formar a los operarios que han de intervenir en el trabajo de campo para evitar al máximo los errores en la toma de datos y así evitar una segunda visita, que en nuestro caso sería muy costosa cuando no imposible.

La calidad final de las ortofotos depende casi exclusivamente de la calidad de la fotografía de partida y de la precisión en la medición y marcado de los puntos de control que sirven de base para la rectificación. Para obtener un resultado óptimo, las fotografías deben ser nítidas y luminosas, por lo que es necesario tomarlas con trípode y poner especial cuidado en que las condiciones lumínicas sean las adecuadas para captar el objetivo a documentar con la mayor calidad posible.

Finalmente se construye un mosaico con las ortofotos de tal forma que se cubra la superficie deseada. Durante este paso, ocasionalmente se deberán realizar ciertos retoques fotográficos para que la intensidad de los colores en cada ortofoto sea más o menos uniforme con todo el conjunto. Esta intervención deberá ser la mínima posible.

Durante nuestras experimentaciones hemos utilizado fotografías obtenidas con cámaras digitales convencionales, previamente calibradas para conocer y eliminar las deformaciones que el objetivo introduce en la proyección cónica de la imagen fotográfica. Esta calibración es ahora muy sencilla y alejada de los complejos sistemas empleados en el pasado, realizados en laboratorio por técnicos especialistas<sup>8</sup>.

a) *Acrópolis Norte de Chilonché*. Una de las primeras experimentaciones con ortofotos la realizamos durante la temporada de campo 2009 del Proyecto La Blanca. Visitamos el sitio arqueológico de Chilonché con la finalidad de documentar la arquitectura visible de la Acrópolis, que había sido dañada por la acción de los expoliadores. Aquí pudimos comprobar la existencia de restos de pinturas murales que estaban expuestos a la intemperie, por lo que nos pareció necesario documentar al máximo lo que aún quedaba de ellas. En primera instancia

se realizó el levantamiento por el método tradicional. Las dianas se colocaron a nivel con el equipo láser y a distancias conocidas. Fueron adheridas con silicona en frío y colocadas sobre las áreas del muro que presentaban pérdidas del acabado, resultando de este modo menos invasivas. Finalmente se indicaron en los croquis la posición de las dianas de la forma más clara posible. En Chilonché, todas las fotografías fueron tomadas con una cámara semicompacta (Fujifilm Fine PrixS5800 5800).

En la Figura 4 se muestra el resultado final del trabajo realizado en el muro sur de los Cuartos 2 y 3 del Edificio 3E1 de la Acrópolis Norte de Chilonché, donde se han superpuesto un dibujo CAD con un mosaico de ortofotos. Este paramento destaca por los restos pictóricos que exhibe su superficie. A pesar de que existen distintos colores, llaman la atención las distintas tonalidades de rojo que se encuentran disgregadas por todo el muro. Como ensayo adicional decidimos cuantificar el porcentaje de pigmento rojo en la superficie del muro, lo cual se ha calculado mediante un software de retoque fotográfico. Para este ensayo se eligió el área delimitada por las cuatro dianas del lado derecho que se muestran en la Figura 13. El software nos arroja que la superficie limitada por las dianas está formada por un total de 137,640 píxeles, de los cuales 77,479 pertenecen a la gama roja. De esta forma pudimos conocer objetivamente que poco más de la mitad de esta superficie conserva el color rojo. Un segundo ensayo nos permitiría refinar el resultado, discriminando entre el color rojo de los pigmentos y el que corresponde a manchas de barro u otros.

Si en Chilonché se ha mostrado la utilidad de la técnica de rectificación fotográfica para registro de restos de pintura mural, en el siguiente caso se pretende mostrar la conveniencia de este método para la documentación de los grafitos incisos en los muros estucados. Se trata de un espacio que nosotros denominamos Cuarto 2 del edificio N de Nakum, que se documentó en su totalidad durante nuestra visita a este sitio arqueológico en el año 2010<sup>9</sup>.

*b) Cuarto en el Edificio N de Nakum.* El sitio de Nakum, situado a orillas del río Holmul, fue descubierto en 1905 por Maurice de Périgny, y desde este momento el sitio ha sido ampliamente investigado. Ya encontramos ejemplos de grafitos publicados por Périgny en 1911 y por Tozzer en 1913, pero el trabajo sistemático de documentación de los grafitos de Nakum no empezaría hasta 1999, cuando el Proyecto Triángulo registró más de cien ejemplos de diversos tipos que serían publicados entre 2001 y 2002. Desde esa fecha, el *corpus* de grafitos registrados ha aumentado gracias a los trabajos del mismo Proyecto Triángulo y del Proyecto Arqueológico Nakum. Parte de los resultados de este trabajo forman parte de una publicación fruto del *I Workshop Internacional de Grafitos Prehispánicos. Los Grafitos Mayas*<sup>10</sup> celebrado en Valencia en 2008. El proceso de documentación seguido por los miembros de estos proyectos de investigación había sido el calcado directo mediante rotuladores de tinta indeleble en secciones de plástico transparente que se colocan directamente sobre las áreas con grafitos<sup>11</sup>.

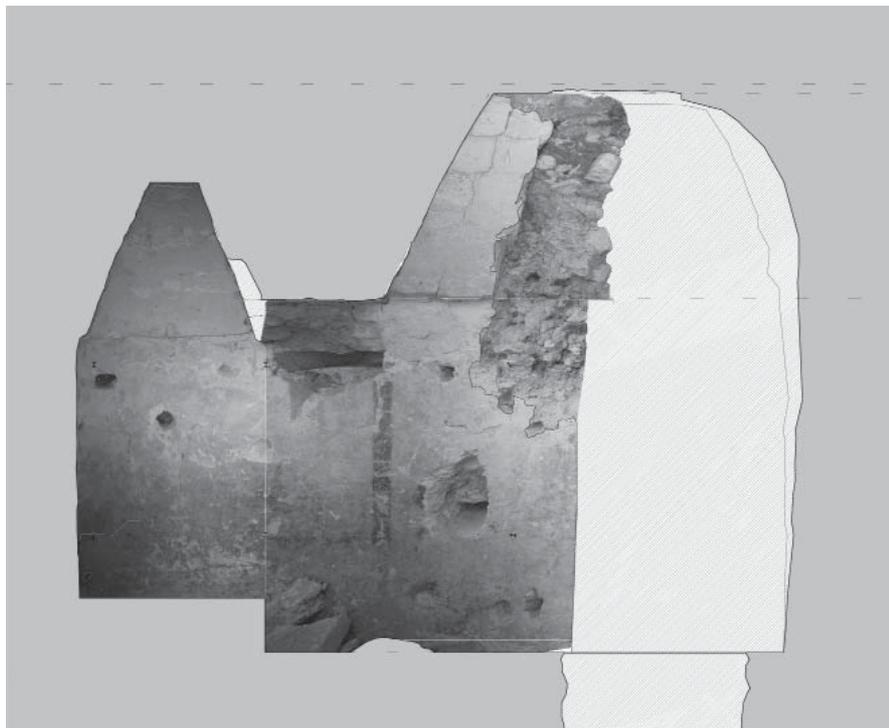


Fig. 4. Representación gráfica del muro sur de los Cuartos 2 y 3, Chilonché.

<sup>9</sup> Véase MUÑOZ *et al.* 2010.

<sup>10</sup> Véase ŽRAŁKA y HERMES 2009.

<sup>11</sup> *Ibid*: 139.

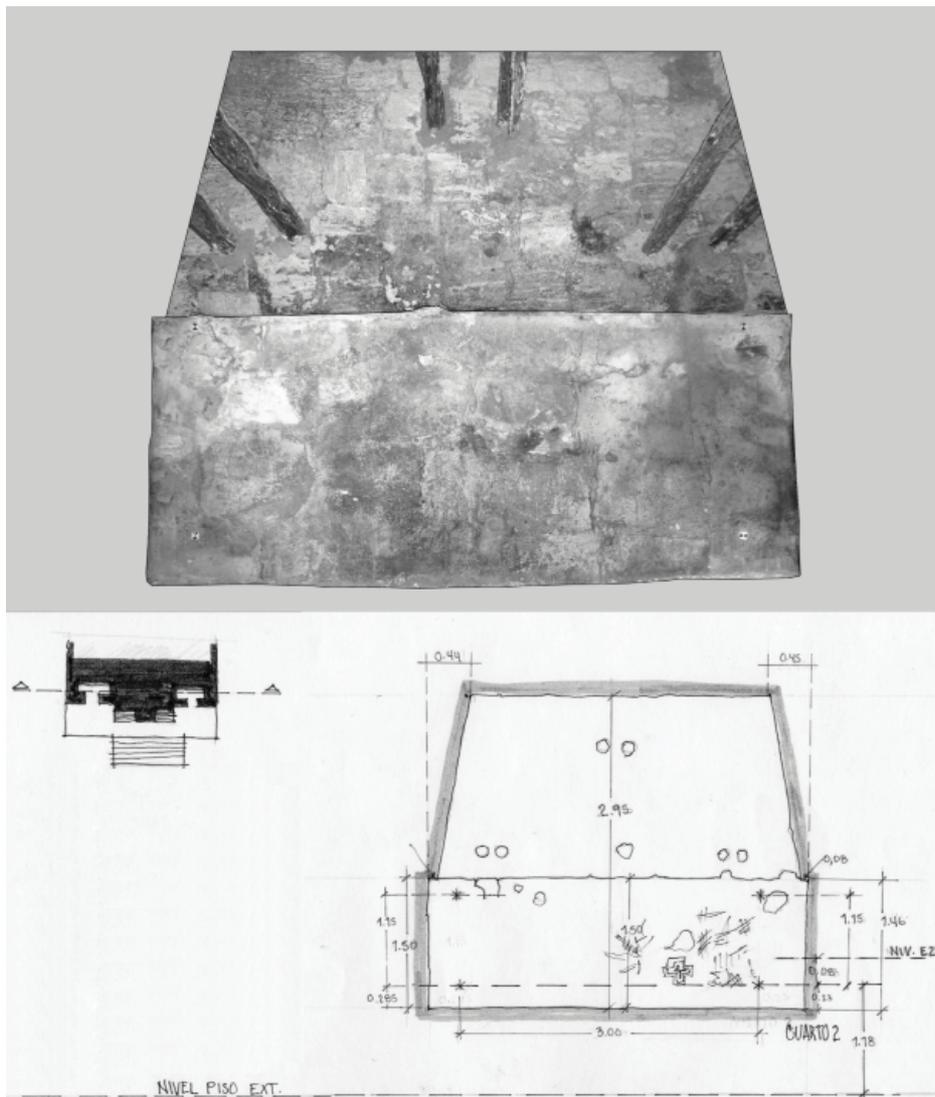


Fig. 5. Fotoplano y croquis del muro oeste del Cuarto 2, Edificio N, Nakum.

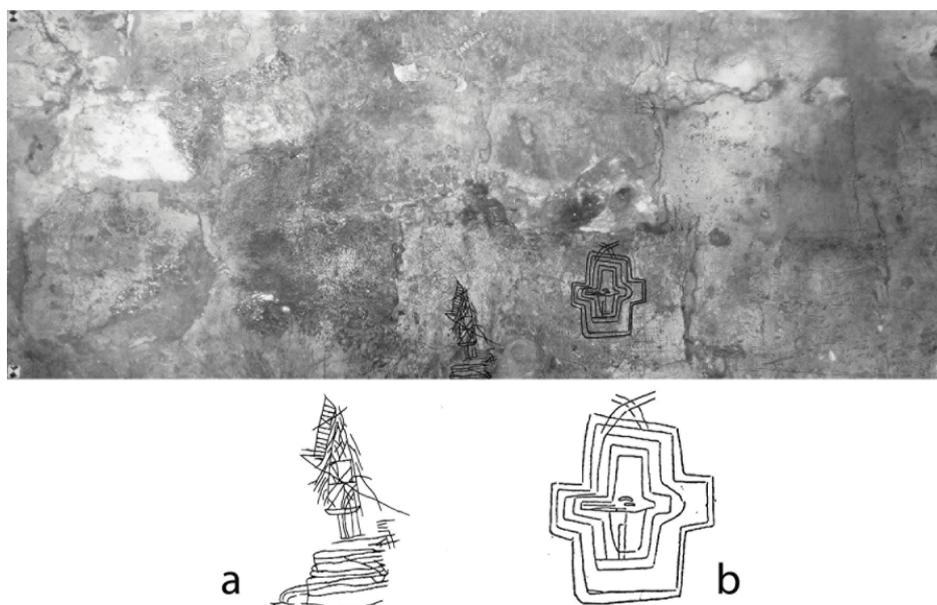


Fig. 6. Fotoplano delimitado por las dianas y dibujo de grafitos tomado de Hermes *et al.* 2001.

La documentación de los alzados murales mediante ortofotos que proponemos, se presenta como un método complementario al proceso de calcado. La fotografía del muro que exhibe los grafitos contiene, además de la información del color, también datos dimensionales, por lo que quedan registrados todos los trazos incisos en su posición y dimensión real, sin ningún tipo de discriminación. Una información que podrá ser analizada en gabinete por distintos especialistas sin haber sufrido ningún proceso de selección, interpretación o idealización por parte de la persona que realiza la toma de datos. Para obtener mejores resultados, es necesario que el proceso de fotografiado se realice de forma minuciosa, contar con un buen equipo fotográfico para que los fotogramas resultantes tengan la calidad necesaria y que las condiciones lumínicas sean las óptimas para obtener así las mejores imágenes posibles de los grafitos.

En Nakum se utilizó una cámara réflex digital Canon 350D y se aprovechó la iluminación natural del cuarto. De esta forma se pudieron obtener unas ortofotos de buena calidad, que aportan gran cantidad de información y que complementan la información obtenida mediante calcos por las investigaciones previas.

En la Figura 5 se muestra la ortofoto del muro oeste del cuarto que nos ocupa en este caso. Este documento gráfico aporta una fiel representación del estado del muro, en el que se aprecian los cambios de coloración que producen las humedades o el crecimiento de microorganismos, entre otros agentes. Pero, volviendo al caso de los grafitos, en la Figura 6 se muestra la parte de la ortofoto delimitada por las dianas, con el dibujo de línea<sup>12</sup> de dos de los grafitos superpuestos a la imagen. Esta superficie contiene un total de 317,538 píxeles, de los cuales 30,800 pertenecen al grafito (a) y 27,448 al grafito (b). La imagen muestra claramente que la información de la ortofoto es muy superior a la del dibujo de línea realizado a base de calcados, y también se puede añadir que la imagen del grafito en la ortofoto, en algunas partes no coincide con el dibujo de calcado. Además, la ortofoto muestra su contexto más inmediato donde se pueden identificar otros grafitos superpuestos a los primeros. Las fotografías se realizaron con luz natural y los resultados obtenidos cumplen con los objetivos planteados, no obstante podrían ser mejorados con el uso de luz rasante artificial para producir sombras y resaltar las líneas en bajorrelieve del grafito. Desde luego la luz artificial afecta al color natural de la superficie del muro, por ello serán necesarias ambas tomas, con luz natural y artificial.

c) *Cuarto en el Palacio de las Ventanas, Tikal.* El siguiente caso se documentó durante la misma expedición científica. Se trata de uno de los cuartos del edificio conocido como Palacio de las ventanas, en Tikal (Fig. 7). En el caso de la Figura 8a se muestra el fotograma tal cual se obtendría del programa de rectificación fotográfica, en el que la bóveda al estar fuera del área limitada por las dianas, en un pla-

no distinto y además inclinada, aparece distorsionada en gran medida. Efectivamente, para obtener una proyección ortogonal correcta hemos de rectificar el área de la cubierta de forma independiente (Fig. 8b). En este caso serían imprescindibles los datos del levantamiento tradicional, es decir, los dibujo de croquis y toma de medidas directa.

Como se ha podido ver en estos tres ejemplos, la generación de ortofotos conlleva ciertas problemáticas que se deben tener en cuenta para realizar la toma de datos en campo, lo que nos evitará tener que volver a visitar los edificios para rectificar datos.

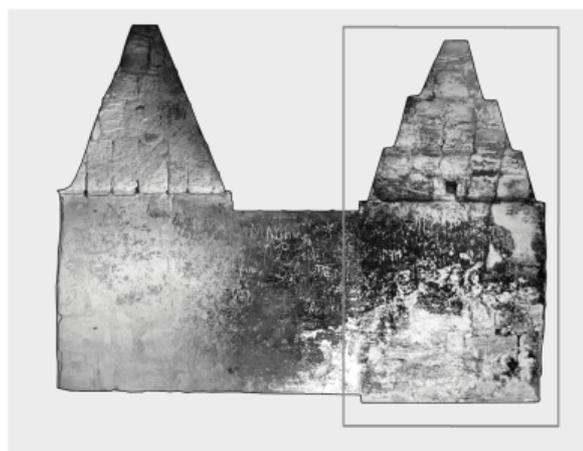


Fig. 7. Fotoplano del muro norte de uno de los cuartos del Palacio de las Ventanas, Tikal.

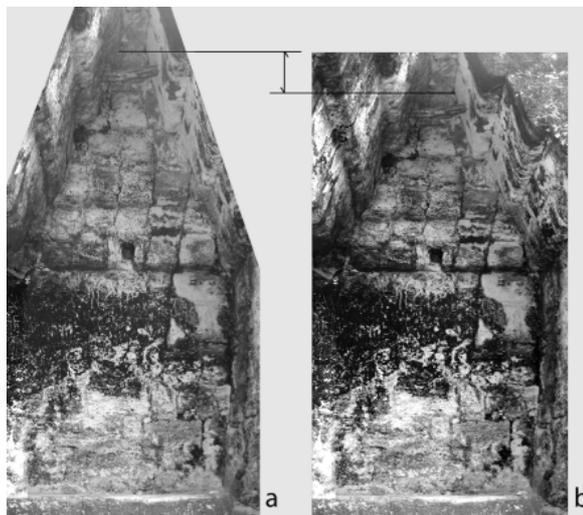


Fig. 8. Distorsión en áreas exteriores a las dianas en fotoplanos.

### Modelos tridimensionales

Como se ha dicho antes, para la generación de los modelos tridimensionales que a continuación se describen se ha experimentado con los llamados “sensores pasivos” en combinación con programas de fotogrametría de última generación. Estos últimos emplean la tecnología *photo based*

<sup>12</sup> Los dibujos de línea de los grafitos han sido tomados de los calcos realizados por el Proyecto Arqueológico Nakum, publicados por HERMES *et al.* 2001.

*scanning* o *photogrametric scanning* para la generación de nubes de puntos similares a las que se obtienen con los escáneres láser, pero obtenidas con tomas fotográficas sistemáticas<sup>13</sup> del objeto. Estos programas informáticos transforman las nubes de puntos en mallas de superficie con una *textura de color aparente* que simula, mediante la compensación optimizada de las imágenes, la textura original<sup>14</sup>. En otras palabras, a cada triángulo de la malla se le asigna automáticamente un pixel de color a partir de las imágenes tomadas en campo.

El principio sobre el que funcionan los programas informáticos tiene sus bases en la estereoscopia desarrollada desde finales del siglo XIX, que consiste en generar una percepción tridimensional a partir de pares de imágenes, imitando la interpretación tridimensional que realiza el cerebro humano a través de los dos ojos, y que ya fue empleada por A. Dixon y A. Le Plongeon en el área maya a finales del siglo XIX. Este principio es aplicado mediante la tecnología conocida como Visión Computarizada por Estéreo Correspondencia (CVSM, por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente aplicada en la generación de los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por su acrónimo anglosajón). Debido a que los distintos *softwares* que funcionan con esta tecnología emplean la luz natural o artificial de forma pasiva, fue necesario usar iluminación artificial en algunos casos para obtener un modelo tridimensional de buena calidad.

a) *Dinteles de madera Templo III, Tikal*. El Templo III de Tikal fue intervenido por vez primera durante los trabajos del Programa de Restauración Arquitectónica llevados a cabo por la Universidad de Pennsylvania (entre 1968 y 1969) en el desarrollo del cual fueron reconstruidos parte de la cubierta del primer cuarto, el dintel de acceso al edificio con palos rollizo y la crestería<sup>15</sup>. El segundo dintel que comunica los dos cuartos está formado por varias vigas de madera que integran escritura jeroglífica y representaciones de un gobernante conocido con el nombre de Sol Oscuro. El dintel es una réplica colocada en 1999 por la empresa COARSA en sustitución del original, que fue depositado en las bodegas del Parque Nacional Tikal para su restauración<sup>16</sup>. Esta réplica nos pareció de gran interés científico-artístico por dos razones; la primera es que, aparentemente, el dintel original fue depositado en una bodega, presumiblemente sin las adecuadas condiciones de conservación, por lo que su deterioro es inminente; la segunda razón es que la réplica reproduce la información del dintel original dentro de su contexto inmediato en el edificio.

Partiendo de estas premisas, decidimos ensayar con la fotogrametría de última generación en la réplica para, en un futuro cercano, poder realizar una documentación detallada del original. Como primer paso tomamos medidas generales del interior del edificio usando cinta métrica y el distanciómetro láser. Posteriormente, se realizó el barrido fotográfico con el fin de realizar un modelo tridimensional del interior del edificio para tener ubicado el dintel en su contexto inmediato. Las mismas fotografías sirvieron de base para realizar un modelo de mayor resolución de las vigas que forman el segundo dintel que nos ocupa (Fig. 9). Con ellas se generó una nube de 20.485 puntos que luego, por interpolación, es transformada por el mismo *software* en una malla de 685.056 polígonos de los cuales 122.580 corresponden al conjunto de vigas de madera (Fig. 10). Para tener una idea de la precisión con que estamos trabajando, basta decir que el área de los dinteles es de 4,7m<sup>2</sup>, por tanto tenemos cerca de 2,5 triángulos por centímetro cuadrado, lo cual nos da una cantidad de datos imposible de obtener mediante los métodos tradicionales y solamente superados por el escáner láser. Con un segundo barrido fotográfico a menor distancia y con iluminación artificial podría mejorarse el nivel de precisión, pudiendo obtener incluso la profundidad de las incisiones realizadas por el artista al tallar los dinteles, pero no fue nuestro objetivo en este caso. Aun así, con las mismas fotografías, el *software* es capaz de generar otro modelo con mayor definición -de 6.356.093 de polígonos- en el que se aprecian con gran detalle las incisiones en bajorrelieve (Fig. 11). Adicionalmente, mediante la compensación optimizada de las imágenes utilizadas, es posible generar una textura para la malla de polígonos, es decir, para nuestro modelo 3D. Con este paso se añade información de color (RGB) a la superficie. Una vez hecho esto se le puede solicitar al *software* que genere una ortofoto del objeto. La imagen resultante presenta algunos errores o lagunas (Fig. 12) y, aunque en términos generales se puede considerar de buena calidad, éste es ampliamente superado por las ortofotos que ofrecen los *softwares* de rectificación fotográfica, donde se manipula mínimamente una sola imagen, por lo que la información de color es más fiable.

Finalmente, la geometría de nuestro modelo 3D se comparó con los datos del levantamiento tradicional para constatar que las dimensiones y proporciones generadas por el *software* son acordes con la realidad. Una vez hecho esto, pudimos comprobar que, efectivamente, el modelo 3D es altamente fiable y coincide con nuestras medidas tomadas con distanciómetro láser.

13 Esta toma sistemática o barrido fotográfico consiste en la toma de pares de fotografías desde distintos puntos dibujando una trayectoria circular con el fin de capturar la mayor superficie posible del objeto. Desde cada punto se realizan al menos dos tomas a diferentes alturas.

14 BALDISSINI *et al.* 2010.

15 VIDAL y MUÑOZ 1997:64.

16 VIDAL y MUÑOZ 2012:102.



Fig. 9. Secuencia de imágenes que genera la nube de puntos.

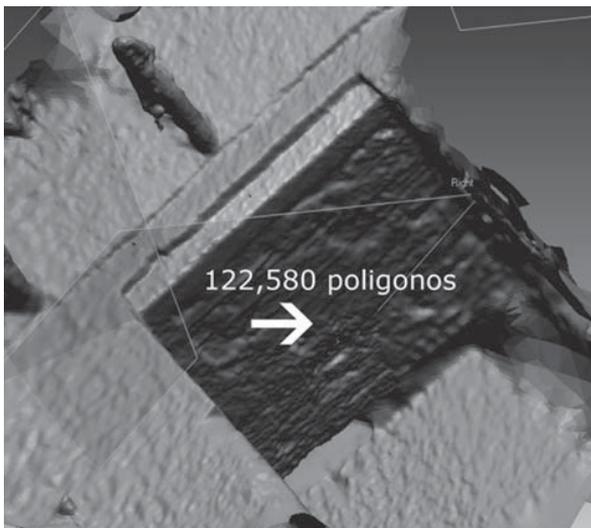


Fig. 10. Malla de resolución media del dintel 2.

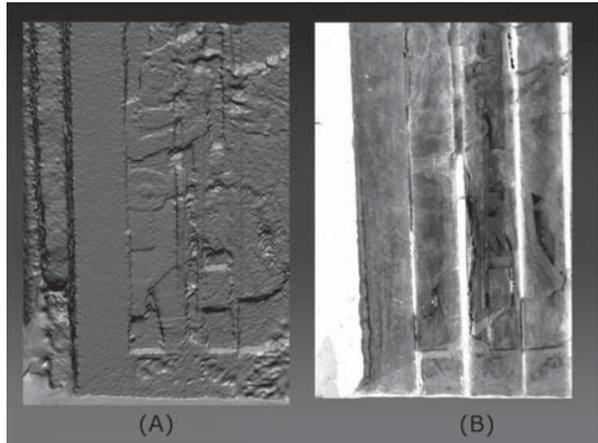


Fig. 11. A) Detalle del modelo de alta resolución del dintel 2 y B) detalle del mismo modelo con textura de color aparente.

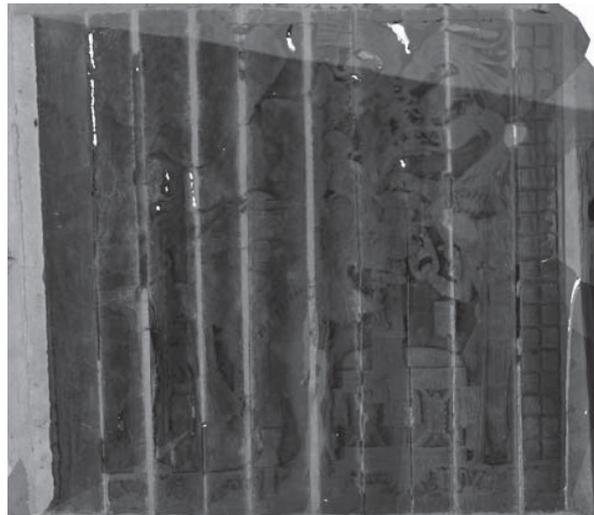


Fig. 12. Ortofoto obtenida a partir del modelo con textura de color aparente.

b) *Mascarón de Chilonché*. Durante el año 2011 visitamos por tercera vez el sitio de Chilonché con la finalidad de generar un modelo tridimensional del mascarón descubierto en el año 2009 a raíz del saqueo que estaba sufriendo el sitio<sup>17</sup>. Siguiendo el método explicado anteriormente se realizó un levantamiento de forma tradicional apoyado con distanciómetro y nivel láser (Fig. 13). A continuación se realizó la toma sistemática de fotografías, en la medida de lo posible, ya que el espacio de trabajo se reduce a los túneles de saqueo, de un metro de altura en promedio. La luz también fue un factor determinante en el resultado final; en esta ocasión empleamos un generador de electricidad a gasolina y tres lámparas incandescentes de 100 vatios para iluminar todo el modelo. El modelo tridimensional obtenido del mascarón presentaba varias oclusiones -coloquialmente conocidas como sombras- que son lagunas que el *software* deja vacías cuando no cuenta con datos suficientes. Estas oclusiones se deben principalmente a que las fotografías introducidas no fueron suficientes o la iluminación de algunas zonas era deficiente, pero a pesar de ello se obtuvo un modelo tridimensional que reproduce la casi totalidad del mascarón (Fig. 14). Una vez obtenido el modelo general, se realizaron algunas pruebas en aquellas partes de mayor interés desde el punto de vista artístico, con la finalidad de obtener su geometría con la mayor precisión posible.

A partir de los mismos fotogramas se generó una nube de 40.733 puntos y a partir de ello se obtuvo un modelo en malla de 3.986.122 de polígonos para una superficie de aproximadamente 5,07 m<sup>2</sup>, obteniendo cerca de 78 polígonos por centímetro cuadrado (Figs. 15 y 16). También en este caso se generó una textura de color aparente que nos permitió documentar los restos pictóricos que aún se conservan. Como en el ejemplo anterior, los datos que nos aporta nuestro modelo 3D contienen información multidimensional, se pueden localizar fácilmente en el espacio tridimensional a través de las coordenadas x,y,z de cada punto o de cada vértice de los polígonos, y contienen datos RGB que también pueden ser localizados en el espacio tridimensional. No obstante el modelo presenta varias oclusiones o lagunas que el *software* restituye mediante interpolación de polígonos a partir de los existentes, permitiendo obtener una superficie continua, aunque no restituye de la misma forma la textura en las zonas de oclusión (Fig. 17).

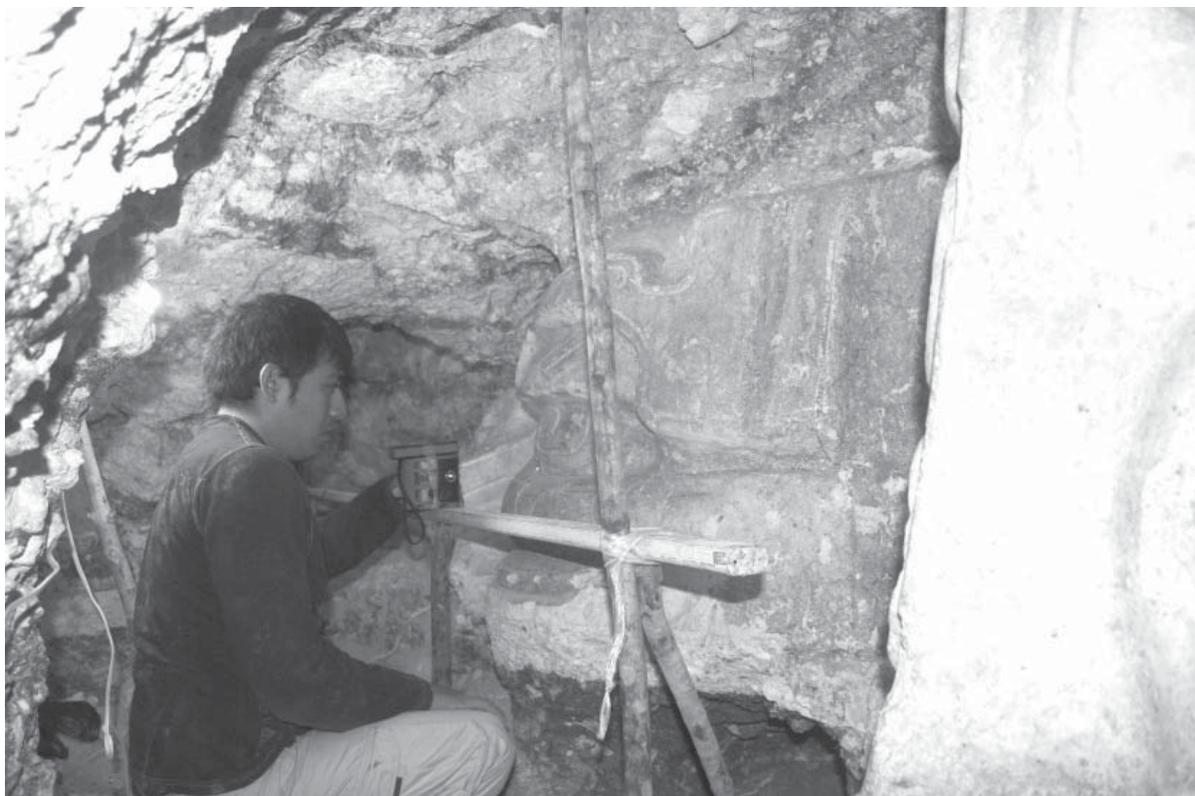
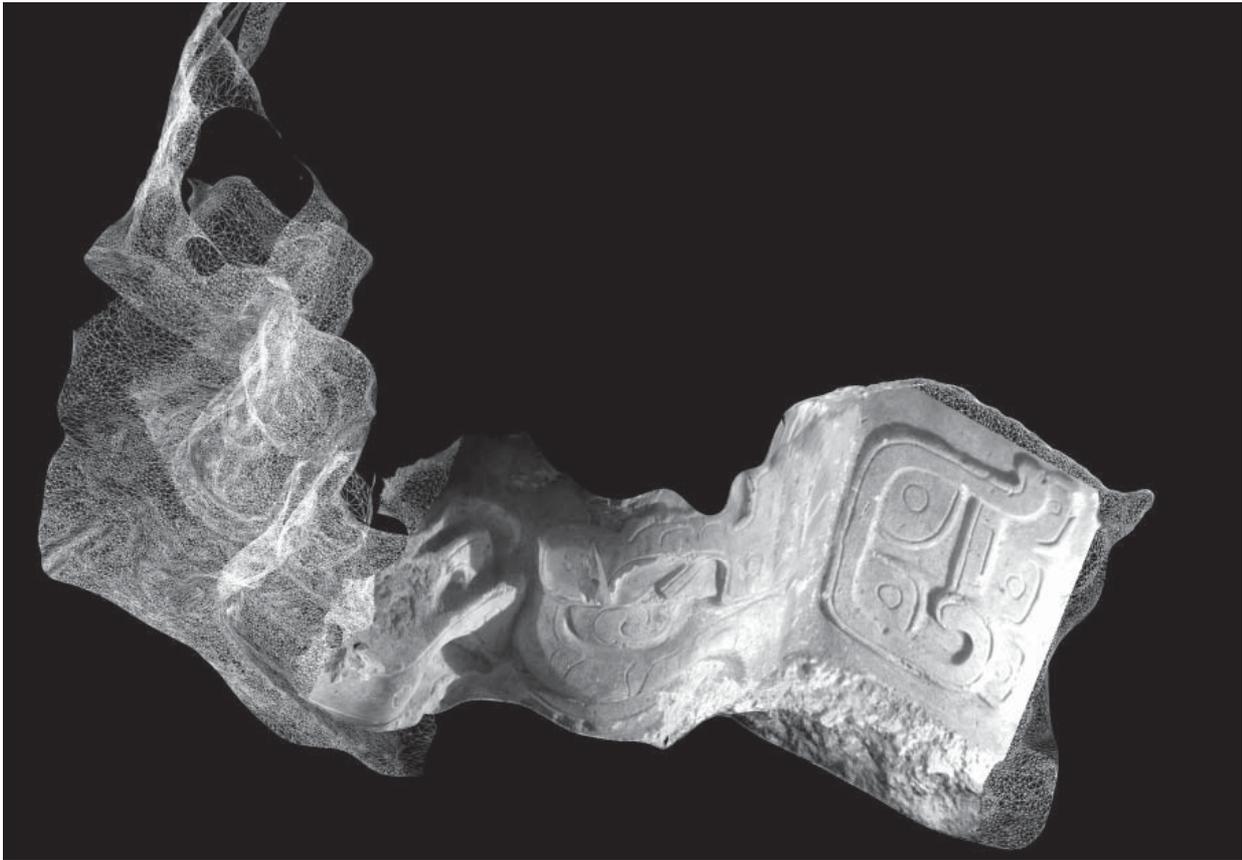
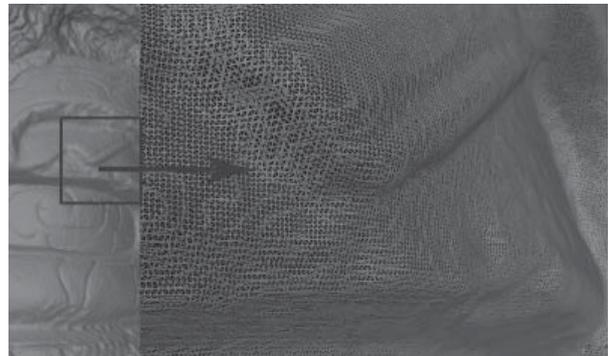


Fig. 13. Toma de datos del mascarón de Chilonché.



**Fig. 14.** Malla de polígonos y textura de color aparente del mascarón, Chilonché.



**Fig. 15.** Detalle del modelo de alta resolución del mascarón.

**Fig. 16.** Malla de 78 polígonos por centímetro cuadrado.



**Fig. 17.** Faltantes de textura en el modelo.

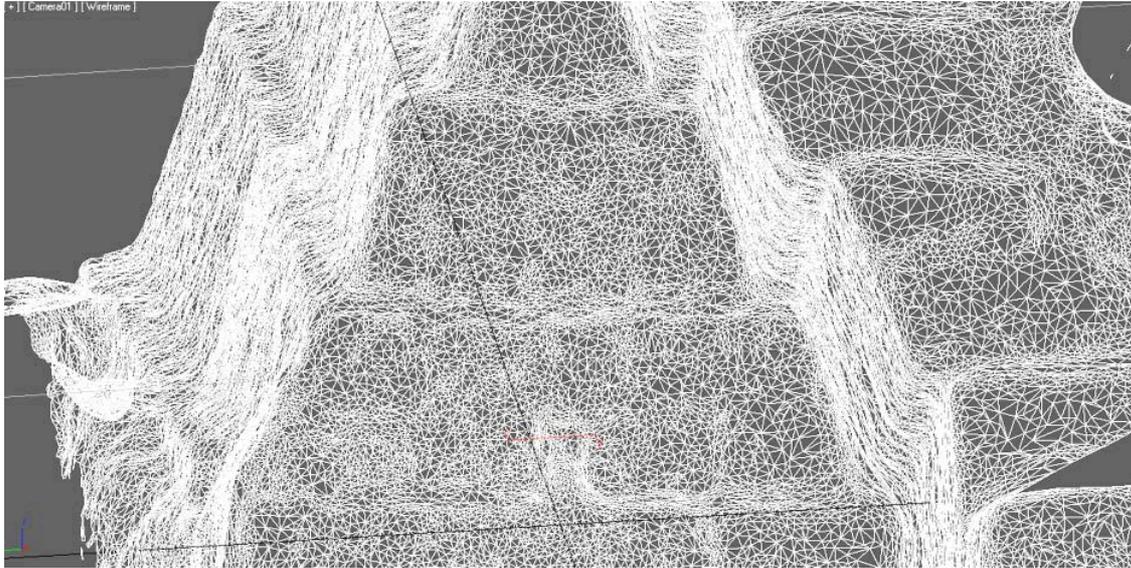


Fig. 18. Modelo de baja resolución (0.38 polígonos/cm<sup>2</sup>) de uno de los cuartos del Palacio de las Ventanas, Tikal.

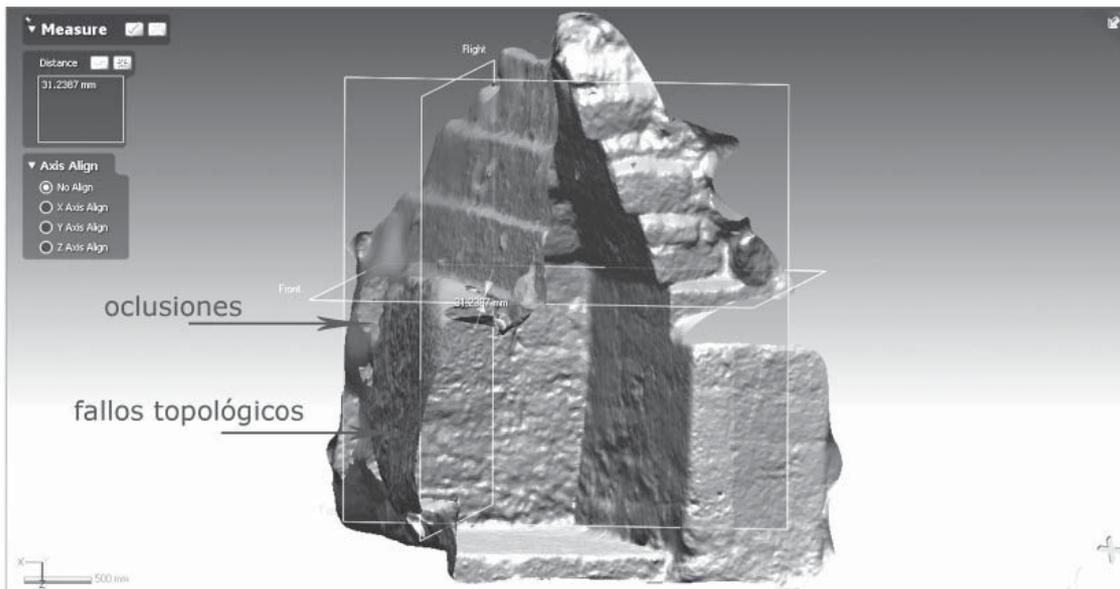


Fig. 19. Modelo con oclusiones y fallos topológicos.



Fig. 20. Modelo de alta resolución y modelo con textura de color aparente.

c) *Cuarto en el Palacio de las Ventanas de Tikal*. En el verano del 2011 realizamos la toma sistemática de fotografías para construir un modelo 3D del cuarto noreste del Palacio de las Ventanas de Tikal que había sido documentado por nosotros mismos en el año 2010<sup>18</sup>. En este caso no fue necesario el uso de iluminación artificial ya que el cuarto se encuentra parcialmente derruido. Desde el inicio no se buscaba generar un modelo de alta resolución, ya que sólo interesaba documentar la geometría de este espacio, en especial el escalonamiento de los sillares de la cubierta. Por tanto el modelo se generó con 139.671 polígonos a partir de 24 fotografías, obteniendo una resolución aproximada de 0,38 polígonos por centímetro cuadrado (Figura 18). La información del modelo 3D y la ortofoto generada antes se compararon para detectar fallos en cualquiera de los dos. Gracias a este cruce de información pudimos detectar la problemática descrita en el ejemplo (c) del apartado *Ortofotos*. Por otro lado, nuestro primer modelo 3D presentaba varios fallos topológicos, principalmente en uno de los muros debido a las tonalidades oscuras producidas por la humedad y la microflora (Fig. 19). Estos fallos se pudieron subsanar con un segundo modelo de mayor resolución con 3.939.696 de polígonos al que también se le generó una textura (Fig. 20). Con este segundo modelo se pudieron documentar con gran precisión las irregularidades de las superficies, los faltantes de sillares e incluso las deformaciones estructurales de los muros.

### Resultados preliminares

Las técnicas fotogramétricas son hoy en día muy asequibles y convenientes para la documentación del patrimonio arquitectónico. El aumento de la velocidad y capacidad de los ordenadores personales ha permitido el desarrollo de *softwares* que permiten realizar el proceso de restitución fotogramétrica en tiempos y costes asumibles para cualquier profesional. No es casualidad que desde hace algunos años organismos como el ICOMOS o el CIPA (International Scientific Committee for Documentation of Cultural Heritage) o el CIPA las recomienden como método de estudio<sup>19</sup>. Coincidimos con otros autores en que la fotogrametría digital ha abierto un amplio abanico de posibilidades, resulta una técnica de fácil uso y aprendizaje a bajo costo<sup>20</sup>.

El resultado obtenido de la toma de datos fotogramétrica es una completa base de datos en la que queda fielmente registrado el estado de conservación de la arquitectura. Especialmente, sus elementos escultóricos, grafitos incisos o pintados, pinturas murales, así como las patologías existentes: cambios de coloración, pérdidas de material, humedades e incluso las deformaciones estructurales e irregularidades constructivas. Todo ello queda registrado con precisión milimétrica tanto en las ortofotos como en

los modelos tridimensionales generados mediante la fotogrametría, que además resulta ser menos invasiva que las técnicas tradicionales.

Precisamente, una de las mayores ventajas de utilizar esta técnica es la gran cantidad de información que se recoge. Esta información al ser procesada en un lenguaje binario, el lenguaje de los ordenadores o computadoras, puede medirse y compararse, por ejemplo, con la información que proveen los métodos tradicionales (Figs. 21 y 22). A simple vista se puede deducir que la cantidad de datos es infinitamente mayor, no obstante creemos que las técnicas aquí expuestas –tradicional, ortofotos y modelos tridimensionales– deben complementarse entre sí y reforzarse con una base de datos que comience por inventariar los elementos, a ser posible con fichas también en lenguaje binario. Otros sistemas de documentación también pueden considerarse, nos referimos a los levantamientos con escáner láser o el método propuesto para el dibujo de grafitos<sup>21</sup> que se expone en otro capítulo de este mismo volumen. Todo ello contribuye a una mejor comprensión del objeto estudiado y facilita en gran medida los trabajos de análisis e interpretación. Al respecto, cabe destacar que el uso complementario de distintas técnicas de levantamiento en el estudio de un mismo objeto nos ha permitido reducir al mínimo los errores en la toma de datos, solventar las carencias que cualquiera de estas técnicas pudiera tener por separado y trabajar con rangos de precisión milimétricos.

Los datos obtenidos con la metodología propuesta en esta ponencia también son susceptibles de difundirse masivamente gracias a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. Desde luego la gran cantidad de datos en muchos casos representan una limitación para su difusión, por lo que se precisa una importante fase de planificación antes de su divulgación por los medios antes citados. Es necesario que los datos pasen por una fase de optimización previa, lo que significa que los datos deberán ser sintetizados en archivos de menor tamaño para facilitar su difusión por internet y llegar al gran público, pero manteniendo la posibilidad de analizarlos en profundidad en trabajos científicos futuros.

Para finalizar queremos resaltar que las nuevas tecnologías aplicadas en la documentación y difusión del patrimonio maya, si bien ofrecen grandes posibilidades para la investigación científica, también permiten difundir el conocimiento a las comunidades mayas más alejadas, cuyos jóvenes se están integrando rápidamente a un cultura global mediante internet y la telefonía móvil, al mismo tiempo que se desligan de su cultura de origen. Por tanto, la difusión de patrimonio cultural por medios electrónicos permitiría establecer puentes que reconecten a las nuevas generaciones con las del pasado, del tal forma que se sientan identificados con su valioso legado patrimonial

18 MUÑOZ *et al.* 2010.

19 PATIAS y SANTANA 2011.

20 ALMAGRO 2004.

21 Véase PEIRÓ y MATARREDONA en este volumen (Capítulo 6).

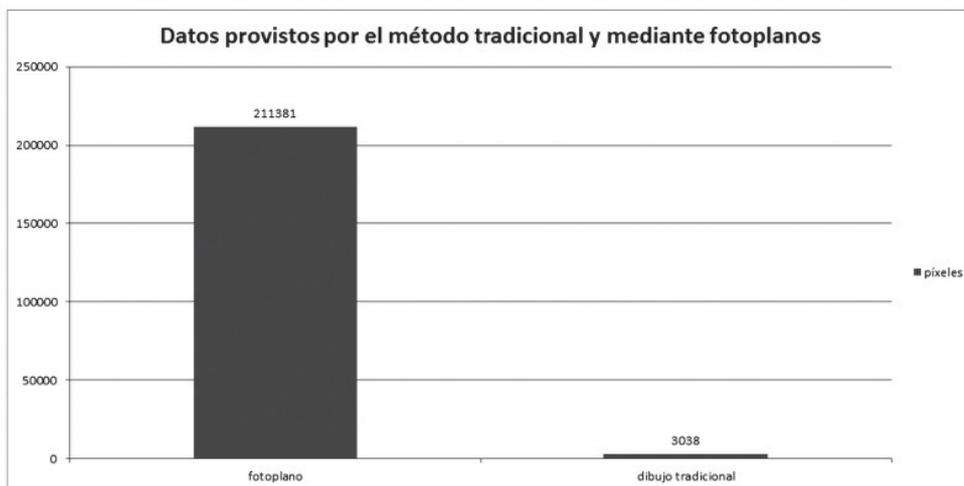
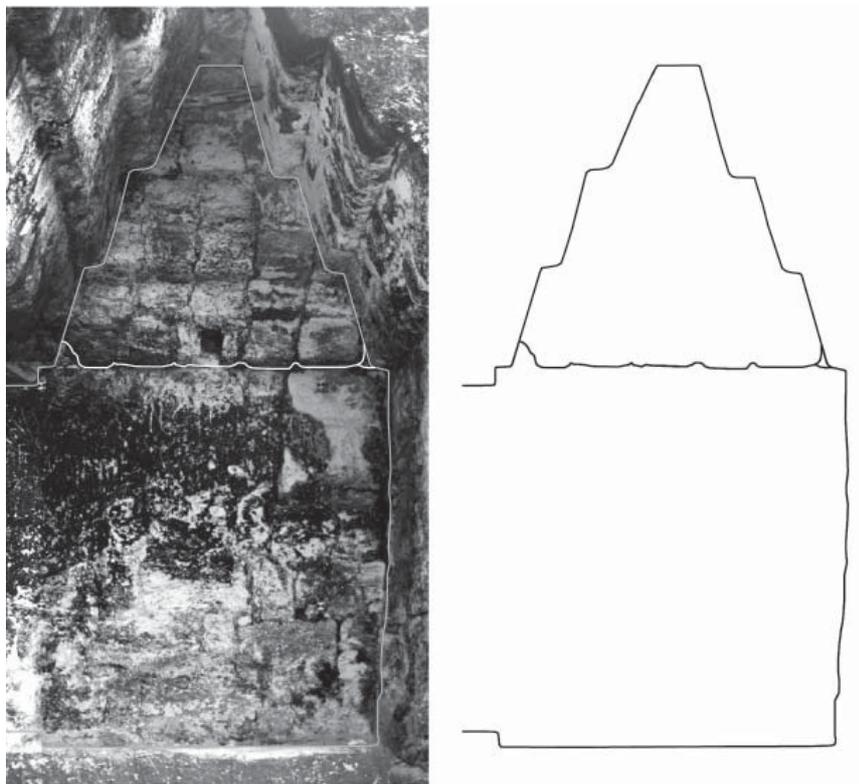


Fig. 21. Tabla comparativa, Palacio de las Ventanas, Tikal.

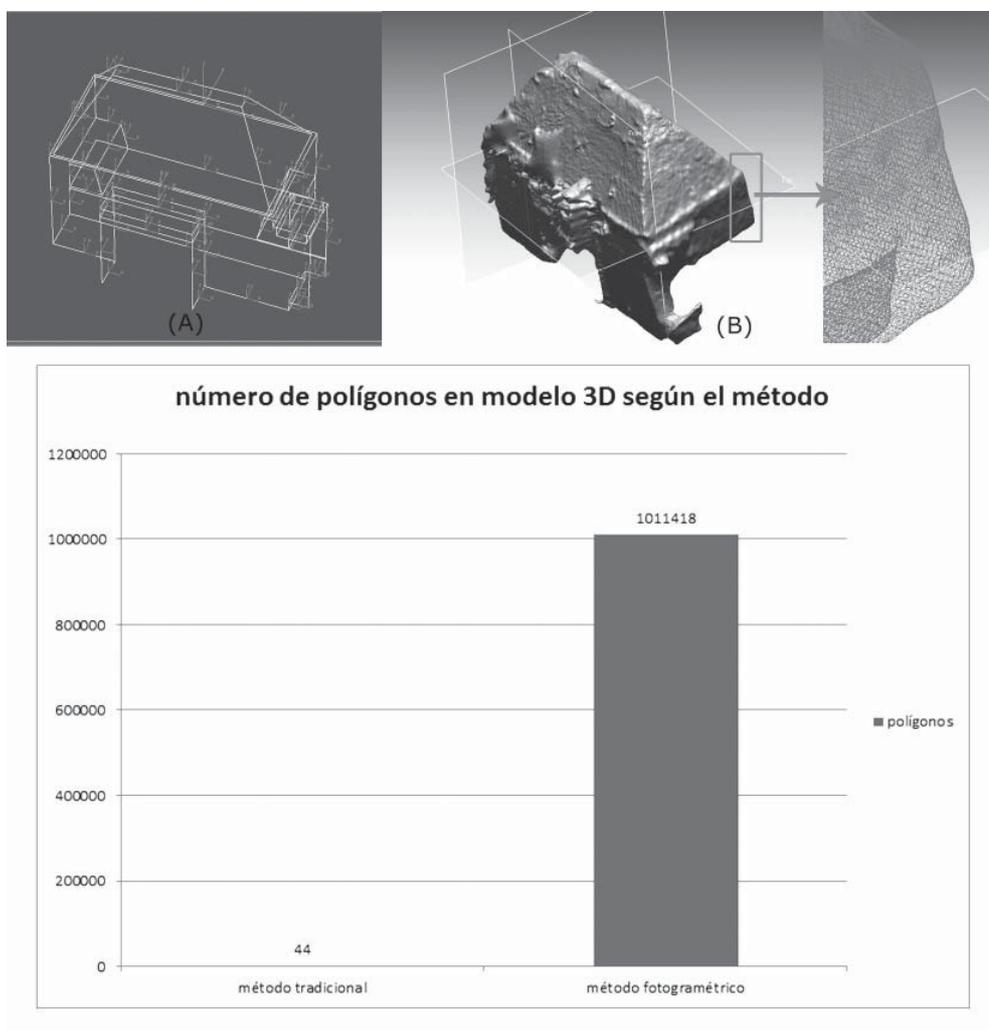


Fig. 22. Tabla comparativa, Cuarto 6, Edificio 3E1, Chilonché.

### Agradecimientos

Los autores agradecen expresamente a los directores del Proyecto La Blanca y al CONACYT de México por el apoyo y el equipo dispuesto para la realización de esta investigación; así como el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad, a través de la financiación de los proyectos de investigación coordinados con número de referencia BIA2011-28311-C02-01 y 02, el patrocinio del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes de España, a través de la financiación obtenida por el Proyecto Arqueológico La Blanca y su entorno dentro del programa de ayudas para Proyectos Arqueológicos en el Exterior, y al Instituto de Antropología e Historia de Guatemala, que han contribuido de forma determinante a hacer posible las investigaciones y la obtención de resultados de arqueología y arquitectura que se exponen en esta publicación.

Asimismo, agradecen la ayuda financiera recibida de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) para la puesta en marcha del Proyecto “Aplicación de nuevas tecnologías para el estudio y difusión del patrimonio cultural maya como factor de educación y desarrollo”, el apoyo en la toma de datos del arquitecto José Leonel López Hernández de la Universidad San Carlos de Guatemala y el apoyo y las orientaciones teóricas recibidas del Profesor Alessandro Merlo de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Florencia (Italia). También queremos agradecer a Filippo Fantini, Jorge Martínez Piqueras, y Zacarías Herguido Alamar por sus consejos metodológicos y por facilitar parte del material que aquí se expone.

**Bibliografía**

ALONSO RODRÍGUEZ, Miguel Ángel, 2000. Sobre la transformación lineal directa y un procedimiento de 'calibración' de las cámaras no métricas. En *Actas del VIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*, pp.335-340. ETSA, Barcelona.

BUILLPOZUELO, Felipe, M<sup>a</sup> Amparo NÚÑEZ y Juan J. RODRÍGUEZ, 2008. *Fotogrametría arquitectónica*. Primera edición, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

CHARNAY, Desiré, 1887. *The ancient cities of the New world; being voyages and explorations in Mexico and Central America from 1857-1882*. Harper & Brothers, Nueva York.

CHARNAY, Desiré y Eugène VIOLLET-LE-DUC, 1863. *Cités et ruines américaines: Mitla, Palenqué, Izamal, Chichen-Itza, Uxmal*. Gide, París.

DESMOND, Laurence G. y Paul G. BRYAN, 2003. Recording architecture at the archaeological site of Uxmal, Mexico: A historical and contemporary view, *The Photogrammetric Record*, vol. 18, n<sup>o</sup>. 102: 105-130.

HERMES, Bernard, Justina OLKO y Jaroslaw ZRALKA, 2001. En los confines del arte. Los graffitti de Nakum (Petén, Guatemala) y su contexto arquitectónico. En *Anales del instituto de investigaciones estéticas XXIII (79)*:29-70.

JUAN VIDAL, Franciso, 2002. Dibujo de levantamiento: modos de levantamiento y sistemas de medición. En *Patrimonio arquitectónico: Estudios previos, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica*, Á. García Codoñer (Ed.), pp. 83-98. Editorial UPV, Valencia.

MAY CASTILLO, Manuel y Gaspar MUÑOZ COSME, 2010. La ficha electrónica como instrumento para la investigación de la arquitectura maya. *Arché* 4-5: 253-260.

MUÑOZ COSME, Gaspar, Nuria MATARREDONA DESANTES, Beatriz MARTÍN DOMÍNGUEZ y Manuel MAY CASTILLO, 2010. Arquitecturas olvidadas: las expediciones científicas como método de investigación del patrimonio en peligro. *Arché* 4-5: 373-380.

MUÑOZ COSME, Gaspar, Cristina VIDAL LORENZO y Óscar QUINTANA SAMAYOA, 2011. Hallazgo de un mascarón en el sitio arqueológico de Chilonché (Petén, Guatemala). En *XXIV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, B. Arroyo, L. Paiz, A. Linares y A.L. Arroyave (Eds.), pp. 277-285. Museo Nacional de Arqueología y Etnología de Guatemala, Guatemala.

PATIAS, Petros y Mario SANTANA QUINTERO, 2011. Introduction to Heritage Documentation. En *CIPA Heritage Documentation, best practices and applications, 2007 y 2009*, E. Stylianidis, P. Patias, M. Santana (Eds.) vol. XXXVIII, pp. 9-14. CIPA, Kyoto, Atenas.

VIDAL LORENZO, Cristina y Gaspar MUÑOZ COSME, 1997. *Tikal. El Gran Jaguar*. AECI. Madrid.

VIDAL LORENZO, Cristina y Gaspar MUÑOZ COSME, 2012. *Tikal. Más de un siglo de arqueología*. Catálogo de la exposición. Universitat de València, Valencia.

ŽRALKA, Jaroslaw y Bernard HERMES, 2009. Los grafitos prehispánicos de los sitios Nakum y Yaxhá (Petén, Guatemala). En *Los grafitos mayas*. C. Vidal y G. Muñoz (Eds.), pp. 133-158. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya 2. Editorial UPV, Valencia.