

# FOTOGRAMETRÍA, MODELAMIENTO TRIDIMENSIONAL Y DRONES EN ARQUEOLOGÍA

## Primera parte La ilustración arqueológica. De la representación artística al modelamiento tridimensional

*Luis Jaime Castillo Butters<sup>a</sup> y Héctor Barrera Yaranga<sup>b</sup>*

### *Resumen*

*El modelamiento fotogramétrico tridimensional ha generado una revolución en la documentación e ilustración arqueológica: los modelos 3D permiten interactuar y manipular imágenes, y contienen una vasta cantidad de información. En este artículo, exploramos la evolución, características y ventajas de los diferentes métodos de ilustración arqueológica: las ilustraciones artísticas, los dibujos técnicos, la fotografía, el video y las imágenes generadas por computadoras. A continuación, exploramos las posibilidades que abren los modelos fotogramétricos, así como las características y diferencias que implica modelar artefactos, contextos, sitios y regiones. En la segunda parte de este artículo nos adentraremos en los diferentes métodos y estrategias que usamos para el modelamiento 3D de sitios arqueológicos.*

*Palabras clave: modelamiento 3D, fotogrametría, drones en arqueología, ilustración arqueológica, documentación.*

### **PHOTOGRAMMETRY, 3D MODELING AND DRONES IN ARCHAEOLOGY. PART ONE. ARCHAEOLOGICAL ILLUSTRATION. FROM ARTISTIC RENDERINGS TO 3D MODELING**

### **Abstract**

*3D photogrammetric modeling has brought about a revolution in archaeological documentation and illustration: 3D models allow one to interact and work with images and hold a vast amount of information. In this article we explore the development, characteristics and advantages of the various methods of archaeological illustration: artistic illustrations, technical drawings, photographs, video and computer-generated images. We explore the possibilities opened up by photogrammetric models, as well as the characteristics and differences entailed by the modeling of artifacts, contexts, sites and regions. The second part of this article will explore the different methods and strategies used in 3D modeling of archaeological sites.*

*Keywords: 3D modeling, photogrammetry, drones in archaeology, archaeological illustration, documentation.*

---

<sup>a</sup> Programa Arqueológico San José de Moro, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú. lcastil@pucp.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-3599-7536>

<sup>b</sup> Programa Arqueológico San José de Moro, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú. hbarrera@pucp.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0001-7484-026X>



## 1. INTRODUCCIÓN

El registro gráfico de artefactos, contextos o sitios es uno de los fundamentos del trabajo arqueológico en campo y laboratorio. Sea a través de pinturas, acuarelas, dibujos técnicos, fotografías, videos o imágenes generadas por computadoras, la condición empírica de la arqueología ha condicionado que, incluso más en que otras disciplinas, sea esencial capturar mediante imágenes los hallazgos y plasmar en ellas nuestras interpretaciones. Los arqueólogos de todos los tiempos se han enfrentado al hecho innegable de que su estudio casi siempre destruye o altera el contexto arqueológico, afectando también a los artefactos, por lo cual existe una clara conciencia de la necesidad de que al menos quede un registro detallado del producto de las exploraciones y excavaciones, es decir, de hacer permanente lo que es en esencia efímero. En este afán por documentar prolijamente los datos, nos enfrentamos a la realidad de que no todo se puede plasmar en palabras y, con frecuencia, solo una imagen puede capturar la complejidad de *lo arqueológico*.

El estándar del registro gráfico en arqueología es muy alto, ya que las imágenes producidas deben ser representaciones fidedignas de la realidad. Por lo tanto, dibujar ha sido y aún es considerado el registro óptimo: es una marca de excelencia en el trabajo arqueológico y es uno de los talentos que deben aprender y dominar los nuevos arqueólogos. Sin embargo, los dibujos no son la única forma de registro y tampoco son un retrato de la realidad. Es así que muchos arqueólogos argüirán que, si lo que se quiere es algo exacto, se tome una foto. Por ende, dibujar, como cualquier otra técnica de ilustración, es un acto de representación que incluye una intención interpretativa, es decir, más que capturar la realidad empírica de un objeto, el dibujo ilustra un punto de vista o idea que queremos transmitir sobre él (Addington 1986; Adkins y Adkins 1989; Bagot 2005; Banning 2002; Caballero Zoreda 2006; Piggot 1965; Pillsbury 2012, 2017; Sapirstein 2020; Steiner 2005).

Los arqueólogos han explorado muchas maneras de representar hallazgos de artefactos, contextos y sitios por medio del uso de las técnicas disponibles más avanzadas. No obstante, todas ellas, además de requerir talento natural y mucho entrenamiento, como cualquier otra forma de representación, tienen dos grandes limitaciones. En primer lugar, producen solo imágenes bidimensionales, en otras palabras, prescinden de una de las dimensiones que conforma la materia, por lo tanto, son necesariamente una simplificación de una realidad que es, esencialmente, tridimensional. En segundo lugar, las imágenes producidas por estas técnicas son representaciones estáticas. En síntesis, una representación artística, un dibujo técnico o una fotografía solo ofrece un punto de vista de lo representado (frontal, lateral, cenital, etc.) y lo captura en un momento en el tiempo, es decir, no permite ninguna manipulación del sujeto ni puede capturar su riqueza tridimensional. Además, no puede capturar los cambios que sufre el sujeto de representación, ya sean estos muchos o pocos, en un tiempo corto o largo. En el registro arqueológico, estas limitaciones se han tratado de subsanar presentando múltiples imágenes desde diferentes ángulos y, con estas, hacer secuencias de imágenes que den cuenta de los cambios entre un momento y otro, de una capa o estrato a otro, de un estado de conservación a otro, etc.

Este artículo trata sobre una nueva adición a la tradición de representación gráfica en arqueología: los gráficos generados por computadoras y, particularmente, los modelos tridimensionales generados a partir del procesamiento fotogramétrico de colecciones de fotografías u otras imágenes obtenidas desde el aire con drones y desde la superficie con cámaras fotográficas.

La fotogrametría en su origen empleaba solo imágenes producidas por cámaras fotográficas, mientras que hoy ellas provienen de múltiples instrumentos como cámaras fotográficas, drones, cámaras térmicas, multiespectrales y, más recientemente, cámaras LiDAR. La gran ventaja de estas nuevas técnicas y la verdadera revolución que están produciendo en el trabajo arqueológico es que permiten representar las tres dimensiones físicas de la materia, dándole volumen a artefactos, contextos, sitios y regiones, lo que, además, permite manipular o visualizar el modelo 3D en cualquier dirección. Con estas nuevas técnicas de ilustración, el punto de vista ya no está limitado por el registro. Además, nuestra experiencia de este no está circunscrita a la perspectiva brindada

por el ilustrador o fotógrafo. Sin embargo, el proceso de transformar imágenes bidimensionales a modelos tridimensionales requiere nuevos entrenamientos, equipos y una nueva sensibilidad (Abate 2019; Barratt 2021; Bolognesi *et al.* 2014; Deren *et al.* 2000; De Reu *et al.* 2013; Forte 2014; Forte *et al.* 2012; Gruen 2021; Guery *et al.* 2017; Harrison-Buck *et al.* 2016; Herrmann *et al.* 2018; Lambers *et al.* 2007; Lingua *et al.* 2017; Pecci 2020; Rahaman 2021; Sapirstein y Murray 2017; Shan *et al.* 2020).

Este artículo se encuentra subdividido en dos entregas. En la primera parte, la presente, se abordan dos temas: un breve recuento de la historia de la ilustración arqueológica a través de las cinco modalidades o técnicas que se han empleado para generar imágenes de *lo arqueológico* y una presentación detallada de lo que es el Modelamiento Fotogramétrico Tridimensional en arqueología, y de lo que se requiere para emplearlo. En la segunda parte, en una publicación posterior, nos enfocaremos en las diferentes estrategias, técnicas y prácticas de modelamiento fotogramétrico de sitios arqueológicos que comprenden seis técnicas o tipos de modelamiento adaptadas a las características y condiciones de los sitios. Estas técnicas se sustentan en la documentación y modelamiento de cientos de artefactos, contextos, sitios y regiones arqueológicas que hemos realizado en el último decenio, en conjunto con la experimentación de numerosos equipos fotográficos y drones, así como de diferentes paquetes de *software* fotogramétrico, y en la adaptación a las características y necesidades de la arqueología de nuevas tecnologías de documentación.

## 2. SECCIÓN I. UN BREVE RECORRIDO POR LA ILUSTRACIÓN ARQUEOLÓGICA: DE LAS REPRESENTACIONES ARTÍSTICAS AL CAD, LA FOTOGAMETRÍA Y EL USO DE DRONES

Como todos los métodos de campo, el registro gráfico ha experimentado una evolución muy importante en la corta historia de la arqueología como producto del desarrollo y adecuación de una sucesión de modalidades de ilustración y de tecnologías adaptadas para el registro arqueológico. Joanne Pillsbury (2012), en el capítulo introductorio de su tratado sobre la ilustración arqueológica, *Past Presented*, ha hecho el más fino y elegante recorrido por estos métodos y técnicas, combinando las dos perspectivas de su especial vocación: la arqueología y la historia del arte. Al respecto, nuestro propósito es menos artístico y más técnico en el sentido arqueológico, por lo que no resultará ni elocuente, ni elegante.

Cinco métodos y técnicas se han ido sucediendo para la producción de las ilustraciones que la arqueología requería: 1) la pintura y el dibujo artístico; 2) el dibujo técnico convencional; 3) la fotografía; 4) el video y, solo últimamente; 5) los diseños asistidos por computadora. Como veremos, las nuevas modalidades y técnicas que fueron apareciendo no sustituyeron a las que ya existían, por el contrario, se complementaron, por lo que hoy en día todas las múltiples formas de ilustración y registro gráfico están en pleno uso, pero con fines ligeramente diferentes.

Ilustrar está en el ADN de la arqueología y en otras ciencias de base empírica como la biología, la anatomía, la botánica, la zoología, etc., en contraste con otras disciplinas donde esto no ocurre. Entonces, expresar una idea o concepto, o explicar un contexto o sitio arqueológico mediante una imagen, parecería casi la única forma de transmitir la idea o de entender el objeto o simplemente de representar un concepto abstracto o un objeto prácticamente invisible. Mucho antes de que naciera la arqueología, quizá desde que nuestros ancestros tomaron conciencia de que estaban rodeados de los restos del pasado, se comenzaron a producir imágenes artísticas que intentaban capturar la apariencia de estos restos y ruinas, como las pinturas rupestres de Altamira. Muchas veces las imágenes no son una mera captura de la realidad que ya no existe y de la que no queda ninguna huella, sino que a través de una imagen tratamos de imaginarnos qué apariencia pudieron tener antiguos edificios antes de convertirse en las ruinas que hoy vemos. En general, estas imágenes no son un reflejo fiel de lo que existió en el pasado o de las ruinas que de este han quedado, sino una proyección de lo que el pasado pudo haber sido: una alegoría, una imagen elaborada por su valor estético y documental.



Figura 1. Representación artística, Cornelius van Poelenburgh, *Escena Imaginaria del Campo Vaccino en Roma con Dos Mulas* (1620), Museo de Louvre, París (fotografía: Luis Jaime Castillo).

## 2.1. Las representaciones artísticas (Figs. 1 y 2)

Con frecuencia se dice que en occidente fue, con el advenimiento del Renacimiento italiano, donde las antigüedades y los monumentos antiguos (tan abundantes en Italia como a lo largo del Mediterráneo) se convirtieron en un tema favorito de representación. Esto, generalmente, como escenario o telón de fondo de otras representaciones y, en algunos casos, como sujeto mismo de la representación. Generalmente, los restos de construcciones antiguas se representaron como las ruinas que eran, pero también los artistas dieron rienda suelta a su imaginación para concebirlos y representarlos en toda su gloria. El espíritu restaurador llegó a su más alta cumbre en obras como *La Escuela de Atenas* de Rafael Sanzio (1511), fresco de las Estancias del Vaticano, en el que los grandes sabios de la antigüedad clásica se reúnen en una estructura abovedada semejante a los templos y termas de Roma. Las representaciones artísticas de los monumentos del pasado no tenían que ceñirse a ninguna norma. Además, la escala de los monumentos no tenía que ser correcta, ni tampoco sus materiales y apariencia. Es decir, no eran documentos ni pretendían ser correctos y precisos, les bastaba ser verosímiles. Por ejemplo, Cornelis van Poelenburgh, un pintor holandés del siglo XVII, retrató con frecuencia escenas históricas o costumbristas que trascurrían alrededor de las ruinas romanas: *Escena Imaginaria del Campo Vaccino en Roma con Dos Mulas* (1620) (Fig. 1) y *La Lapidación de San Esteban en Roma* (1622-1624).

En el siglo XVIII, la ilustración artística de los monumentos, sobre todo por influencia de la arquitectura, comenzó a hacerse más y más precisa, sin embargo, esto dio un amplio margen a la imaginación. De esta manera, los inmensos y detallados cuadros de Giovanni Antonio Canal (Canaletto), Michele Marieschi, Bernardo Bellotto y Francesco Guardi de los grandes edificios





Figura 2. Representación artística, Wilhelm Steuerwaldt, *Las Ruinas de la Abadía Medieval de Heisterbach* (1863), Museo de Louvre, París (fotografía: Luis Jaime Castillo).

de Venecia, de las naves de todo tamaño que circulaban por sus canales, así como de las fiestas y ceremonias que se escenificaban en esta hermosa ciudad, son ejemplos del gusto desarrollado por las élites europeas al concebir las representaciones de la arquitectura como un sujeto firmemente establecido en el siglo XVIII. De igual manera, el cuadro *Las Ruinas de la Abadía Medieval de Heisterbach* (1863) de Wilhelm Steuerwaldt (Fig. 2), hoy en el Museo de Louvre, es un extraordinario ejemplo de la representación de una iglesia gótica semiderruida, es decir, no como motivo de fondo o escenario, sino como el sujeto propio de la representación. Esto halla su razón en que las ruinas de un gran edificio evocan una serie de contenidos psicológicos (decaimiento, decadencia, depresión, el pasado, la amenaza) que un edificio moderno y en buen estado no puede transmitir. Es posible que esta sea la razón de su popularidad como sujeto de representación.

Las representaciones artísticas de los restos arqueológicos nunca han desaparecido ni perdido el favor popular. Asimismo, los artistas del presente emplean estas técnicas de pintura y dibujo artístico, esencialmente, para producir recreaciones e ilustraciones imaginativas<sup>1</sup>. De manera paralela, las convenciones en cuanto a las técnicas establecidas en otras ciencias naturales como la botánica, la zoología y la anatomía, desde el siglo XVIII, también se emplearon en las representaciones artísticas de las primeras imágenes e ilustraciones de hallazgos arqueológicos (v.g. Martínez Compañón y Bujanda 1781-1794; Pillsbury 2012, 2017; Reiss y Stübel 1880-1887).

## 2.2. Los dibujos técnicos (Figs. 3 y 4)

En el siglo XIX, a medida que los anticuarios y coleccionistas fueron cediendo el paso a los tempranos arqueólogos, que se concebían a sí mismos como científicos naturales, surgió la necesidad de generar ilustraciones que retrataran con un alto grado de precisión los restos y artefactos, particularmente, líticos, ceramios y metales, de forma tal que investigadores que no tenían acceso a ellos pudieran apreciarlos y compararlos con los propios. Fue necesario, entonces, el desarrollo del dibujo técnico arqueológico basado en usos convencionales, estándares y medidas, que permitieran que los artefactos pudieran ser ilustrados de la misma manera y, consecuentemente, pudieran ser usados como elementos de comparación e investigación. Por otro lado, la arqueología llegaba más de cien años rezagada al desarrollo de los dibujos técnicos que, desde la publicación de la *Enciclopedia Francesa* alrededor de 1750, había innovado con ilustraciones técnicas muy precisas de máquinas y artefactos mecánicos.

El dibujo técnico, basado en convenciones estandarizadas, se fue imponiendo en la arqueología, particularmente en la europea, donde aparecieron diversas escuelas de dibujo técnico y procedimientos aceptados especialmente en Francia y Alemania. Estas se basaban en mediciones cuidadosas y representaciones de aspectos difíciles de apreciar como la talla lítica (Sapirstein 2020). Como consecuencia de este desarrollo, surgió la profesión de dibujante técnico arqueológico, la cual se fue afianzando a medida que proyectos de investigación y museos requirieron este tipo de imágenes. Hasta mediados del siglo XIX, la publicación de fotografías era imposible, por lo que el dibujo técnico, a través de grabados, debía también absolver las necesidades de una creciente industria gráfica y editorial. El dibujo técnico se convirtió en el estándar de representación de los artefactos y contextos hallados en el campo, además, es practicado por los arqueólogos de todo el mundo hasta el día de hoy. Sin embargo, lejos de reemplazar a las representaciones artísticas, el dibujo técnico convivió con ellas: el primero se asocia con la creatividad artística, mientras que el segundo con el rigor académico y la exactitud. Tal es el caso de dibujos que ilustraban perspectivas imposibles de visualizar en la realidad, como la famosa vista cenital de las capillas funerarias y el sarcófago de Tutankhamun, o una imagen en planta de la tumba M-U 1727 de San José de Moro (Fig. 3).

## 2.3. Las fotografías arqueológicas (Figs. 5 y 6)

Con el perfeccionamiento de la fotografía, a mediados del siglo XIX, se generó una tecnología que permitía capturar la realidad, aparentemente, de manera precisa, detallada y sin las subjetividades del ilustrador. Si bien, al inicio, la fotografía fue un medio técnicamente complicado, posteriormente, y de manera rápida en grandes ciudades y pueblos, aparecieron estudios profesionales y entusiastas que emplearon esta novedad para retratar todo tipo de cosas. Es así que la fotografía se fue imponiendo como el medio más idóneo para generar ilustraciones. Ahora bien, uno de los sujetos favoritos de la temprana fotografía fueron los restos arqueológicos de los grandes monumentos como las iglesias, estatuas y artefactos muebles en general, con lo que en la práctica nació la fotografía arqueológica (Fig. 5). En el Perú, destaca como padre de la fotografía arqueológica Hans Heinrich Brüning (1848-1928), un ingeniero alemán que llegó a la región de Lambayeque a fines del siglo XIX y cuya prolífica labor permitió crear la colección más vasta de imágenes de la vida cotidiana de la región, tecnologías, usos, costumbres y, por supuesto, arqueología local (Brüning 1989; Schaedel 1988). Otro avance importantísimo en la fotografía de lo arqueológico fue el desarrollo, muy temprano, de la fotografía aérea. La idea de combinar una cámara con un globo y, poco después, adaptarla a los primeros aeroplanos, fue una alianza evidente. A principios del siglo XX, en los frentes europeos de la Primera Guerra Mundial, la fotografía aérea probó ser uno de los medios más eficientes para generar inteligencia, producir mapas del terreno, y estudiar el posicionamiento y movimiento de las tropas. Sin embargo, las fotos aéreas no tienen el grado de precisión que uno podría imaginarse, puesto que siempre el lente genera una deformación de

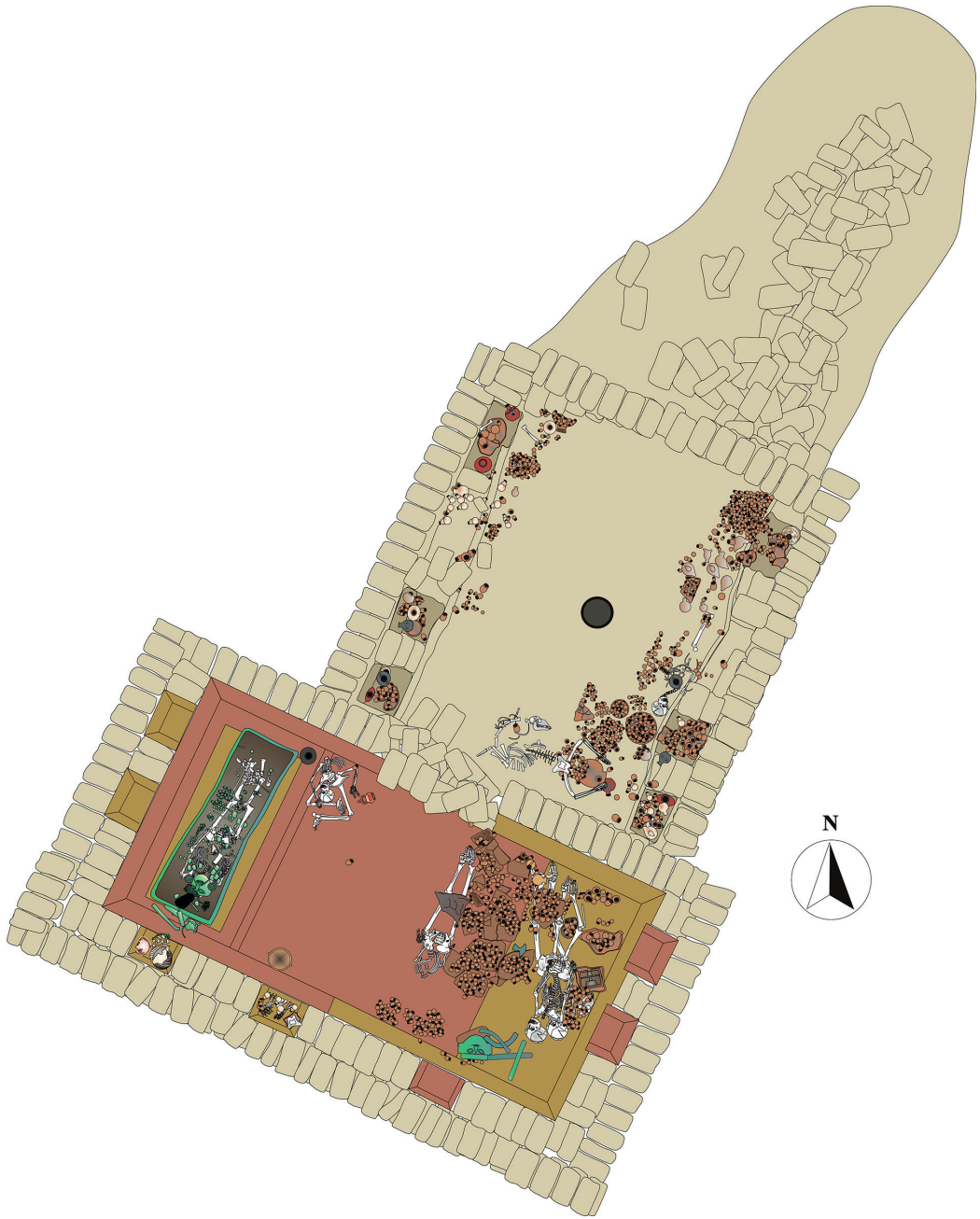


Figura 3. Dibujo técnico, vista en planta de la Tumba M-U 1727 de San José de Moro (dibujo: Luis Muro/PASJM).

la imagen. Por lo tanto, para que la fotografía aérea se convierta en un mecanismo de alta precisión, las imágenes debían ser *corregidas*, algo que ocurrirá con el advenimiento de la fotogrametría.

A medida que la fotografía se iba imponiendo como el método más favorecido para el registro arqueológico, los artistas y dibujantes técnicos, seguramente, temieron que sus días estuvieran contados. La nueva técnica parecía permitir a cualquier lego hacer instantáneamente lo que un ilustrador profesional hacía con mucho entrenamiento, con un costo muy alto y en mucho tiempo.

## Tumba M-U613

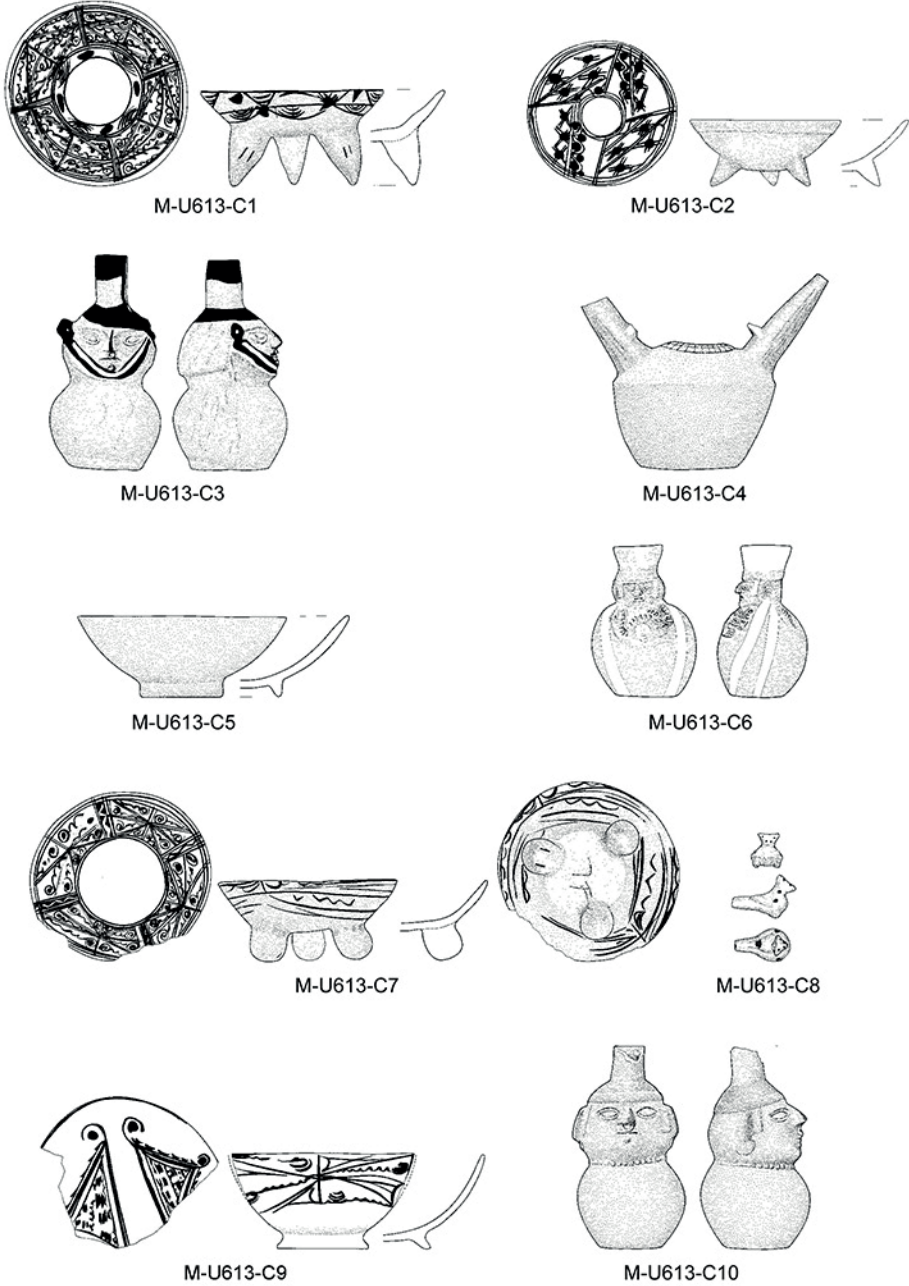


Figura 4. Dibujo técnico de la cerámica contenida en la tumba M-U613 de San José de Moro (dibujo: Percy Fiestas Granados/PASJM).





*Figura 5. Fotografía de Stonehenge (1853), Royal Collection Trust, RCIN 2906077 (fotografía: William Russell Sedgfield).*



*Figura 6. Fotografía de Machu Picchu tomada desde un dron, noviembre del 2019 (fotografía: Fabricio Serván/ PASJM).*



Además, a primera vista, la fotografía parecía capturar con exactitud lo retratado, sin distorsiones ni subjetividades, sin que la visión, el talento o la técnica influyera sobre lo representado. Esto, evidentemente, no fue cierto y hoy sabemos que la fotografía puede ser una técnica de ilustración tan subjetiva como las anteriores. Afortunadamente, la fotografía nunca reemplazó a las ilustraciones artísticas o al dibujo técnico, por el contrario, las tres técnicas de registro gráfico lograron convivir, desarrollándose diferentes orientaciones y aplicaciones para cada una. Es así que, con el tiempo, la fotografía fue evolucionando y haciéndose capaz de producir imágenes más precisas y de mayor calidad. Mejoras en la calidad de las cámaras, los lentes y filtros, las películas, los métodos de revelado y las luces hicieron parte de la diferencia. Sin embargo, la mejora en la técnica de los fotógrafos fue lo que, en última instancia, estableció a la fotografía como un método de registro de alta calidad y una de las artes visuales. Una cosa es tomar una foto, otra es tomar una buena foto.

#### 2.4. Los videos

El 28 de diciembre de 1895, los hermanos Lumière exhibieron ante un curioso público, en París, 10 filmes cortos, lo que dio inicio a la era del video o *film*. Desde su invención, el video generó gran expectativa por su capacidad de registrar, ya no una imagen, sino un continuo de imágenes que, cuando proyectadas, creaban la ilusión de movimiento. Por primera vez, una técnica de creación de imágenes podía capturar la acción, la expresión y el transcurrir del tiempo. Sin embargo, su costo elevado y la complejidad de operar las cámaras filmadoras hacían imposible su uso generalizado, y, ciertamente, su aplicación en el registro arqueológico. En consecuencia, algunas de las más importantes investigaciones arqueológicas de principios del siglo XX nunca fueron registradas en video. Ejemplo de ello es la excavación de la tumba de Tutankhamun descubierta en 1922 por Howard Carter y Lord Carnavon, o los trabajos de Hiram Bingham, en Machu Picchu, iniciados en 1911. El video era complicado y caro, por lo que, muy esporádicamente, se le dio uso en la arqueología. Los ejemplos más antiguos de filmaciones de excavaciones arqueológicas datan de la década de 1930, aunque se trata de breves filmaciones de sitios como Monte Carmelo y la Garganta de Olduvai que nunca se difundieron (Hiscock 2014). Esto es más paradójico aún si consideramos que la arqueología y, particularmente, la excavación arqueológica de tumbas y momias, ha sido, desde el origen de la cinematografía, un tema favorito y recurrente. Quizás, este inusitado interés fue una consecuencia de los grandes descubrimientos arqueológicos de principios del siglo XX en Egipto, Mesopotamia, China, México, Perú, etc. Si bien no hay registro de trabajos arqueológicos, sí se desarrolló una fascinación por los y las arqueólogos y sus aventuras, el misterio de sus hallazgos, así como las maldiciones asociadas a ellos. Estos temas son, hasta el día de hoy, los favoritos de los productores de cine y del público general.

Un pequeño cambio se inició en la década de 1980 con la aparición del video digital portátil, pero esto no produjo una tradición de filmes arqueológicos, la cual sí existe en la antropología cultural y, especialmente, en la etnografía. Si bien el video se volvió más asequible, rara vez fue parte del arsenal de los arqueólogos. Contrariamente a lo que ocurrió con la pintura, el dibujo técnico y la fotografía, el video nunca ha sido popular, al menos entre los arqueólogos, y muy pocos de ellos se han destacado por producir videos de sus excavaciones. Parece ser que la percepción general es que filmar (una excavación) es una tarea de expertos que, por su interés, acompañaban a las tareas arqueológicas, lo que aún ocurre con poca frecuencia (Beale y Healy 1975; Hiscock 2014).

#### 2.5. Las imágenes generadas por computadoras

La más reciente técnica de ilustración empleada en la arqueología, quinta en nuestra serie, son las imágenes generadas por computadoras. En realidad, se trata de varias técnicas para generar gráficos e ilustraciones en base a computadoras muy potentes y a programas gráficos como los dibujos de vectores en Illustrator o Corel Draw; las imágenes producidas por programas de manipulación

fotográfica, como Photoshop; las imágenes asistidas por computadoras o CAD, en AutoCAD; o las imágenes generadas por fotogrametría, procesadas en Metashape o Pix4D. Estas técnicas son relativamente recientes. Su uso no se dio sino hasta que se fabricaron computadoras personales lo suficientemente robustas y paquetes de *software* capaces de generar gráficos, lo cual no ocurrió sino hasta la década de 1990. Si bien los programas CAD (Diseños Asistidos por Computadoras) son los más populares, existen muchos tipos de gráficos que se generan, hoy en día, enteramente a partir de las capacidades computacionales de ordenadores y de sofisticados programas de diseño, dibujo y gráficos.

Como sucedió con las cuatro modalidades de ilustración antes descritas, la aparición de los CAD hizo presumir que las otras formas de generar ilustraciones arqueológicas desaparecerían o serían mayormente reemplazadas, lo que, nuevamente, no ocurrió. Por el contrario, estos nuevos recursos se combinaron con los anteriores, lo que devino en la producción de programas y accesorios que permiten hacer dibujos y pinturas artísticas enteramente en el ambiente virtual de la computadora. Los dibujos técnicos tienen una gran proximidad con los gráficos generados por computadoras, por lo que su adopción fue inmediata por los ilustradores tradicionales, de los primeros y más entusiastas en emplear las nuevas técnicas. Cabe destacar que lo mismo sucedió con la fotografía en la producción de gráficos. Ahora bien, los programas CAD, además, podían hacer cosas que los anteriores métodos de ilustración no podían, por lo que, en vez de sustituir los métodos tradicionales, ampliaron la capacidad de producir imágenes. Esta vez lo hicieron al incorporar la altísima precisión de los gráficos necesarios para la ingeniería, el diseño mecánico y la arquitectura. En la arqueología, la incorporación de los gráficos generados por computadoras fue también rápida, al punto que hoy en día todos los planos y mapas que se requieren para hacer trámites oficiales tienen que presentarse en formato CAD.

En síntesis, las cinco técnicas discutidas hasta aquí: las representaciones artísticas, los dibujos técnicos, la fotografía, el video y las ilustraciones por medio de computadoras, han tenido diferentes grados de impacto en el registro y la ilustración de lo arqueológico. La técnica que se ha adaptado menos al trabajo arqueológico es el video, que ha quedado siempre restringido a la producción de documentales y rara vez se emplea para el registro arqueológico estándar. Las pinturas y representaciones artísticas también están especializadas en la producción de imágenes recreativas y, con mucha frecuencia, en la producción de ilustraciones para textos divulgativos, catálogos o proyectos museográficos. Su costo es cada vez más elevado, puesto que este tipo de ilustraciones necesita de artistas entrenados, por lo que es un *lujo* que solo se puede sustentar cuando existe el presupuesto suficiente. En cuanto al dibujo técnico y la fotografía, siguen siendo el estándar de registro arqueológico, siendo posible observar en cualquier proyecto a los arqueólogos tomando fotos y haciendo dibujos técnicos, tanto de sus excavaciones como de sus hallazgos. Además, a diferencia de los otros dos métodos, todo arqueólogo tiene algún tipo de entrenamiento en fotografía y dibujo. La fotografía nunca llegó a sustituir al dibujo técnico, y posiblemente no lo hará. Sin embargo, todos estos métodos comparten la debilidad que mencionamos al inicio de esta sección: son formas estáticas de representación, congelan lo representado en el momento en que se tomó la foto o se hizo el dibujo y, por lo tanto, lo condenan a existir en las dos dimensiones que representan. Esto cambió con la aparición de los gráficos generados por computadoras y, particularmente, con los modelos tridimensionales generados por fotogrametría.

### 3. SECCIÓN II. EL MODELAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO 3D Y EL USO DE DRONES EN LA PRODUCCIÓN DE ILUSTRACIONES ARQUEOLÓGICAS

La fotogrametría es una disciplina de análisis espacial, así como una tecnología de generación de imágenes (e ilustraciones) y de modelamiento tridimensional, que permite extraer información precisa y medir aspectos de objetos a partir del procesamiento computacional de imágenes (Guery

*et al.* 2017; Sapirstein y Murray 2017). Generalmente, la fotogrametría se nutre de imágenes bidimensionales o nubes de puntos producidos por una amplia gama de equipos de detección y registro como escáneres laser (LiDAR), terrestres o aéreos; cámaras convencionales, fotográficas y de video; y cámaras multiespectrales, térmicas, SAR, SWIR e, incluso, imágenes obtenidas con la cámara fotográfica o de LiDAR de un teléfono inteligente. Estos equipos se pueden operar desde la superficie, con un dron o vehículo volador no tripulado volando a baja altura, desde un avión, o también desde un satélite volando a cientos de kilómetros. En todos los casos, el principio de la fotogrametría es el mismo: se necesitan múltiples imágenes con un alto grado de superposición que retraten al sujeto desde diferentes puntos de vista, los cuales, posteriormente, serán transformados en modelos tridimensionales. El procesamiento fotogramétrico de estas imágenes, mediante el uso de *software*, transforma las imágenes bidimensionales en *productos* tridimensionales, entre los cuales destacan: las orto imágenes; los modelos tridimensionales; los modelos de elevación, de superficie y de terreno; la topografía digital; los índices de vegetación; etc. De estos productos es posible obtener imágenes bi y tridimensionales, así como información sobre los sujetos documentados, medidas, volúmenes y otros aspectos. Además, los modelos obtenidos en diferentes momentos, si están georreferenciados con precisión, pueden ser comparados para detectar cambios y cuantificar tanto las diferencias como las variaciones volumétricas, lo que permite detectar, de manera automática, afectaciones o pérdidas, distorsiones, deformaciones de sitios y componentes construidos.

Los procesos de correlación de las imágenes hasta su correcta ubicación en el espacio comprenden una serie de pasos: desde la extracción y ubicación de puntos compartidos por múltiples imágenes, la construcción de nubes de puntos, hasta, finalmente, la transformación de estos puntos en modelos tridimensionales. Así, el entendimiento y dominio sobre estos ha sido el resultado de muchísimos años de investigación y de grandes avances en la informática, lo cual ha devenido en la creación de paquetes de *software* de fotogrametría muy complejos y cada vez más eficientes (Deren *et al.* 2000; Guery *et al.* 2017). Algunos de ellos, como Regard3D, Colmap, VisualSfm y Python Photogrammetry Toolbox son gratuitos y de acceso abierto (*Free and Open Source Software*; Rahaman 2021). Otros, como Agisoft Metashape o Pix4D, son paquetes profesionales pagados muy populares entre los arqueólogos y otros especialistas.

La producción de ilustraciones y modelos 3D a partir del proceso fotogramétrico y, particularmente, la que emplea drones para cubrir grandes áreas o la que permite documentar edificios o sitios mediante el uso de drones, es un paso adelante en la documentación de *lo arqueológico* y en la producción de ilustraciones. En muchos casos, estas técnicas y equipos pueden ser más eficientes que los métodos que hasta ahora se han utilizado para los mismos propósitos. El gran avance que estas nuevas tecnologías ofrecen se debe a que la recolección de datos en campo es mucho más rápida. Esta rapidez resulta en costos mucho más bajos, sobre todo, en los aspectos logísticos del trabajo, además, minimiza el riesgo para el operador, puesto que no tiene que llegar hasta lugares peligrosos o alejados. Asimismo, el impacto sobre los sitios también se minimiza, puesto que las tareas de documentación, generalmente, se pueden realizar sin contacto con lo representado (Sapirstain y Murray 2017). Sin embargo, también hay que reconocer que este método, como cualquier otro, tiene una serie de deficiencias y limitaciones.

Como se vio en las técnicas de ilustración descritas en la sección anterior, toda ilustración o modelamiento es, a la vez, el resultado de la aplicación de estándares y convenciones a una cadena de trabajo, pero también implica una perspectiva personal, así como una forma de ver y concebir el objeto representado, la iluminación, la forma de obtener las imágenes y un conjunto de opciones de las características que estas imágenes tienen. En otras palabras, las imágenes producidas a partir del modelamiento fotogramétrico tienen los mismos elementos artísticos que la fotografía y no son simplemente el resultado de presionar un obturador. Estos criterios dependen tanto de la experiencia como de la intuición del registrador, de las condiciones de iluminación y de la geometría del *artefacto*. Por lo tanto, lo artístico del proceso fotogramétrico está en la individualidad y subjetividad de estas decisiones.

En este momento, el más importante reto del registro fotogramétrico es la georreferenciación de imágenes y, en consecuencia, todos los productos derivados del proceso de modelamiento. Existen dudas respecto a la precisión de la localización en el espacio de los modelos 3D producidos (Bolognesi *et al.* 2014; Masson-MacLean *et al.* 2021; Sapirstein y Murray 2017). Corregir este tipo de imprecisiones es esencial para que, por ejemplo, modelos 3D del mismo sujeto puedan ser comparados a fin de detectar cambios, modificaciones o alteraciones. Elevar el nivel de precisión ha sido uno de los más importantes objetivos del desarrollo de nuevos equipos y técnicas, particularmente de la generalización del uso de equipos con RTK (*Real Time Kinematics*), los cuales, debidamente empleados, pueden reducir los errores a pocos centímetros. Comparaciones rigurosas de los resultados obtenidos con diferentes equipos (*v.g.* Bolognesi *et al.* 2014) y en diferentes condiciones son la única forma de lograr una mayor confianza. Esta tarea no es nada sencilla y se complica aún más por los constantes cambios en la tecnología. Sapirstein y Murray concluyen su artículo sobre la aplicabilidad del registro fotogramétrico en el trabajo de campo arqueológico con la siguiente invocación: «La fotogrametría debe servir, entonces, a los grandes objetivos de la arqueología, en vez de cambiarlos. El camino a un papel productivo para la fotogrametría en arqueología está en una articulación cuidadosa y la aplicación de buenas prácticas, estándares compartidos y metadatos transparente» (2017: 349, nuestra traducción).

Es evidente que existe una apremiante urgencia por documentar el patrimonio cultural, particularmente el construido, que en todo el mundo se está destruyendo a un ritmo alarmante debido a terremotos, inundaciones, incendios y conflictos, como la ampliación de la frontera agrícola y de los asentamientos humanos. En este escenario, es imperativo el desarrollo y perfeccionamiento de métodos de registro que permitan avanzar rápida y eficientemente con la documentación de las evidencias arqueológicas (Petrovic *et al.* 2021; Rahaman 2021). Afortunadamente, en los últimos años dos tecnologías han confluído para hacer posible una nueva forma de documentación y registro: el modelamiento 3D fotogramétrico y los drones o vehículos voladores no tripulados. Si bien existen numerosas publicaciones acerca del uso de la fotogrametría en el patrimonio cultural y la arqueología, son muy pocos los estudios detallados que sirvan al usuario para orientar su trabajo usando esta técnica<sup>2</sup>. Rahaman (2021: 29) afirma que «[...] investigaciones en buenas prácticas o procesos automatizados que puedan ser usados por el público general para crear reconstrucciones 3D son difíciles de encontrar y procedimientos de bajo costo son escasos» (nuestra traducción).

### 3.1. Tipos y modalidades de modelamiento 3D fotogramétrico en arqueología y patrimonio cultural

Si bien cada proyecto de documentación y modelamiento 3D de una *res* arqueológica presenta una problemática única que requiere de un tratamiento singularizado y de una estrategia de registro adaptada a su geometría, todos los proyectos pueden ser agrupados en cuatro tipos o modalidades de documentación adaptados a las categorías, escalas, tamaños y características de lo que se quiere modelar y documentar. Es decir, el registro depende del tamaño y de las características del objeto del modelamiento, pero también de los productos que se quiere obtener. Consiguientemente, la técnica y estrategia de captura de la información o la producción de imágenes será diferente y dependerá del tipo de *bien* arqueológico. Así, por ejemplo, solo será necesario el uso de un dron cuando la extensión del *bien* lo amerite o cuando se requieran imágenes cenitales. En caso contrario, no es eficiente usar un aparato que tome imágenes desde arriba. Imágenes obtenidas desde la superficie con cámaras fotográficas o con un LiDAR de superficie, de mayor resolución que las imágenes obtenidas por drones, son necesarias para la documentación de artefactos pequeños o para ver detalles de contextos y sitios. Modelar los sitios más grandes y las regiones requiere, necesariamente, de imágenes aéreas, ya sea que estas se obtengan mediante un dron u otro aparato volante. Adicionalmente, las fotos tomadas por drones pueden hacerse mediante programas de

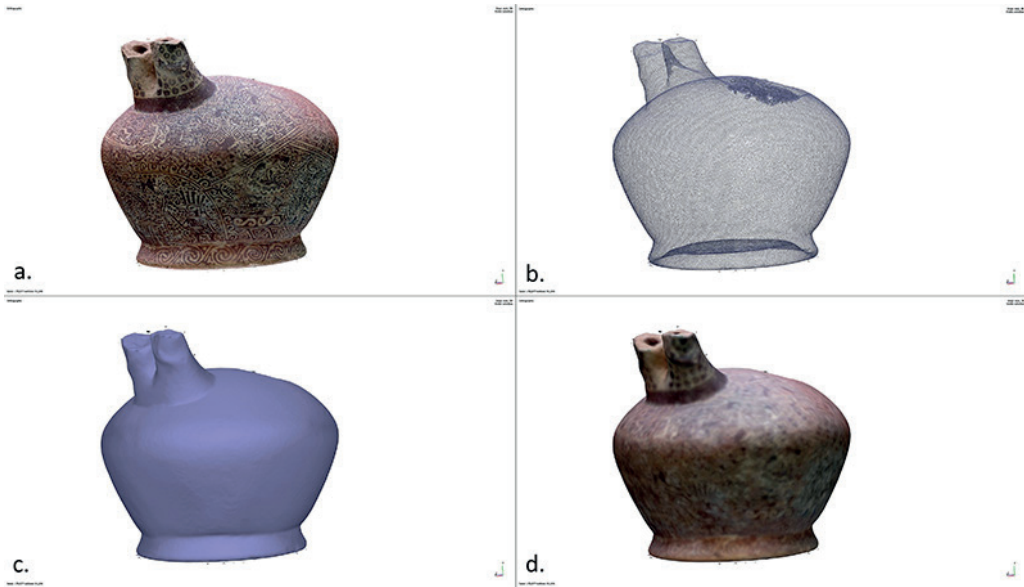


Figura 7. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un artefacto arqueológico: ceramio de línea fina Mochica Tardío proveniente de San José de Moro (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

planificación de vuelos o autopilotos. Estos controlan todos los parámetros (altitud, resolución de imágenes, superposición vertical y lateral de imágenes, ángulo de vuelo, etc.) mediante vuelos *libres* en los que el piloto controla todos los parámetros o una combinación de ambos.

Considerando lo anterior, podemos definir cuatro modalidades de modelamiento:

#### *El modelamiento y documentación de artefactos muebles (Figs. 7 y 8)*

El registro y modelamiento fotogramétrico de artefactos muebles, ya sean pequeños o medianos, como una pequeña cuenta, los hilos de una pieza textil, una punta de obsidiana, un ánfora de cerámica, una momia, una estatua o un automóvil, se hace, por lo general, en un laboratorio o en un museo, donde las condiciones ambientales y de luz pueden ser controladas. Los artefactos tienden a tener una geometría compleja, generalmente, más complicada que la que se presenta en un contexto, sitio o región, por lo que controlar la iluminación es crítico para un registro adecuado. En estos ambientes, los artefactos pueden ser manipulados de forma tal que se registren todas sus caras o superficies, es decir, toda su geometría y detalles. Para la documentación de artefactos se emplean imágenes obtenidas con cámaras fotográficas o un escáner láser.

#### *El modelamiento y documentación de contextos y excavaciones arqueológicas (Figs. 9 y 10)*

Los arqueólogos llaman *contexto* a un conjunto de elementos y artefactos asociados entre sí e integrados por el espacio que los contiene. Los artefactos también incluyen elementos naturales, a los que llamamos ecofactos, asociados en el mismo espacio. Algunos ejemplos de contextos son las unidades de excavación con todos los elementos ahí presentes: tumbas con restos humanos, ofrendas y la matriz que los contiene, o también pequeños componentes arquitectónicos como una casa o una habitación con todo lo que comprende. Generalmente, un contexto es el resultado de un evento cultural y es de tamaño discreto, en otras palabras, más grande que un artefacto y más pequeño que un sitio. Los contextos arqueológicos son análogos a la escena de un crimen o de un accidente de tránsito: todos los elementos están asociados y su distribución y orientación es muy importante, así como el entorno que los integra.



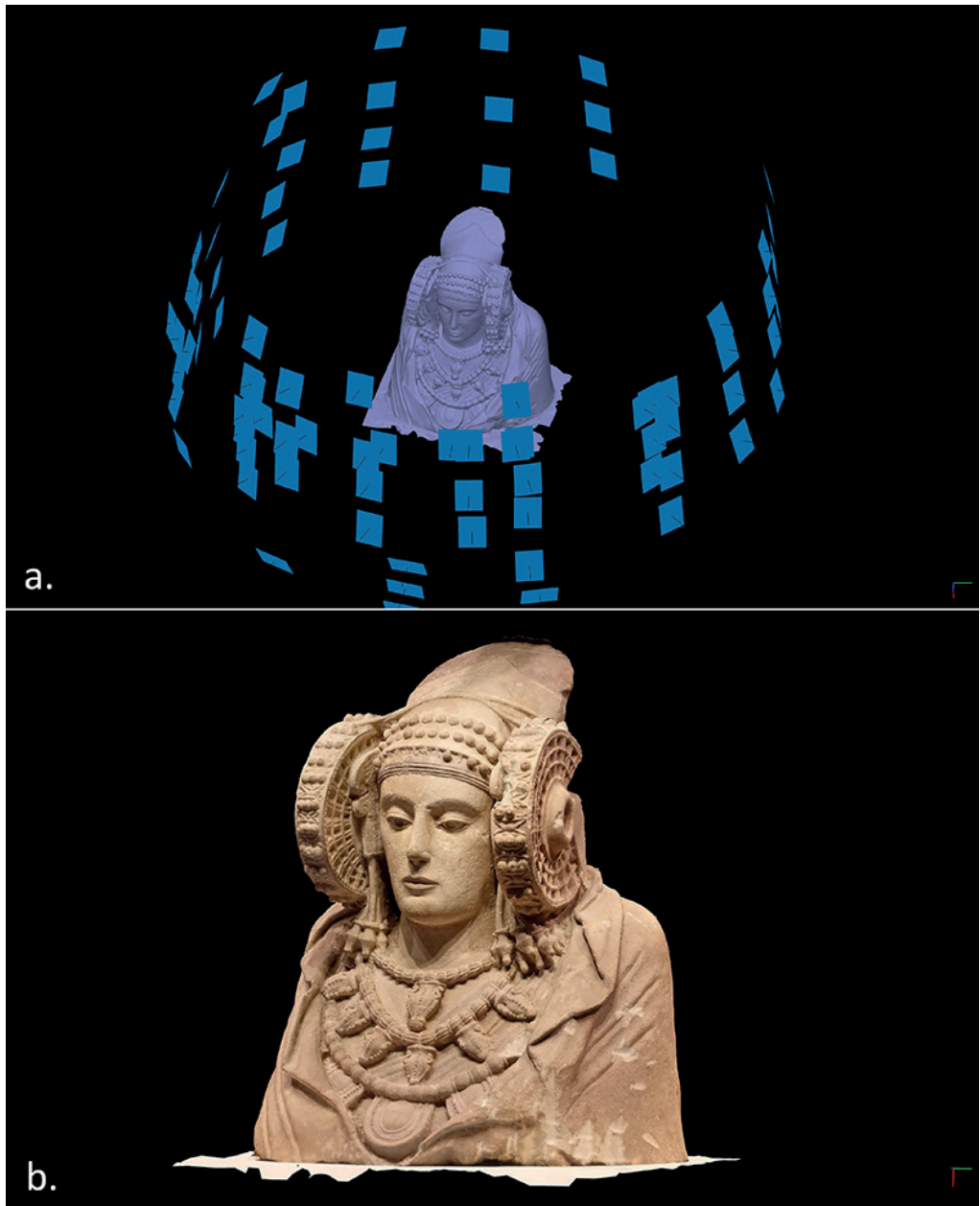


Figura 8. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un artefacto arqueológico: la Dama de Elche, Museo Arqueológico Nacional, Madrid. El registro de este artefacto se hizo en un museo, con la iluminación propia de la sala de exhibición y usando una cámara fotográfica, con la que se tomaron 82 fotografías (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

El registro de un contexto arqueológico requiere de una documentación fotográfica muy detallada para poder transformar las imágenes en un modelo 3D fotogramétrico. A diferencia de los artefactos, los contextos generalmente no se pueden manipular y muchas veces las condiciones de iluminación no se pueden modificar, por lo que hay que adaptarse a la luz natural.

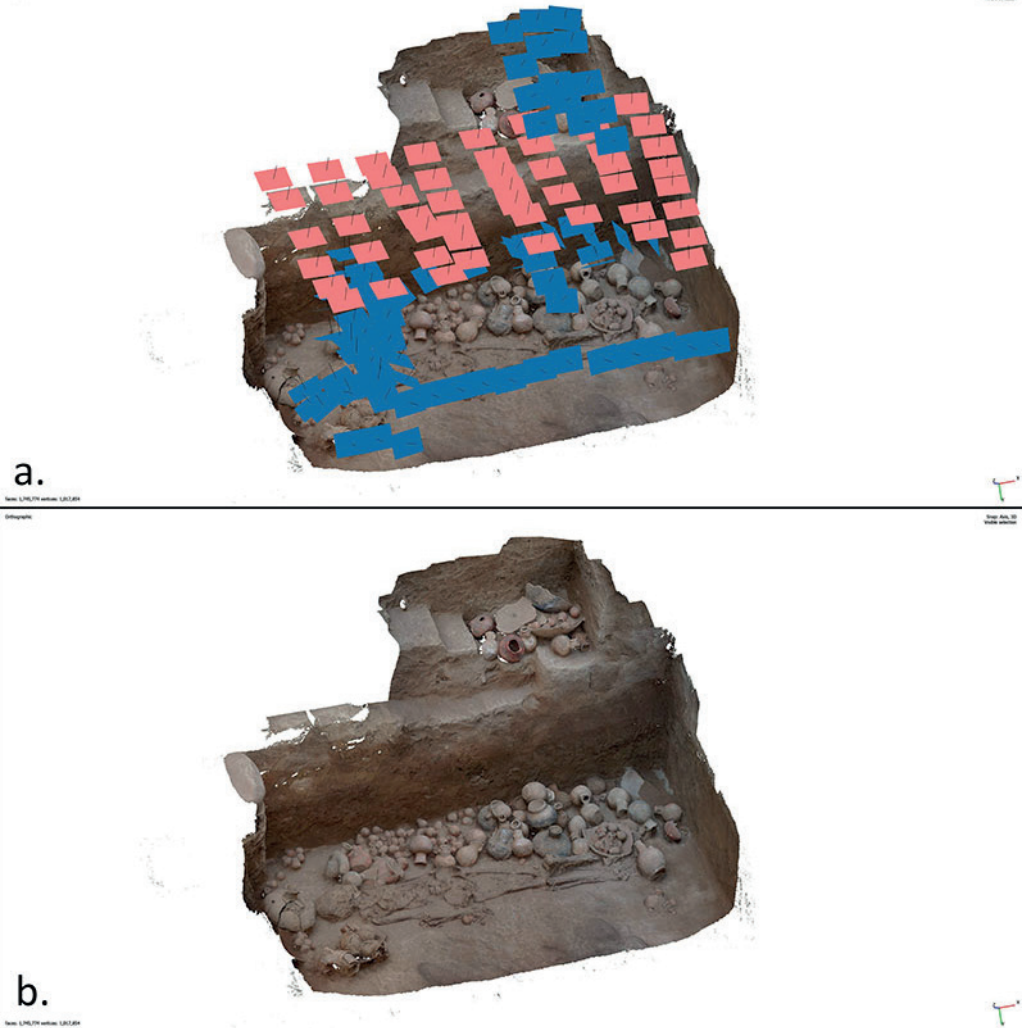


Figura 9. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un contexto arqueológico: detalle de la tumba M-U2111 de San José de Moro. Cobertura fotográfica y modelo 3D (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

En la documentación de contextos se emplean cámaras fotográficas, escáneres láser o LiDAR (Van Valkenburgh *et al.* 2020) y, eventualmente, drones, si el tamaño del contexto lo requiere. En la mayoría de los casos, el modelamiento de un contexto arqueológico se realiza mediante Fotogrametría Terrestre en Base a Imágenes de Corta Distancia (*Digital Ground-Base Close-Range Photogrammetry*) o Fotogrametría Terrestre (Petrovic *et al.* 2021), la cual utiliza imágenes fotográficas mayormente oblicuas tomadas desde la superficie y a corta distancia (Guery *et al.* 2017).

#### *El modelamiento y documentación de sitios arqueológicos (Figs. 11 y 12)*

Por lo general, un sitio arqueológico es más grande que un contexto y más pequeño que una región o área extensa. Ahora bien, los sitios vienen en todo tamaño y forma. Un sitio arqueológico pequeño puede ser el campamento de un grupo de cazadores, una cueva o abrigo rocoso, un edificio aislado, entre otros. Un sitio arqueológico grande puede ser un gran complejo de templos, palacios y áreas residenciales como Chan Chan y Pampa Grande en el norte del Perú, la capital inca del Cusco, o los inmensos sitios de Pikillaqta o Raqchi (todos en el Cusco). Un sitio arqueológico

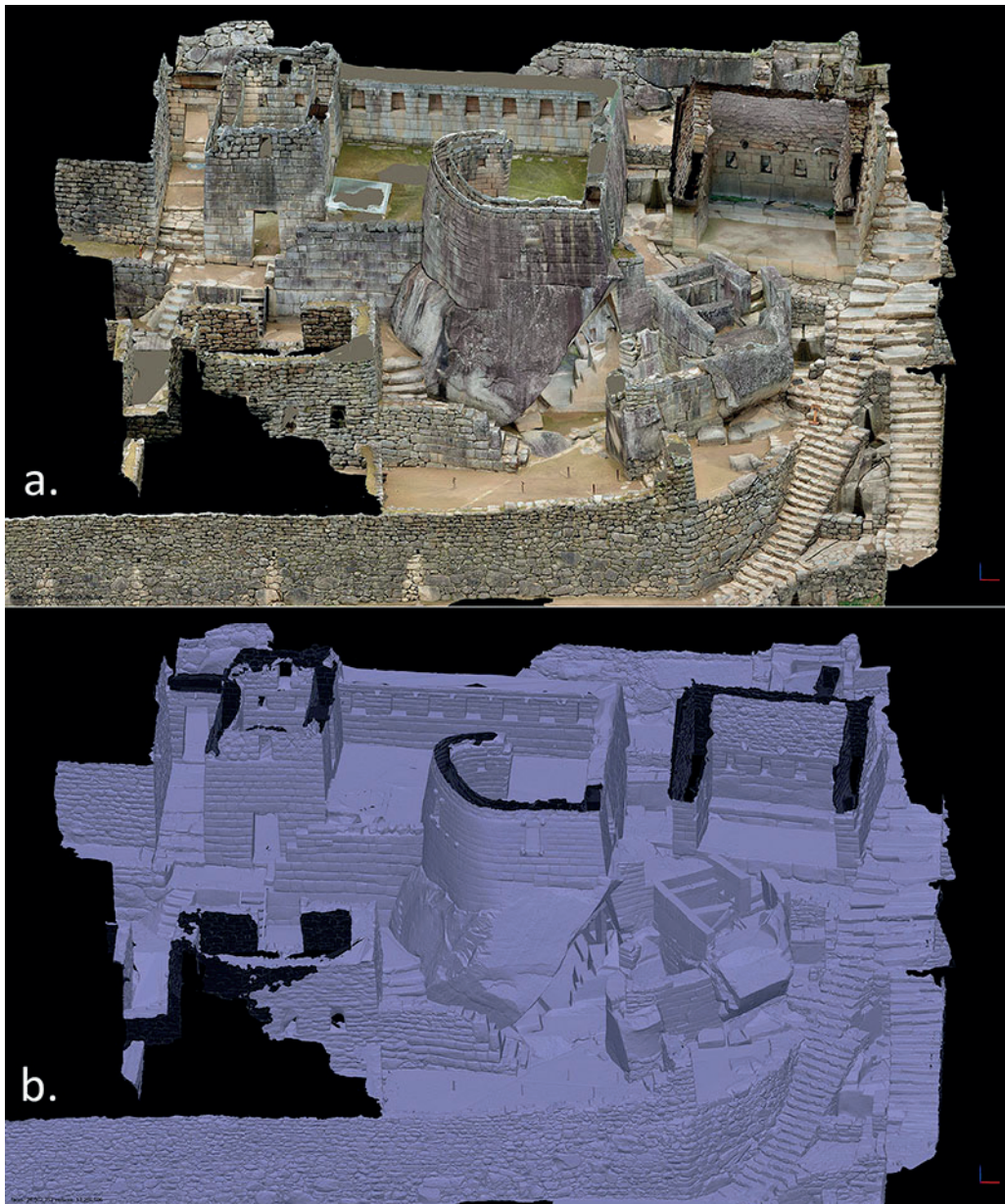


Figura 10. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un contexto arqueológico: torreón de Machu Picchu, realizado exclusivamente desde la superficie y con una cámara fotográfica (en base a 2829 fotos) (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM)

lógico, entonces, se define por la continuidad y contigüidad de sus elementos, así como por su perímetro, que alcanzará el límite de los mismos. Por esta razón, Chan Chan es un sitio arqueológico inmenso, mientras que la cueva de Pikimachay es un sitio arqueológico muy pequeño. Los sitios arqueológicos grandes suelen contener múltiples componentes, así como elementos horizontales y verticales. En el caso de Chan Chan, el sitio incluye nueve inmensas ciudadelas en su interior, cada una de ellas seguramente un palacio para un gobernante chimú, con plazas,



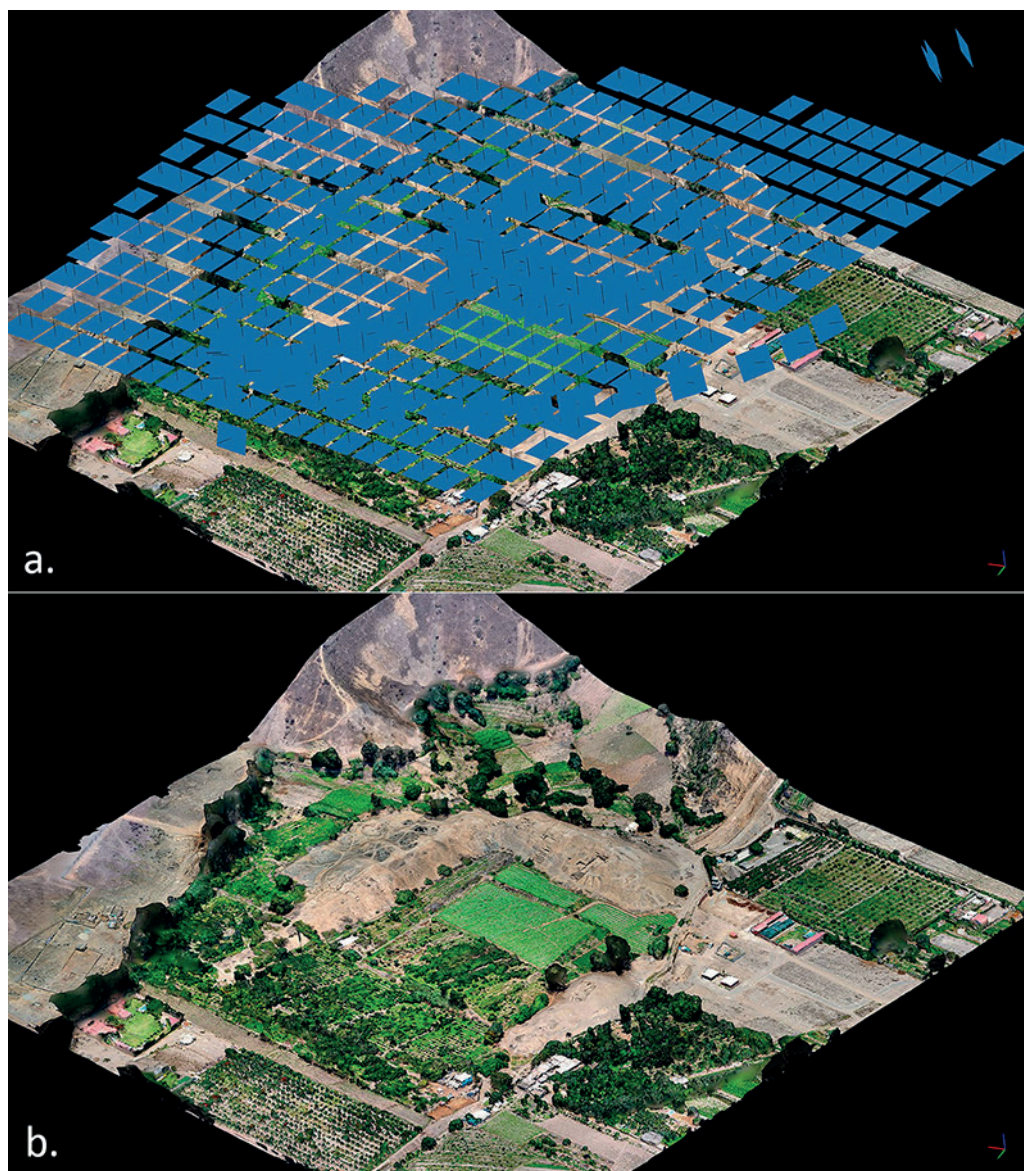


Figura 11. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un sitio arqueológico: Cardal, valle de Lurín. En la imagen superior se puede ver la cobertura fotográfica del templo en U y de su entorno. En la imagen inferior se aprecia el modelo fotogramétrico (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

depósitos, oficinas públicas o audiencias, un huachaque o reservorio de agua, zonas baldías y una plataforma funeraria donde reposarían los restos del gobernante.

La documentación de sitios arqueológicos, de cualquier tamaño o extensión, hace necesario el uso de drones para la obtención de imágenes o fotografías cenitales y oblicuas que serán posteriormente procesadas con programas fotogramétricos. Generalmente, las imágenes de drones suelen ser suficientes para modelar cualquier sitio arqueológico, pero en algunos casos estas pueden complementarse con imágenes desde la superficie tomadas con cámaras fotográficas. En el caso de los sitios, puesto que usualmente incluyen elementos verticales (por ejemplo,

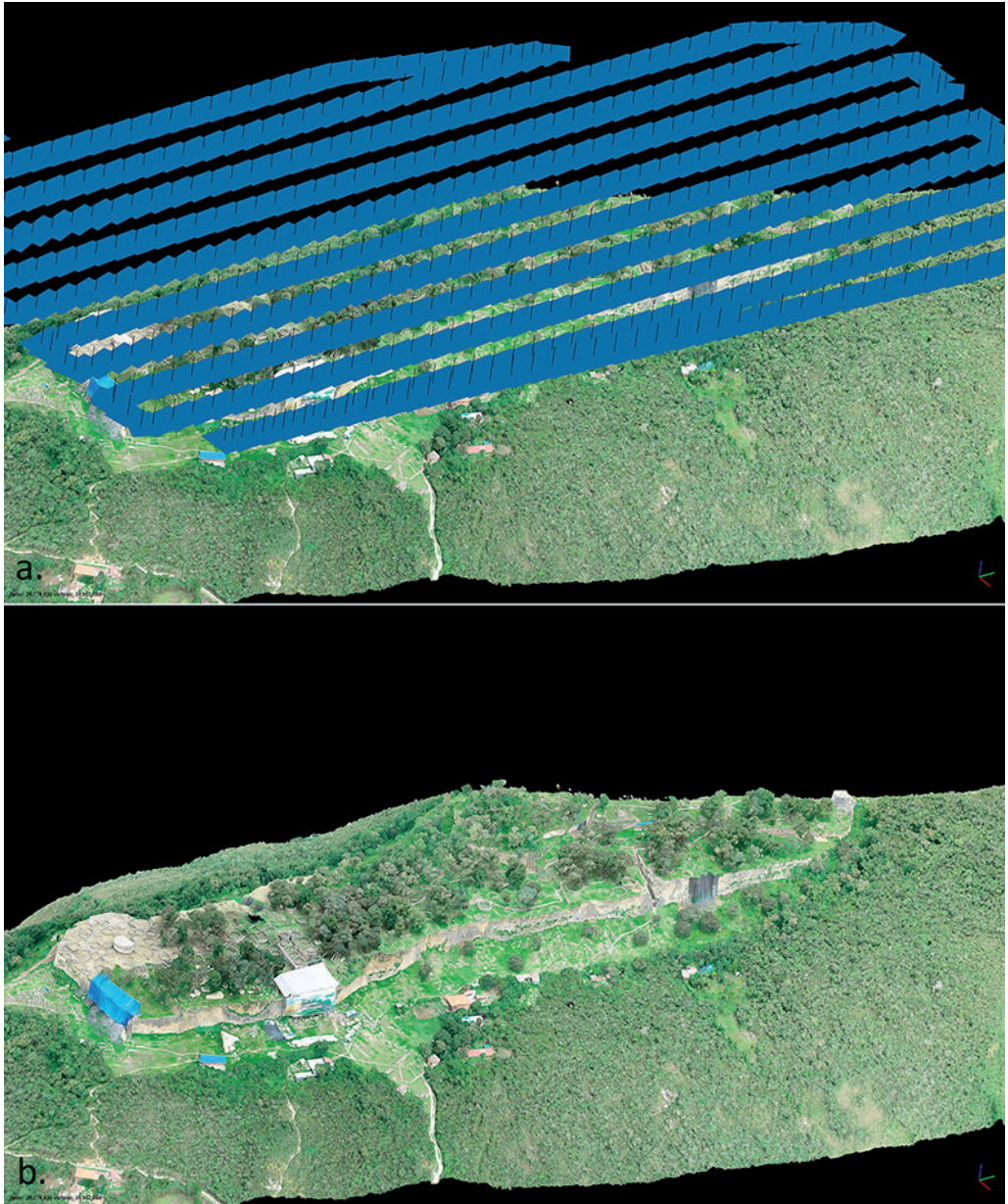


Figura 12. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de un sitio arqueológico: Kuélap, provincia de Chachapoyas, región Amazonas. Vuelo realizado en marzo del 2023, luego de que se derrumbara una sección del muro norte. Modelamiento en base a un mosaico cenital (fotografías: Fabricio Serván, modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

paredes, arquitectura compleja, entre otros) es necesario combinar mosaicos de imágenes cenitales tomadas con drones en un patrón de filas y columnas (transectos), donde la cámara apunta directamente para abajo, con imágenes oblicuas tomadas desde el aire o tierra con cámaras fotográficas convencionales o con drones, que están en ángulo con el terreno. Esto, por lo tanto, permite documentar aspectos verticales con mayor precisión. En este caso, la técnica que se emplea es la Fotogrametría Aérea (Petrovic *et al.* 2021), la cual emplea imágenes aéreas



o elevadas sobre el sujeto de documentación, cenitales y oblicuas, obtenidas mediante el uso de drones o también de cometas, globos y barras de extensión.

*El modelamiento y documentación de regiones o grandes áreas. La prospección con drones (Figs. 13 y 14)*

En la documentación de regiones o grandes áreas, tradicionalmente, se han empleado fotos aéreas e imágenes satelitales como elementos de apoyo (Lambers *et al.* 2007). La introducción de la tecnología de drones y las imágenes aéreas de baja altura que estos pueden tomar ha traído un gran cambio, puesto que la prospección (el análisis del territorio y de sus componentes), que en la arqueología se traduce en la ubicación y definición de sitios y componentes espaciales, tales como estructuras, poblados, canales, caminos, campos de cultivo, cementerios, etc., se puede hacer directamente con drones. Para este propósito se emplean mosaicos de imágenes, mayoritariamente cenitales, producidos por drones controlados por programas de vuelo a partir de los cuales se generan ortofotos y modelos de relieve. Este tipo de aplicación se puede denominar Prospección Arqueológica con Drones y Modelamiento Tridimensional Fotogramétrico (Castillo Butters y Barrera Yaranga 2023).

#### 4. RESUMEN Y CONCLUSIONES DE LA PRIMERA PARTE

En esta primera parte de la entrega hemos tratado, principalmente, dos temas. En primer lugar, hemos recorrido brevemente la historia de la ilustración arqueológica, de sus métodos y técnicas. Como hemos visto, las imágenes artísticas, los dibujos técnicos, la fotografía y el video se han empleado sucesivamente desde que se empezó a representar *lo arqueológico*. Estos sientan las bases para una nueva generación de métodos que, a grandes rasgos, se pueden calificar como *gráficos generados por computadoras*. Estos gráficos abarcan un conjunto de tecnologías y métodos de ilustración y generación de imágenes que tienen en común el uso intensivo de procesadores; además, actualmente están revolucionando la forma de generar imágenes en la arqueología. En segundo lugar, nos hemos enfocado en uno de estos métodos: la fotogrametría, la cual transforma imágenes bidimensionales en modelos tridimensionales o que se alimentan de nubes tridimensionales de puntos generados por láser, a partir de los cuales produce y extrae datos sobre la forma, medidas, volúmenes y elevaciones de los sujetos. Las características del registro y las estrategias que se emplean para ello dependen de la naturaleza y dimensión del sujeto, por lo que postulamos cuatro modalidades de registro que corresponden a artefactos, contextos, sitios y regiones arqueológicas, cada una con sus características y estrategias propias. Evidentemente, no hay una sola forma de generar un modelo tridimensional fotogramétrico, ni un solo tipo de instrumento para hacerlo. Las formas de modelar varían dependiendo del sujeto de documentación, de sus dimensiones, ubicación e iluminación y de los resultados que se quieran lograr, así como de los aparatos que se empleen.

La gran revolución que significa esta nueva tecnología es que permite recuperar la tridimensionalidad de la realidad y naturaleza con la que la arqueología trata cotidianamente. La realidad, el universo y sus elementos son tridimensionales, pero hasta la fecha todos los métodos de documentación y, sobre todo, los registros gráficos, reducen estas tres dimensiones a solo dos. Por otro lado, la fotogrametría nos devuelve la capacidad de manipular y posicionar, así como también de medir y comparar en el espacio los elementos de nuestro estudio. Lamentablemente, la nueva tecnología de documentación se ha adelantado a otras que empleamos para producir ilustraciones, las cuales son casi todas bidimensionales (libros, imágenes proyectadas, etc.), lo que nos obliga a volver a la bidimensionalidad, transformando los modelos 3D a imágenes 2D.

En la segunda parte de este artículo queda por desarrollar el aspecto más pragmático del registro tridimensional fotogramétrico: cómo se documenta o registra un sitio y, consiguientemente, los diferentes métodos, estrategias y prácticas que hemos empleado en el registro de centenares de sitios arqueológicos en la costa, sierra y selva del Perú hasta la fecha.



*Figura 13. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de una región o prospección aérea: sección del desierto de Jatanca, al este de San Pedro de Lloc, valle de Jequetepeque. La prospección aérea de esta amplia región permitió identificar los sitios de Jatanca (abajo al centro), Huaca Colorada y Tecapa (arriba a la derecha), así como otros restos (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).*

## Notas

- <sup>1</sup> Ver, por ejemplo, las magníficas ilustraciones de escenas precolombinas producidas por la artista y antropóloga Christiane Clados (<https://www.deviantart.com/coricancha>).
- <sup>2</sup> Son muy numerosas las publicaciones dedicadas a la intersección entre el patrimonio cultural, el modelamiento 3D fotogramétrico y los drones, entre ellas AARGnews, publicada semestralmente por *The Aerial Archaeological Research Group*.

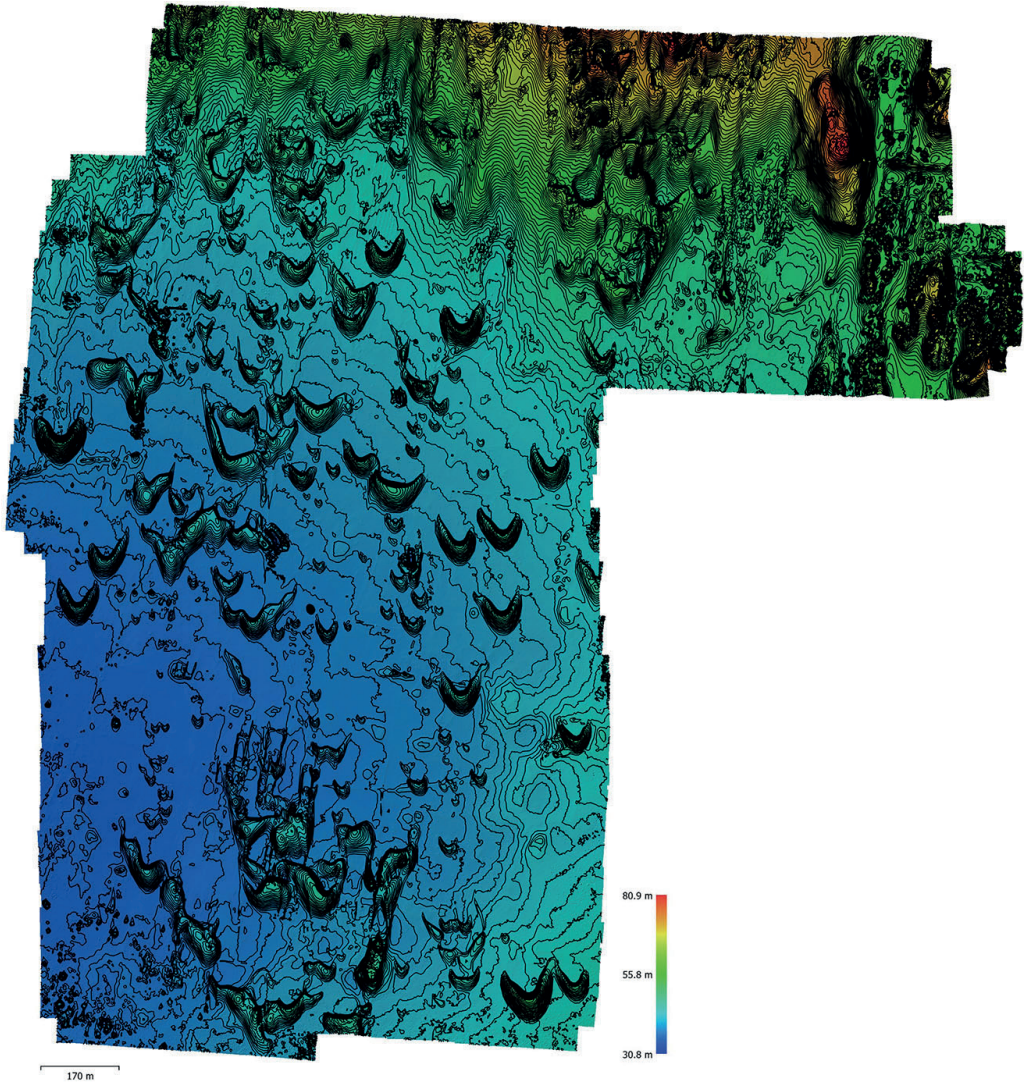


Figura 14. Modelamiento tridimensional fotogramétrico de una región o prospección aérea: DEM (Modelo de Elevación Digital) y curvas de nivel de la misma sección del desierto de Jatanca que la Fig. 13 (fotografías y modelos: Luis Jaime Castillo/PASJM).

## REFERENCIAS

- Abate, D. (2019). Built-heritage multi-temporal monitoring through photogrammetry and 2D/3D change detection algorithms, *Studies in Conservation* 64 (7), 423-434. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1554934>
- Addington, L. R. (1986). *Lithic illustration. Drawing flaked stone artifacts for publication*, University of Chicago Press, Chicago.
- Adkins, L. y R. Adkins (1989). *Archaeological illustration*, Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bagot, F. (2005). *El dibujo arqueológico, la cerámica. Normas para la representación de las formas y decoración en vasijas*, IFEA/CEMCA, Lima/Ciudad de México.



- Banning, E. B. (2002). Archaeological illustrations, en: M. A. Jochim y R. S. Dickens (eds.), *The archaeologist's laboratory. The analysis of archaeological data*, 277-287, Springer, Boston.
- Barratt, R. P. (2021). Speculating the past: 3D reconstruction in archaeology, en: E. M. Champion (ed.), *Virtual heritage: a guide*, 13-23, Ubiquity Press, London. <https://doi.org/10.5334/bck.c>
- Beale, T. y P. F. Healy (1975). Archaeological films: the past as present, *American Anthropologist* 77 (4), 889-897. <https://doi.org/10.1525/aa.1975.77.4.02a00180>
- Bolognesi, M., A. Furini, V. Russo, A. Pellegrinelli y P. Russo (2014). *Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry*, Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Riva del Garda, Italy, 113-119. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-113-2014>
- Brüning, E. (1989). *Estudios monográficos del departamento de Lambayeque*, Sociedad de Investigación de la Ciencia, Cultura y Arte Norteño, Chiclayo.
- Caballero Zoreda, L. (2006). *El dibujo arqueológico. Notas sobre el registro gráfico en arqueología*, Papeles del Portal 3, 75-93.
- Castillo Butters, L. J. y H. Barrera Yaranga (2023). Drones y modelamiento 3D fotogramétrico en la prospección arqueológica, *Revista PH* 110, 88-115. <https://doi.org/10.33349/2023.110.5402>
- Deren, L., L. Lianming y H. Xiaoqin (2000). The development of photogrammetry and remote sensing from 1996 to 2000 (National Report of China), *Geo-spatial Information Science* 3 (3), 1-13. <https://doi.org/10.1007/BF02826602>
- De Reu, J., J. Plrtz, G. Verhoeven, P. De Smedt, M. Bats, B. Chérrette, W. De Maeyer, J. Deconynck, D. Herremans, P. Laloo, M. Van Meirvenne, y W. De Clercq (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage, *Journal of Archaeological Science* 40, 1108-1121. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>
- Forte, M. (2014). 3D Archaeology, new perspective and challenges, the example of Catalhouyuk, *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies* 2 (1), 1-29. <https://doi.org/10.13140/2.1.3285.0568>
- Forte, M., N. Dell'Unto, J. Issavi, L. Onsurez, y N. Lecardi (2012). 3D Archaeology at Çatalhöyük, *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1, 351-378.
- Gruen, A. (2021). Everything moves: The rapid changes in photogrammetry and remote sensing, *Geo-spatial Information Science* 24 (1), 33-49, <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1868275>
- Guery, J., M. Hesse y A. Mathys (2017). Photogrammetry, digital techniques for documenting and preserving cultural heritage, en: A. Bentkowska-Kafel y L. MacDonald (eds.), *Digital techniques for documenting and preserving cultural heritage*, 229-236, Arc Humanities Press, Yorkshire. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1xp3w16.26>
- Harrison-Buck, E., M. Willis y C. Walker (2016). Using drones in a threatened archaeological landscape, rapid survey, salvage, and mapping of the Maya site of Saturday Creek, Belize, *The SAA Archaeological Record* 2 (16), 30-35.
- Herrmann, J., B. Glissmann, P. Sconzo y P. Pfalzer (2018). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) survey with commercial-grade Instruments: a case study from the Eastern Ħabur Archaeological Survey, Iraq, *Journal of Field Archaeology* 43 (4), 269-283. <https://doi.org/10.1080/00934690.2018.1465808>
- Hiscock, P. (2014). Archaeology in film, en: C. Smith (ed.), *Encyclopedia of Global Archaeology*, 2779-2781, Springer, New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2\\_1078](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_1078)
- Lambers K., H. Eisenbeiss, M. Sauerbier, D. Kupferschmidt, Th. Gaisecker, S. Sotoodeh, y T. Hanusch (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. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.008>
- Lingua, A., F. Noardo, A. Spano, S. Sanna, y F. Matrone (2017). 3D model generation using oblique images Acquired by UAV, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42 (4), 107-115. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-107-2017>
- Martínez Compañón y Bujanda, B. (1781-1794). *Trujillo del Perú*, 9 volúmenes, Ediciones Cultura Hispánica, Madrid.
- Masson-MacLean, E., O'Driscoll, J., Maciver, C. y G. Noble (2021). Digitally recording excavations on a budget: a (low-cost) DIY approach from Scotland, *Journal of Field Archaeology* 46 (8), 595-613. <https://doi.org/10.1080/00934690.2021.1970444>
- Pecci, A. (2020). *Digital survey from drone in archaeology: potentiality, limits, territorial archaeological context and variables*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 949 012075, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/949/1/012075>

- Petrovic, D., D. Grigillo, M. Kosmatin Fras, T. Urbancicy y K. Kozmus Trajkovski (2021). Geodetic methods for documenting and modelling cultural heritage objects, *International Journal of Architectural Heritage* 15 (6), 885-896. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1683779>
- Pillsbury, J. (ed.) (2012). *Past presented: archaeological illustration and the ancient Americas*, Dumbarton Oaks Research Library and Collection, Washington D.C.
- Pillsbury, J. (2017). Ilustración arqueológica en los Andes (1850-1890), *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. Ciências Humanas* 12 (2), 315-330. <https://doi.org/10.1590/1981.81222017000200004>
- Piggot, S. (1965). Archaeological draughtsmanship: principles and practice part I: principles and retrospect, *Antiquity* 39 (155), 165-176. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00031823>
- Rahaman, H. (2021). Photogrammetry: what, how, and where, en: E. M. Champion (ed.), *Virtual heritage: a guide*, 25-37, Ubiquity Press, London. <https://doi.org/10.5334/bck.d>
- Reiss, W. y A. Stübel (1880-1897). *The necropolis of Ancon in Peru: a contribution to our knowledge of the culture and industries of the empire of the incas, being the result of excavations made on the spot* [traducción de A. H. Keane], 3 volúmenes, A. Asher, Berlin.
- Sapirstein, P. (2020). Hand drawing versus computer vision in archaeological recording, *Studies in Digital Heritage* 4 (2), 134-159. <https://doi.org/10.14434/sdh.v4i2.31520>
- Sapirstein, P. y S. Murray (2017). Establishing best practices for photogrammetric recording during archaeological fieldwork, *Journal of Field Archaeology* 42 (4), 337-350. <https://doi.org/10.1080/00934690.2017.1338513>
- Schaedel, R. (1988). *La etnografía Muchik en las fotografías de H. Brüning 1886-1925*, Ediciones COFIDE, Lima.
- Shan, J., Z. Hu, P. Tao, L. Wang, S. Zhang y S. Ji (2020). Toward a unified theoretical framework for photogrammetry, *Geo-spatial Information Science* 23 (1), 75-86, <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1730712>
- Steiner, M. (2005). Approaches to archaeological illustration: a handbook, *Practical handbooks in archaeology* 18, Council for British Archaeology, Association of Archaeological Illustrators and Surveyors, London.
- Van Valkenburgh, P., K. C. Cushman, L. J. Castillo, C. Rojas, C. Roberts, C. Kepler y J. Kellner (2020). Lasers without lost cities: using drone-mounted LiDAR to capture architectural complexity at Kuelap, Amazonas, Peru, *Journal of Field Archaeology* 45 (51), 575-588. <https://doi.org/10.1080/00934690.2020.1713287>

Recibido: Marzo 2024

Aceptado: Junio 2024



Phantom 4 Pro RTK, 1 km <sup>2</sup>							
Altura	Resolución	Superposición frontal y lateral	Distancia	Transectos y vértices	Número de fotos	Baterías	Tiempo
200 m	5.5 cm/pix	65% / 65%	10.864	9 y 18	129	1	14'35''
		75% / 75%	14.925	13 y 26	265	2	19'49''
		85% / 85%	20.160	22 y 44	734	3	46'19''
150 m	4.1 cm/pix	65% / 65%	13.884	12 y 24	229	2	18'30''
		75% / 75%	18.918	17 y 34	454	2	30'16''
		85% / 85%	30.967	29 y 58	1290	6	82'34''
100 m	2.7 cm/pix	65% / 65%	20.052	19 y 38	544	3	34'22''
		75% / 75%	27.047	26 y 52	1041	5	64'54''
		85% / 85%	45.083	44 y 88	2935	12	180'19''
50 m	1.4 cm/pix	65% / 65%	39.040	38 y 76	2173	9	133'51''
		75% / 75%	54.995	53 y 106	4242	17	263'58''
		85% / 85%	90.832	89 y 178	11.846	46	726'39''
25 m	0.7 cm/pix	65% / 65%	77.036	76 y 152	8689	34	528'14''
		75% / 75%	107.511	107 y 214	17.039	65	1032'06''
		85% / 85%	179.053	178 y 356	47.364	180	2864'50''

Mavic 2, 1 km <sup>2</sup>							
Altura	Resolución	Superposición frontal y lateral	Distancia	Transectos y vértices	Número de fotos	Baterías	Tiempo
200 m	4.7 cm/pix	65% / 65%	12.924	12 y 24	184	2	17'15''
		75% / 75%	16.106	15 y 30	351	2	21'47''
		85% / 85%	26.680	26 y 52	993	3	41'30''
150 m	3.5 cm/pix	65% / 65%	15.033	14 y 28	312	2	20'02''
		75% / 75%	21.074	20 y 40	623	2	28'50''
		85% / 85%	35.978	34 y 68	1.764	5	74'37''
100 m	2.3 cm/pix	65% / 65%	23.065	22 y 44	734	2	30'44''
		75% / 75%	32.980	31 y 62	1.448	4	61'33''
		85% / 85%	52.608	52 y 104	4.008	11	163'40''
50 m	1.2 cm/pix	65% / 65%	45.033	44 y 88	2.936	8	120'05''
		75% / 75%	64.003	62 y 124	5.789	16	238'56''
		85% / 85%	104.585	104 y 208	16.107	41	650'45''
25 m	0.6 cm/pix	65% / 65%	89.855	89 y 178	11.349	30	479'13''
		75% / 75%	113.029	111 y 222	20.728	53	843'57''
		85% / 85%	208.597	208 y 416	64.467	163	2595'52''

Tablas 1 y 2. Comparación de dos modelos de drones comerciales: DJI Phantom 4 Pro RTK y Mavic 2, en cuanto al impacto que tiene la altura del vuelo y la superposición, el tiempo que toma completar una misión, el número de fotos que se toman, el número de baterías que se requieren y la distancia que debe recorrer el dron para documentar un kilómetro cuadrado. Resaltado en amarillo aparecen las combinaciones más recomendables, en naranja las que producen un número excesivo de fotos y sin resaltar las que producen una cobertura deficiente (tablas: Luis Jaime Castillo/PASJM).

Phantom 4 Pro RTK, 9 hectáreas							
Altura	Resolución	Superposición frontal y lateral	Distancia	Transectos y vértices	Número de fotos	Baterías	Tiempo
200 m	5.5 cm/pix	65% / 65%	907	2 y 4	9	1	1'13''
		75% / 75%	1627	4 y 8	24	1	2'12''
		85% / 85%	2233	6 y 12	60	1	4'28''
150 m	4.1 cm/pix	65% / 65%	1209	3 y 6	18	1	1'36''
		75% / 75%	2061	5 y 10	40	1	3'17''
		85% / 85%	2972	8 y 16	107	1	7'25''
100 m	2.7 cm/pix	65% / 65%	1813	5 y 10	43	1	3'06''
		75% / 75%	2976	8 y 16	96	1	7'08''
		85% / 85%	4486	13 y 26	260	2	17'56''
50 m	1.4 cm/pix	65% / 65%	3867	11 y 22	189	1	13'15''
		75% / 75%	5131	16 y 32	384	2	24'37''
		85% / 85%	8385	26 y 52	1040	5	67'04''
25 m	0.7 cm/pix	65% / 65%	7060	23 y 46	771	4	48'24''
		75% / 75%	10.190	32 y 64	1536	7	97'46''
		85% / 85%	16.491	53 y 106	4240	17	263'51''
Mavic 2, 9 hectáreas							
Altura	Resolución	Superposición frontal y lateral	Distancia	Transectos y vértices	Número de fotos	Baterías	Tiempo
200 m	4.7 cm/pix	65% / 65%	1441	3 y 6	15	1	1'55''
		75% / 75%	1594	4 y 8	28	1	2'09''
		85% / 85%	2531	7 y 14	82	1	3'56''
150 m	3.5 cm/pix	65% / 65%	1554	4 y 8	27	1	2'04
		75% / 75%	2192	6 y 12	56	1	2'59''
		85% / 85%	3595	10 y 20	156	1	7'27''
100 m	2.3 cm/pix	65% / 65%	2341	6 y 12	60	1	3'07''
		75% / 75%	3273	9 y 18	126	1	6'06''
		85% / 85%	4870	15 y 30	350	1	15'09''
50 m	1.2 cm/pix	65% / 65%	4474	13 y 26	260	1	11'55''
		75% / 75%	5977	18 y 36	504	2	22'18''
		85% / 85%	9892	31 y 62	1447	4	61'23''
25 m	0.6 cm/pix	65% / 65%	8381	26 y 52	1040	3	44'42''
		75% / 75%	11.689	37 y 74	2072	6	87'16''
		85% / 85%	18.916	62 y 124	5786	15	235'24''

Tablas 3 y 4. Comparación de dos modelos de drones comerciales: DJI Phantom 4 Pro RTK y Mavic 2, en cuanto al impacto que tiene la altura del vuelo y la superposición, el tiempo que toma completar una misión, el número de fotos que se toman, el número de baterías que se requieren y la distancia que deber recorrer el dron para documentar un polígono de 9 hectáreas. Resaltado en amarillo aparecen las combinaciones más recomendables, en naranja las que producen un número excesivo de fotos y sin resaltar las que producen una cobertura deficiente (tablas: Luis Jaime Castillo/PASJM).