



Received: 22-02-2017  
Accepted: 03-03-2017

## Aplicación de la fotografía métrica en edificación mediante el uso de la cámara digital convencional: un caso de estudio aplicado al patrimonio arqueológico

## Application of metric photography in building using the conventional digital camera: a case study applied to archaeological heritage

José Antonio Barrera Vera, Gabriel Granado Castro, Joaquín Aguilar Camacho

Universidad de Sevilla (barrera@us.es, ggranado@us.es, jacmpit@us.es)

---

**Resumen**— El análisis estratigráfico constituye una herramienta de diagnóstico indispensable en obras de arqueología, que permite descifrar a arqueólogos, historiadores y antropólogos la disposición e interrelación entre los diferentes estratos y la ordenación cronológica de los restos hallados. En este campo, la fotogrametría realizada con cámara digital convencional y software de amplia difusión constituye una alternativa versátil, eficiente y asequible frente a las técnicas convencionales de representación, basadas en procedimientos artesanales y cargadas de subjetividad, cuyas principales limitaciones son analizadas. En este artículo se establecen una sencilla metodología y un modelo sistemático para la documentación y preservación de unidades estratigráficas en excavaciones arqueológicas, compatibles con la técnica de análisis estratigráfico basada en la matriz Harris. La validez y posibilidades del método han sido constatadas en el proyecto de intervención arqueológica desarrollado en la Capilla Real de la Catedral de Sevilla.

**Palabras clave**— Fotogrametría, arqueología, patrimonio y estratigrafía.

---

**Abstract**- The stratigraphic analysis constitutes an essential diagnostic tool in archeology works, which allows the archaeologists, historians and anthropologists to decipher the arrangement and interrelation between the different strata and the chronological ordering of the remains found. In this field, the photogrammetry realized with conventional digital camera and software of wide diffusion constitutes a versatile alternative, efficient and affordable in front of the conventional techniques of representation, based on artisan and loaded procedures of subjectivity, whose main limitations are analyzed. This article establishes a simple methodology and a systematic model for the documentation and preservation of stratigraphic units in archaeological excavations, compatible with the technique of stratigraphic analysis based on the Harris matrix. The validity and possibilities of the method have been verified in the project of archaeological intervention developed in the Royal Chapel of the Cathedral of Seville.

**Index Terms**— Photogrammetry, archeology, heritage and stratigraphy.

## I. INTRODUCCIÓN

La frase de Paul Courbin (Courbin, 1988):  
 "... él sabe que si comete un error, si observa las cosas incorrectamente o las comprende mal, sus conclusiones serán irremediablemente falsas y no harán más que llevar a otros errores a todos aquellos que las tengan en cuenta." en referencia a la labor desempeñada por los arqueólogos, permite introducir el enfoque del presente trabajo, dirigido a plantear una metodología alternativa para la documentación estratigráfica en arqueología que, aún hoy, en los albores del siglo XXI, continúa recurriendo al empleo de técnicas con más de un siglo de vida, artesanales en muchos casos, y aún ajenas a la evolución del nuevo conocimiento y de los logros tecnológicos alcanzado en este campo.

Las líneas que prosiguen desvelan las cuantiosas ventajas que la fotogrametría como técnica de documentación gráfica reporta al registro y análisis estratigráfico en arqueología; además, establece un procedimiento y un método específico de trabajo, contrastado con resultados experimentales, alternativo a las técnicas habitualmente empleadas para el registro sistematizado, la documentación y el tratamiento estratigráfico en arqueología de perfiles y secciones del terreno, que son objeto de estudio en los sondeos y excavaciones de un yacimiento. La metodología propuesta permite salvar el principal defecto de las actuales técnicas de documentación, basadas en procedimientos artesanales y cargadas de subjetividad, que dan lugar a registros parciales e interpretados de la realidad.

El soporte digital constituye un modalidad de registro cada vez más extendida para la captura y representación de la evidencia arqueológica en una amplia gama de temas (Shott, 2014; Sanger, 2015; Remondino, 2011; McPherron et al., 2009).

Los trabajos arqueológicos llevados a cabo en la Catedral de Sevilla, hace ahora cinco años, a raíz de la intervención desarrollada en la Capilla Real de este majestuoso templo para la sustitución de su solería, en avanzado estado de deterioro, han servido de base y estímulo para abordar el reto de aplicar la fotografía métrica, en su estado primigenio y natural, como una alternativa más de registro y documentación gráfica del patrimonio arqueológico, poniéndola a su servicio para la obtención de documentos gráficos con un verdadero valor científico.

Concretamente, la búsqueda de una alternativa a las técnicas habituales y tradicionales de registro gráfico en arqueología para documentar perfiles estratigráficos constituye la base de la metodología de trabajo desarrollada, fruto de la propia necesidad y experiencia, en base a los actuales avances en este

campo (Fisher et al., 2015).

## II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### A. *El análisis estratigráfico en arqueología y la matriz Harris*

Según el profesor Edward C. Harris (Harris, 1989), la estratigrafía arqueológica es la ciencia por la cual los yacimientos arqueológicos pueden ser debidamente comprendidos. Se ocupa de analizar la disposición e interrelación entre los diferentes estratos, lo que permite al arqueólogo determinar el orden cronológico relativo en que fue creada la estratificación. En opinión del Dr. Harris, el análisis estratigráfico arqueológico no comparte fundamentos ni principios con el geológico, pues en el primer caso, la mayor parte de la estratificación es fruto de la actividad humana y no de procesos físicos naturales e irreproducibles.

Por tanto, la documentación de la estratigrafía permite a arqueólogos, historiadores, antropólogos y a otros estudiosos, comprender la estructura y periodización de un yacimiento, aportando además de un posible significado de su pasado, un instrumento para el ordenamiento cronológico del material y los restos arqueológicos hallados.

En cuanto a los antecedentes de esta disciplina, hay que remontarse hasta finales del s. XVII y principios del s. XVIII para encontrar los primeros vínculos que relacionaban la procedencia de determinados restos arqueológicos con algunos tipos de estratos geológicos, concepción que se mantuvo durante todo el s. XIX. No obstante, hasta principios del s. XX, no encontramos las primeras referencias bibliográficas a la estratigrafía arqueológica, en uno de los primeros manuales de arqueología publicados, de Sir William M. F. Petrie (Petrie, 1904).

Así, los primeros registros estratigráficos arqueológicos, generados en base a una metodología específica -que posteriormente se conocería como sistema Wheeler-Kenyon-, corresponde a Sir Mortimer Wheeler (Wheeler, 1954) que estableció un sistema de numeración de estratos y secciones y la diferenciación de interfases -línea divisoria entre los distintos depósitos arqueológicos-. Ahora bien, la verdadera transformación de la estratigrafía arqueológica como disciplina acontece en el año 1978 con la aportación de la "Matrix Harris", una herramienta de análisis concebida para organizar la información estratigráfica registrada y construir la secuencia cronológica de la misma, ideada por el profesor Harris, a quien también se le atribuye la labor de haber sistematizado los principios de la estratigrafía arqueológica.

El método propuesto por Harris permite estructurar y mostrar la periodización del yacimiento, dominando gran número de unidades estratigráficas que son representadas en forma de diagrama, de manera que conserven su relación

---

J.A. Barrera, G. Granado y J. Aguilar son Profesores del Departamento de Ingeniería Gráfica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, en la Universidad de Sevilla.

secuencial. Esta metodología gozó de una amplia difusión por toda Europa en la década de los ochenta, que aún hoy perdura (Harris, 2015), siendo la base de su éxito el potencial descriptivo, organizativo e interpretativo que aporta esta herramienta al introducir el tiempo como una cuarta dimensión en la representación estratigráfica. Como implementación informática de esta metodología se ha desarrollado la aplicación Harris Matrix Composer (Harris, 2017).

impregnar de un cierto toque de rigor con la vectorización de estas representaciones (fig. 2).

En lo referente a las técnicas tradicionales empleadas para la documentación estratigráfica en arqueología, podemos hablar de una metodología o técnica (Caballero, 2006; Calo, 2007) ampliamente difundida. Esta técnica, en esencia, es la que se viene aplicando a la documentación y registro de perfiles y secciones desde los inicios de la estratigrafía arqueológica como ciencia. Así, el arqueólogo de la

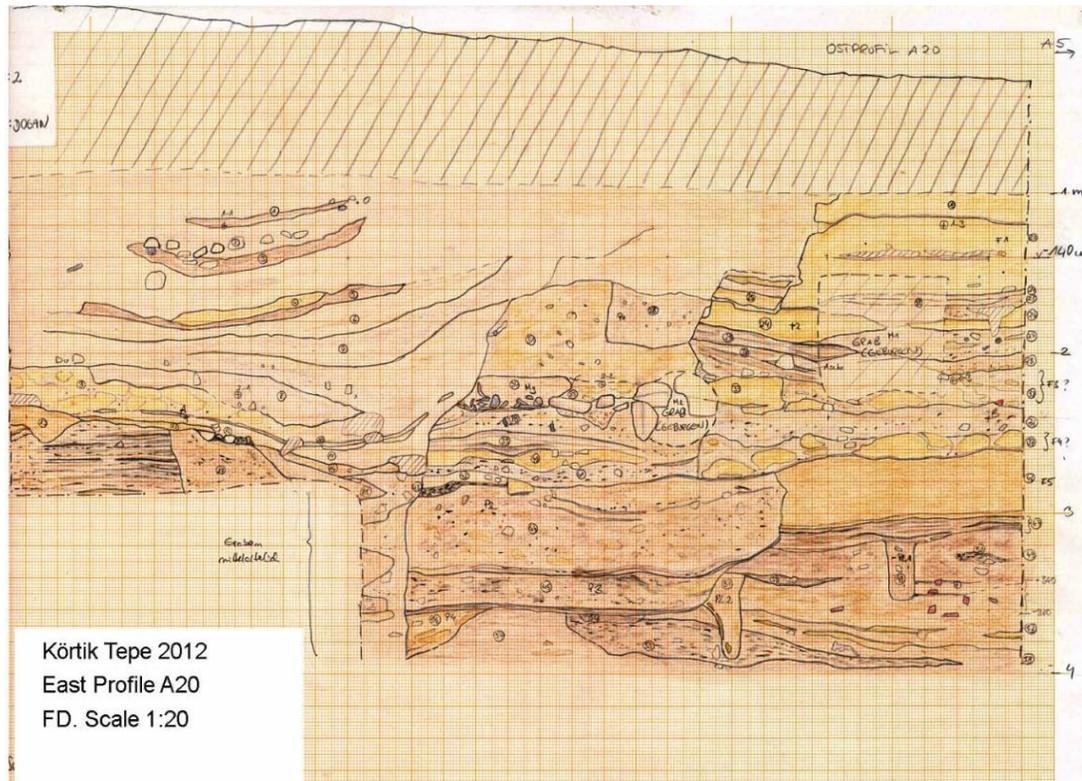


Fig. 1. Croquis de campo: sección estratigráfica sobre papel milimetrado. Drawing A20E (Ludwigs & Tepe, 2012).

Otra ventaja importante de este método radica en que ofrece la posibilidad de ordenar cronológicamente los restos materiales localizados en la excavación de un yacimiento. En este sentido, la introducción del concepto de unidad estratigráfica agiliza enormemente la labor del arqueólogo, ya sea en la ejecución de la excavación como en la recogida de la documentación y en el momento constitutivo e interpretativo de la secuencia estratigráfica.

### B. Método tradicional de representación

En el contexto de la documentación gráfica del patrimonio arqueológico resulta interesante analizar el extendido uso, aún hoy, de herramientas y técnicas de registro de carácter elemental, que en numerosas ocasiones se materializan a través de un mero croquis de campo (fig. 1) y que, más recientemente gracias a la universalización de la representación asistida por ordenador, se ha tratado de

excavación procede a dibujar en un soporte escalado –papel milimetrado o de cuadrícula– un croquis del elemento arqueológico hallado, en el que se trazan de manera aproximada las líneas de contorno e interfaces que, a su juicio y bajo su percepción arqueológica en ese instante, mejor representan la división estratigráfica del perfil de la excavación. Además, dentro del proceso de documentación tradicional, es esencial identificar con la mayor exactitud posible la localización del hallazgo. Para ello, el mencionado croquis se referencia al resto de elementos arqueológicos o constructivos del yacimiento midiendo distancias y alturas a puntos de referencia distribuidos por el sondeo (Page & Acosta, 2002), con unos medios –cinta métrica, flexómetros y jalones– y unos procedimientos –basados en la trilateración y/o en la determinación de abscisas y ordenadas– que determinan un rigor métrico más que cuestionable.

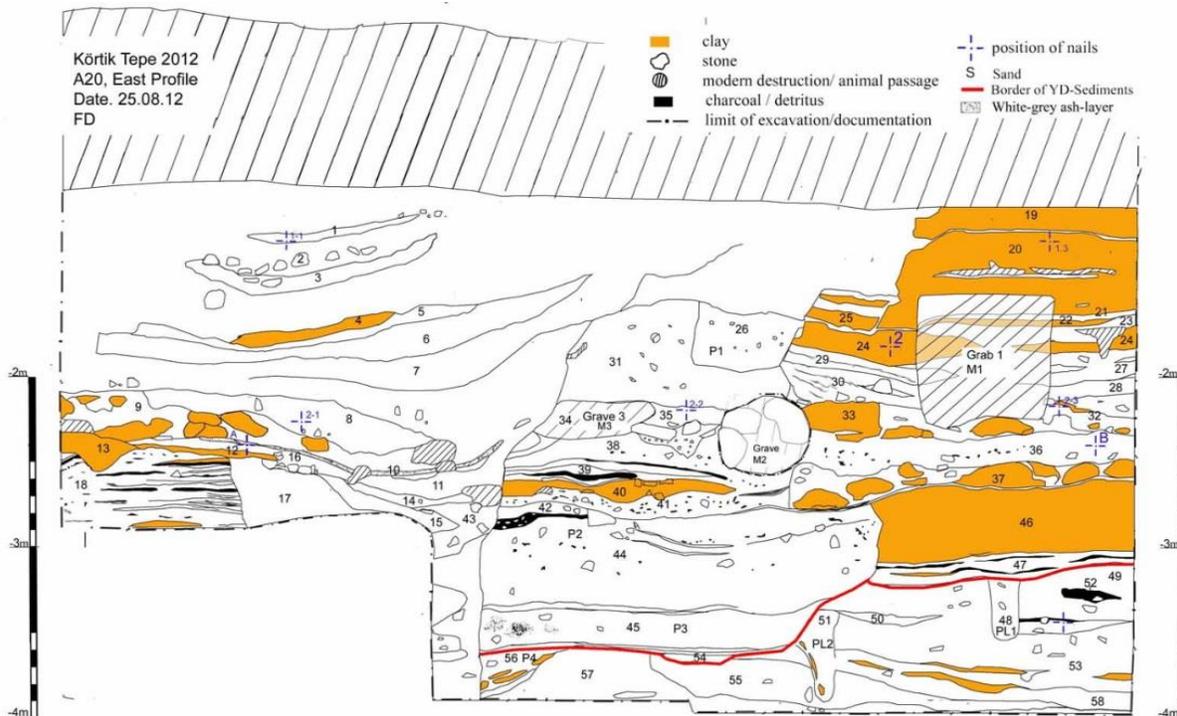


Fig. 2. Vectorización en CAD del croquis representado en la fig. 1. Drawing A20E (Ludwigs & Tepe, 2012).

### C. Limitaciones del producto gráfico generado

La técnica de representación descrita, si bien aporta como principales ventajas su sencillez y bajo coste de ejecución, plantea una serie de inconvenientes, que seguidamente analizamos, y que dan lugar a un producto gráfico limitado en cuanto a su naturaleza como documento científico:

**Subjetividad de interpretación.-** La representación y documentación de un elemento arqueológico mediante la metodología descrita implica el cometido de su abstracción y discretización por parte del profesional que elabora el croquis de campo, lo que inexorablemente conlleva una labor interpretativa previa, e incluso simultánea al proceso de representación y documentación, que supone un verdadero condicionante a la calidad del trabajo resultante. No olvidemos, además, que dicho proceso de interpretación debe acometerse en la fase de campo bajo una serie de condicionantes y factores –ambientales, ergonómicos, de seguridad, de tiempo, etc.– que no contribuyen precisamente a la clarividencia de ideas.

**Falta de proporcionalidad.-** La falta de proporcionalidad existe tanto en la forma y dimensiones de los hallazgos arqueológicos caracterizados. Una representación de la realidad mal proporcionada puede inducir errores en la interpretación y análisis de los restos documentados, fundamentalmente en la distribución y relación cronológica de los hallazgos.

**Escasez de rigor métrico.-** Se debe, por un lado, a la necesaria abstracción y discretización de la realidad a

representar y, por otro, al proceso seguido para la toma de datos y medidas pues, en numerosas ocasiones, éstas no se determinan con exactitud o con los instrumentos y procedimientos de trabajo más adecuados a la geometría y naturaleza del elemento a documentar. A este fin hay que reseñar el progreso que ha supuesto el empleo de estaciones totales (Bernatchez & Marean, 2011; McPherron, 2005) y otros equipos topográficos en las intervenciones arqueológicas.

**Pérdidas de texturas y composiciones originales.-** La transcripción de la realidad mediante un croquis compuesto únicamente por líneas, conlleva la pérdida inevitable de información visual en los elementos representados. De manera que aquellas propiedades físicas intrínsecas al objeto –composición, estado, color, distribución, impurezas, texturas, granulometrías, alteraciones, etc.– no pueden registrarse con la metodología tradicional y requieren del uso de tramas y rellenos para su caracterización.

**Discretización de elementos.-** La necesaria discretización de un elemento a la hora de su representación supone una pérdida de información extraordinaria. Además, este proceso va precedido de una labor de abstracción repleta de subjetividad, constituyendo por tanto uno de los principales condicionantes en la consiguiente calidad de un registro gráfico arqueológico. Puede concluirse con ello, que la discretización comporta una pérdida de información cualitativa y cuantitativa, en tanto que necesariamente ha de simplificar las propiedades físicas y

geométricas de los objetos representados. Este factor cobra mayor trascendencia a medida que aumenta la irregularidad de la composición y geometría del elemento a documentar.

**Errores de georreferenciación.-** La determinación inexacta de la posición planimétrica y/o altimétrica de los elementos arqueológicos hallados, puede constituir una fuente importante de error a la hora de interpretar y establecer relaciones y organizaciones cronológicas entre todas las evidencias arqueológicas afloradas en una excavación.

**Eventualidad.-** Efímero suele ser el período en el que un sondeo arqueológico permanece abierto y breve, por tanto, la coyuntura para su análisis, relación, interpretación y revisión “in situ”. De manera que, una vez concluida una actuación arqueológica o cerrada una de sus fases de trabajo, toda información no recopilada o erróneamente cosechada, se habrá perdido para la posteridad.

La eventualidad y el resto de factores descritos, en su conjunto, dificultan a posteriori nuevos estudios y la reinterpretación de la realidad arqueológica emergida, ya sea de la mano de otros profesionales de la arqueología, o bien a cargo del mismo arqueólogo que la interpretó durante la fase de campo y al que la maduración de ideas y las conclusiones finales de su labor investigadora, analizando todos los elementos desde otra perspectiva, podrían llevarle a observar nuevos aspectos o relaciones históricas que pasaron inadvertidas en un primer momento.

Las descritas son sólo algunas de las limitaciones de carácter general constatadas en la metodología convencional de registro gráfico más extendida dentro del campo de la arqueología. Esta técnica de documentación, que acabamos de analizar y que bien podríamos calificar de artesanal, continúa aplicándose en esencia de forma generalizada a la documentación y registro de elementos y restos arqueológicos y, en particular, de secciones y unidades estratigráficas del terreno, donde la mayor dimensión de las geometrías a representar acentúa la problemática analizada, y para la cual hemos propuesto el uso de un procedimiento de trabajo y unas herramientas alternativas, cuya validez y resultados han sido contrastados.

#### *D. Particularidades del proceso de documentación mediante fotografía métrica*

Lejos de acometer una recopilación exhaustiva de todos los factores que, en mayor o menor medida, inciden en el proceso de documentación estratigráfica mediante fotogrametría, enumeramos a continuación aquellos más relevantes y a los que conviene prestar especial atención.

**Iluminación de la escena.-** Por todos es conocido el papel esencial que desempeña la luz en una captura fotográfica – pues sin la una no es posible la otra-. Aparte de resultar un factor físico imprescindible en el proceso fotográfico, la luz posee una función plástica de expresión y modelado que

confiere un significado y un carácter tal a la imagen generada, que muchas veces ella sola determina la calidad del resultado obtenido. Esta es la razón por la que resulta un condicionante esencial en la aplicación del método propuesto, especialmente si tenemos en cuenta que las superficies a documentar suelen tener una disposición espacial vertical y en las que la luz natural, si la hay, incide siempre de forma oblicua, generando sombras y contrastes que acentúan la profundidad y volumen de los elementos, dando lugar a un resalte no deseado de las texturas.

La distribución espacial de la intensidad de luz proporcionada por una lente en una imagen fotográfica digital, guarda relación con la cuarta potencia del coseno del ángulo con el que la misma incide en el sensor de la cámara (Gardner, 1947). Esta variación tiene como resultado un oscurecimiento de la imagen desde el centro hasta la periferia. Tal efecto, bajo determinadas condiciones, puede eliminarse casi en su totalidad con algunas aplicaciones -Adobe Photoshop (Lighthouse, 2017; Equalight, 2017)-.

En el caso particular que nos ocupa, los niveles de luz natural en el interior de la Capilla Real, no sólo resultaban ser sumamente bajos -especialmente en el interior de los sondeos excavados-, sino variables y discontinuos. Este aspecto ha mermado sensiblemente la calidad de los resultados finalmente alcanzados, aunque no ha llegado a comprometer la validez de los mismos como documentos gráficos al objeto determinado. Su corrección digital mediante software hubiera contribuido, sin duda, a la mejora de los resultados obtenidos, a cambio, eso sí, de mayor costo y menor sencillez de la metodología propuesta.

**Distancia de enfoque.-** Es la distancia existente entre el objeto enfocado y la cámara. Esta distancia depende directamente de la superficie útil del elemento a documentar e inversamente del ángulo de visión de la lente, que a su vez está íntimamente ligado a la longitud focal de la misma.

En la documentación de perfiles estratigráficos encontramos dos factores que restringen la distancia máxima de enfoque efectiva: las dimensiones del propio sondeo y la existencia de elementos arqueológicos en el interior de los mismos. Ambos aspectos limitan las posiciones que en la práctica resultan ocupables para realizar las capturas fotográficas, condicionando el uso de la distancia de enfoque más eficaz.

### III. EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

#### *A. Cámara digital*

Las cámaras digitales comerciales son equipos de bajo costo y de fácil manejo que pueden ser empleados para fines científicos, como avalan diversos estudios (Akkaynak et al., 2014; Chakrabarti et al., 2009; Verhoeven, 2008), siempre que se salvaguarden unas condiciones de captura –formato de

la imagen, luminosidad y calibración de color- que garanticen una mínima distorsión de la escena.

Para el registro de la estratigrafía se utilizó una cámara digital convencional réflex Canon EOS 450D, con sensor CMOS de 22,2 x 14,8 mm y con 12,2 megapíxeles efectivos.

#### B. Lente

Los dos tipos de lentes más comunes son las de longitud focal fija y las tele-objetivos. Las primeras presentan como ventajas una mayor nitidez y luminosidad, además de una menor aberración, al estar optimizadas para su distancia focal. No obstante, la falta de versatilidad que conlleva el uso de una focal fija resulta determinante para la naturaleza del trabajo que nos ocupa.

Nuestra elección, por tanto, fue una lente estándar EF-S Canon 18-55 mm f/3,5-5,6 IS II, con sensor APS-C de longitud focal equivalente de 29 mm -a 35 mm-, que en condiciones de poca luz pudiera proporcionar detalles nítidos de las imágenes con aberraciones mínimas y con una velocidad de obturación relativamente rápida que minimice el efecto borroso causado por el movimiento de la cámara.

#### C. Equipos topográficos

La necesidad de georreferenciar la posición y cota de todas las secciones estratigráficas documentadas, precisó la materialización de una red topográfica geolocalizada en el interior de la Capilla Real, desde la cual se llevó a cabo la determinación de las coordenadas de una serie de clavos distribuidos en la sección de cada perfil estratigráfico. El establecimiento de esta red se confeccionó a partir de las coordenadas UTM/ED50 del clavo nº 6336 situado en las inmediaciones del templo y perteneciente a la red topográfica de la empresa municipal de abastecimiento de aguas de la ciudad de Sevilla –EMASESA-.

Para la georreferenciación planimétrica de los estratos se utilizó una estación total Leica TS02, con distanciómetro láser de 30 m de alcance y precisión de 2 mm + 2 ppm.

Para la georreferenciación de cotas ortométricas la elección fue un nivel óptico-electrónico de alta precisión DNA03 Leica, con una precisión en modo electrónico de 1 ppm.

#### D. Iluminación de la escena

Las bajas condiciones de iluminación natural fue la tónica general en la escena de trabajo, resultando preciso recurrir a la modificación artificial de esta circunstancia. Para ello se hizo uso del flash Canon incorporado a la cámara digital, ajustado en modo automático con una velocidad de sincronización de 1/200". Puntualmente, fue necesario incrementar los niveles de iluminación natural mediante dos focos con luz de relleno continua de 450W cada uno.

#### E. Software

Una vez resuelta la fase de campo, con la realización de las

tomas fotográficas y su correspondiente geolocalización, es necesario llevar a cabo el procesado de toda la información que permita obtener el documento gráfico final. Para materializar esta etapa se ha utilizado el siguiente software:

PhotoModeler Scanner 6 (PhotoModeler, 2017).- Utilizado para realizar la calibración de la cámara digital y corregir la aberración introducida por la lente en las capturas. El formato de imagen empleado ha sido JPEG.

La necesidad de un proceso previo de calibración de la cámara y la metodología empleada para ello guardan una relación directa con la finalidad del trabajo y la calidad métrica de los resultados. Dentro de las opciones de software fotogramétrico disponibles en el mercado existen alternativas - 123D Catch (Autodesk, 2017), p.ej.- que identifican automáticamente los parámetros internos de orientación de la cámara y que no precisan de un procedimiento de calibración inicial. No obstante, el grado de precisión alcanzable limita su empleo a trabajos con escasa exigencia geométrica (Souto-Vidal et al., 2015).

En nuestro caso, para el tipo de lente y las distancias focales empleadas, se optó por el algoritmo de calibración de PhotoModeler, por su flexibilidad y buenos resultados contrastados (Pérez et al., 2011). No obstante, existen otras opciones de software libre -Agisoft Lens (Geobit, 2017), p. ej.- que también constituyen una buena alternativa.

ASR Digital Image Rectifier (ASRix, 2017).- Este software ha sido empleado para la rectificación de las imágenes como alternativa a otras opciones libres existentes en el mercado, entre ellas VeCAD (Tsioukas, 2011), por su simplicidad de manejo y por su integración bajo entorno AutoCAD (Nickerson & Chapiro, 2005; Almagro, 2004).

AutoCAD 2010 (Autodesk, 2010).- Aplicado para realizar el montaje y composición de los perfiles estratigráficos georreferenciados y los fотомosaicos. Aunque esta labor podría llevarse a cabo con algún software específico para el tratamiento de imágenes geolocalizadas -aplicaciones GIS-, se ha optado por AutoCAD al ser una herramienta de amplia difusión entre profesionales del sector.

Protopo 6.1 (Protopo, 2017).- Es una aplicación topográfica que trabaja integrada bajo entorno AutoCAD. Se ha destinado a la gestión de los datos topográficos obtenidos en campo con la estación total, necesarios para llevar a cabo la restitución y geolocalización de las tomas fotográficas. Como alternativa podría utilizarse alguna aplicación GIS de software libre - QGIS (QGIS, 2017) o gvSIG (gvSIG, 2017), p. ejemplo.-.

GIMP (Gimp, 2017).- Software libre para tratamiento de imágenes, empleado en la conversión de formatos RAW y JPEG.

#### IV. METODOLOGÍA

##### A. Documentación mediante fotografía métrica

Si resulta indiscutible el papel que ha jugado la fotografía en la Historia Contemporánea de la documentación universal, también lo es la aplicación de la fotografía métrica a la documentación gráfica patrimonial, más conocida como fotogrametría, técnica que viene utilizándose a estos fines desde hace algunas décadas, con logros suficientemente contrastados (Remondino, 2011; Lerma, 2002).

La fotografía métrica no interpretada constituye una herramienta y soporte alternativo para la documentación gráfica de elementos arqueológicos de geometría predominantemente plana, de mediana o gran dimensión. Su uso combinado con la toma de información espacial mediante estación total ofrece resultados con una precisión métrica adecuada a este fin, no siendo preciso obtener el modelo digital del elemento a documentar.

En su lugar, lo que se obtiene como producto final es una vista en alzado del plano de la sección estratigráfica, el cual por lo general, resulta inclinado a causa de la naturaleza del terreno y del proceso de excavación y perfilado. En la práctica, ello conlleva que la determinación de la profundidad o cota de los estratos no pueda realizarse a partir de una ortoimagen del plano que los contiene y deba hacerse sobre una proyección frontal del mismo.

##### B. Procedimiento de trabajo en campo

El trabajo de campo comprende tres etapas diferenciadas:

Calibración de la cámara digital.- Para que las tomas fotográficas capturadas puedan ser restituidas con valor métrico, se procedió a realizar, en primer lugar, la calibración de la cámara con ayuda de un patrón de puntos y el procedimiento indicado en el manual de PhotoModeler (Eos Systems, 2016). Es importante reseñar que fue necesario repetir un proceso de calibración para cada una de las distancias focales -18 y 25 mm- utilizadas durante la fase de campo. También es relevante indicar que las dimensiones del patrón de calibración impreso y su posición, en cada caso, deben asemejarse a la realidad del elemento a documentar.

Planificación de las tomas fotográficas.- Las principales dificultades en esta etapa quedan concretadas en dos factores. El primero, ante la eventualidad de no poder materializar la distancia de enfoque más idónea, que fundamentalmente quedará condicionada por la forma y dimensión del sondeo y la lente utilizada. El segundo, ante unas condiciones de exposición desfavorables para la captura de las imágenes, a consecuencia de una deficiente iluminación de la escena y una compleja composición de los estratos a documentar. Respecto a este segundo factor, con anterioridad se han apuntado posibles opciones de software para atenuar sus efectos.

En relación al primero de los factores, cabe aceptar tres soluciones de compromiso: utilizar una lente con mayor

ángulo de visión, forzar la oblicuidad de la toma o discretizar la sección en varias capturas.

El uso de una lente con mayor ángulo de visión –gran angular o súper gran angular- incrementa la productividad del trabajo de campo, pero las deformaciones introducidas por este tipo de ópticas merman en gran medida la calidad de las imágenes obtenidas, especialmente cuando las condiciones de iluminación y las texturas de los estratos son poco proclives a ofrecer resultados bondadosos.

La posibilidad de forzar la oblicuidad de la toma serviría para incrementar la distancia de enfoque, si bien, como contrapartida, las condiciones para la restitución son más desfavorables, limitando la calidad de los resultados finales.

La última alternativa pasa por realizar una fragmentación del registro de aquellos perfiles estratigráficos en los que las condiciones de trabajo no permitan adoptar la distancia de enfoque más idónea para proceder a su documentación mediante una única toma fotográfica. En estos casos, la solución propuesta (Fisher et al., 2015; Aguilar et al., 2013) consiste en materializar la documentación mediante varias tomas fotográficas -fotomosaicos-, dividiendo para ello el perfil en cuadrículas de un tamaño adecuado a la longitud de enfoque realmente efectiva. Otro aspecto a tener en cuenta para la discretización mediante fotomosaicos es la necesidad de recurrir a solapes de 1/3 como mínimo entre capturas adyacentes, con objeto de reducir la posible distorsión de paralaje entre los pares de fotografías superpuestas (Jacobs, 2004). Como contrapartida, esta solución incrementa la laboriosidad y dificultad del proceso de documentación del perfil estratigráfico; además limita la bondad de los resultados, pues las condiciones particulares de iluminación de cada toma, si no se homogeneizan digitalmente, resultan concluyentes en el realismo del producto final.

Georreferenciación de las imágenes y perfiles estratigráficos.- La geolocalización de los restos y estratos arqueológicos de un yacimiento es una labor esencial para su correcto análisis y el adecuado establecimiento de relaciones entre los distintos hallazgos. En el caso que nos ocupa, para realizar esta operación en los perfiles estratigráficos documentados, se aprovecharon los puntos de referencia insertados en cada sección mediante clavos –precisando un mínimo de tres por cada imagen- y una arandela de color que facilitó su identificación en cada toma fotográfica. Cuando resultó preciso realizar una composición mediante fotomosaicos los vértices de una cuadrícula, físicamente materializada sobre el estrato mediante hilos, fueron tomados como puntos de referencia.

En la metodología propuesta el levantamiento de los puntos de referencia con una estación total láser y un nivel topográfico posibilita su geolocalización y la de todos los perfiles estratigráficos. A este fin, se estableció al inicio de la intervención arqueológica un red de bases georreferenciadas

TABLA I  
 SECCIONES ESTRATIGRÁFICAS DOCUMENTADAS

| Sondeo       | Nº de secciones | Nº tomas fotográficas | Profundidad |            | Longitud   |            |
|--------------|-----------------|-----------------------|-------------|------------|------------|------------|
|              |                 |                       | Máxima (m)  | Mínima (m) | Máxima (m) | Mínima (m) |
| I            | 7               | 8                     | 1,335       | 0,833      | 3,61       | 1,54       |
| II           | 8               | 10                    | 2,384       | 1,671      | 3,24       | 2,05       |
| III          | 4               | 4                     | 0,615       | 0,383      | 2,24       | 1,36       |
| IV           | 4               | 4                     | 0,645       | 0,489      | 2,06       | 1,42       |
| V            | 6               | 12                    | 2,373       | 0,287      | 2,99       | 1,27       |
| <b>Total</b> | 29              | 38                    |             |            |            |            |

en el interior de la Capilla Real, partiendo de las coordenadas UTM/ED50 facilitadas por la empresa municipal de aguas de Sevilla para un clavo situado en las inmediaciones del templo. Estas coordenadas fueron comprobadas mediante un receptor GPS bifrecuencia, en un proceso de medición durante 30' con observaciones a intervalos de 1". La única discrepancia constatada respecto a las coordenadas facilitadas fue de 1 milímetro en la cota del punto, por lo que se aceptó la validez de los datos facilitados.

Combinando la intersección inversa y la radiación simple, como procedimientos topográficos de trabajo, se procedió al levantamiento de todos los puntos de referencia en las secciones estratigráficas a documentar, generando así una

nube de puntos georreferenciada que sirvió de base a la posterior restitución y geolocalización de las imágenes.

En el caso particular que nos ocupa, un resumen del número de secciones estratigráficas y tomas fotográficas documentadas en el trabajo desarrollado en la fase de campo se muestra a continuación (tabla 1), con indicación de las principales dimensiones de cada sondeo.

### C. Procesado de las imágenes

Una vez concluido el trabajo de campo, el tratamiento de las imágenes para su presentación final como documento gráfico es elaborado en cuatro pasos:

Atenuación de las deformaciones debidas a la lente.- En las

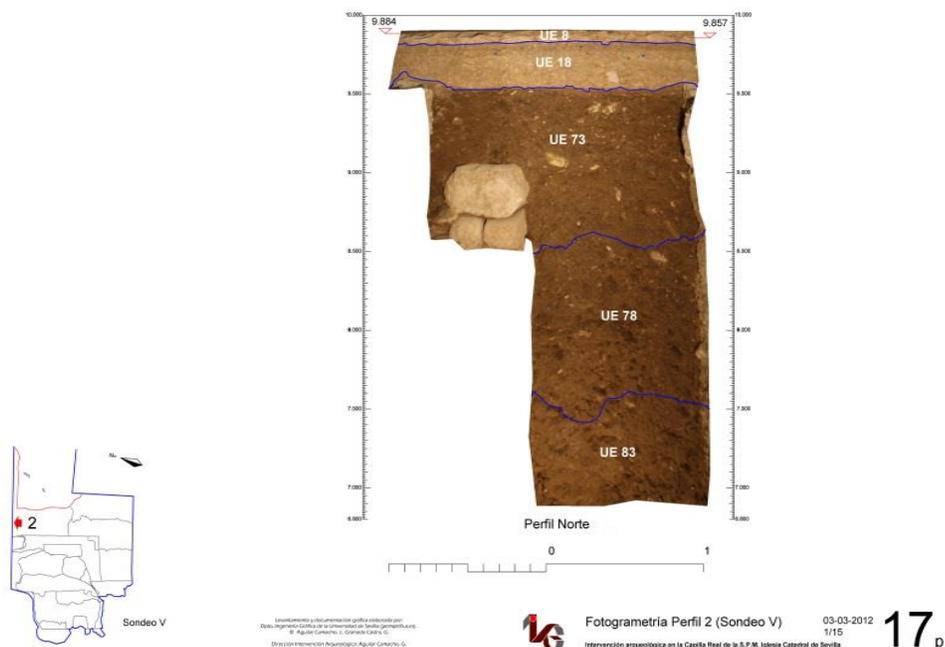


Fig. 3. Representación de unidades estratigráficas con valor métrico y textura fotorrealística, mediante toma fotográfica única, a escala 1:15. Las líneas se han trazado entre las interfaces que separan distintas unidades estratigráficas (UE8, UE18, UE73, UE78 y UE83).



Fig. 4. Composición en fotomosaico de unidades estratigráficas, con valor métrico y textura fotorrealística, a escala 1:10. Las líneas se han trazado entre las interfaces que separan distintas unidades estratigráfica (UE75, UE74 y UE 88).

imágenes capturadas para corregir los efectos geométricos introducidos por la lente -efecto barril y de cojín-, se utilizó el software PhotoModeler Scanner, llevando a cabo lo que la aplicación denomina ‘proceso de idealización’ de las imágenes. Como resultado de esta etapa, se idealizaron en formato JPEG todas las tomas capturadas.

Restitución de las imágenes idealizadas.- Corregidos los efectos geométricos introducidos por la lente en las tomas, es el momento de abordar su rectificación para dotarlas de valor métrico.

Para el proceso de restitución, por su sencillez y rapidez de manejo, se hizo uso de la aplicación informática ASR Digital Image Rectifier.

topográfica Protopo, fue la importación y la representación en AutoCAD de la nube de puntos levantada con estación total en la fase de campo.

Con AutoCAD es posible ajustar a tamaño natural la imagen restituida de cada sección e insertarla en su posición georreferenciada. Para conseguir un mejor resultado final, con mayor sensación de realidad, la imagen puede ser recortada hasta ajustarla al contorno y forma de la sección estratigráfica documentada, eliminando así los bordes de la misma que no forman parte de la sección.

Montaje y maquetación del documento final.-La última etapa corresponde al maquetado de cada fotografía métrica para su impresión digital o en papel en un plano a escala. El montaje de cada sección estratigráfica se ha realizado sobre un formato A3 apaisado e incluye una escala gráfica horizontal y otra vertical. Esta última, permite determinar la cota de cualquier punto o elemento observado en el mismo con precisión subcentimétrica –adecuado para las finalidades del trabajo y acorde al formato y escalas de representación utilizados-. También se inserta en la esquina inferior izquierda del formato un croquis con la localización de cada sección estratigráfica en el sondeo, así como la orientación de la misma (fig. 3 y 4).

TABLA II  
PRECISIÓN OBTENIDA A PARTIR DE PUNTOS DE CONTROL

|                 | Horizontal          |                    | Vertical (Cota)     |                    |
|-----------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|                 | Error absoluto (mm) | Desv. estánd. (mm) | Error absoluto (mm) | Desv. estánd. (mm) |
| <b>Figura 3</b> | 3,30                | 1,87               | 1,63                | 0,76               |
| <b>Figura 4</b> | 1,71                | 2,00               | 1,88                | 2,10               |

Geoinserción y simulación de vistas en alzado.- Para la georreferenciación de las imágenes idealizadas y rectificadas y la generación de las vistas en alzado se recurrió a la aplicación AutoCAD, por ser de uso cotidiano entre los profesionales de la arqueología.

El primer paso, llevado a cabo con ayuda de la aplicación

## V. RESULTADOS

En los trabajos de registro gráfico desarrollados durante la intervención arqueológica en la Capilla Real de la Catedral de Sevilla, se documentaron mediante fotografía métrica un total

de veintinueve secciones estratigráficas correspondientes a cinco catas (Tabla 1). Todas las secciones fueron maquetadas y presentadas en un formato A3 apaisado, a escalas 1:10, 1:15 y 1:20.

A modo de ejemplo, la fig. 3 documenta la sección estratigráfica del terreno (toma fotográfica única) correspondiente a uno de los sondeos excavados.

La fig. 4 corresponde a la composición en fotomosaico (cuatro tomas fotográficas) de un paramento vertical perteneciente a la cimentación de la antigua mezquita almohade que subyace bajo el actual edificio de la catedral.

En la tabla 2 se muestra el nivel de precisión geométrica alcanzado en las figuras 3 y 4, a partir de la posición, determinada en la imagen restituída y con estación total, de una serie de puntos de control.

Las imágenes así obtenidas permiten además reflejar el resultado del proceso de análisis realizado por un arqueólogo, tal cual se realiza en la metodología tradicional de representación. También aporta una ventaja esencial respecto a ésta pues al no interpretar subjetivamente la realidad, tampoco conlleva pérdida alguna de información visual. Este matiz diferencial resulta trascendental, pues permite la visualización de los hallazgos arqueológicos de forma muy similar a la que se observaría in situ, facilitando a posteriori una adecuada reinterpretación y análisis de los elementos documentados, lo que a buen seguro redundará en favor del proceso de investigación.

Ambas imágenes plasman la transcripción estratigráfica realizada por el arqueólogo de la excavación sobre el registro gráfico generado, con ayuda de la aplicación Adobe Acrobat Pro DC (2017). Las líneas de color azul definen las interfaces entre estratos, mientras que los textos en color blanco identifican el número asignado a las distintas unidades estratigráficas que integrarán la matriz Harris.

A priori, cabría pensar que este tipo de análisis arqueológico también puede llevarse a cabo sobre una toma fotográfica cualquiera, sin necesidad de recurrir a las técnicas fotogramétricas. De hecho, ésta resulta ser una práctica habitual en el ámbito de la arqueología. Conviene aclarar, por tanto, que las transcripciones plasmadas sobre imágenes fotográficas cotidianas adolecen de valor métrico a causa de las deformaciones que introduce la óptica utilizada y la ausencia de un proceso previo o ulterior para su calibración.

El método de trabajo propuesto presenta una serie de ventajas relevantes frente a la técnica de representación que tradicionalmente viene utilizándose a este fin, y que podemos resumir en las siguientes:

- Aporta una representación fidedigna de la geometría y las relaciones espaciales de sus elementos. Los posibles errores e imprecisiones derivados del propio procedimiento son perfectamente asumibles para el fin que se pretende y mejoran los resultados de la técnica tradicional.



Fig. 5. Solería cerámica del siglo XVI. Fotografía métrica restituída, sobre la que se ha realizado transcripción gráfica del análisis de elementos arqueológicos.

- Ofrece una representación continua y completa de la realidad, conservando la riqueza de información visual frente a la técnica convencional. Genera, por tanto, un tipo de documento gráfico perdurable que conserva texturas, colores y composiciones originales, frente a las representaciones simbólicas que persiguen emularlas.

- Mantiene las relaciones espaciales de cualquier evidencia arqueológica documentada, a través de su georreferenciación conjunta.

- Posibilita un análisis diacrónico e indefinido de la estratigrafía de un yacimiento con un nivel de información muy próximo al que es posible alcanzar a pie de excavación.

## VI. CONCLUSIONES

La aplicación del procedimiento de trabajo y el modelo de registro documental descritos han demostrado su efectividad y han permitido ofrecer una solución satisfactoria, ajustada a las demandas de documentación estratigráfica planteadas por el proyecto de intervención arqueológica en la Capilla Real de la Catedral de Sevilla.

Como principal ventaja esta metodología permite documentar, preservar y poner en valor la realidad estratigráfica sin subjetividad, dotándola de un significado geométrico sólido, un ajustado costo y reducidas exigencias de especialización. Entre los principales inconvenientes hay que destacar que su rentabilidad queda condicionada por la distancia cámara-objeto, con un sustancial incremento del tiempo de pos-proceso cuando esta distancia resulta

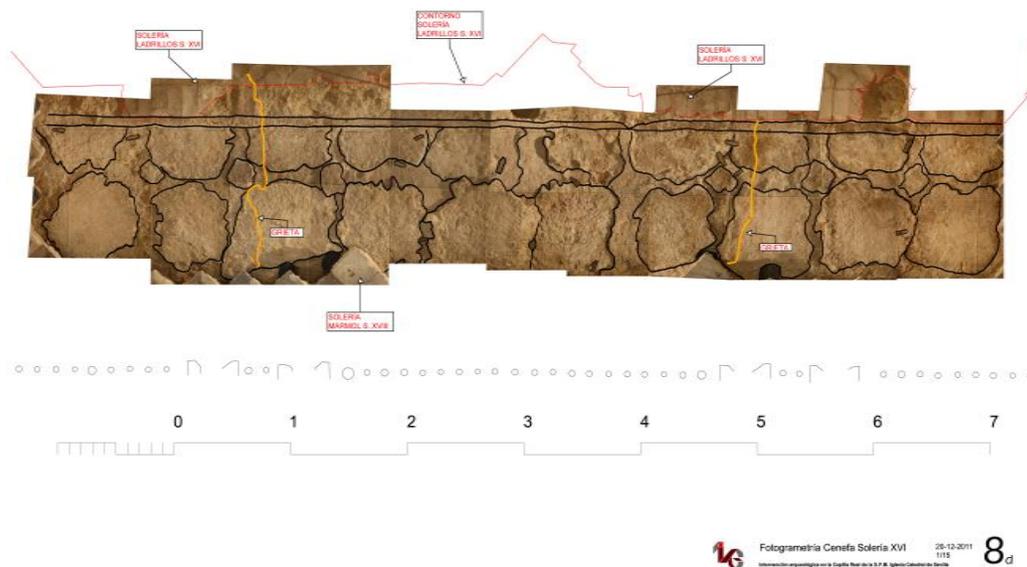


Fig. 6. Restos de cenefa perimetral de solería del s. XVI y restos del antiguo muro de cierre de la mezquita antes de su ampliación con la Capilla Real.

restringida. No obstante cabe indicar que, en general, es factible obtener documentación métrica con textura fotorrealista de buena calidad a partir de una única toma.

Los factores más determinantes en el nivel de detalle visual y la precisión métrica alcanzada, son: la distancia de enfoque, el ángulo de la toma y las condiciones de iluminación de la escena en cada sección. El uso de ópticas gran y súper gran angular o el forzado del ángulo de la imagen han reportado resultados de menor calidad visual y geométrica, especialmente en aquellos casos en los que el terreno presentaba una textura rugosa o un deficiente perfilado.

La metodología propuesta es susceptible de aplicación a otros elementos arqueológicos y patrimoniales de geometría plana, como paramentos, solerías y revestimientos (figs. 5 y 6). Además, la posibilidad de emplear aplicaciones de software gratuitas y equipos fotográficos convencionales incrementa su potencial. A través de su divulgación, pretendemos aportar un procedimiento que pueda servir de referente en el campo de la documentación y preservación estratigráfica en arqueología.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Cabildo de la S.P.M. Iglesia Catedral de Sevilla mediante el proyecto de investigación PRJ201101312 asignado al grupo de investigación (TEP932): Arquitectura e Ingeniería gráfica, forense y de supervisión de proyectos, de la Universidad de

Sevilla.

#### REFERENCIAS

- Adobe Photoshop Lightroom (2017), (n.d.). <http://www.adobe.com/es/products/photoshop-lightroom.html>.
- Adobe Acrobat Pro DC (2017), (n.d.). <https://acrobat.adobe.com/es/es/acrobat/acrobat-pro.html>.
- Aguilar, J., Granado, G., Barrera, J.A. (2013). Aplicación de técnicas avanzadas para el registro y la documentación estratigráfica en arqueología, *Virtual Archaeol. Rev.* 4, 130–134.
- Akkaynak, D., Treibitz, T., Xiao, B., Gürkan, U.A., Allen, J.J., Demirci, U., Hanlon, R.T. (2014). Use of commercial off-the-shelf digital cameras for scientific data acquisition and scene-specific color calibration, *J. Opt. Soc. Am. A.* 31, 312–321. doi:10.1364/JOSAA.31.000312.
- Almagro, A. (2004). Sobre el uso métrico de fotografías digitales en los levantamientos arquitectónicos, in: *X Congr. Expresión Gráfica Arquít. EGA*, Granada, Spain, pp. 351–359. <http://hdl.handle.net/10261/19810>.
- ASRix-Digital Image Rectifier (2017), (n.d.). <http://nickerson.icomos.org/asrix/asr-c.htm>.
- Autodesk AutoCAD (2010), (n.d.). <http://www.autodesk.es/products/autocad/overview>.

- Autodesk 123D Catch app (2017), (n.d.). <http://www.123dapp.com/catch>.
- Bernatchez, J.A., Marean, C.W. (2011). Total Station Archaeology and the Use of Digital Photography, *SAA Archaeol. Rec.* 11, 16–21.
- Caballero, L. (2006). El dibujo arqueológico. Notas sobre el registro gráfico en arqueología, *Papeles Del Patal Rev. Restauración Monum.* 75–95.
- Calo, N. (2007). ¿Por dónde empiezo? Formas de enfrentarse al dibujo arqueológico en caso de no contar con la última tecnología, *Gallaecia.* 26, 205–228.
- Chakrabarti, A., Sharstein, T., Zickler, T. (2009). An empirical camera model for internet color vision, in: *Proc. Br. Mach. Vis. Conf.*, London, pp. 1–11.
- Courbin, P. (1988). *What is Archaeology?: An essay on the nature of Archaeological Research* (translated by Paul Bahn), University of Chicago Press, Chicago & London.
- EqualLight 3 (2017), (n.d.). <http://www.rmimaging.com/equalight.html>.
- Eos Systems Inc. (2016), Calibration-Single Sheet (1) and (2), PhotoModeler Scanner Tutorials. <http://www.photomodeler.com/tutorial-videos/media/SingleSheetCalib/CalibrationPart1.html> (accessed April 15, 2016).
- Fisher, E.C., D. Akkaynak, J. Harris, A.I.R. Herries, Z. Jacobs, P. Karkanis, C.W. Marean, J.R. McGrath, (2015). Technical considerations and methodology for creating high-resolution, color-corrected, and georectified photomosaics of stratigraphic sections at archaeological sites, *J. Archaeol. Sci.* 57, 380–394. doi:10.1016/j.jas.2015.02.022.
- Gardner, I.C. (1947). Validity of the Cosine-Fourth-Power Law of Illumination, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 39, 213–219.
- Geobit Agisoft Lens (2017), (n.d.). <http://agisoft.net/products/agisoft-lens-2/>. Gimp (2017). <http://gimp.es/>.
- gvSIG Asociación (2017), (n.d.). <http://www.gvsig.com/es>.
- Harris, E.C. (1989). *Principles of archaeological stratigraphy*, Second Edi, Academic Press, London.
- Harris, E.C. (2015). The Harris Matrix and Stratigraphic Revolution in Archaeology, *Cursos Y Conf. Mus. Arqueol. Nacinal.* <http://www.man.es/man/actividades/cursos-y-conferencias/anteriores/2015/2015-03-17-Harris.html> (accessed February 21, 2016).
- Harris matrix composer (2017), (n.d.). <http://www.harrismatrixcomposer.com/>.
- Jacobs, C. (2004). *Interactive Panoramas: Techniques for Digital Panoramic Photography*, Springer, Berlin.
- Lerma, J.L. (2002), *Fotogrametría moderna: Analítica y Digital*, Universidad Politécnica de Valencia.
- Ludwigs, A., Tepe, K. (2012). Stratigraphy. Graph A20E, Drawing A20E, Vor. Archäologie. <https://www.vorderasien.uni-freiburg.de/forschung/projekte-der-mitarbeiterinnen/dr.-marion-benz/koertik-tepe/ktk2012strati> (accessed February 23, 2016).
- McPherron, S.P. (2005). Artifact orientations and site formation processes from total station proveniences, *J. Archaeol. Sci.* 32, 1003–1014. doi:10.1016/j.jas.2005.01.015.
- McPherron, S.P., Gernat, T., Hublin, J.-J. (2009). Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds, *J. Archaeol. Sci.* 36, 19–24. doi:10.1016/j.jas.2008.06.028.
- Nickerson, S., Chapiro, A. (2005). ASRix: A Simple Digital Image Rectifier, in: 2005 CIPA XX Symp., ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol: XXXVI-5/C34, Torino, Italy, pp. 476–480.
- Page, V., Acosta, M.J. (2002). V-El dibujo arqueológico, in: M.M. de El Cigarralejo (Ed.), *Exp. Didácticas Del Mus. Del Cigarralejo* (Mula, Murcia), Excmo. Ayuntamiento de Mula; CajaMurcia; Museo Monográfico de El Cigarralejo, Murcia, pp. 1–12.
- Pérez, M., Agüera F., Carvajal, F. (2011). Digital Camera Calibration using images taken from an unmanned aerial vehicle, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XXXVIII, 167–171.
- Petrie, W.M.F.M. (1904) *Methods & aims in archaeology*, Macmillan and Co., Limited, London.
- PhotoModeler Scanner (2017). <http://www.photomodeler.com/products/scanner/default.html>.
- Protopo v6.1 (2017), (n.d.). <http://www.aptop.com/protopo.html>.
- QGIS (2017), OSGeo Project. [http://www.qgis.org/es/site/](http://www.qgis.org/es/site/Remondino, F. (2011). Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning, Remote Sens. 3, 1104–1138. doi:10.3390/rs3061104)
- Sanger, M.C. (2015) Determining depositional events within shell deposits using computer vision and photogrammetry,

- J. Archaeol. Sci. 53, 482–491. doi:doi:10.1016/j.jas.2014.10.026.
- Shott, M. (2014). Digitizing archaeology: a subtle revolution in analysis, *World Archaeol.* 46, 1–9. doi:10.1080/00438243.2013.879046.
- Souto-Vidal, M., Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito, *Inf. La Construcción.* 67, 2–10. doi:http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.098.
- Tsioukas, K. (2011). Tsioukas' Blog. VeCAD Photogrammetry, (n.d.). <http://blogs.auth.gr/tsioukas/2011/08/21/vecad-photogrammetry/>.
- Verhoeven, G. (2008). Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared photography, *J. Archaeol. Sci.* 35, 3087–3100. doi:10.1016/j.jas.2008.06.012.
- Wheeler, M. (1954). *Archaeology from the Earth*, Oxford at the Clarendon Press.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.