

Análisis de imágenes digitales con DStretch como soporte a la restauración virtual de una pintura mural histórica en San Cristóbal de la Laguna

Análise de imagens digitais com DStretch como suporte do restauro virtual de uma pintura mural histórica em San Cristobal de La Laguna

Analysis of digital images with DStretch as a support for the virtual restoration of an historical mural painting in San Cristóbal de La Laguna

ALBA FUENTES-PORTO^{1*}
OVIDIA SOTO-MARTÍN²
JORGE MARTIN-GUTIERREZ³

1. Servicio de Análisis y Documentación de Obras de Arte (SADOA-SEGAI), Universidad de La Laguna.

2. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna.

3. Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería, Universidad de La Laguna.

* albfuentesporto@gmail.com

Resumen

Este artículo expone el uso de la herramienta de análisis de imágenes DStretch aplicada al estudio y análisis formal de unas pinturas murales dieciochescas en la Iglesia de San Agustín de San Cristóbal de La Laguna, ciudad Patrimonio de la Humanidad en España. La tecnificación de la documentación digital ha hecho posible recuperar virtualmente este conjunto pictórico, en la actualidad en un estado de deterioro muy avanzado a causa de un incendio sufrido en 1964. Se propone una metodología de trabajo para lograr una recreación fidedigna y rigurosa apoyada en el software libre DStretch. Esta herramienta, concebida para la investigación del arte rupestre, se sustenta en el tratamiento digital de imágenes a través de la aplicación de procesos automáticos de decorrelación. El método expuesto ha resultado ofrecer una interesante aplicabilidad en el estudio de la pintura mural histórica analizada y potenciar la objetividad de su reintegración virtual.

Resumo

Este artigo expõe o uso da ferramenta de análise de imagens DStretch aplicada ao estudo e análise formal de pinturas murais do século XVIII da igreja de San Agustín de San Cristóbal de La Laguna, cidade espanhola classificada como Património da Humanidade. A modernização da documentação digital permitiu recuperar virtualmente este conjunto pictórico, actualmente em estado de deterioração muito avançado devido a um incêndio ocorrido em 1964. Propõe-se uma metodologia de trabalho para alcançar uma recriação fiel e rigorosa, apoiada no programa livre DStretch. Esta ferramenta, concebida para a investigação de arte rupestre, baseia-se no tratamento digital de imagens através da aplicação de processos automáticos de decorrelação. O método exposto acabou por oferecer uma aplicabilidade interessante no estudo da pintura mural histórica analisada e potenciar a objectividade da sua reintegração virtual.

Abstract

This paper proposes the use of the DStretch image analysis tool applied to the study and formal analysis of eighteenth-century mural paintings in the San Agustín Church of San Cristóbal de La Laguna, a World Heritage city in Spain. Thanks to the technification of digital documentation, it has been possible to recover virtually this pictorial group that currently is almost completely lost due to a fire occurred in 1964. A work methodology that aims to achieve a reliable and rigorous recreation is proposed, supported by free software DStretch. This tool, which is conceived for research on rock art, is based on decorrelation processes, used in digital image treatment, which improve the readability of an image. The method offers an interesting applicability to the study of the historical mural painting analyzed and enhance the objectivity of its virtual reintegration.

PALABRAS CLAVE

DStretch
Análisis Digital de Imagen
Decorrelación
Reintegración virtual
Pintura mural

PALAVRAS-CHAVE

DStretch
Análise Digital de Imagens
Decorrelação
Reintegração virtual
Pintura mural

KEYWORDS

DStretch
Digital Image Analysis
Decorrelation
Virtual reintegration
Mural painting

Introducción

Las pinturas murales y frescos son bienes patrimoniales altamente sensibles al deterioro, por lo que en numerosas ocasiones vemos cómo unas condiciones ambientales inestables, o problemas estructurales derivados de los inmuebles que las albergan, alteran sus valores plásticos además de afectar a su integridad matérica. Humedades procedentes del soporte mural, eflorescencias salinas, biodeterioro o intervenciones históricas poco respetuosas como los encalados pueden afectar a la correcta apreciación de sus representaciones pictóricas llegando incluso a ocultar por completo su superficie.

Puesto que toda intervención debe sustentarse en una comprensión exhaustiva del bien a intervenir, los conservadores-restauradores cuentan con gran cantidad de métodos e instrumentos que permiten recuperar gran cantidad de información acerca de su entidad estética y matérica. Así, los registros en el espectro visible e invisible – análisis multispectral, fotografía de fluorescencia ultravioleta, reflectografía infrarroja – permiten examinar pintura y soporte, conocer la técnica empleada o recuperar elementos imperceptibles a simple vista [1-3]. Otras técnicas analíticas como la cromatografía, la espectrometría de masas y de absorción atómica, la fluorescencia de rayos X o la microscopía electrónica de barrido nos ayudan a caracterizar la composición química de sus morteros y policromías [4-6]; o a profundizar en el estudio y diagnóstico del deterioro que las afecta, como la termografía infrarroja estática, la espectroscopia, el tapping, etc. [7-10].

Son métodos de alto rendimiento en sus campos de aplicación, pero no son universales y accesibles para todo tipo de proyectos debido al coste elevado de muchos de estos equipos y la formación requerida para llevarlos a cabo. Incluso algunos de ellos pueden llevar mucho tiempo de dedicación llegando a ser un trabajo agotador, por ejemplo, la detección de defectos en pinturas murales de gran formato (en iglesias) a través del análisis de tapping con los dedos [8].

En este trabajo exponemos una propuesta metodológica que pretende contribuir a la mejora del estudio formal en pinturas murales altamente deterioradas optimizando la visibilidad de sus representaciones pictóricas, lo que nos ayudará a la alcanzar una hipótesis formal sólida a la hora de abordar una reintegración. Para ello nos apoyamos en una herramienta informática gratuita de uso sencillo, conocida como DStretch.

DStretch es una herramienta de registro y documentación de arte rupestre, que ha demostrado ofrecer resultados muy significativos en este campo [11-12]. Su uso se sustenta en la mejora de la legibilidad de las representaciones digitales, aumentando las diferencias de tonalidad entre sus canales a través de la aplicación de algoritmos de decorrelación, y generando imágenes en falso color capaces de destacar aspectos formales apenas perceptibles [13-15].

Su aplicación experimental sobre las pinturas históricas

que se expone en este artículo ha resultado de interés, al permitirnos apreciar con mayor claridad trazos y aspectos de su composición original, anteriormente difíciles de visualizar. Con ello demostramos que modificar los canales RGB de una imagen digital es un modo de obtener información de pinturas murales cuyo avanzado estado de deterioro dificulta la correcta apreciación de sus representaciones pictóricas.

El objetivo general del trabajo que aquí se expone es abordar la reintegración virtual de las pinturas murales dieciochescas de la Iglesia de San Agustín, en San Cristóbal de La Laguna. Pinturas y templo se encuentran prácticamente perdidos en la actualidad debido a un incendio que afectó a la totalidad del inmueble y a su posterior abandono; por lo que esta reintegración digital se incluye dentro de un ambicioso proyecto de reconstrucción virtual que recupera el antiguo esplendor de este castigado edificio. Para el tratamiento digital de los frescos nos proponemos los siguientes objetivos específicos:

- Materializar la reintegración a partir de una hipótesis formal sólida que recupere de forma fidedigna el aspecto original de las pinturas.
- Acometer un estudio visual directo y documental para sustentar la hipótesis formal.
- Recuperar motivos ocultos a simple vista por medio del análisis de imagen de sus registros digitales con DStretch.
- Contribuir a la validación de DStretch como herramienta óptima para el estudio de pinturas murales fuera de su contexto de aplicación original [16], el arte rupestre.

A la vista de los objetivos nos marcamos una hipótesis del trabajo que pretende validar que “el uso de DStretch como software de análisis de imágenes para la recuperación de representaciones ilegibles en pinturas murales deterioradas es efectivo”.

Los trabajos desarrollados no sólo confirman el interés que ofrece DStretch fuera de su contexto de aplicación original, sino que permiten abordar con solidez la reintegración digital de estos frescos. Esto supone una aportación a la innovación en la metodología de estudio de pinturas murales deterioradas.

En los próximos epígrafes se expone el contexto en el que se realiza la intervención y los detalles del proyecto en el que se integra este trabajo. A continuación, se describe la metodología a través de trabajo experimental desarrollado, explicando las características del análisis digital de imagen, pasando finalmente a exponer los resultados obtenidos y las conclusiones.

Contexto

La ciudad de San Cristóbal de La Laguna, situada en las Islas Canarias, dispone de un casco histórico declarado Bien Cultural Patrimonio de la Humanidad en 1999, consecuencia



Figura 1. a) Fachada principal de la antigua Iglesia de San Agustín. Autor: Adalberto Benítez, SGI Fototeca. b) Paso de Semana Santa procesionando frente a la fachada lateral del templo. Estudio García.

del valor universal y excepcional que tuvo la concepción del plano urbano de la ciudad, que se remonta al siglo XV.

La Laguna es el primer ejemplo de ciudad española no fortificada, que sirvió como modelo para los asentamientos españoles en América durante la época colonial [17]. Entre los numerosos templos, conventos, ermitas, plazas, casonas y palacios que se asientan en las calles en forma de cuadrícula de esta urbe, la iglesia y ex-convento de San Agustín han desempeñado un destacado protagonismo en la vida espiritual y cultural de esta ciudad (Figura 1). Se trata de uno de los templos más antiguos de Canarias, fundado en 1506 por los frailes agustinos Andrés de Góes y Pedro de Cea, llegados con el conquistador y primer Adelantado de la Isla de Tenerife, Don Alonso Fernández de Lugo, fundador y constructor de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna [18].

En el interior del templo gozaban de especial protagonismo las majestuosas pinturas murales que decoraban su doble presbiterio, encuadrando con majestuosidad el gran baldaquino central junto con el altar, centro espiritual del recinto. Atribuidas al pintor tinerfeño Félix Padrón (1744-1814) [19], fueron realizadas en torno a 1780 bajo un programa ideológico concebido como una exaltación de los padres de la Iglesia, santos, teólogos e intelectuales relacionados

con el misterio eucarístico [18]. Todo ello enmarcado por una recreación arquitectónica de corte clasicista y gusto dieciochesco con abundantes marmoleados y decoraciones vegetales (Figura 2). Estos trampantojos – trampa ante el ojo –, trompe-l'oeil o cuadratura, constituyeron un típico recurso pictórico de carácter artificioso y teatral, siendo ampliamente utilizado en las techumbres y paramentos de las iglesias desde mediados del siglo XVIII [5]; si bien supuso una novedad en el contexto local.

El día 2 de junio de 1964 este templo religioso sufrió un gran incendio, sumiéndolo en un estado ruinoso hasta nuestros días y destruyendo gran parte de este patrimonio pictórico de gran valor artístico (Figura 3).

En los últimos años han surgido algunas iniciativas, ideas y proyectos de recuperación del espacio de la Iglesia San Agustín. En concreto, en el año 2005, el Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna convocó un concurso de proyectos de rehabilitación para este espacio. La propuesta ganadora [20] pretende revivir la antigua iglesia como una mediateca destinada a dinamizar y actualizar el centro urbano de la ciudad. La remodelación contempla consolidar las ruinas de la iglesia y antiguo convento agustino para convertirlas en una plaza pública cubierta dedicada al esparcimiento

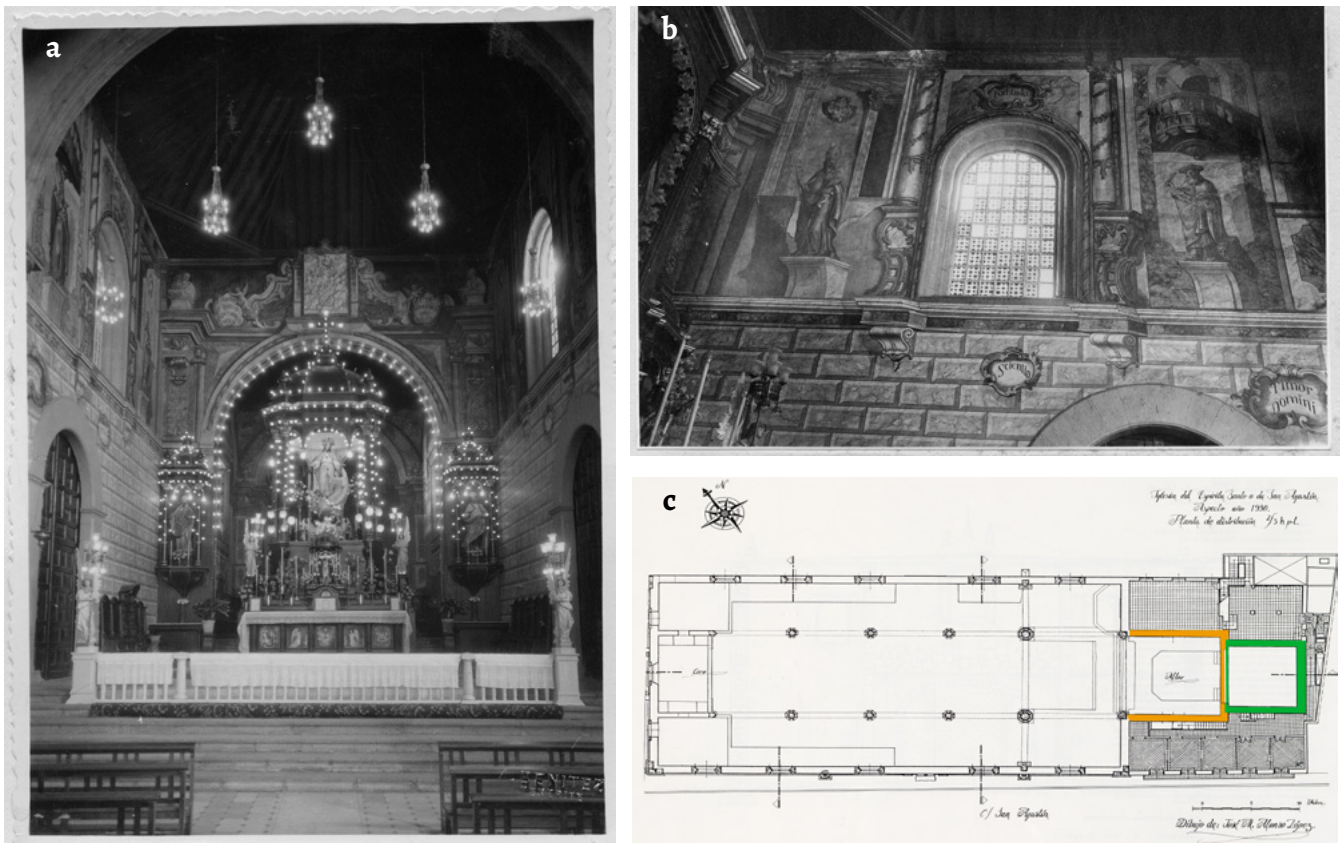


Figura 2. a) Fotografía histórica de la cabecera de San Agustín, donde podemos ver el primer cuerpo de sus murales desplegándose en torno al altar y un segundo cuerpo apuntando tras el presbiterio. Autor: Adalberto Benítez, SGI Fototeca. b) Detalle del lateral izquierdo. Autor: Agustín Guerra Molina, SGI Fototeca. c) Planimetría histórica sobre la que detallamos la disposición de ambos cuerpos, el primero en amarillo y el segundo en verde.

de los vecinos y a la organización de actividades lúdicas y culturales; de modo que el trabajo que aquí se presenta podría constituir una referencia de cara a su restauración.

El desarrollo que ha experimentado el empleo de las nuevas tecnologías aplicadas al patrimonio cultural ha permitido reconstruir virtualmente la iglesia de San Agustín contribuyendo a rescatar la memoria histórica de este emblemático edificio lagunero. Esta iniciativa, que ha sido financiada por el Excmo. Ayto. de La Laguna y desarrollada por una empresa canaria de gestión del patrimonio cultural [18] junto a un amplio número de colaboradores externos, ha hecho posible el acercamiento al antiguo esplendor de la iglesia, con especial atención investigadora a la recuperación de las pinturas murales dieciochescas que habitaban en su interior.

Virtualización y valorización del patrimonio

El conocimiento y la valoración de nuestra herencia cultural constituyen el pilar fundamental para fortalecer el compromiso social por su tutela y potenciar la demanda de políticas culturales que aseguren su pervivencia en el tiempo [21]. En este sentido, la Gestión y Conservación del Patrimonio Histórico-Artístico ha encontrado en el desarrollo de las nuevas tecnologías un valioso recurso que permite acercar los bienes culturales a los ciudadanos

a través de recreaciones digitales y experiencias virtuales [22-26]. Estos modelos permiten mejorar la comprensión de los bienes culturales dañados o desaparecidos mediante la transposición gráfica de los restos materiales conservados y de las fuentes documentales relacionadas. Estas reconstrucciones virtuales suponen un gran atractivo para una sociedad cada vez más acostumbrada al uso de tecnologías de realidad virtual, consumidora y demandante de experiencias digitales [27].

La facilidad técnica con que se afrontan hoy en día las reconstrucciones virtuales implica la posibilidad de una proliferación incontrolable de productos pseudoculturales carentes de rigor científico e histórico que crean conceptos erróneos capaces de gozar de gran perdurabilidad debido a la potencia divulgativa de estas imágenes. Por ello, es necesario sentar bases que regulen la producción de este tipo de material y marquen las pautas para la generación de modelos veraces capaces de respetar desde lo virtual, que no imaginario, la materialidad e historia de los bienes representados [28].

Planeamiento de un modelo infográfico fundado – Virtualización de la iglesia de San Agustín

El proyecto de reconstrucción virtual de la iglesia de San Agustín fue abordado desde una perspectiva multidisciplinar de trabajo. Historiadores y arqueólogos fueron los encargados de recabar información detallada tanto del templo como de su significancia sociocultural a través



Figura 3. a) Imagen del impactante incendio que asoló el templo el día 2 de junio de 1964. b) Testimonio histórico del interior de San Agustín, días después de ser pasto de las llamas. Ambas imágenes son del fotógrafo Agustín Guerra Molina.

de fuentes y tratados histórico-artísticos, planimetrías, dibujos y fotografías antiguas, además de su estudio *in situ*. A partir de este trabajo de documentación previa, un equipo de especialistas en virtualización del patrimonio se encargó de modelar en 3D la estructura arquitectónica del edificio antes del incendio [18, 29]; mientras que la tarea de restaurar digitalmente los frescos de su interior recaería en conservadores-restauradores especializados en el tratamiento y documentación de pinturas murales.

El modelado 3D de la arquitectura del edificio se realizó utilizando el software libre Blender [30]. En primer lugar, se creó la volumetría del edificio, del pavimento y de los muros interiores del templo; continuando con el modelado de las columnas y de las arcadas que dividen su planta. Se añadieron modelados de los detalles arquitectónicos del interior y de las dos fachadas visibles del templo, proceso que culminó con la creación del artesonado y de pequeños elementos ornamentales como los casetones de las puertas de madera, la decoración de las pilastras o la hornacina que coronaba la portada lateral. Para no aislar la reconstrucción de su contexto, se realizó la volumetría del resto del convento, aunque con menor detalle. Una vez terminado el modelado del edificio se realizó el texturizado, procedimiento por el cual se proporciona al modelo 3D una apariencia realista aplicando colores y materiales (madera, piedra, metal, etc.). Fue en este proceso en el que se incorporaron las imágenes creadas mediante la restauración digital de los frescos (Figura 4), trabajo que se describe en este artículo.

Metodología

Problemática

El objetivo general del trabajo, como se ha indicado, es obtener una recreación digital fidedigna del patrimonio pictórico de la Iglesia San Agustín para su integración en el modelo 3D virtual del edificio.

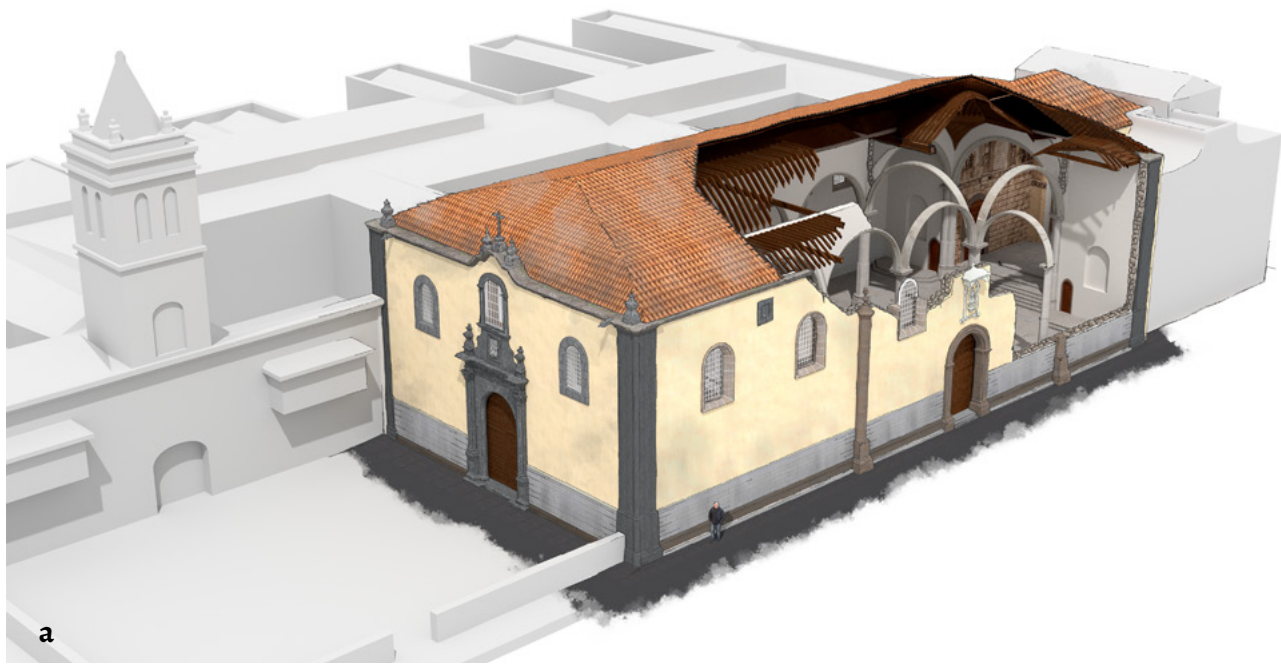
Estas pinturas se han perdido casi por completo, y presentan un estado de deterioro tan avanzado que

dificulta definir sus representaciones. Además, se carece de textos y documentos históricos que puedan indicar detalles sobre su composición.

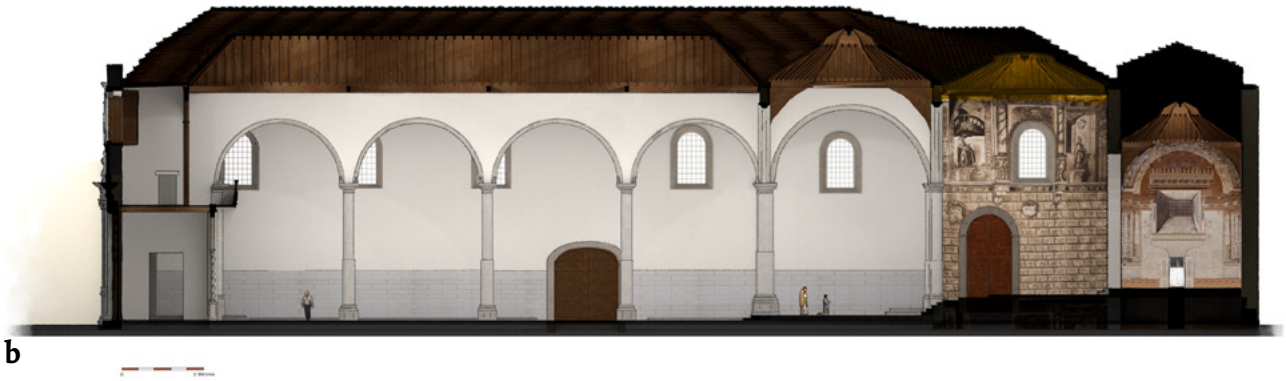
En el estado actual, los paños derecho e izquierdo de su primer cuerpo han desaparecido por completo y los restos de policromía de la arcada central, expuestos a la intemperie, se encuentran ocultos bajo gruesas capas de biodeterioro. Los paños del segundo tramo han llegado en mejor estado a nuestros días, posiblemente por encontrarse más alejados del foco del incendio y conservar su cubierta, lo que evitó una exposición directa a los agentes atmosféricos. Aun así, las elevadas temperaturas a las que se vieron sometidos causaron la pérdida de más del 70 % de la policromía, y las partes conservadas presentan alteraciones severas como levantamientos de la superficie pictórica, lavado de materiales y una acusada alteración cromática de los pigmentos; además de gruesos depósitos de sales, cemento y excrementos de ave, grafitis, así como una consistente capa de suciedad superficial (Figura 5).

Propuesta metodológica

La tarea de conseguir una reintegración digital que reflejase una hipótesis verosímil y fidedigna se logró gracias a una cuidada labor de documentación y de análisis comparativo sustentada en tres fases de trabajo: En una primera, se abordó un estudio visual directo y el análisis formal de los restos conservados *in situ*, todos ellos localizados en el segundo cuerpo. Esto permitió apreciar que sus representaciones arquitectónicas se desplegaban de forma simétrica desde el eje central de la sala y se servían de una perspectiva cónica muy escorzada para conferirle profundidad. Este descubrimiento permitiría recuperar gran parte de la información proyectando los motivos que habían pervivido sobre las zonas de pérdidas. En esta fase de estudio se capturaron tomas generales de cada paramento, respaldándolas con zooms de detalles con el fin de poder apreciar con claridad los elementos más alejados y recuperar el mínimo detalle posible. Estas fotografías presentaban unas dimensiones de 2736 × 3648



a



b

Figura 4. Reconstrucción virtual de la Iglesia de San Agustín acometida como parte del discurso expositivo de Cor Ignis: memoria y patrimonio de la iglesia de San Agustín de La Laguna: a) perspectiva axonométrica; b) perfil lateral.

píxeles, una resolución de 314 ppp y tamaño de 6 MB. Además, para documentar y recrear con posterioridad el cromatismo real de la obra con la mayor fidelidad posible, se realizó el registro colorimétrico de zonas accesibles y libres de depósitos apoyados por una carta de color.

La segunda fase de trabajo consistió en el estudio de la documentación histórica. Entre las fotografías antiguas recabadas por el equipo de historiadores aparecieron registros de los paramentos perdidos del primer cuerpo (Figuras 2a y 2b). No se tuvo la misma suerte con el espacio situado tras el gran baldaquino, que únicamente aparecía en las fotografías de forma indirecta.

Estas lagunas documentales, unidas al avanzado estado de deterioro, dificultaba la correcta apreciación de los motivos conservados. Esto marcó la necesidad de implementar nuevas estrategias de estudio y análisis con el fin de recuperar la máxima información posible, limitando así la posibilidad de recaer en posibles suposiciones a la hora de abordar la propuesta formal que sustentaría la reintegración.

Por ello se recurrió como tercera técnica a un análisis a partir de los registros digitales tomados (fotografías de alta resolución) y comprobar lo que podía aportar a nuestra problemática una herramienta de análisis de imagen básica y gratuita, diseñada ex profeso para mejorar la legibilidad de los registros fotográficos de arte rupestre. Nos referimos a DStretch.

DStretch – Análisis digital de imagen

DStretch fue creada por Jon Harman con el fin de destacar pictogramas rupestres imperceptibles o de escasa nitidez a través de imágenes digitales, mejorando la representación pictórica de un modo rápido y sencillo. Fue su propio creador el encargado de difundir los primeros ejemplos de su aplicación, que se centraron principalmente en el estudio de arte nativo de Baja California, Nuevo México y Nevada [13]. La elocuencia de los resultados ofrecidos en el estudio de grabados y pinturas rupestres han propiciado que su uso se extendiera rápidamente entre la comunidad científica de numerosos países [11, 31-37].



Figura 5. a) Vista general de los frescos en la actualidad. b) Detalle del paramento derecho, donde apreciamos abundantes pérdidas y gruesos depósitos que ocultan la policromía original. c) Esquina derecha de la pared central, afectada por la misma problemática.

Puede usarse de forma gratuita, como *plugin* del software libre de procesamiento digital de imágenes científicas ImageJ. Además, recientemente ha aparecido la versión DStretch para dispositivos móviles Android e IOS [38].

DStretch se basa en técnicas de *decorrelation stretching*, una técnica habitual en tareas de teledetección que tienen como fin mejorar de forma artificial el color de una imagen, produciendo otra imagen en lo que se conoce como falso color [39]. Esta técnica combina operaciones de mejora de contraste (*stretching*) con técnicas de decorrelación (*decorrelation*). Éstas últimas buscan mejorar la visualización de las imágenes correlacionadas, refiriéndose a aquellas cuyo nivel digital en sus distintas bandas está muy próximo, lo que provoca una redundancia visual que dificulta la observación de los elementos registrados; es decir, el color de los píxeles es muy similar [40].

El principio de DStretch es la aplicación de la técnica de transformación PCA-KLT (análisis de componentes principales y de la transformada de Karhunen-Loeve). El análisis de componentes principales es probablemente la más antigua y conocida de las técnicas de análisis multivariante. Fue descubierta por Pearson [41] y desarrollada por Hotelling [42] y Karhunen y Loève [43]. En ingeniería, a PCA normalmente se le conoce como la transformada de Karhunen y Loève, de ahí la abreviatura PCA-KLT para esta técnica, que proporciona la mejor estimación lineal de un rango dado para un vector.

El uso de esta transformada es un procedimiento muy habitual en sistemas de codificación de imágenes y sobre todo en las estrategias de reconocimiento de formas dentro de una imagen, tales como caras, huellas dactilares, caracteres, etc. En un segundo paso, la aplicación DStretch expande el contraste de los colores (*stretch*) para uniformizar sus variaciones. Finalmente usa la transformada de la inversa para aproximar o correlacionar los colores en lo posible al original.

DStretch aplica el procedimiento descrito a todos los colores de la imagen mediante una matriz de transformación, con la característica de que se puede seleccionar el espacio de color en el que queremos observar la imagen. El programa dispone de opciones predeterminadas para elegir diferentes espacios de color como los conocidos (RGB o LAB) u otras variaciones creadas por el propio Harman con el fin de realzar ciertas tonalidades características del arte rupestre (YDS, YBR, YBK, LDS, LRE). De manera que el predeterminado YDS trabaja mejor con colorantes amarillos, los YBR y LRE mejoran los rojos, el YBK mejora los negros, azules y amarillos, y las opciones YXX o LXX se ofrecen para que el usuario configure sus propios espacios de color [14-15].

En definitiva, DStretch ofrece una batería de posibilidades de filtros que aplicándolos y combinándolos, pueden resaltar ciertos colores en la imagen digital. El resultado es la obtención de una imagen en falso color que posibilita la visualización de los motivos difíciles de percibir por el ojo humano, así como la distinción entre diferentes superposiciones y clases de pigmentos utilizados.

Entorno de trabajo y requerimientos técnicos de la imagen original

En la versión para plataformas PC, el acceso a DStretch se realiza a través de ImageJ Software. Seleccionada esta opción, el programa solicita abrir la imagen que se desea analizar, y se visualiza en el entorno de trabajo (Figura 6). Basta elegir los distintos espacios de color que encontramos en la barra inferior, los cuales aplican sobre la imagen el algoritmo Decorrelation Stretch seleccionado. El programa devuelve la transformación aplicada de forma inmediata, resaltando los colores del algoritmo aplicado.

A modo de ayuda, al situarnos con el cursor sobre cada uno de los espacios de color disponibles nos ofrece una breve

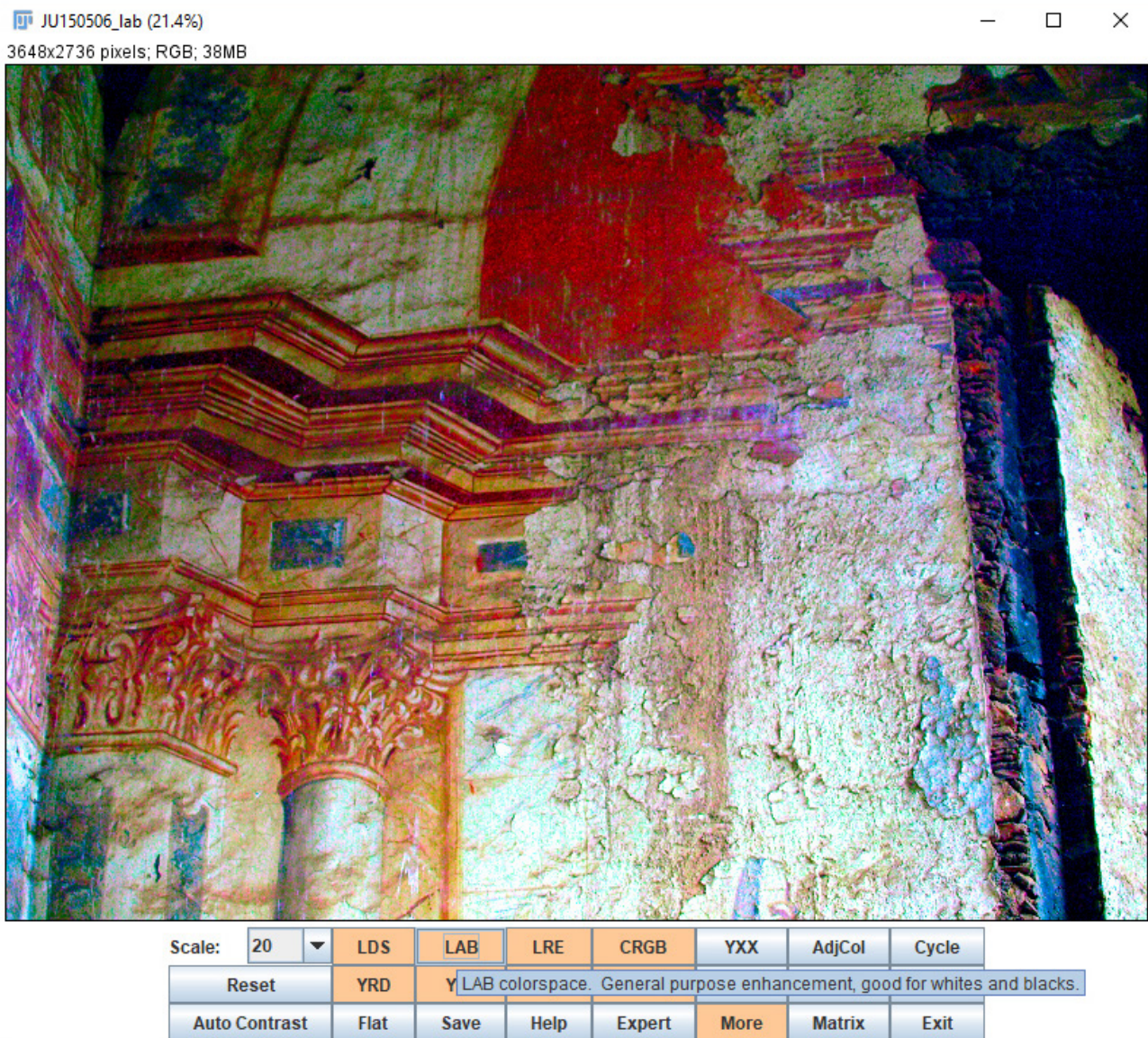


Figura 6. Entorno de trabajo de DStretch como plugin de ImageJ. Los comandos y espacios de color principales se disponen directamente bajo la imagen a analizar, y cuenta con ventanas emergentes que proporciona información de ayuda al usuario.

indicación sobre las transformaciones que produce la opción seleccionada. Entre estas opciones encontramos los espacios de color estándar RGB y LAB, así como otras variaciones indicadas anteriormente.

El programa permite seleccionar un área determinada de la imagen con el fin de restringir el cálculo a los píxeles que contiene y así poder excluir información confusa o elementos ajenos a nuestro interés. Otro parámetro interesante a tener en cuenta en el manejo del programa es la escala. El valor preestablecido es 15, pero se puede aumentar o disminuir para así ayudar a minimizar la aparición de ruido en los resultados.

Puesto que este sistema automatizado de mejora de imágenes parte del tratamiento matemático de la matriz de vectores (píxeles) de las imágenes fotográficas realizadas, es importante evitar cualquier técnica de retoque fotográfico o expansión del histograma, ya que este tipo de tratamientos alterarían los valores originales de reflectividad y eliminarían parte de la información de la

imagen [44]. Autores de contrastada experiencia en el uso de DStretch, y en su contexto original, recomiendan el empleo de imágenes en formato TIFF frente al JPEG (al implicar una menor compresión de la información) y la mayor resolución posible, lo que garantiza un mayor espacio de color. Además se recomienda el uso de un ISO bajo para evitar el ruido en los píxeles, iluminación con luz natural y contar con un soporte o trípode que garantice la estabilidad de las capturas con exposiciones prolongadas [14, 31, 33, 45-46].

Resultados

El análisis de imágenes de las pinturas murales de San Agustín con DStretch se centralizó en el segundo cuerpo del doble presbiterio, por tratarse de una zona con restos materiales altamente deteriorados de los que se carecía de registros históricos.

En primer lugar, se analizaron las tomas generales de los tres paños con el fin de obtener una percepción general de los resultados que se podían conseguir. A continuación, se analizaron las imágenes de detalles que aportan mayor resolución y precisión a los análisis.

Los resultados más significativos se obtuvieron en el

pañó central, zona afectada por una gran laguna de datos y que podía dar pie a interpretaciones erróneas por parte del restaurador. Además, se corría el riesgo de obviar la presencia de fragmentos de policromía de pequeño tamaño al confundirse con las capas de preparación por estar ocultos bajo gruesos depósitos de suciedad superficial y eflorescencias.

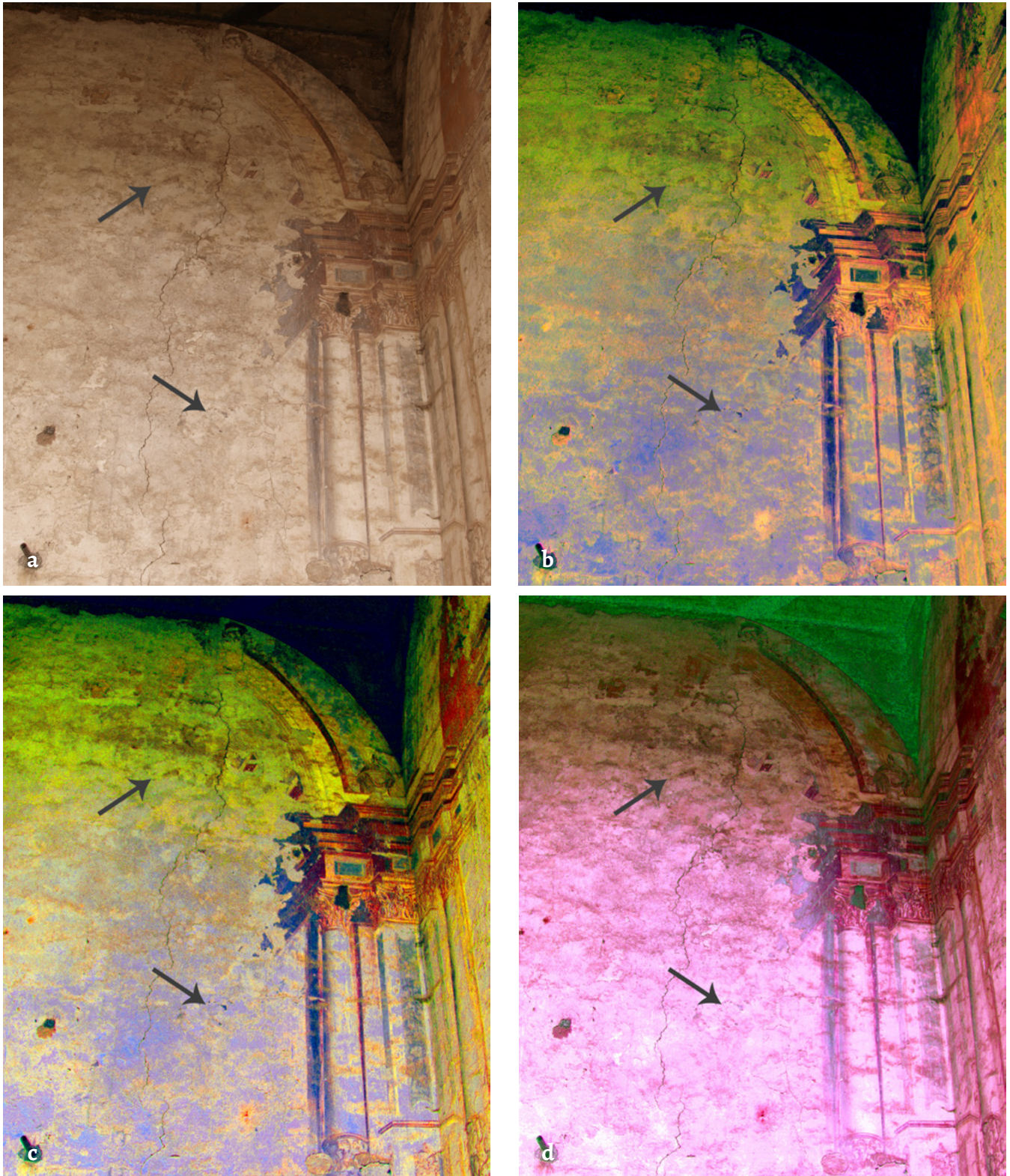


Figura 7. Análisis del paño central: *a)* imagen RGB de partida; *b)* filtro YBK destacando restos descontextualizados de la moldura; *c)* filtro LDS con semejantes resultados sobre los elementos inferiores, además de mejorar la visibilidad de la zona superior; *d)* filtro RGBo aportando mayor nitidez en los contornos de dichos ornamentos superiores.

De este paño no se pudo rescatar información alguna en la fase de visualización directa, ni se disponía de documentación histórica sobre su representación, pero sí se obtuvieron resultados con el tratamiento de imágenes con DStretch. El uso del espacio de color LDS con escala 15 resaltó los tonos oscuros de la cornisa que fuga hacia el centro de la escena, y con ellos los pequeños restos aislados de este motivo, ayudando a identificarlos y determinar la longitud mínima que alcanzaba este elemento. A su vez, el espacio de color RGB a una escala de 20 permitió apreciar con nitidez restos parciales de elementos cuadrangulares que se desplegaban en el interior de la arcada central fugando en la misma dirección (Figura 7).

En las zonas inferiores del paramento lateral derecho también se lograron resultados significativos que subsanaron las lecturas confusas e imprecisas alcanzadas mediante su observación, ya que estaban condicionadas por la presencia de abundantes eflorescencias además de otros depósitos de material ajeno. El análisis de imagen permitió identificar con claridad la decoración en cuadrícula de los espacios comprendidos entre las grandes columnas

laterales y la pequeña puerta de acceso central. Además de delimitar nítidamente el remate inferior de la pequeña pilastra que la flanquea, también se identificó la existencia de motivos decorativos azules sirviendo de elemento de unión con el vano situado encima. Los espacios de color que ofrecieron los mejores realces en esta zona fueron el LDS, el LAB y el YYE, que, aplicados a una escala de 7,5, permitieron ver un grafiti contemporáneo inapreciable a simple vista (Figura 8 y Figura 9). La manera en la que se realzan ciertas tonalidades en función del espacio de color seleccionado se puede comprender muy bien a partir de sus histogramas. En una imagen sin tratar, en la que todos los píxeles tienen la misma tonalidad, se puede ver que su histograma tiene niveles predominantemente rojizos y, los azules y verdes muy tenues e igualados; en las imágenes tratadas en diferentes espacios de color ofrecen valores altamente contrastados en rangos espectrales muy concretos de azules, verdes o magentas (Figura 8).

Los resultados obtenidos e interpretados por el análisis de imagen nos llevaron a retomar el estudio de las fotografías históricas buscando constatar la presencia

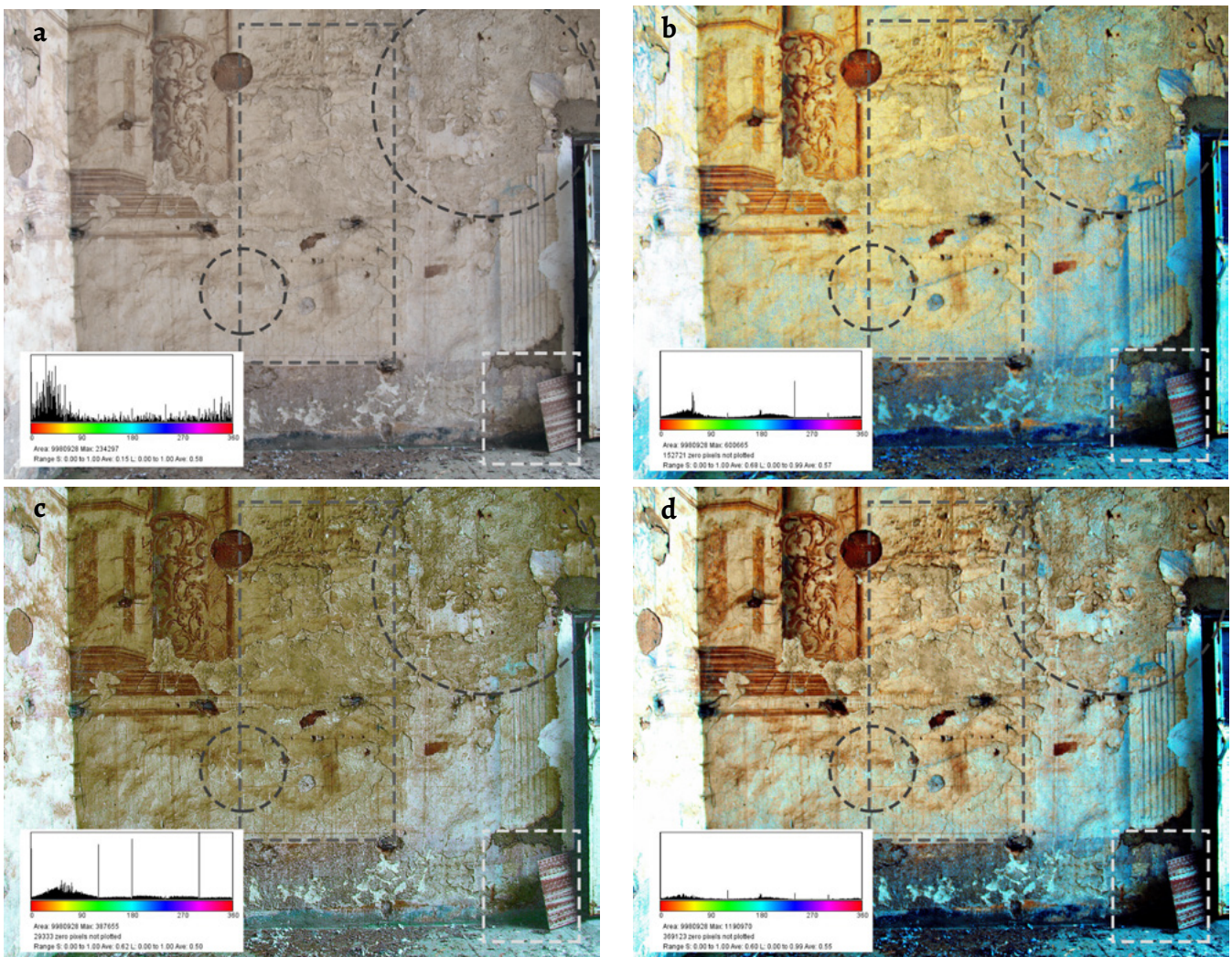


Figura 8. Análisis en el paño lateral derecho: *a)* imagen RGB de partida; *b)* filtro LDS destacando los motivos azulados y el remate inferior de la pilastra que flanquean la entrada; *c)* apreciación de la decoración central con forma de cuadrícula y de un grafiti inapreciable a simple vista con un filtro YYE; *d)* resalte generalizado de todos los elementos con un filtro LAB.

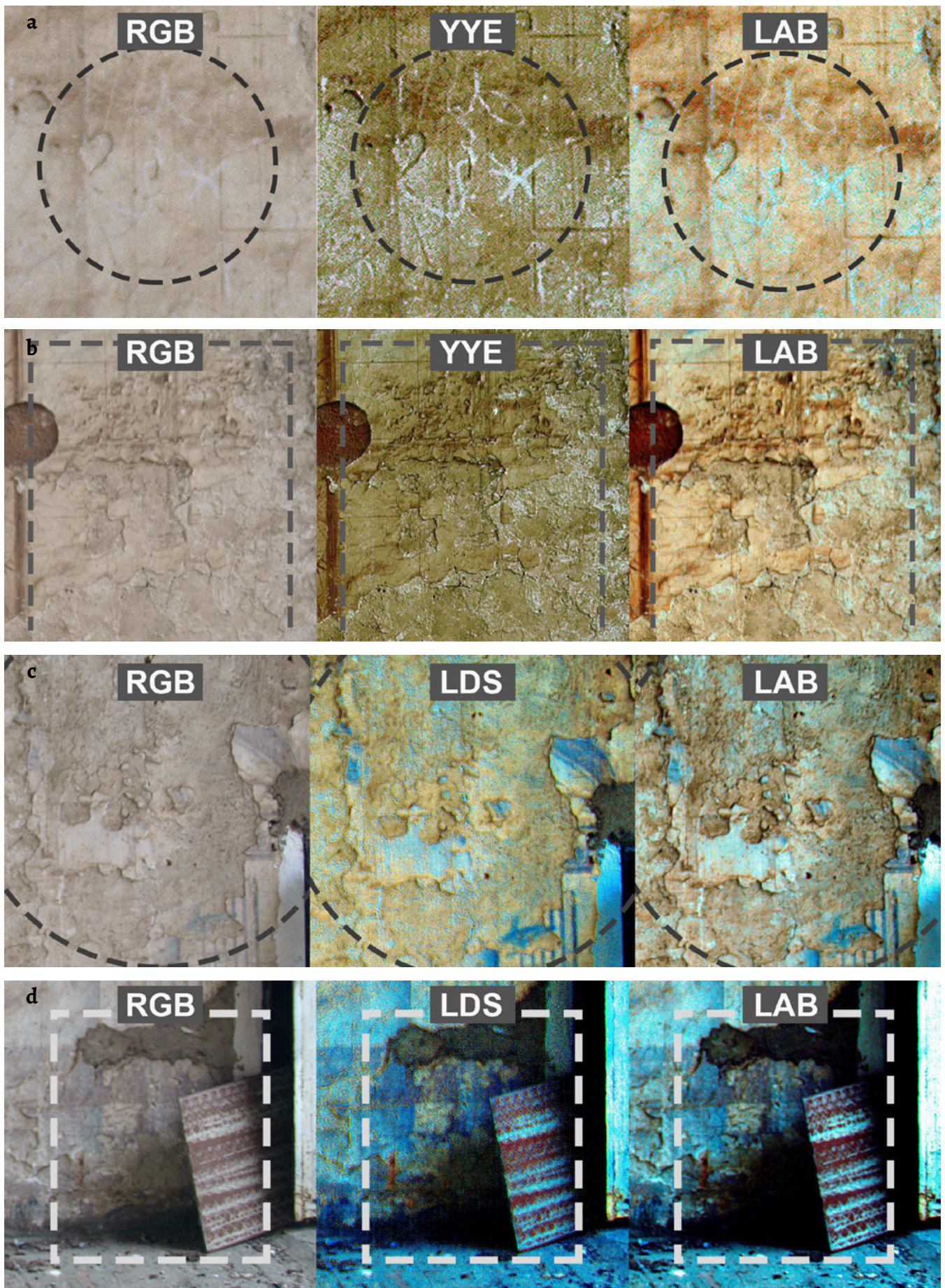


Figura 9. Detalles rescatados con DStretch en el paño lateral derecho: *a)* grafiti contemporáneo; *b)* decoración cuadriculada; *c)* elementos ornamentales azules flanqueando la puerta de acceso; *d)* perfil inferior de la pilastra central.

de los mismos indicios. Esta vez también se sometieron a un proceso de mejora fotográfica, para resaltar elementos poco visibles en las fotografías, logrando identificar los elementos cuadrangulares dispuestos en el interior de la arcada central como casetones, y los trazos azules localizados entre la puerta y el vano de la pared lateral como una suerte de friso con cornisa que comunicaba ambos espacios (Figura 10).

Integración en el modelo virtual

Gracias a la información recabada por medio del estudio organoléptico, unido al análisis de imagen y al estudio de fotografías históricas, pudimos abordar la reintegración formal de estas pinturas en base a una interpretación sólida. El primer paso consistió en obtener ortofotografías de cada paramento; o lo que es lo mismo, presentaciones fotográficas en la que todos los elementos de la imagen poseen la misma escala, libre de errores y deformaciones.

Una ortofotografía se consigue mediante un conjunto de fotografías corregidas digitalmente para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva, y en la que por lo tanto es posible realizar mediciones exactas. En nuestro caso, se seleccionaron aquellas tomas de detalle que contaban con un solape del 50-60 % y se procesaron con el programa de restitución fotogramétrica Photomodeler (versión 2014.1) [47]. Este programa, de fácil manejo y

gran velocidad de cálculo, corrige automáticamente los errores de las deformaciones fotográficas y distorsiones del objetivo. Además, define la geometría plana del objeto representado calculando el punto de vista de cada fotografía y situándolo mediante triangulación en un espacio de tres dimensiones virtual.

Representada la geometría y escala original de cada paño a una resolución óptima (Figura 11a), se acometió su restauración digital con el software Adobe Photoshop. Para ello se recurrió a criterios propios de una reintegración matérica [6]. En el segundo cuerpo se reintegraron miméticamente las zonas de las que se conservaba información material mediante un clonado fotográfico; mientras que el trazado hipotético de aquellos elementos perdidos y recuperados parcialmente por medio del análisis de imagen se planteó por medio de esbozos esquemáticos con tintas planas (Figura 11b). En el primer cuerpo del presbiterio, del que no se conservan restos materiales, se pudo rescatar su programa iconográfico, aunque no su cromatismo, a través de fotografías antiguas. Esto se logró alineándolas y corrigiendo las deformaciones de su perspectiva con las ortofotografías actuales de sus paramentos como referencia.

El proceso culminó restituyendo los frescos restaurados digitalmente a su emplazamiento original, la cabecera de la Iglesia de San Agustín; logrando así devolverla a la vida, por el momento de forma virtual (Figura 11c).



Figura 10. Ampliación y mejora de contraste de único registro fotográfico conservado en el que aparece el segundo cuerpo del presbiterio. Esto ha permitido definir mejor las formas de los motivos rescatados mediante DStretch.



Figura 11. Resultados de la reintegración virtual: a) ortofotografía del paño lateral derecho de la cabecera antes de su intervención digital; b) mismo paño una vez restaurado; c) renderizado del doble presbiterio con la recuperación formal de sus frescos.

Conclusiones

Los estudios previos, optimizados mediante el uso de herramientas de análisis digital, nos han permitido trazar una hipótesis razonada y coherente de lo que serían las pinturas murales de la Iglesia de San Agustín.

Dentro de estos estudios, DStretch demostró ofrecer gran versatilidad como herramienta de análisis fuera de su campo de aplicación convencional, permitiendo apreciar con mayor precisión y detalle elementos de escasa nitidez. Esto no sólo permitió rescatar detalles imperceptibles a

simple vista, si no que a su vez potenció la objetividad del análisis formal realizado sobre el conjunto, y por tanto de la reintegración acometida.

Además de ser gratuito, una de las principales ventajas de este complemento es que puede manejarse por una persona sin grandes conocimientos informáticos. El diseño de preajustes conduce a un aprendizaje rápido y fácil, así como a resultados inmediatos. Las transformaciones de mejora digital que posibilita son casi independientes del operador, a diferencia de otras alternativas de procesamiento, cuyos resultados dependen en gran medida de las habilidades y

experiencia que posee, variando enormemente la calidad de los resultados ofrecidos en función de éstos.

Resultados y accesibilidad nos llevan a validar este software como herramienta al servicio del análisis formal de pinturas históricas. En futuras investigaciones esperamos optimizar su funcionalidad contemplando mejoras metodológicas que nos permitan analizar imágenes exentas de deformaciones, para después extraer y transponer de forma automatizada todas aquellas representaciones que se logren rescatar.

Para finalizar, queremos destacar el interés de abordar otros análisis complementarios que contribuyan a profundizar en el conocimiento de estos murales. Ejemplo de ello es la necesidad de precisar su cromatismo original mediante análisis químicos que puedan determinar la composición y el color inicial de sus pigmentos; así como una caracterización de la paleta del pintor.

Agradecimientos

El proyecto expositivo que ha contemplado los trabajos aquí expuestos, Cor Ignis: memoria y patrimonio de la iglesia de San Agustín de La Laguna, ha sido financiado en exclusividad por el Excmo. Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna, desarrollado por Cultania y contado con la colaboración de los especialistas en virtualización del patrimonio Josué Ramos, Pablo Aparicio y Belén Blázquez, además de las firmantes Ovidia Soto y Alba Fuentes. Este trabajo ha sido respaldado por el Programa de Formación de Personal Investigador de la Universidad de La Laguna (convocatoria 2018) en la modalidad de Apoyo a la Formación de Personal Investigador para la presentación y defensa de resultados de investigación. Agradecemos las imágenes de la Iglesia de San Agustín durante y después del incendio, tomadas por Agustín Guerra Molina, al archivo fotográfico de su hijo Gerardo Guerra Martín. Las imágenes de la SGI Fototeca han sido amablemente cedidas por la Universidad de Sevilla.

REFERENCIAS

- Cosentino, A.; Gil, M.; Ribeiro, M.; y Di Mauro, R., 'Technical photography for mural paintings: the newly discovered frescoes in Aci Sant'Antonio (Sicily, Italy)', *Conservar Património* **20** (2014) 23-33, <https://doi.org/10.14568/cp2015001>.
- Cosentino, A., 'Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination', *Conservar Património* **21** (2015) 53-62, <https://doi.org/10.14568/cp2015006>.
- Cosentino, A., 'Multispectral imaging system using 12 interference filters for mapping pigments', *Conservar Património* **21** (2015) 25-38, <https://doi.org/10.14568/cp2015005>.
- Mora, P.; Mora, L.; Philippot, P., *La Conservación de las Pinturas Murales*, Universidad Externado de Colombia, Bogotá (2003).
- Ferrer, A., *La Pintura Mural. Su soporte, Conservación, Restauración y las Técnicas Modernas*, Universidad de Sevilla, Sevilla (1995).
- Del Pino, C., *Pintura mural. Conservación y Restauración*, CIE Inversiones Editoriales Dossat-2000, Madrid (2005).
- Tornari, V., 'Laser interference-based techniques and applications in structural inspection of works of art', *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **387** (2007) 761-780, <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0974-4>.
- Del Vescovo, D.; Fregolent, A., 'Assessment of fresco detachments through a non-invasive acoustic method', *Journal of Sound and Vibration* **284** (2005) 1015-31, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.07.011>.
- Cesareo, R., 'Non-destructive EDXRF-analysis of the golden haloes of Giotto's frescos in the Chapel of the Scrovegni in Padua', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **211** (2003) 133-37, [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01165-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01165-0).
- Paoletti, D.; Spagnolo, G. S.; Facchini, M.; Zanetta, P., 'Artwork diagnostics with fiber-optic digital speckle pattern interferometry', *Applied Optics* **32** (1993) 6236-6241, <https://doi.org/10.1364/AO.32.006236>.
- Quesada, E., 'Aplicación DStretch del software Image-J. Avance de resultados en el arte rupestre de la región de Murcia', *Cuadernos de Arte Rupestre* **5** (2008) 14-47.
- Fernandez, M.; Spanedda, L., 'Abrigo con arte rupestre de El Tablazo II (Diezma, Granada). Revisión con DStretch de los motivos pintados', *Revista de Estudios de Arqueología Bastetana* **1** (2013) 73-81, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6797495> (acceso en 2019-5-25).
- Harman, J., 'DStretch slideshow index', en Dstretch, <http://www.dstretch.com/DStretchSlideshowIndex.html> (acceso en 2017-10-17).
- Harman, J., 'DStretch help', en Dstretch, <http://www.dstretch.com/DStretchHelp.html> (acceso en 2017-11-17).
- Harman, J., 'Using decorrelation stretch to enhance rock art images', en Dstretch, <http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html> (acceso en 2017-11-17).
- Evans, L.; Mourad, A.-L., 'DStretch and Egyptian tomb paintings: a case study from Beni Hassan', *Journal of Archaeological Science: Reports* **18** (2018) 78-84, <https://doi.org/10.1016/J.JASREP.2018.01.011>.
- 'San Cristóbal de La Laguna', UNESCO, <https://whc.unesco.org/en/list/929> (acceso en 2018-11-8).
- 'Cor Ignis: el Renacimiento de la iglesia de San Agustín', en *Cultania*, <http://cultania.com/cor-ignis-el-renacimiento-de-la-iglesia-de-san-agustin/> (acceso en 2018-10-24).
- Rodríguez, M., *La Pintura en Canarias Durante el Siglo XVIII*, Cabildo Insular de Gran Canaria, Las Palmas (1986).
- 'Mediateca San Agustín', SIC, <http://www.estudiosic.es/index.php/?proyectos/mediateca-y-centro-cultural-la-laguna--1er-premi/> (acceso en 2018-10-08).
- Ariztía, A.; Bordachar, M., 'Protección constitucional del patrimonio intangible', Proyecto de Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Chile, Santiago de Chile (2017).
- Pereira, C.; Henriques, F.; Carriço, N.; Amaral, V.; Ferreira, T.; Candeias, A., 'Virtual historical reconstitution of the main altarpiece of the Espírito Santo Church, in Évora: application of web-based infographics to Cultural Heritage', *Conservar Património* **24** (2016) 63-71, <https://doi.org/10.14568/cp2015034>.
- Robles, L. G.; García, V.Q., 'Nuevas tecnologías para difundir el Patrimonio Cultural: las reconstrucciones virtuales en España', *e-rph - Revista electrónica de Patrimonio Histórico* **4** (2009), <http://revistaseug.ugr.es/index.php/erph/article/view/3357> (acceso en 2019-5-25).
- Napolitano, R. K.; Scherer, G.; Glisic, B., 'Virtual tours and informational modeling for conservation of cultural heritage sites', *Journal of Cultural Heritage* **29** (2018) 123-129, <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.08.007>.

25. Bruno, F.; Bruno, S.; De Sensi, G.; Luchi, M.-L.; Mancuso, S.; Muzzupappa, M., 'From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition', *Journal of Cultural Heritage* **11** (2010) 42-49, <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2009.02.006>.
26. Guarnieri, A.; Pirotti, F.; Vettore, A., 'Cultural heritage interactive 3D models on the web: An approach using open source and free software', *Journal of Cultural Heritage* **11** (2010) 350-53, <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2009.11.011>.
27. Escrivá-Estevan, F.; Madrid-García, J. A., 'El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio', *Arché* (2006) 11-20.
28. Gómez-Robles, L.; Quirosa-García, M. V. 'La restauración virtual: teoría y práctica', *AACADigital: Revista de la Asociación Aragonesa de Críticos de Arte* **3** (2008), <http://www.aacadigital.com/contenido.php?idarticulo=102> (acceso en 2019-5-25).
29. Aparicio, P., 'La reconstrucción virtual de la iglesia de San Agustín de La Laguna (Tenerife)', *PAR. Arqueología y Patrimonio Virtual*, <https://parpatrimonioytecnologia.wordpress.com/2016/12/19/la-reconstruccion-virtual-de-iglesia-san-agustin-de-la-laguna-tenerife/> (acceso en 2018-10-05).
30. Blender-Foundation, <https://www.blender.org/foundation/> (acceso en 2018-10-5).
31. Acevedo, A.; Franco, N.V., 'Aplicación de DStretch-ImageJ a imágenes digitales del arte rupestre de Patagonia (Argentina)', *Comechingonia Virtual* **6**(2) (2012) 152-175, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4154324> (acceso en 2019-5-25).
32. Dodd, J., 'Petroglyphs as paintings. The application of digital image enhancement to the study of Årsand 1, Hordaland, Western Norway', *Adoranten* (2013) 116-124, <http://www.rockartscandinavia.com/petroglyphs-as-paintings-the-application-of-digital-image-enhancement-to-the-study-of-aarsand-1-hordaland-western-norway-by-james-dodd-a91.php> (acceso en 2019-5-18).
33. Gunn, R. G.; Douglas, L. C.; Whear, R. L., "Interpreting" polychrome paintings using DStretch', *Rock Art Research* **31** (2014) 101-104, <https://www.researchgate.net/publication/283361410>.
34. Le Quellec, J.-L.; Duquesnoy, F.; Defrasne, C., 'Digital image enhancement with DStretch: Is complexity always necessary for efficiency?', *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* **2** (2015) 55-67, <https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2015.01.003>.
35. Mark, R. K.; Billo, E., 'Computer-assisted photographic documentation of rock art. Coalition CSIC thematic network on cultural Heritage', *Coalition* **11** (2006) 10-14, <https://www.researchgate.net/publication/281210788>.
36. Colella, M., 'I cavalieri della Forra di Paspardo. I dipinti dell'età del Ferro nell'arte rupestre della Valcamonica', Dipartimento Valcamonica e Lombardia del Centro Camuno di Studi Preistorici, http://www.simbolisullarocchia.it/archivio/2010/2010_pitture_paspardo_Colella.pdf (acceso en 2019-5-25).
37. Ruiz, J. F.; Pereira, J., 'The colours of rock art. Analysis of colour recording and communication systems in rock art research', *Journal of Archaeological Science* **50** (2014) 338-349, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.023>.
38. Harman, J., 'DStretch news', en *Dstretch*, <http://www.dstretch.com/news.html> (acceso en 2017-11-17).
39. Alley, R. E., 'Algorithm theoretical basis document for decorrelation stretch decorrelation stretch ASTo6', manuscrito, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (1996), <http://www.dstretch.com/DecorrelationStretch.pdf> (acceso en 2019-05-18)
40. Marchante, Á., 'Análisis macro y microespacial del abrigo inédito de Puerto Baterno (Agudo, Ciudad Real) y su inserción dentro del arte rupestre esquemático de los Montes de Ciudad Real, Valle de Alcudia y Sierra Madrona', *Vínculos de Historia. Revista del Departamento de Historia de la Universidad de Castilla – La Mancha* **5** (2016) 161-195, <https://doi.org/10.18239/vdh.voi5.011>.
41. Pearson, K., 'On lines and planes of closest fit to systems of points in space', *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **2**(11) (1901) 559-572, <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>.
42. Hotelling, H., 'Simplified calculation of principal components', *Psychometrika* **1** (1936) 27-35, <https://doi.org/10.1007/BF02287921>.
43. Basilevsky, A.; Hum, D. P. J., 'Karhunen-Loève analysis of historical time series with an application to plantation births in Jamaica', *Journal of the American Statistical Association* **74** (1979) 284-90. <https://doi.org/10.2307/2286324>.
44. Rogerio-Candelera, M. Á., 'Experiencias en la documentación de pintura rupestre utilizando técnicas de análisis de imagen: avances hacia el establecimiento de protocolos de documentación no invasivos', *Cuadernos de Arte Rupestre* **6** (2013) 53-67, http://www.cuadernosdearterupestre.es/arterupestre/6/Rogerio_CandeleraCAR201206_05.pdf (acceso en 2019-5-25).
45. Quesada, E., 'Aplicación Dstretch del software ImageJ. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia', *Cuadernos de Arte Rupestre* **5** (2008-2010) 14-47, http://www.cuadernosdearterupestre.es/arterupestre/5/QuesadaCAR2008_5_2.pdf (acceso en 2019-5-25).
46. Gutiérrez-Calvache, D.; González-Tendero, J. B.; Fernández-Ortega, R., 'Primera aplicación de D-Stretch-ImajeJ. Mejora automatizada de imagen digital en el arte rupestre cubano', *Rupestreweb* (2009), <https://www.researchgate.net/publication/237721364>.
47. Photomodeler, <https://www.photomodeler.com> (acceso en 2017-10-15).

RECIBIDO: 2018.12.9

REVISTO: 2019.4.4

ACEPTADO: 2019.4.23

ONLINE: 2019.5.31



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.